



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Doctorado

Estrategia de Manejo para el Uso Eficiente de Energía
de un Vehículo Híbrido Eléctrico Basado en Celdas de
Combustible

presentada por

MC. Manuel de Jesús López Pérez

como requisito para la obtención del grado de

**Doctor en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis

Dr. Abraham Claudio Sánchez

Codirector de tesis

Dr. Ulises Cano Castillo

Cuernavaca, Morelos, México. Enero de 2021.

	ACEPTACIÓN DE IMPRESIÓN DEL DOCUMENTO DE TESIS DOCTORAL	Código: CENIDET-AC-006-D20
		Revisión: 0
	Referencia a la Norma ISO 9001:2008 7.1, 7.2.1, 7.5.1, 7.6, 8.1, 8.2.4	Página 1 de 1

Cuernavaca, Mor., a 07 de enero de 2021.

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Subdirector Académico
P r e s e n t e

At'n: Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez
Presidente del Claustro Doctoral
del Departamento De Ingeniería Electrónica

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del estudiante **Manuel de Jesús López Pérez** manifiestan que después de haber revisado el documento de tesis titulado **“Estrategia de manejo para el uso eficiente de energía de un vehículo híbrido electrónico basado en celdas de combustible”**, realizado bajo la dirección del **Dr. Abraham Claudio Sánchez** y codirección del **Dr. Ulises Cano Castillo**, el trabajo se **ACEPTA** para proceder a su impresión.

A T E N T A M E N T E



Dr. Abraham Claudio Sánchez
CENIDET



Dr. Ulises Cano Castillo
INEEL



Dr. Jesús Aguayo Alquicira
CENIDET



Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
CENIDET



Dr. Jesús Darío Mina Antonio
CENIDET



Dr. Jesús Elías Valdez Reséndiz
ITESM

Reciba un cordial saludo.

c.c.p: M.E. Guadalupe Garrido Rivera / Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
c.c.p: Dr. Hugo Estrada Esquivel / Jefe del Departamento de Ingeniería Electrónica.
c.c.p: Expediente.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca, Mor.,

13/enero/2021

No. de Oficio:

SAC/09/2021

Asunto:

Autorización de
impresión de tesis

MANUEL DE JESÚS LÓPEZ PÉREZ
CANDIDATO AL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

Por este conducto tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "Estrategia de manejo para el uso eficiente de energía de un vehículo híbrido electrónico basado en celdas de combustible", 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.

A T E N T A M E N T E

"Excelencia en Educación Tecnológica"

"Educación Tecnológica al Servicio de México"

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



**CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA**

C.c.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Expediente

CMAZ/CHG



Abstract

This work presents the design of an energy management strategy for hybrid electric vehicles based on fuel cells, where a bank of batteries and ultracapacitors are auxiliary components of the hybrid power plant. The strategy is proposed under a control scheme based on fuzzy logic and considers fuel cells as the main source of the hybrid power plant configuration and fuel (hydrogen) conversion efficiency. Therefore, all the energy requirement must be supplied by them, making the best use of the energy on board. While, the total power requirement of the vehicle is complemented by the two sources, batteries and ultracapacitors. The design of the energy management strategy also considers the size of the sources, since the size of these depends on the magnitude of the energy and power contribution of each one. Therefore, this work includes an “ab-initio” sizing methodology of the sources, to include their weight in the total energy requirement of the vehicle.

The sizing method begins with reducing the size of the fuel cells to meet the energy requirement of the vehicle according to the selected driving cycle. While batteries and ultracapacitors are sized according to their dynamic response characteristics and considering specifications of commercial candidate cells, for a proposed electrical configuration and a hybrid power plant baseline.

In order to illustrate the design of the energy management strategy and the sizing methodology, an electric utility vehicle, the WLTC CLASS I drive cycle, and a range of 60 km were used. Various sensitivity analyzes were carried out on the strategy proposed in this work under changes in the size of the sources, as well as its initial parameters.

The results show that by reducing the power plant, the power and energy requirements are also reduced. In addition, with the implementation of the energy management strategy, a better use of energy was observed on board, promoting economic and fuel savings. It was also found that including ultracapacitors (with a minimum size) to the power plant offers benefits, such as reducing the stress of the batteries with a marginal investment cost compared to when they are not used. Also the inclusion of batteries is necessary to meet the power requirement of the vehicle. Its sizing and the EMS design criteria allow the batteries to be used without exceeding their desired operating parameters and comply with the vehicle's performance.

The results of the implementation of the design of the energy management strategy and of the power plant sizing methodology show promise, by making efficient use of energy on board. In addition, the efficiency achieved in the fuel conversion of fuel cells is comparable with other published works, and under certain conditions, it even exceeds what was found in the review of the state of the art. Finally, both the strategy and the sizing method can be easily implemented, and the computational cost is not that great when compared to strategies with optimal control.

Resumen

Este trabajo presenta el diseño de una estrategia de manejo de energía para vehículos eléctricos híbridos basados en celdas de combustible, en donde un banco de baterías y de ultracapacitores son componentes auxiliares de la planta de potencia híbrida. La estrategia se plantea bajo un esquema de control basado en lógica difusa y considera a las celdas de combustible como fuente principal de la configuración de la planta de potencia híbrida y la eficiencia de conversión del combustible (hidrógeno). Por lo tanto, todo el requerimiento energético debe ser suministrado por éstas, haciendo el mejor uso de la energía abordo. Mientras que, el requerimiento de potencia total del vehículo se complementa por las dos fuentes, baterías y ultracapacitores. El diseño de la estrategia de manejo de energía también considera el tamaño de las fuentes, ya que del tamaño de éstas depende la magnitud de la aportación energética y de potencia de cada una. Por lo que en este trabajo se incluye una metodología de dimensionamiento “ab-initio” de las fuentes, para incluir el peso de las mismas en el requerimiento energético total del vehículo.

El método de dimensionamiento inicia con la reducción del tamaño de las celdas de combustible para suplir el requerimiento de energía del vehículo de acuerdo al ciclo de manejo seleccionado. Mientras que las baterías y los ultracapacitores se dimensionan de acuerdo a sus características de respuesta dinámica y considerando especificaciones de celdas candidatas comerciales, para una configuración eléctrica propuesta y una línea base de planta de potencia híbrida.

En orden de ilustrar el diseño de la estrategia de manejo de energía y la metodología de dimensionamiento, se utilizó un vehículo eléctrico utilitario, el ciclo de manejo WLTC CLASS I, y una autonomía de 60 km. Se realizaron diversos análisis de sensibilidad de la estrategia propuesta en este trabajo bajo cambios en el tamaño de las fuentes, así como de sus parámetros iniciales.

Los resultados muestran que, al reducir la planta de potencia, los requerimientos de potencia y energía también se reducen. Además, con la implementación de la estrategia de manejo de energía se observó un mejor uso de la energía abordo, promoviendo ahorros económicos y de combustible. También se encontró que, incluir los ultracapacitores (con un tamaño mínimo) a la planta de potencia ofrece beneficios, como la reducción del estrés de las baterías con un costo de inversión marginal comparado cuando no se utilizan. También la inclusión de baterías es necesario para cumplir con el requerimiento de potencia del vehículo. Su dimensionamiento y el criterio de diseño de la EMS, permite utilizar las baterías sin exceder sus parámetros de operación deseados y cumplir con el desempeño del vehículo.

Los resultados de la implementación del diseño de la estrategia de manejo de energía y de la metodología de dimensionamiento de la planta de potencia muestran ser prometedoras, al hacer uso eficiente de la energía abordo. Además, la eficiencia alcanzada en la conversión del combustible de las celdas de combustible es comparable con otros trabajos publicados, y en ciertas condiciones, hasta supera lo que se encontró en la revisión del estado del arte. Finalmente, ambas, la estrategia y el método de dimensionamiento, se puede implementar fácilmente, y el costo computacional no es tan grande si se compara con estrategias con control óptimo.

Dedicatoria

A mis abuelitos, Eligio† y Eloísa†, por el ejemplo tan grande de dedicación y fortaleza que siempre fueron para mí, en donde estén, este trabajo también es para ustedes.

A mis padres, Alejandro y Felicita, con toda mi admiración y respeto. Por ser los mejores padres del mundo, por su apoyo incondicional que me han otorgado en mi vida. Por ustedes, he llegado hasta acá.

A mis hermanos, Alejandra y Cristian, con toda mi alegría les comparto mi esfuerzo, espero ser un ejemplo a seguir.

*A mi esposa, Cecilia, mi gran Tesoro, quien le dio sentido a mi vida, y ha sido mi soporte para seguir luchando.
Te amo.*

A mis hijos, Arturo y Adrián, los dos grandes regalos que Dios, y mi esposa, me han dado en la vida. Quienes me inspiran a despertar cada mañana y enfrentar todo lo que la vida me ponga enfrente.

Agradecimientos

A Dios, por sobre todas las cosas, por haberme dado licencia para culminar este trabajo.

A mi familia, hoy y siempre, por su apoyo incondicional que me han otorgado en cada momento de mi vida. Sin ustedes, este logro no lo hubiese culminado.

A mi esposa, Cecilia Barragán, por toda su comprensión, cariño y, sobre todo, su apoyo que me permitieron culminar otra etapa de mi vida. Gracias por todos los regalos que me has otorgado en todo este tiempo que has compartido conmigo. En especial, los dos más grandes regalos, nuestros hijos, Arturo y Adrián, que en conjunto contigo, constituyen mi motor para seguir adelante en esta vida.

Al Dr. Ulises Cano, Co-director de esta tesis, por todo su apoyo y motivación para iniciar, continuar y culminar esta etapa de mi desarrollo profesional. Por las facilidades proporcionadas en el desarrollo de este trabajo. Por ser la gran persona que es, y que, sin su intervención, no se hubiese materializado este logro.

Al Dr. Abraham Claudio, Director de esta tesis, que al igual que mi Co-director, este trabajo no lo hubiese realizado sin ellos. Por todo su apoyo, conocimientos y orientaciones que me otorgó en el desarrollo de este trabajo.

A mis revisores, Dr. Jesús Mina, Dr. Jesús Aguayo y Dr. Fabricio Escobar, por todas retroalimentaciones otorgadas en cada semestre del doctorado, que enriquecieron este trabajo. Y al Dr. Jesús Valdez, por todo su apoyo como revisor externo.

A todos mis compañeros y amigos del INEEL y del CENIDET, por compartirme su amistad, su tiempo, y sus conocimientos.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico que me facilitaron para culminar mis estudios de doctorado.

Y finalmente, agradezco al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico, por permitirme seguir creciendo profesionalmente.

...A todos, mil gracias...

Manuel de Jesús López Pérez

Índice general

<i>Índice de figuras</i>	<i>xiii</i>
<i>Índice de tablas</i>	<i>xvii</i>
<i>Notación</i>	<i>xviii</i>
<i>Organización de la tesis</i>	<i>xxiii</i>
<i>Introducción</i>	<i>1</i>
1.1 Antecedentes y motivación.....	1
1.2 Acercamiento del problema	3
1.3 Estado del arte.....	7
1.3.1 Dimensionamiento de la planta de potencia híbrida.....	8
1.3.2 Estrategias de manejo de energía.....	10
1.4 Planteamiento del problema	15
1.4.1 Propuesta de solución	17
1.5 Marco teórico	18
1.5.1 Vehículos todo eléctricos.....	19
1.5.2 Sistemas de tracción eléctrica híbrida	19
1.5.3 Configuraciones híbridas	26
<i>Diseño y análisis de convertidores de potencia</i>	<i>29</i>
2.1 Convertidor buck	30
2.2 Convertidor boost	34
2.3 Controlador del convertidor de potencia	38

2.4 Estabilidad de los convertidores	40
2.5 Validación del controlador del convertidor	41
<i>Diseño y dimensionamiento de la planta de potencia híbrida</i>	<i>46</i>
3.1 Cálculo del requerimiento energético	47
3.1.1 Ciclo de manejo	49
3.2 Dimensionamiento de la planta de potencia híbrida: caso de estudio	52
3.2.1 Diseño y dimensionamiento de las celdas de combustible	54
3.2.2 Dimensionamiento del banco de ultracapacitores	63
3.2.3 Dimensionamiento del banco de baterías	67
3.2.4 Validación del requerimiento energético	70
3.3 Re-dimensionamiento	72
3.4 Comparativa entre diferentes plantas de potencia	73
3.5 Comparativa del dimensionamiento de las celdas de combustible entre diversos trabajos	78
<i>Diseño de la estrategia de manejo de energía</i>	<i>80</i>
4.1 Clasificación de las estrategias de manejo de energía	81
4.2 Propuesta de diseño de la estrategia de manejo de energía	82
4.2.1 Diseño del control local	83
4.2.2 Diseño del control supervisor	83
4.3 Desarrollo del control local	86
4.4 Desarrollo del control supervisor	89
4.4.1 Control de las celdas de combustible	92
4.4.2 Control del banco de baterías	98
4.4.3 Control del banco de ultracapacitores	99
4.4.4 Diseño de la estrategia	99
4.5 Validación de la estrategia	101
4.6 Análisis de sensibilidad de la EMS propuesta	111
4.6.1 Análisis de sensibilidad de la EMS de acuerdo al sobredimensionamiento de las celdas de combustible	111
4.6.2 Análisis de sensibilidad de la EMS de acuerdo al estado de carga inicial de las baterías.	117
4.6.3 Análisis de sensibilidad de la EMS de acuerdo al tamaño del banco de las baterías.	121

4.6.4 Análisis de sensibilidad de la EMS de acuerdo al tamaño del banco de ultracapacitores	125
<i>Conclusiones</i>	<i>134</i>
5.1 Aportaciones de la tesis	137
5.2 Trabajos futuros	138
<i>Bibliografía</i>	<i>140</i>
<i>Anexos</i>	<i>150</i>
A.1 Estabilidad del convertidor buck	150
A.2 Estabilidad del convertidor boost	153
A.3 Energía almacenada en los componentes rotacionales del EV.....	154
A.4 Sistema de inferencia difusa	157
A.5 Análisis de la eficiencia de conversión del hidrógeno en el sobredimensionamiento de las celdas de combustible	163

Índice de figuras

Fig. 1.- Curva de polarización de una celda de combustible.....	20
Fig. 2.- Eficiencia de una mono-celda.....	22
Fig. 3.- Modelo para la carga/descarga de una batería de Li-Ion	23
Fig. 4.- Diagrama de distribución de la carga en un UC de doble capa	25
Fig. 5.- Configuraciones de plantas de potencia integradas por FC y UC.	26
Fig. 6.- Configuraciones de plantas de potencia integradas por FC y BB.....	26
Fig. 7.- Configuraciones de plantas de potencia integradas por FC, BB y UC.	28
Fig. 8.- Topología del convertidor tipo buck.....	30
Fig. 9.- Topología del convertidor boost.	34
Fig. 10.- a) Compensador tipo II, utilizando un amplificador operacional, b) respuesta en frecuencia de la red de compensación tipo II.	39
Fig. 11.- Diagrama del controlador compensador tipo II.	42
Fig. 12.- Tarjeta electrónica prototipo para el control del convertidor modo corriente.	43
Fig. 13.- Seguimiento de referencia a 5A con un voltaje de salida del convertidor de 51V.	43
Fig. 14.- Seguimiento de referencia a 10A del convertidor con un voltaje de salida del convertidor de 55V.	44
Fig. 15.- Seguimiento de referencia a 10A del convertidor con un voltaje de salida del convertidor de 70V.	44
Fig. 16.- Parámetros de configuración del vehículo eléctrico híbrido basado en celdas de combustible.....	47
Fig. 17.- Ciclo de manejo WLTC CLASS III.....	50
Fig. 18.- Ciclo de manejo WLTC CLASS II.....	51
Fig. 19.- Ciclo de manejo WLTC CLASS I.	52
Fig. 20.- Configuración de la planta de potencia del caso de estudio.	53
Fig. 21.- Ejemplo de vehículo utilitario.....	54
Fig. 22.- Diagramas Sankey de diferentes escenarios posibles de flujo de energía en el EV.	55
Fig. 23.- El peso de las FC depende del número de celdas, su área activa y otros componentes.	58
Fig. 24.- Diagrama de SIMULINK para el análisis del comportamiento del vehículo.....	59
Fig. 25.- Potencia requerida por el vehículo utilitario, caso de estudio.	60
Fig. 26.- Energía requerida por el vehículo eléctrico híbrido en el ciclo de manejo seleccionado.	60
Fig. 27.- Curva de polarización de una celda combustible del INEEL, experimental y modelada.	61
Fig. 28.- Gráfico en 3D del conjunto de pesos de las celdas de combustible.....	62
Fig. 29.- Peso mínimo por cada conjunto de número de celdas.	62
Fig. 30.- Dimensionamiento del banco de ultra-capacitores.	65

Fig. 31.- Máxima energía cinética recuperada en un ciclo de manejo WLTC CLASS I.	65
Fig. 32.- Dimensionamiento del banco de baterías.	68
Fig. 33.- Potencia eléctrica positiva requerida por el ciclo de manejo WLTC CLASS I.....	69
Fig. 34.- Diagrama de flujo de validación del requerimiento energético del vehículo.	71
Fig. 35.- Capacidad de energía instalada para los casos evaluados.....	75
Fig. 36.- Peso de la planta de potencia para los casos evaluados.	76
Fig. 37.- Costo de la planta de potencia para los casos evaluados.	77
Fig. 38.- Arquitectura propuesta para la EMS.....	82
Fig. 39.- Sistema de inferencia difusa (FIS).....	86
Fig. 40.- Diagrama para validar el control de los convertidores (control “local”).....	88
Fig. 41.- a) Comportamiento de las baterías, b) de su convertidor, y c) de los ultracapacitores en el seguimiento de referencias de corrientes.....	88
Fig. 42.- . a) Comportamiento de las celdas de combustible, b) de su convertidor, y c) de los ultracapacitores en el seguimiento de referencias de corrientes.....	89
Fig. 43.- a) Comportamiento de las baterías, b) de su convertidor, y c) de los ultracapacitores en el seguimiento de referencias de corrientes.....	89
Fig. 44.- Configuración de la planta de potencia del vehículo, caso de estudio.....	91
Fig. 45.- Diagrama del control “supervisor”.	91
Fig. 46.- Profundidad de descarga en diferentes aplicaciones.....	94
Fig. 47.- Grados de pertenencia para la entrada V_{bus_nom}	95
Fig. 48.- Grados de pertenencia para la entrada A_{dSOC}	96
Fig. 49.- Grados de pertenencia para la salida dI_{FC}/dt	96
Fig. 50.- Grafica de la superficie del FIS.	97
Fig. 51.- Diseño de la estrategia de manejo de energía.	99
Fig. 52.- Sistemas de control de la EMS.	100
Fig. 53.- Sistema de control de las celdas de combustible basado en lógica difusa.....	100
Fig. 54.- Sistema de control del banco de baterías basado en separación de frecuencias.	101
Fig. 55.- Desempeño de las fuentes del vehículo de acuerdo al dimensionamiento y EMS propuestos para el ciclo de manejo seleccionado.	102
Fig. 56.- Desempeño de las fuentes para la autonomía definida (60 km)	102
Fig. 57.- Análisis de eficiencias de la conversión del combustible a potencias mayores de las celdas.	104
Fig. 58.- Distribución de las corrientes de los subsistemas de la planta de potencia, en el desempeño del vehículo.....	105
Fig. 59.- Estado de carga de las baterías a lo largo del recorrido (autonomía de 60 km)	105
Fig. 60.- Potencia que entrega las celdas de combustible a lo largo del recorrido del vehículo.	106
Fig. 61.- Potencia que entrega/recibe el banco de baterías a lo largo del recorrido del vehículo.	106
Fig. 62.- Potencia que entrega/recibe el banco de ultracapacitores a lo largo del recorrido del vehículo.	107

Fig. 63.- Voltaje del bus a lo largo del recorrido del vehículo eléctrico.	107
Fig. 64.- Distribución de corrientes por cada fuente en los primeros 300 s del ciclo de manejo seleccionado con un voltaje inicial del bus de DC de 70V.	108
Fig. 65.- Distribución de corrientes por cada fuente en los primeros 300 s del ciclo de manejo seleccionado con un voltaje inicial del bus de DC de 80V.	109
Fig. 66.- Eficiencia puntual de conversión del combustible a lo largo del recorrido del vehículo.	110
Fig. 67.- Estado de carga de las baterías a diferentes tamaños de celdas de combustible.....	112
Fig. 68.- Eficiencia de conversión puntual del combustible a lo largo del recorrido del vehículo.	113
Fig. 69.- Eficiencia acumulada de conversión del combustible a lo largo del recorrido del vehículo.	113
Fig. 70.- Incremento en la eficiencia de acuerdo al sobredimensionamiento de las celdas de combustible.....	115
Fig. 71- Consumo de hidrógeno para cada caso de sobredimensionamiento de las celdas de combustible.....	115
Fig. 72.- Incremento en el consumo de combustible de acuerdo al sobredimensionamiento de las celdas de combustible.	116
Fig. 73.- Comportamiento del SOC de las baterías a diferentes condiciones del SOC inicial....	117
Fig. 74.- Comportamiento de la eficiencia puntual de la conversión del combustible a diferentes condiciones del SOC inicial.	118
Fig. 75.- Eficiencia acumulada para diferentes condiciones del SOC inicial de las baterías.....	119
Fig. 76.- Consumo de combustible para diferentes condiciones de SOC inicial de las baterías.	119
Fig. 77.- Comportamiento del SOC de las baterías a condiciones iniciales diferentes del SOC de referencia al 75%.	120
Fig. 78.- Comportamiento del SOC de las baterías a condiciones iniciales diferentes del SOC de referencia al 85%.	120
Fig. 79 Comportamiento del SOC de las baterías a condiciones iniciales diferentes del SOC de referencia a 90%.	121
Fig. 80.- Comportamiento de la corriente de las baterías para diferentes tamaños del banco. ...	122
Fig. 81.- Comportamiento del voltaje de las baterías para diferentes tamaños del banco.....	122
Fig. 82.- Comportamiento del SOC de las baterías para diferentes tamaños del banco.....	124
Fig. 83.- Comportamiento del C-rate de las baterías para diferentes tamaños del banco.	124
Fig. 84.- Desempeño de las fuentes del vehículo eléctrico para el Caso 1 propuesto.....	127
Fig. 85.- Estado de carga de las baterías para el Caso 1 propuesto.	127
Fig. 86.- Tasa de descarga del banco de baterías en términos de “C-rate”.	128
Fig. 87- Desempeño de las fuentes del vehículo eléctrico para el Caso III propuesto.....	129
Fig. 88.- Estado de carga de las baterías para el Caso III propuesto.	130
Fig. 89.- Tasa de descarga del banco de baterías en términos de “C-rate” para el Caso III.....	130
Fig. 90.- Desempeño de las fuentes para el Caso 4.	131

Fig. 91.- Voltaje de los ultracapacitores (bus de CD) y velocidad del vehículo de acuerdo al ciclo de manejo.....	131
Fig. 92.- Diagrama de bode de la respuesta del convertidor buck con el compensador.....	151
Fig. 93.- Márgenes de ganancia y de fase ante la variación del parámetro R1 del compensador.	151
Fig. 94.- Márgenes de ganancia y de fase ante la variación del parámetro R2 del compensador.	152
Fig. 95.- Márgenes de ganancia y de fase ante la variación del parámetro C1 del compensador.	152
Fig. 96.- Márgenes de ganancia y de fase ante la variación del parámetro C2 del compensador	152
Fig. 97.- Márgenes de fase y de ganancia ante variaciones del parámetro R1 del compensador.	153
Fig. 98. Márgenes de fase y de ganancia ante variaciones del parámetro R2 del compensador.	153
Fig. 99.- Márgenes de fase y de ganancia ante variaciones del parámetro C1 del compensador.	154
Fig. 100.- Márgenes de fase y de ganancia ante variaciones del parámetro C2 del compensador	154
Fig. 101.- Resultados de la energía requerida considerando la energía almacenada en los componentes rotativos.	157
Fig. 102.- Razonamiento difuso para un antecedente.....	160
Fig. 103.- Razonamiento difuso para múltiples antecedentes.	161
Fig. 104.- Razonamiento difuso para múltiples reglas con múltiples antecedentes.	162

Índice de tablas

Tabla 1.- Desarrollo de EMS para VE con configuración FC y UC	12
Tabla 2.- Desarrollo de EMS para VE con configuración FC y BB	13
Tabla 3.- Desarrollo de EMS para VE con configuración FC, BB y UC.....	14
Tabla 4.- Resumen de los parámetros del ciclo de manejo WLTC CLASS III por fases.	51
Tabla 5.- Resumen de los parámetros del ciclo de manejo WLTC CLASS II por fases.....	51
Tabla 6.- Resumen de los parámetros del ciclo de manejo WLTC CLASS I por fases.	52
Tabla 7.- Datos del vehículo de prueba, caso de estudio.....	54
Tabla 8.- Datos del modelo matemático de la celda de combustible	61
Tabla 9.- Datos del ultracapacitor Maxwell modelo BCAP3000.....	66
Tabla 10.- Información técnica de una batería Samsung UR17850RX	69
Tabla 11.- Comparación entre el dimensionamiento inicial y final para el caso de estudio.	72
Tabla 12.- Configuraciones de plantas de potencia evaluadas	74
Tabla 13.- Capacidad de energía instalada, peso y costo de las configuraciones de las plantas de potencia de los casos.....	75
Tabla 14.- Tabla comparativa del tamaño de las celdas de combustible por trabajo.	79
Tabla 15.- Clasificación de las Estrategias de Manejo de Energía.....	81
Tabla 16.- Comparativa de los tipos de estrategias de manejo de energía	81
Tabla 17.- Identificadores para los grados de pertenencias.....	96
Tabla 18.- Reglas de inferencia para el FIS.....	97
Tabla 19.- Dimensionamiento final de la planta de potencia.	101
Tabla 20.- Mejora de eficiencia en comparativa con otros trabajos.....	110
Tabla 21.- Eficiencia promedio por cada caso de sobredimensionamiento de las celdas de combustible.....	114
Tabla 22.- Consumo de combustible para cada caso de sobredimensionamiento.....	116
Tabla 23.- Eficiencia promedio para diferentes condiciones del SOC inicial de las baterías.	118
Tabla 24.- Corrientes y voltajes máximos y mínimos para los diferentes tamaños del banco de baterías.....	123
Tabla 25.- C-rate máximos (descarga/recarga) para cada tamaño de banco de baterías.	125
Tabla 26.- Comparación entre cuatro casos para el análisis de dimensionamiento del banco de ultracapacitores.....	132
Tabla 27.- Datos del vehículo de prueba	156
Tabla 28.- Estimación de los parámetros de potencia, peso y eficiencia de la celda ante la variación del SD de la FC.....	163

Notación

Abreviaciones:

BB	Baterías/banco de baterías
BBS	Sistema del banco de baterías (BB y convertidor asociado)
BEV	Vehículo eléctrico basado en baterías
BOP	Balance de planta
CENIDET	Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
DC	Corriente directa
EMS	Estrategia de manejo de energía
EV	Vehículo eléctrico
FC	Celdas de combustible
FC(H)EV	Vehículo eléctrico (híbrido) basado en celdas de combustible
FCS	Sistema de celdas de combustible (FC, BOP y convertidor asociado)
FL	Lógica difusa
FIS	Sistema de Inferencia Difusa
HEV	Vehículo eléctrico híbrido
INEEL	Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias
Li-Ion	Ion de Litio
MEA	Ensamble membrana-electrodo
M/G	Motor/generador
MOGWO	Optimización Multi-Objeto Lobo Gris
NB	Negativo grande
NM	Negativo mediano
NS	Negativo pequeño
OB	Basadas en optimización
PB	Positivo grande
Pb-Ac	Plomo-Ácido
PEM	Membrana de intercambio protónico
PEMFC	Celdas de combustible de membrana de intercambio protónico
PM	Positivo mediano
PS	Positivo pequeño
PWM	Modulación por ancho de pulsos
RB	Basadas en reglas
SOC	Estado de carga
UC	Ultracapacitores/banco de ultracapacitores
TecNM	Tecnológico Nacional de México
WLTC	Ciclo de manejo para vehículos ligeros
Z	Cero

Símbolos

a	Aceleración del vehículo
A	Voltaje exponencial de una batería
A_{cell}	Área activa de la celda de combustible
A_{cell}	Conjunto de áreas activa para las celdas de combustible
A_{cell}^{\min}	Área activa mínima de la celda de combustible
A_{cell}^{\max}	Área activa máxima de la celda de combustible
Ad_{SOC}	Tasa de potencia a entregar por las baterías normalizada
A_f	Área frontal del vehículo
B	Capacidad exponencial de una batería
B_s	Número de baterías en serie
B_p	Número de baterías en paralelo
C	Capacitor
C_x	Capacitores que integran el compensador del convertidor $x = \{1, 2\}$
C_a	Coefficiente de arrastre aerodinámico
C_{UC}^{cell}	Capacitancia nominal de una celda de ultracapacitor
C_R	Coefficiente de rodamiento
D	Ciclo de trabajo
D_{cFC}	Ciclo de trabajo para el convertidor de las celdas de combustible
D_{buck_cBB}	Ciclo de trabajo para el convertidor de las baterías, modo reductor
D_{boost_cBB}	Ciclo de trabajo para el convertidor de las baterías, modo elevador
E	Energía requerida en las llantas para mover el vehículo
E_0	Voltaje constante de una batería determinada por el fabricante
E_{BB}	Voltaje no lineal de una batería
E_{BR}	Energía total recuperada de los frenados regenerativos
E_{FC}	Voltaje no lineal de una celda de combustible
E_{FW}	Energía total requerido para mover hacia adelante el vehículo
$E_{r,T,P}$	Voltaje reversible a cierta presión y temperatura de operación de una celda de FC
E_{RB}	Energía máxima posible a recuperar en un ciclo de manejo
E_{st}	Energía almacenada de los frenados regenerativos
E_{UC}^{cell}	Energía almacenada en un ultracapacitor
F	Constante de Faraday

F_d	Arrastre aerodinámico
F_x	Fuerza requerida para mover hacia adelante el EV
f_x	Funciones para determinar pesos de los componentes de las FC $x = \{a, b, 1, 2, 3, 4\}$
F_w	Función para determinar el peso de las celdas de combustible
g	Aceleración gravitacional
G_{id}	Función de transferencia del convertidor en modo corriente
G_{com}	Función de transferencia del compensador
G_{dc}	Función de transferencia del modulador
G_{LC}	Función de transferencia en lazo cerrado
i_L	Límite de densidad de corriente
i_{loss}	Perdida de corriente interna
i_o	Densidad de corriente de intercambio
it	Capacidad extraída de una batería
i^*	Corriente filtrada a bajas frecuencias de una batería
I_{BB}	Corriente del banco de baterías
I_{BB}^{cell}	Corriente de una batería
I_{BBS-UC}	Corriente del sistema del banco de baterías y del banco de ultracapacitores
I_{BB_C}	Corriente del convertidor del banco de baterías
I_{driver}	Corriente del driver del motor del vehículo eléctrico
I_{FC}	Corriente del conjunto de celdas de combustible
I_{FC}^{ref}	Corriente del conjunto de celdas de combustible de referencia
I_{FC_C}	Corriente del convertidor de las celdas de combustible
I_L	Corriente del inductor en el convertidor
I_{UC}	Corriente del banco de ultracapacitores
I_{UC}^{cell}	Corriente de un ultracapacitor
j	Densidad de corriente
K	Constante de polarización de una batería
K_{H_2}	Entalpía del gas hidrógeno
L	Bobina/inductor
m	Masa del EV
\dot{m}_{H_2}	Flujo del gas hidrógeno
M_{H_2}	Masa molar del gas hidrógeno
n	Número de electrones del gas

N_{FC}	Número de celdas en un conjunto de celdas de combustible
N_{FC}	Conjunto de número de celdas en un conjunto de celdas de combustible
P_{BB}	Potencia del banco de baterías
P_{BBS}	Potencia del sistema del banco de baterías
P_{BBS-UC}	Potencia del sistema del banco de baterías y del banco de ultracapacitores
P_{driver}	Potencia del driver del motor del vehículo eléctrico
P_E	Potencia eléctrica requerida por el tren de potencia
P_{FC}	Potencia del conjunto de celdas de combustible
P_{FCS}	Potencia del sistema de celdas de combustible
P_M	Potencia mecánica requerida en las llantas
P_{max}	Potencia máxima requerida por el vehículo en un ciclo de manejo
P_{UC}	Potencia del banco de ultracapacitores
Q	Transistor
Q_c	Etapas de conmutación (encendido/apagado)
Q_{BB}^{cell}	Capacidad nominal de una batería
Q_{BB}^{max}	Capacidad máxima de una batería
Q_{UC}^{cell}	Carga almacenada en un ultracapacitor
R	Resistencia eléctrica
R_x	Resistencias que integran el compensador del convertidor $x = \{1, 2\}$
R_g	Constante del gas
R_i	Resistencia interna
R_x	Resistencia de rodamiento
s	Operador Laplace
SOC_{BB}	Estado de carga de las baterías
SOC_{max}	Estado de carga máxima permitida por las baterías
SOC_{min}	Estado de carga mínima permitida por las baterías
SOC_{ref}	Estado de carga de las baterías de referencia
T	Temperatura de operación
T_b	Constante de tiempo
T_{on}	Tiempo encendido
T_s	Periodo de conmutación
UC_s	Número total de ultracapacitores en serie

UC_{s0}	Número mínimo de ultracapacitores en serie para mantener el voltaje del bus
UC_p	Número total de ramas de ultracapacitores en paralelo
V_{BB}	Voltaje de operación nominal de un banco de baterías
V_{BB}^{cell}	Voltaje nominal de una batería
V_{bus}	Voltaje del bus
V_{bus_ref}	Voltaje del bus de CD de referencia
$V_{bus_ref}^{nor}$	Voltaje del bus de CD normalizado
V_c	Voltaje del capacitor en el convertidor
Vel	Velocidad del vehículo eléctrico
Vel_{max}	Velocidad máxima del vehículo eléctrico
V_{FC}	Voltaje del conjunto de celdas de combustible
$\overline{V_{FC}^{cell}}$	Voltaje promedio de una celda de combustible
V_g	Voltaje de entrada del convertidor
V_{min}	Voltaje mínimo del bus de DC
V_{max}	Voltaje máximo del bus de DC
V_0	Voltaje de salida del convertidor
V_{UC}	Voltaje del banco de ultracapacitores
V_{UC}^{cell}	Voltaje nominal de un ultracapacitor
V_{UC}^{OC}	Voltaje de un ultracapacitor en circuito abierto
VD	Diodo
w	Fuerza para vencer la pendiente del camino
W_{BB}	Peso total del banco de baterías
W_{BB}^{cell}	Peso nominal de una batería
W_{BP}	Peso de las placas bipolares
W_{EP}	Peso de las placas finales
W_{FC}	Peso de las celdas de combustible
W_{FC}	Conjunto de pesos de las celdas de combustible
W_{MEAS}	Peso de las MEA
W_S	Peso de la tornillería y otros componentes estructurales
W_{UC}	Peso total del banco de ultracapacitores
W_{UC}^{cell}	Peso nominal de un ultracapacitor

α	Coefficiente de transferencia
ΔI_{FC}^{\max}	Tasa de cambio máxima permisible en la corriente de las celdas de combustible
ΔI_{FC}	Tasa de cambio en la corriente de las celdas de combustible
ΔI_{FC}^{nor}	Tasa de cambio en la corriente de las celdas de combustible normalizada
Δj_{avg}	Valor promedio en el cambio de la densidad de corriente de las FC
η_c	Eficiencia del driver del motor
η_{conv}	Eficiencia del convertidor
η_d	Eficiencia de la transmisión
η_{FC}	Eficiencia de la celda de combustible
$\eta_{M/G}$	Eficiencia del M/G
ρ	Densidad del aire
θ	Ángulo de la pendiente del camino
ξ	Factor de amortiguamiento
ω_n	Frecuencia angular no amortiguada

Organización de la tesis

Esta tesis está organizada en cinco capítulos. En el Capítulo 1 se presenta la motivación y los antecedentes de este trabajo. En ese mismo se introducen los fundamentos teóricos y las

generalidades requeridas para el desarrollo de este trabajo. Además, se describen los principales conceptos que forman la base de los resultados obtenidos.

En el Capítulo 2 se presentan el diseño y el análisis de los convertidores de potencia asociados a las fuentes de la configuración de la planta de potencia híbrida propuesta en este trabajo.

En el Capítulo 3 se presentan el diseño y los resultados de la metodología de dimensionamiento de las fuentes de una planta de potencia híbrida propuesta en este trabajo para un vehículo eléctrico utilitario, que es el caso de estudio, así como una comparativa de diferentes plantas de potencia.

En el Capítulo 4 se presentan el diseño y los resultados del desarrollo de la estrategia de manejo de energía para hacer uso eficiente de la energía a bordo del vehículo eléctrico basado en celdas de combustible, así como análisis de sensibilidad del sobredimensionamiento de cada una de las fuentes.

Finalmente, en el Capítulo 5 se mencionan las conclusiones, las aportaciones del trabajo y algunos trabajos futuros.

I

Introducción

En la actualidad, los combustibles fósiles y las plantas nucleares suplen la mayoría de la demanda de la energía a nivel mundial. Las plantas de potencia queman carbón, petróleo y gas natural, para producir energía, lo que provoca grandes impactos al medio ambiente. Otra fuente de contaminación son los vehículos que circulan diariamente en todo el mundo. Éstos producen, anualmente, millones de toneladas de contaminantes y gases de efecto invernadero a la atmósfera, que amenazan al planeta entero.

Muchos científicos, ingenieros, economistas y políticos han propuesto varias medidas para reducir el uso de los combustibles fósiles y sus emisiones. Pero estas medidas no han sido suficientes. El uso de fuentes de energía renovables se ha incrementado considerablemente para suplir la demanda de energía eléctrica en el mundo. Sin embargo, aun la principal fuente de contaminantes provienen del parque vehicular [1].

1.1 Antecedentes y motivación

Las naciones en el mundo persiguen soluciones de transporte sustentable. Vehículos que generen cada vez menos contaminación al medio ambiente. El preocupante problema de disminuir contaminantes al no utilizar combustibles fósiles ha llevado a retomar el uso de la electricidad y de motores eléctricos en los vehículos de transporte, en poca o gran medida. Una propuesta, ya comercial, es la de los vehículos híbridos, es decir, vehículos que contienen motores eléctricos y de combustión interna, tal es el caso del Toyota PRIUS, o del Honda INSIGHT que se presentaron en los 90's y que desde entonces han retomado importancia la inclusión de motores eléctricos en los vehículos de transporte [2].

Si bien, la hibridación de motores eléctricos con motores de combustión en los automóviles ha impactado en la reducción de contaminantes, no la ha eliminado por completo. Además, el uso eficiente del combustible y de las emisiones generadas, dependen fuertemente de la distribución de potencia, y de la conexión electromecánica de los motores. Donde el motor eléctrico puede complementar al motor de combustión (mecánicamente) o en sentido inverso, indirectamente con la recarga de un banco de baterías. Estas configuraciones pueden estar disponible en vehículos de transporte personal o de carga [3]–[7].

Sin embargo, se busca que los autos no generen ningún tipo de contaminante, los llamados cero emisiones o eléctricos. Los vehículos todo eléctricos (EV, por sus siglas en inglés) tienen la ventaja de emitir cero contaminantes, por lo que éstos pudieran ser una solución que traería grandes beneficios relacionados con la eliminación de emisiones de contaminantes y ruido. Este tipo de vehículos, comúnmente, utilizan baterías como fuente propulsora de tracción. Por lo general, este tipo de vehículos requieren de un gran número de baterías para alcanzar la autonomía de los vehículos convencionales (de combustión interna). Por lo que, los tiempos de recarga de las baterías es alta relativamente, que va desde decenas de minutos, hasta una decena de horas.

Entre los sistemas de propulsión eléctrica alternativos de los EV, se ha propuesto a las celdas de combustible (FC, por sus siglas en inglés) como una solución potencial y atractiva para aplicaciones en EV, debido a que proporciona un funcionamiento favorable al medio ambiente con el uso de combustible renovable. Particularmente, las FC de membrana de intercambio protónico (PEM, por sus siglas en inglés) surgen como uno de los candidatos más prometedores para sistemas de EV, debido a su simplicidad, viabilidad, mayor densidad de potencia, temperaturas de operación bajas y rendimiento eléctrico alto relativamente en comparación con el tamaño aproximado de un motor de combustión interna.

Las FC son dispositivos electroquímicos que convierten, mediante una reacción química, la energía almacenada en el gas combustible hidrógeno en energía eléctrica al combinarlo con oxígeno. Por lo tanto, los FCEV basados en hidrógeno son ecológicos, pues no contaminan. Ya que, por el contenido energético del hidrógeno, los FCEV ofrecen autonomías superiores a los autos eléctricos basados en baterías. Además, el tiempo de recarga del combustible de los FCEV es equivalente al de un vehículo convencional, es decir, de combustión interna. Este tiempo es relativamente mucho menor que el utilizado para recargar las baterías de un EV basado en baterías. Si bien, el tiempo utilizado para recargar a un 80% el EV basado en baterías puede alcanzar los 30 minutos, el tiempo para recargar el hidrógeno a un 100% de un FCEV es de 5 minutos.

Los vehículos eléctricos basados en celdas de combustible (FCEV, por sus siglas en inglés), especialmente los de membrana de intercambio protónico (PEMFC, por sus siglas en inglés) prometen ser una alternativa a los vehículos de combustión interna. Este tipo de vehículos no generan contaminantes localmente. Es decir, son cero emisiones “*in-situ*”. Además, utilizan un

sistema de propulsión más eficiente basados en motores eléctricos. También, los vehículos todo eléctrico, como los basados en celdas de combustible, pueden ser recargados en un tiempo muy corto (menos de diez minutos), cuyo tiempo sería similar a la recarga de gasolina de los autos convencionales. Este tiempo es muy bajo en comparación con aquellos vehículos basados sólo en baterías, ya que los FCEV dependen únicamente del gas hidrógeno como principal fuente de energía. Por esta razón, los vehículos eléctricos a base de celdas de combustible presentan una oportunidad prometedora para los consumidores y fabricantes de automóviles por igual. Ya que la densidad energética del hidrógeno, del cual se obtiene la energía eléctrica, es mucho mayor que el de las baterías, esta tecnología promete traer más ventajas que la otra. Además, los fabricantes de vehículos han hecho progresos constantes en la reducción de costo, incremento de autonomía de éstos tipos de vehículos [8]–[10], para que sean comerciales y estén al alcance de los usuarios de transporte terrestre.

Las FC utilizan hidrógeno, una de las fuentes de combustible más prometedoras, ya que es más ligero y puro que el aire. Cuando se utiliza el hidrógeno en una celda de combustible, es eficiente altamente y no deja emisiones contaminantes. Y lo mejor de todo es que se encuentra en cualquier lugar prácticamente, ya que es el elemento más abundante del universo. La próxima generación de automovilistas conscientes del medio ambiente exigirá formas más limpias de transporte. Reconociendo el potencial del hidrógeno para responder a esa demanda, se están proponiendo vehículos eléctricos basados en celdas de combustible para impulsar un futuro mejor [11].

1.2 Acercamiento del problema

La celda de combustible es una fuente no lineal que entrega una salida de voltaje variable dependiente de la corriente que se le demande. Este comportamiento, así como su respuesta dinámica lenta, se atribuye a problemas de transporte de masa del combustible hidrógeno y del reactante oxígeno. La curva de polarización, propia de cada celda, es una gráfica que representa el comportamiento de la celda según su régimen de operación. En ésta se muestra que el voltaje disminuye cuando la corriente se incrementa. Por lo que, en la mayoría de sus aplicaciones, las celdas de combustible se acompañan de una interfaz de potencia, es decir, con convertidores de corriente directa a corriente directa (DC-DC, por sus siglas en inglés) que regulan el voltaje a un valor fijo.

Aunado al cambio de voltaje dependiendo de la corriente de demanda, la eficiencia de conversión del combustible hidrógeno tiene un comportamiento muy similar. La eficiencia en que la celda de combustible convierte la energía almacenada en el hidrógeno en energía eléctrica también depende de la corriente que se le demande. Así pues, la eficiencia será más alta cuando se

le demande menos potencia y viceversa. Es decir, la eficiencia máxima de conversión se tendrá cuando se le demanda una potencia mínima. Y cuando la potencia demandada sea la máxima, se tendrá una eficiencia mínima. Ya que la potencia y la eficiencia de conversión del combustible, de las celdas de combustible, varía según su régimen de operación, debido a su curva de polarización, los vehículos eléctricos basados en esta tecnología incorporan celdas sobredimensionadas, que hacen frente a la demanda energética del vehículo bajo regímenes de operación impuestos por un usuario. Este sobredimensionamiento conlleva a ocupar mayor espacio y peso en el vehículo.

Por lo mencionado anteriormente, si se dimensiona adecuadamente un conjunto de celdas de combustible, acorde a la aplicación, se puede obtener una mejor eficiencia en la conversión de la energía a bordo del EV sin incrementar en demasía el tamaño y peso de éstas.

Con todas las bondades de las FC, los vehículos de nueva generación deberían de incorporarlas para su propulsión. Sin embargo, no lo están debido a los grandes retos que éstos presentan. Las FC tienen grandes ventajas, pero también tienen desventajas, tales como su respuesta dinámica lenta, el impacto económico y falta de infraestructura, por ser una tecnología en desarrollo, entre otras [1], [2]. Por lo anterior, muy a menudo éstas se combinan con otras fuentes, por ejemplo, con un banco de baterías (BB) y/o un banco de ultracapacitores (UC). Éstas otras fuentes tienen una dinámica mayor que las FC, requerida a menudo para aceleraciones u otras demandas de potencia alta del vehículo, las cuales dependen de la aplicación de éste. Además, La combinación de las FC con BB y/o UC, ha mostrado reducir el dimensionamiento de las celdas, así como obtener una mejor respuesta de la dinámica global del sistema. La combinación de éstos se hace posible con el uso de los convertidores de DC-DC, que acondicionan la potencia de las fuentes a un bus de DC que alimenta el *driver* (controlador/manejador/acondicionador) del motor eléctrico del vehículo para su propulsión. Sin embargo, éstas fuentes también tienen ciertas limitaciones, que se describen más adelante, por lo que las investigaciones nuevas están orientadas a resolver estas inconveniencias en la tecnología de celdas de combustibles y otras más que surgen con la incorporación de éstas en los vehículos

Las investigaciones realizadas en este tipo de configuración “híbrida” de fuentes se ha orientado en el desarrollo de técnicas de distribución de energía a bordo del vehículo, conocidas como estrategias de manejo de energía (EMS, por sus siglas en inglés).

Los objetivos de las EMS propuestas en los trabajos revisados, han sido para la maximización de la eficiencia global del sistema, reducción de pérdidas en el sistema, minimización del uso del combustible, aumento de la autonomía del vehículo, entre otros.

Las herramientas de control de las EMS van desde simple reglas heurísticas, hasta técnicas de control nuevas relativamente como aplanamiento diferencial [12], [13].

Aunque el objetivo de una EMS sea específico, se pueden combinar más de uno para lograr un mejor desempeño. Por ejemplo, si se maximiza la eficiencia global del sistema, se espera que se reduzcan las pérdidas en el sistema, y se incremente la autonomía del vehículo. Sin embargo, en el diseño de la EMS, muchos trabajos, consideran que las celdas de combustible tienen una eficiencia fija, opuesto al funcionamiento de éstas. Así como el voltaje y la corriente varían según su punto de operación de las celdas de combustible, la eficiencia de éstas también varía de acuerdo con su curva de polarización. Esta variación podría ser un factor importante en el uso eficiente del combustible en las celdas, lo que propiciaría alcanzar valores más altos en los objetivos más comunes de las EMS en los vehículos eléctricos.

Según la revisión de la literatura realizada hasta el momento, se ignora una de las ventajas de la tecnología de celdas de combustible, la recarga rápida del combustible, que es en orden de unidades de minutos. Mientras que, en comparación de las baterías, y dependiendo de la potencia del cargador, ésta se puede realizar de media, hasta más de ocho horas. Además, muchos de los trabajos, consideran sólo dos puntos de operación de las FC. Si bien, las técnicas de control son de tipos diferentes a la técnica de encendido/apagado, éstas desprecian las ventajas de operar a las FC dentro de esos puntos. También, de los trabajos revisados, éstos muestran el desarrollo de una EMS que consideran la descarga completa de las baterías al final de la autonomía definida. Es decir, toman en cuenta que la operación de éstas es en modo “depleting” (descarga completa), y que las baterías se recargan desde una fuente externa no descrita en el trabajo. Aunado a lo anterior, muy pocos trabajos mencionan el dimensionamiento de las fuentes a bordo del vehículo previo (“*ab-initio*”) al diseño e implementación de una estrategia de manejo de energía específica.

Por lo general, el tamaño de las fuentes va ligado al tipo de vehículo y su aplicación. Los vehículos pesados, requieren más energía y potencia para mover su propio peso, que los vehículos ligeros, independientemente de su aplicación. Por lo tanto, vehículos más pesados, o que mueven una mayor carga (según su aplicación), requieren de una planta de potencia más grande. Y, en consecuencia, si ésta se dimensiona de manera incorrecta se compromete el desempeño del vehículo mismo. En el caso de los vehículos a base de baterías solamente, esta situación se ve maximizada. Las baterías son dispositivos electroquímicos que almacenan energía de acuerdo con su tipo de tecnología y su construcción.

<p>En las baterías, su capacidad de entrega de energía o potencia están ligadas entre sí al tamaño de éstas. Si se requiere más potencia o más energía, se requiere incrementar el tamaño del banco, lo cual se puede traducir en que, si se requiere cumplir con un desempeño más demandante del vehículo, o incrementar la autonomía de este, se necesita incrementar el número de baterías a bordo.</p>
--

La situación anterior frecuentemente termina en subutilizar la capacidad de energía instalada en el vehículo, cuando sólo se requiere la potencia que éstas pueden entregar, y a veces, también en términos de energía. Lo anterior se puede evitar cuando se utilizan las celdas de combustible

Un sistema de celdas de combustible se conforma de dos componentes principales, las celdas de combustible y el tanque de hidrógeno. Las celdas de combustibles convierten la energía almacenada en el hidrógeno en energía eléctrica útil. Así pues, en un sistema de celdas de combustible, la capacidad de entrega de energía es independiente de su capacidad de entrega de potencia.

En un sistema de celdas de combustible, la capacidad, en términos de energía, se encuentra determinado por la cantidad de hidrógeno almacenado en el tanque. Mientras que la capacidad de potencia se encuentra definido por el tamaño de las celdas.

Esta ventaja del sistema de celdas permite separar la capacidad de potencia y energía en términos del tamaño del tanque de almacenamiento y de las celdas de combustible. Por lo tanto, se puede incrementar el tanque de hidrógeno para cumplir con el requerimiento de energía sin afectar el tamaño de las celdas. Y viceversa, se puede incrementar el tamaño de las celdas para cumplir el requerimiento de potencia sin incrementar el tamaño del tanque.

Por otra parte, en la actualidad, no existe un vehículo eléctrico comercial que sea a base de UC únicamente. Si bien, los UC son dispositivos que pueden almacenar y entregar energía muy rápidamente (en el orden de miles de A/s), la densidad de energética es muy baja (menor a 10 Wh/kg).

En comparación con las baterías, los UC sólo pueden almacenar, aproximadamente, una centésima parte de energía por celda¹. Lo anterior se traduce, que el banco de UC sería 100 veces más grande que uno de baterías para almacenar la misma cantidad de energía.

Por lo tanto, para almacenamiento de energía, los UC serían la opción menos recomendable para este uso en EV. Sin embargo, para el uso de grandes cantidades de energía en periodos de tiempo muy cortos, son la mejor opción, pues de las fuentes descritas anteriormente, los UC son los de mayor densidad de potencia, superando por encima de diez veces la densidad de potencia de una batería.

La arquitectura híbrida de una planta de potencia permite la explotación de algunas de las ventajas de las fuentes al mismo tiempo que se evitan sus desventajas. Además, con la hibridación se puede reducir el tamaño de los componentes de la planta de potencia en comparación con los

¹ Comparación a nivel celda entre un ultracapacitor BCAP3000 de Maxwell y una batería e Ion-Litio Swing 5300 de Boston Power

vehículos que dependen de una única fuente de energía/potencia. Adicionalmente, al reducir el tamaño de éstos se puede minimizar el peso y el costo de la planta de potencia híbrida.

Si bien, la hibridación de una planta de potencia trae grandes beneficios como los descritos anteriormente, también trae grandes retos. Uno de ellos es el dimensionamiento de las fuentes que integran la planta de potencia híbrida del vehículo. Un inadecuado dimensionamiento puede afectar el desempeño del vehículo, limitando las funciones al que fueron diseñados y acotando la autonomía de éste. Otro gran reto es la distribución de la energía/potencia que cada fuente puede entregar para cumplir con el requerimiento energético del VE. Para ello, se requiere del diseño de una EMS que coordine la distribución de la energía por cada fuente y mejore el uso de ésta a bordo del vehículo. La complejidad del diseño de la EMS se incrementa en orden al número de fuentes a controlar, así como el tipo de control a utilizar. En este trabajo de tesis, se identificó que éstos dos temas son de importancia para el diseño del vehículo eléctrico. Y, por lo tanto, son temas que se abordaron en el desarrollo de esta tesis de doctorado y que se describen a continuación.

Un dimensionamiento adecuado disminuiría el peso agregado al vehículo, y en consecuencia la energía adicional que se requeriría para moverlo. Además, existe una relación directa entre el peso del EV con el requerimiento de potencia y energía total del mismo [14].

Por todo lo anterior, en este trabajo de tesis se propone el diseño de una EMS que eficiente la energía utilizada a bordo del EV al realizar una distribución de energía entre las fuentes, de tal forma que las FC trabajen en múltiples puntos de operación de acuerdo al estado de carga (SOC, por sus siglas en inglés) de las baterías y de los ultracapacitores, así como el desarrollo de un dimensionamiento de las fuentes a bordo, para disminuir el peso e incrementar la autonomía al reducir el consumo energético para mover el vehículo.

1.3 Estado del arte

El dimensionamiento de la planta de potencia de un VE juega un factor importante en el diseño de éste. Además, el desempeño del VE puede afectarse negativamente con un inadecuado dimensionamiento de los componentes de su planta de potencia.

En la literatura, muchos trabajos se han orientado en el desarrollo de estrategias de manejo de energía para varias configuraciones de plantas de potencia para vehículos eléctricos híbridos basados en celdas de combustible (FCHEV, por sus siglas en inglés). Éstas incluyen configuraciones como FC+BB, FC+UC, y FC+BB+UC, cuyos objetivos son: la reducción del consumo de combustible, incremento de la autonomía y mejora de la eficiencia del sistema. De hecho, una EMS es indispensable para usar la energía a bordo de manera eficiente. Uno de los retos más grandes en la industria automotriz y en general de la industria de la movilidad eléctrica, es la

mejora de la eficiencia en los componentes del vehículo. Lo anterior, se debe a la, cada vez, mayor presión en la conservación energética y de la disminución de los impactos ambientales. Por ejemplo, de acuerdo al departamento de energía de los Estados Unidos [15], en vehículos convencionales con motores de combustión interna, el diseño de las llantas y materiales pueden reducir la resistencia de rodamiento en un 5 a 7% con lo que se incrementa la eficiencia del combustible en tan sólo 1%. Las pérdidas de energía parasitas por el uso de bombas de agua, de combustible y de aceite, así como los sistemas de ignición y de control del motor, pueden ascender hasta un 6%. Cualquier mejora en el ahorro en la energía tendría un impacto positivo, especialmente a lo largo de la vida útil del vehículo.

Por lo tanto, ahorrar peso, no sólo en las celdas de combustible, sino también en toda la planta de potencia es uno de los objetivos de este trabajo de tesis, que, además es el objetivo de muchos desarrolladores de vehículos alrededor del mundo.

Sin embargo, la minimización de los componentes de la planta de potencia puede traer beneficios adicionales, si esto se realiza al inicio del diseño del vehículo. Ya que puede proporcionar ahorros potenciales en energía y en el costo de inversión, con lo que se maximiza su rendimiento. Por otro lado, en aplicaciones vehiculares, la mayoría de las investigaciones se han orientado en el desarrollo de estrategias de EMS sin considerar un dimensionamiento inicial apropiado de las fuentes, a pesar de que existe una fuerte relación entre el dimensionamiento y la EMS [16]–[22]. De hecho, el tamaño de los componentes de la planta de potencia afecta el desempeño de la EMS [23]. Ya que esta última determina el flujo de energía desde y hacia las fuentes que actúan como sistemas almacenadores de energía, y la capacidad de manejo de energía depende de las capacidades de la planta de potencia.

1.3.1 Dimensionamiento de la planta de potencia híbrida

En muchos de los trabajos de investigación se han realizado esfuerzos para mejorar el desempeño del vehículo, reducir su costo, el peso y el volumen de la planta de potencia, mediante el estudio del dimensionamiento de plantas de potencia y la reducción del consumo de combustible [23]–[31]. Otros, simplemente realizan el dimensionamiento para cumplir con el requerimiento de potencia y energía de un ciclo de manejo en particular [23], [32]–[36]. Sin embargo, algunas propuestas se basan en el dimensionamiento de las fuentes en lazo abierto. Es decir, que el dimensionamiento considera solamente el requerimiento de potencia y energía utilizando los parámetros de diseño del vehículo [23], [25], [33]–[40], sin tomar en cuenta el peso añadido de la planta de potencia en el diseño, el cual debería de considerarse, ya que incrementa el peso total del vehículo, y por lo tanto, el requerimiento energético del mismo [24], [26]–[28]. En [25], se propone un algoritmo que estima la resistencia agrupada de una planta de potencia integrada por FC y BB.

El algoritmo permite calcular la variación de corriente disponible máxima para cada fuente. Esto permite al diseñador definir la potencia de cada fuente de acuerdo con los requerimientos de la planta de potencia al relacionar la corriente de cada fuente con un voltaje fijo del bus. El algoritmo intenta encontrar el valor de potencia mínimo para cada fuente y cumplir con el requerimiento de potencia. Sin embargo, el análisis sólo considera siete valores de potencia para cada fuente. Feroldi en [34], propone una metodología de dimensionamiento para un sistema integrado por FC y UC basados en criterios de desempeño. El criterio determina la contribución de cada fuente para cumplir con la velocidad y aceleración del vehículo en un rango de tiempo definido por el criterio. Sin embargo, la metodología no se explicó completamente. Además, si el dimensionamiento inicial no cumple con los requerimientos de potencia y de rendimiento, sólo se permite “reajustar” el tamaño de los UC para cumplir con el requisito de potencia determinado por el ciclo de manejo y el criterio de desempeño evaluado. En [35], los autores proponen un método para dimensionar un tren de potencia basado en FC y UC. El método considera la evaluación de un cierto número de sistemas comerciales de FC y UC. Ellos proponen una solución óptima aquella que cumple con el requerimiento de potencia con el costo mínimo del sistema. En [36], la metodología que se propone es similar a la que se presenta en [34]. El algoritmo que se presenta consiste en definir un valor mínimo y máximo de celdas comerciales como límites para determinar el tamaño de un banco de UC. Para cada tamaño de banco de UC, se especifica un sistema de FC con una capacidad de potencia complementaria al del banco de UC. El tamaño de cada fuente se añade al peso inicial del vehículo y se evalúa bajo un ciclo de manejo estocástico. El sistema óptimo es aquel que, evaluado bajo ese ciclo de manejo, haya consumido menos combustible de hidrógeno. En [37], los investigadores presentan un método para dimensionar un tren de potencia basado en FC y UC en una configuración pasiva. Ellos presentan un análisis del impacto del tamaño del banco de UC en la eficiencia del sistema de FC. La conclusión del trabajo se resume en que, al incrementar el tamaño del banco de UC, se incrementa el voltaje de operación de las FC y, en consecuencia, se incrementa la eficiencia de éstas. En [30], los autores proponen un enfoque de optimización multicriterio para una planta de potencia de un FCHEV. Los resultados del dimensionamiento se presentan en términos de un “factor de peso”. El método no muestra el peso total de las fuentes ni su configuración. Por otro lado, la estimación se realiza en lazo abierto. Lee y Lin en [31], proponen una estrategia de manejo de energía de auto optimización para un vehículo ligero para varios ciclos de manejo estocásticos. Sin embargo, sus validaciones se realizaron sólo para dos diferentes tamaños de plantas de potencia. En [29], los autores estudiaron el impacto del dimensionamiento de un sistema híbrido integrado por un banco de baterías y múltiples conjuntos de celdas de combustible, pero el trabajo sólo comparara cinco casos de dimensionamiento del sistema FC-BB y no proponen una metodología como tal. Kwan et al. en [38], proponen un esquema de optimización para un autobús eléctrico híbrido basado en FC-BB-UC. El trabajo sólo optimiza la EMS bajo un conjunto de fuentes, como componentes fijos. En [23], los autores

estudian el cómo la configuración del dimensionamiento de las fuentes afecta en el costo global del vehículo. El estudio se orienta en la minimización del impacto del tiempo de vida de las fuentes utilizando modelos de degradación. En [39], los autores presentan un esquema de optimización para una EMS eficiente y un dimensionamiento de sus componentes. El trabajo es orientado a vehículos enchufables (plug-in). Además, el método de dimensionamiento sólo define la potencia/capacidad de cada fuente, y no la configuración, peso o volumen de éstas. Gaikwad y Ghosh en [40], proponen un método de dimensionamiento basado en un análisis conocido como “pinch”. El método se validó para un ciclo de manejo WLTC CLASS III. Sin embargo, sólo se consideró los parámetros del vehículo para el dimensionamiento. Es decir, fue en lazo abierto. Además, no se validó el desempeño del vehículo con el peso de la planta de potencia añadida. En [26], los autores presentan una metodología de dimensionamiento de una planta de potencia híbrida integrada por FC y BB. El dimensionamiento se basó en el uso de una EMS que utiliza una técnica de control llamada separación de frecuencias, la cual determina la frecuencia de corte donde cada fuente debería de operar de acuerdo con la dinámica propia de cada fuente. El método toma en cuenta el requerimiento energético del vehículo, así como el peso de la planta de potencia híbrida para el redimensionamiento de las fuentes. El método finaliza cuando la especificación final de la planta de potencia cumple con el requerimiento de potencia y energía del vehículo evaluado. En [28] se presenta una metodología similar al trabajo presentado en [26], pero se incluye un análisis del impacto del uso de tres tecnologías diferentes de baterías como fuente auxiliar del tren de potencia integrado por FC y BB, en orden de obtener la mejor combinación en términos de peso, volumen y consumo de combustible hidrógeno. En [27], los investigadores utilizan una metodología de dimensionamiento de un tren de potencia integrado por FC, BB y UC. El método se basa en el uso de una estrategia de separación de frecuencias para realizar el dimensionamiento “óptimo” adaptando el peso añadido por las fuentes para calcular la potencia final y el requerimiento de energía. En tal trabajo, la optimización fue realizada a través de una técnica llamada Optimización Multi-Objetivo Lobo Gris (MOGWO, por sus siglas en inglés), que minimiza el peso de las fuentes y aumenta la eficiencia y el rendimiento del vehículo bajo la EMS propuesta.

1.3.2 Estrategias de manejo de energía

Una EMS efectiva permite que el sistema satisfaga la demanda instantánea de energía, aumenta la vida útil de los elementos de almacenamiento, reduce los costos operativos y, por lo tanto, optimiza el rendimiento del sistema y mejora la autonomía del EV [41].

Muchas EMS se ha estudiado en la literatura y éstas se han dividido en dos grandes grupos, basadas en reglas heurísticas (RB, por sus siglas en inglés) y basadas en optimización (OB, por sus

siglas en inglés)[42], [43]. Las RB son estrategias básicas que son utilizadas ampliamente debido a su aplicación práctica. Mientras que las OB se centran en la búsqueda de la solución óptima del problema de la distribución de energía a bordo del EV. Sin embargo, por lo regular, éstas llegan a encontrar una solución óptima local. Es decir, aplicable sólo a los EV con parámetros similares a la que fue desarrollado la EMS [44].

Las configuraciones eléctricas de algunos FCHEV, donde las celdas son acompañadas por un sistema de almacenamiento, las FC a veces han jugado un papel como extensor de autonomía en sistemas de propulsión de EV, tales son los casos que se presentan en [45]–[48]. En estas configuraciones la estrategia de manejo de energía se relaja, pues el extensor sólo funciona como un dispositivo de encendido/apagado, que opera de acuerdo con ciertos umbrales de los parámetros de operación del sistema, tales como el voltaje del bus o la corriente de demanda. Sin embargo, en configuraciones híbridas donde las FC son la fuente principal se requiere de una EMS que tome en consideraciones un reparto eficiente de la energía que entreguen las fuentes, así como su almacenamiento cuando existe una recuperación de energía mediante frenado regenerativo. Hay configuraciones FC+BB y FC+UC, y para estas configuraciones se han propuesto estrategias de manejo de energía para que el FCHEV sea eficiente en la administración de energía en el sistema [12], [49]–[57]. Sin embargo, en estas configuraciones donde las FC es la fuente principal, se tiene que los UC pueden responder a una dinámica mayor del sistema, pero no tienen la densidad energética de las BB, y éstas últimas tienen una mayor densidad de almacenamiento de energía, pero la dinámica de entrega de ellas es mucho menor que el de los UC. Por esta razón, una hibridez de estas fuentes permitiría tomar la ventaja de unas de ellas para compensar las desventajas en otras. Por lo que en [16], [17], [19], [20], [22], [58], son solo algunos trabajos que presentan estrategias de manejo de energía para sistemas híbridos que incluyen FC, BB y UC para aplicaciones vehiculares

<p>La eficiencia de un sistema híbrido de potencia, como el caso del vehículo eléctrico, depende fuertemente de la estrategia de manejo de energía, por lo que las investigaciones en esta rama se han enfocado en desarrollar EMS que distribuya la energía de las fuentes a bordo de los EV de manera eficiente [59].</p>

Las FC tienen muchas bondades, como las mencionadas anteriormente. Sin embargo, también tiene limitaciones. Una de ellas es la respuesta de su dinámica lenta. Lo que significa que no se puede demandar energía a las celdas de combustible a tasas de cambio altas relativamente. Por tal motivo, las investigaciones se han orientado a configuraciones híbridas, es decir, en conjunto con otras fuentes de energía, ya sean con un banco de baterías o uno de ultra-capacitores. Estas configuraciones pueden ser FC+BB, FC+UC o FC+BB+UC. A continuación, se presenta la recopilación de estas investigaciones orientadas a aplicaciones vehiculares.

EMS para HEV en configuración de FC y UC

Los sistemas de generación basados en celdas de combustible, actualmente, están en más aplicaciones, que incluyen las de transporte. Algunos trabajos, como los que se muestran en la Tabla 1, han demostrado que se puede mejorar la eficiencia de los sistemas de generación basada en FC si se combina con UC y se integra una EMS.

La eficiencia de estos sistemas (FC-UC) se logra al transferir los tiempos de operación transitoria del sistema de las celdas hacia los ultracapacitores, lo que reduce el estrés por parte de las celdas y mejora la respuesta del sistema.

Tabla 1.- Desarrollo de EMS para VE con configuración FC y UC

<i>Año</i>	<i>Autor</i>	<i>Estrategia</i>	<i>Objetivo</i>
2018	Dominguez & Jácome [35]	Lógica difusa	Analizar el desempeño de la EMS de acuerdo al dimensionamiento del tren de potencia del EV.
2017	Ashok et al. [60]	Modos deslizantes	Desarrollar controladores de modos deslizantes adaptativos y validar su desempeño en una aplicación vehicular.
2017	Bendani & Naseh [61]	Pasividad	Controlar el sistema híbrido del EV utilizando un método de control no lineal.
2017	López et al. [62]	Separación de frecuencias	Analizar la EMS propuesta con respecto a la prevención de la falta de reactante en las FC, y el impacto de la frecuencia de corte en la EMS.
2017	Sandoval et al. [63]	Separación de frecuencias	Analizar las interacciones y desempeño de los componentes del tren de potencia bajo diferentes escenarios.
2017	Allaoua et al. [64]	Basado en reglas	Mejorar el desempeño del EV al incorporar una fuente con una dinámica mayor que el de las FC. Incrementar la vida útil de las FC al disminuir su estrés.
2016	Shin et al. [65]	Control pasivo	Reducir el consumo de combustible hidrógeno con la implementación de un banco de UC.

Los UC son fuentes auxiliares para una configuración híbrida con FC, ya que tienen densidades energéticas bajas comparadas con las FC y BB, por lo que también existen configuraciones de FC y BB.

EMS para HEV en configuración de FC y BB

Un banco de baterías puede entregar una corriente inicial alta para arrancar el motor del EV y también puede fungir como un dispositivo limitador de carga que permitiría a las FC operar inicialmente en baja potencia y luego incrementa su operación a alta potencia.

Algunos de los enfoques de las EMS que utilizan esta configuración se puede observar en la Tabla 2, en la cual se enfatiza el objetivo de éstas:

Tabla 2.- Desarrollo de EMS para VE con configuración FC y BB

<i>Año</i>	<i>Autor</i>	<i>Estrategia</i>	<i>Objetivo</i>
2020	Wang et al. [66]	Estrategia de minimización de consumo equivalente óptimo	Optimizar el consumo del hidrógeno y asegurar la distribución óptima de energía entre las FC y las BB.
2020	Li et al. [67]	Lógica difusa	Mejorar el ahorro de combustible y el desempeño del EV, así como el SOC de las baterías.
2019	Wu et al. [39]	Control óptimo	Reducir el costo energético y el costo de las fuentes cumpliendo la demanda y mantienen la salud de las baterías.
2017	Muñoz et al. [68]	Redes neuronales	Diseñar y optimizar los trenes de potencia de un EV híbrido basado en celdas de combustible para deducir su consumo de combustible.
2017	Amaya et al. [69]	Regla heurísticas	Reducir el consumo de combustible y prolongar la vida útil de los componentes.
2016	Fernández et al. [48]	Reglas heurísticas	Determinar las condiciones de trabajo para mejorar la eficiencia y el desempeño, con referencia a las capacidades de las celdas de combustible y las baterías.
2016	Mebarki et al. [70]	Reglas heurísticas	Aprovechar el exceso de energía provenientes de las FC cuando estás operan en un solo punto de operación.
2015	Morales et al. [21]	Combinación Optimización y reglas heurísticas	Minimización del consumo del combustible hidrógeno en presencia de incertidumbre paramétrica en los modelos de las fuentes.

Las densidades energéticas que pueden contener las baterías, capacitores y celdas de combustible son diferentes entre sí, al igual que sus dinámicas. Por tal motivo, una configuración híbrida de éstas podría contrarrestar las desventajas de cada una de ellas por las bondades de las otras.

EMS para HEV en configuración de FC, BB y UC

Las FC obtienen la energía del hidrógeno cuya densidad de energía es alta relativamente, aunque su velocidad de respuesta es lenta. Los UC tienen una velocidad de respuesta alta, pero su densidad de energía es baja relativamente. Las BB tienen mayor densidad de energía que los UC y menor a las celdas. Además, tienen una mejor respuesta que las FC, aunque no supera al de los UC. Por lo anterior, pareciera que la combinación de todas podría evitar las desventajas de unos con las bondades de los otros, y el cual es objeto de estudio de esta configuración en los FCHEV.

La configuración de un sistema de fuentes de energía basado en FC, BB y UC tiene muchas ventajas. Las FC, por su densidad de energía alta, puede entregar energía al vehículo y a las BB para tenerlas cargadas. Mientras que los UC, por su dinámica alta y baja densidad energética puede responder a los cambios repentinos de demanda (transitorios). Las BB suelen ser usadas para suplir energía en complemento a las FC en regímenes constantes de demanda de energía. Además, las BB y UC se utilizan para almacenar energía recuperada de frenados regenerativos.

A pesar de todas las ventajas que se tiene en esta configuración, se tiene el problema del acoplamiento de estas fuentes, así como el manejo de la energía proveniente de ellos. Por tal motivo, las investigaciones con respecto a este tema están orientadas a la distribución de la energía de manera eficiente mediante diversas técnicas de control. En la Tabla 3 se muestra un concentrado de técnicas y estrategias de control de trabajos recientes para el manejo de energía en un FCHEV con la configuración de FC, BB y UC. Los objetivos van desde mostrar la funcionalidad de una estrategia propuesta vía simulaciones, pasando por alcanzar mejores eficiencias, mayor autonomía, reducción de pérdidas, hasta estudios comparativos de diversas estrategias propuestas para este tipo de configuración de EV híbridos.

Tabla 3.- Desarrollo de EMS para VE con configuración FC, BB y UC

<i>Año</i>	<i>Autor</i>	<i>Estrategia</i>	<i>Objetivo</i>
2020	Valdez et al. [71]	Lógica difusa	Mejorar el rendimiento del EV con la incorporación de UC en aceleraciones y frenados regenerativos.
2020	Zhang et al. [72]	Redes neuronales	Optimizar el desempeño de cada fuente al reducir la diferencia entre la potencia que entrega cada fuente y la ideal para el desempeño del EV.
2020	Amjadi [73]	4-Q SC Luo converters	Analizar una topología nueva de convertidor inteligente para balancear la carga de las fuentes del EV.
2019	Do et al. [74]	Basado en reglas	Validar la efectividad y el desempeño de la EMS propuesta y compararlas con EMS similares.
2019	Jiang et al. [75]	Pontryagin's Minimal Principle	Reducir el consumo energético y prolongar la durabilidad de las celdas de combustible en FCHEV.
2019	Wang et al. [76]	Basado en reglas	Prolongar la vida útil del sistema de celdas de combustibles, al disminuir su estrés y consumo de combustible.
2019	Fathy et al. [77]	Algoritmo Salp Swarm	Minimizar el consumo de hidrógeno y reducir la degradación del desempeño de las FC.
2019	Wang et al. [78]	Estado máquina finita	Maximizar la potencia neta de salida del sistema de celdas de combustible. Evaluar el desempeño, ahorro de combustible y la dinámica del sistema global.
2019	Fu et al. [79]	EMCS	Incrementar la vida útil de los sistemas del EV, mejorar el desempeño y ahorro de combustible.
2019	Rasheed et al. [80]	Separación de frecuencias	Reducir el consume de combustible al reducir el tamaño de las fuentes utilizando un método de separación de cargas.
2018	Snoussi et al [33]	Seperación de frecuencias	Diseñar el tamaño óptimo de los sistemas de almacenamiento de energía híbrida considerando una EMS basado en separación de frecuencias.
2017	Marzougui et al. [81]	Basado en reglas	Evaluar la efectividad de la EMS basado en reglas propuesto en el trabajo.
2016	Valdez [82]	Lógica Difusa	Diseñar una EMS para la operación de la planta de potencia de EV híbrido, con la distribución de potencia mediante el control de la corriente que suministre cada fuente.

En la literatura existen muchos trabajos con respecto a estrategias de manejo de energía, cada una aborda un objetivo particular, y utiliza una configuración específica de la planta de potencia híbrida. Además, para el desarrollo de la EMS utilizan técnicas de control, desde básicas como las RB, hasta otras muy complejas como las de OB. Sin embargo, cada una de ellas tiene sus ventajas y desventajas. En general, las primeras son fáciles de implementar, pero la solución no es óptima.

Por otro lado, las segundas se encuentra una solución óptima, pero su requerimiento computacional es alto, relativamente, que limita su implementación en aplicaciones de tiempo real.

En el desarrollo de EV, en especial los basados en celdas de combustible, existen muchos retos, y de la priorización de ellos es el cómo se direcciona su diseño y desarrollo, que incluye el dimensionamiento de sus fuentes y la implementación de una EMS. De la revisión bibliográfica realizada hasta el momento se identificaron varios retos en el desarrollo de este tipo de EV, que se describen a la subsección siguiente, así como la propuesta de solución para los mismos.

1.4 Planteamiento del problema

El reto mundial es la independencia del uso de combustible fósiles en el sector automotriz. Debido a ello, muchas investigaciones se han orientado en el desarrollo de tecnologías nuevas que puedan sustituir a la que actualmente tienen los vehículos convencionales, sin demeritar las prestaciones que se tienen. Se han logrado grandes avances con el desarrollo de tecnologías nuevas de baterías con el incremento en su densidad energética para suplir con los retos de las demandas grandes de energía que presentan los vehículos eléctricos. Sin embargo, la tecnología de celdas de combustibles promete ser la más viable en el desarrollo de este tipo de vehículos, ya que separan la densidad de energía, de la de potencia. La primera queda albergada en el combustible renovable que se utiliza, el hidrógeno, cuya densidad es mucho mayor que el de las baterías. Mientras que la segunda las proporciona las celdas de combustible. Por lo que, si se requiere mayor densidad energética o de potencia, basta con incrementar sólo una de ellas, la cantidad de combustible abordo o el tamaño de las celdas de combustible. A diferencia de las baterías, ambas densidades se encuentran vinculadas, e incrementar una significa aumentar la otra. Sin embargo, pese a estas bondades, se tienen otras limitantes. Aunado a eso, también se tienen otros retos que vencer en el desarrollo de los vehículos eléctricos.

Según la revisión de la literatura realizada hasta el momento, se ha encontrado diversos retos que se deben abordar en el desarrollo de los vehículos eléctricos, en especial aquellos que se basan en la tecnología de celdas de combustible.

De esta revisión se identificaron los retos siguientes:

- Autonomía del EV
- Tiempos de recarga del EV
- Configuración de la planta de potencia
- Tamaño de las fuentes
- Acoplamiento de múltiples fuentes
- Control de la electrónica de potencia

-
- Cumplimiento con el desempeño del EV
 - Mejora del uso del combustible
 - Vida útil de las fuentes
 - Impacto económico en el desarrollo del EV
 - Desarrollo de la EMS (distribución de energía y potencia abordo)
 - Viabilidad en la implementación de la EMS

Los trabajos revisados abordan estos retos, unos más que otros, pero sin considerarlos todos. Uno de los retos que relajan su importancia, es el tiempo de recarga del combustible. En la mayoría de las investigaciones, consideran que la autonomía del vehículo debe ser suministrada por la energía almacenada en todas las fuentes, y por lo general, minimizan el impacto del tiempo de recarga de las baterías en las configuraciones híbridas de las celdas de combustible. Es decir, no consideran a las celdas de combustible como principal fuente, y en el caso de las baterías, consideran la operación de éstas en modo “depleting” (descarga completa), sin mencionar el método o forma de su recarga. Otro reto que minimizan su importancia, es el dimensionamiento de las fuentes, donde desprecian el impacto que tiene el tamaño de las fuentes en el momento de la distribución de energía/potencia, ignorando la relación que existe entre ellos. Ya que, entre más grande sean éstas, más energía o potencia se pueden almacenar o extraer de ellas, y viceversa. Lo anterior, impacta en gran medida en las cantidades de energía o potencia que podría manejar la EMS. Adicionalmente, son pocos los trabajos que mencionan la viabilidad de la implementación de la EMS que se propone. Muchos de los trabajos consideran aspectos ideales, despreciando el impacto del costo y el tiempo computacional que se necesita para la funcionalidad de la EMS. De igual manera, el costo de inversión que se requerirá implementar una u otra configuración de tren de potencia. Ya que, entre más pequeña sea la planta de potencia, por lo general, más económica saldría integrarla al vehículo.

Un factor importante en el desempeño de la planta de potencia de un EV, es su tiempo de respuesta. Su importancia radica en que, si las fuentes no pueden suministrar la energía/potencia en el tiempo que se requiere, se compromete el desempeño del EV. Algunos trabajos, sin considerar esto, contemplan el uso de ultracapacitores en combinación con un convertidor de potencia, despreciando el retardo que éste le proporciona a la dinámica de los ultracapacitores. Esta combinación reduce los tiempos de descarga y recarga de los ultracapacitores a los tiempos de respuesta de su convertidor asociado. En el caso de las celdas de combustible, también ignoran que éstas no pueden suplir cambios de potencia instantáneas, sólo algunos trabajos consideran un cambio de corriente (A/s) o potencia (W/s) en el diseño de sus EMS. Esto también aplica para el caso de las baterías. Pero en ellas, se considera la tasa de descarga/recarga en términos de su capacidad, la cual varía del tipo de tecnología de la batería y de su fabricación misma. Y que, al igual que las celdas de combustible, algunos trabajos consideran este parámetro. Por último, pocos

trabajos consideran la eficiencia de conversión del combustible. Ya que, entre más eficiente sea esta conversión menos combustible se utilizará y, por lo tanto, menor sería su costo de operación. Si bien, los trabajos que priorizan este parámetro, tratan de ahorrar combustible mediante la EMS, pocos de éstos consideran trabajar a las celdas de combustible en zonas de operación de eficiencias altas. Es decir, la eficiencia de la conversión del combustible se resume en dos puntos de operación, encendido y apagado. Con lo que, se desprecia la ventaja de utilizar a las celdas en todo su rango de operación determinado por su curva de polarización. Por todo lo anterior, en este trabajo se propone una solución que pretender hacer frente a los retos identificados en las investigaciones revisadas.

1.4.1 Propuesta de solución

En cada uno de los trabajos revisados se propone una estrategia de manejo de energía, la cual tienen un objetivo particular y fue diseñada tomando en cuenta parámetros de operación y dimensionamiento de las fuentes. Sin embargo, la comparación de éstas difícilmente podría ser justa, pues la optimización o el rango de operación de cada una de ellas fue ajustado al diseño particular de la estrategia. Por lo anterior, en este trabajo de tesis se contempla una configuración de la planta de potencia y un caso de estudio, considerando todos los retos enlistados anteriormente, en una mayor o menor medida.

En este trabajo de tesis, se hace énfasis en considerar a las celdas de combustible como principal fuente. Es decir, que éstas entregan toda la energía para una autonomía definida. Por lo que, a las baterías se tienen contempladas utilizarlas en modo “*sustained*” (estado de carga final similar al estado de carga inicial, definida como un criterio de diseño). Lo cual permite que la autonomía del vehículo solo dependa de la cantidad de combustible a bordo del vehículo. Adicionalmente, se considera las dinámicas de respuestas de cada fuente, enfocándose en la eficiencia de conversión del hidrógeno

Para lo cual, se tiene la siguiente hipótesis:

Mediante un dimensionamiento “Ad-Hoc” de la planta de potencia híbrida (celdas de combustible, baterías y ultracapacitores) permitirá reducir el costo energético (y costo de inversión) requerido por el vehículo eléctrico de acuerdo a un ciclo de manejo definido para ello. Además, si se considera el diseño de una estrategia de manejo de energía, basado en lógica difusa, que considere el estado de carga de las baterías y de los ultracapacitores (voltaje del bus de DC), permitirá definir el mejor punto de operación de las celdas de combustible para cumplir con el desempeño del vehículo con la mejor eficiencia de conversión del combustible posible, de acuerdo al requerimiento energético del vehículo y el dimensionamiento de su tren de potencia.

Con ese propósito, se planteó el objetivo general siguiente:

Realizar un dimensionamiento de las fuentes de la planta de potencia híbrida (basada en celdas de combustible, baterías y ultracapacitores) con el fin de minimizar el peso adicional de éstas y disminuir el requerimiento energético del vehículo, y diseñar una estrategia de manejo de energía para la planta híbrida que mejore la eficiencia de conversión del combustible, considerando el requerimiento energético del vehículo, y la capacidad de las fuentes, para determinar los mejores puntos de operación, con la finalidad de reducir el consumo de combustible.

Y los objetivos particulares siguientes:

- Proponer un algoritmo de dimensionamiento de la planta de potencia.
- Proponer un procedimiento de diseño de la planta de potencia de celdas de combustible.
- Diseñar una EMS que considere a las celdas de combustible como fuente principal (No-plug-in).
- Analizar el diseño de los convertidores asociados.
- Diseñar una EMS basado en lógica difusa.
- Mejorar la eficiencia de conversión del hidrógeno.

1.5 Marco teórico

Los vehículos eléctricos se postulan como una de las alternativas más prometedoras para hacer frente a los vehículos convencionales, comúnmente llamados de combustión interna. Sin embargo, se tienen algunos retos que vencer para que el vehículo eléctrico tenga el desempeño, versatilidad, autonomía, etc., de un vehículo convencional. Por lo anterior, las investigaciones actuales se han orientado en el desarrollo de tecnologías que permitan emigrar a los vehículos eléctricos, conocidos como cero emisiones. Dentro de dichas investigaciones, como se ha mencionado anteriormente, se han orientado en el dimensionamiento de plantas de potencia híbrida y en el desarrollo de estrategias de manejo de energía, ya que existe una relación muy fuerte entre el dimensionamiento de la planta de potencia y de la EMS. Sin embargo, para ello, se requiere de electrónica de potencia, es decir, de convertidores de potencia que acondicionen los niveles de voltaje y corriente, para controlar la potencia que pueda entregar su fuente asociada.

1.5.1 Vehículos todo eléctricos

Si bien, actualmente existen vehículos híbridos, éstos aún utilizan un motor de combustión interna. El término híbrido proviene del uso de un motor eléctrico en combinación con un motor de combustión interna. De acuerdo con el tamaño del banco de baterías asociado al motor eléctrico de este tipo de vehículo híbrido, las baterías de éste pueden recibir una recarga de energía mediante la red eléctrica doméstica. A este tipo de vehículos se les llama híbridos enchufables o Plug-In hybrid (PHEV, por sus siglas en inglés). Sin embargo, los vehículos “cero emisiones”, son aquellos que cuentan con un sistema de propulsión puramente eléctrica, llamados “todo eléctricos”. En este tipo de vehículos se incluyen los que se basan sólo en baterías (BEV, por sus siglas en inglés), o los que se basan principalmente en celdas de combustible (FCEV). Estos tipos de vehículos cuentan con sus propias ventajas y desventajas, las cuales están asociadas a la tecnología que se utiliza (baterías o celdas de combustible), que incluyen costos de inversión, tiempos de recarga, tasas de carga/descarga (descarga solamente para las FC), entre otros. Por ello, los sistemas de tracción eléctrica híbridos prometen traer mayores beneficios, al potencializar las ventajas de las fuentes del sistema híbrido, así como evitar las desventajas de cada una de ellas.

1.5.2 Sistemas de tracción eléctrica híbrida

Los sistemas de tracción eléctrica que cuentan con una planta de potencia híbrida aprovechan las ventajas de cada una de las fuentes y se evitan sus desventajas. Además, se han reportado que, en los sistemas híbridos, el tamaño de las fuentes se reduce. Sin embargo, en este tipo de sistemas de tracción, el control de la planta de potencia se vuelve más complejo. La complejidad del control se incrementa con el número de convertidores asociados a cada fuente a controlar.

Las fuentes de energía, estudiadas mayormente en trabajos de investigación, incluyen a celdas de combustible, baterías y capacitores. Dentro de las celdas de combustible, las de tipo PEM son las más prometedoras en el ámbito de aplicaciones vehiculares. En el caso de las baterías, las de tecnología de iones de litio son las más utilizadas en los BEV, por tener una mayor densidad de energía que sus equivalentes. Por último, en el caso de los capacitores, los ultracapacitores son los que tienen mayor densidad de potencia en comparación que sus equivalentes. Por lo que utilizar una combinación de los anteriores, trae grandes beneficios, que utilizar sólo uno tipo de fuentes. A continuación, se describe las fuentes más utilizadas en configuraciones de plantas de potencia de vehículos híbridos todo eléctricos.

Celdas de combustible (FC)

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que utilizan el oxígeno y el hidrógeno para producir energía eléctrica mediante una reacción química. Ésta es muy útil como fuente de energía, ya que se considera como una fuente de energía “limpia”, debido a que sus únicos subproductos son agua y calor. La potencia eléctrica que la celda de combustible puede suministrar depende del diseño de su construcción, así como de su curva de polarización. Ésta última se usa para expresar el voltaje de la celda como una función de su corriente, la cual comprende tres regiones, como se muestra en la Fig. 1[83].

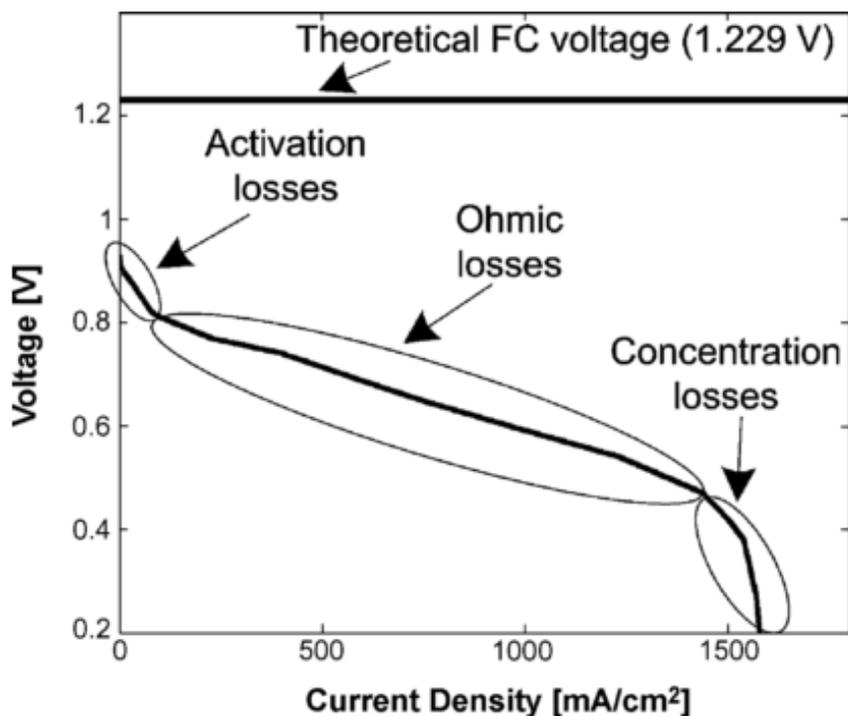


Fig. 1.- Curva de polarización de una celda de combustible

En la primera región, en voltajes altos y corrientes bajas, las pérdidas están relacionadas con la energía requerida para inicializar la reacción (zona de activación o zona de circuito abierto). En la segunda región, las pérdidas son atribuidas principalmente a la resistencia óhmica de la resistividad electrolítica y la resistencia externa de los electrodos y conexión (región óhmica o lineal). En la tercera región, que se localiza en corrientes altas y voltajes bajos, el comportamiento se limita por la tasa de transferencia de masa, es decir, la concentración de los reactantes. Este comportamiento se puede modelar mediante una ecuación cuasi-estática, donde el voltaje depende de la corriente de operación, y que se puede describir por la ecuación de Nernst menos las pérdidas dentro de la celda, como [83]:

$$E_{FC} = E_{r,T,P} - \frac{R_g T}{\alpha F} \ln \left(\frac{j + i_{loss}}{i_0} \right) - \frac{R_g T}{nF} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - j} \right) - jR_i \quad (1.1)$$

donde E_{FC} es el potencial de la celda, $E_{r,T,P}$ es el potencial reversible a una cierta temperatura y presión de operación, R_g es una constante del gas, T es la temperatura de operación, α es el coeficiente de transferencia, n es el número de electrones que se transfieren en la reacción, y F es la constante de Faraday (96487 coulomb/equivalente). Por otro lado, j es la densidad de corriente, i_{loss} es la pérdida por corrientes internas, i_0 es la densidad de corriente de intercambio, i_L es el límite de la densidad de corriente, y R_i es la resistencia interna.

Así como la curva de polarización de una celda de combustible muestra como el voltaje de ésta varía según la corriente que se le demande. También la eficiencia de las celdas varía dependiendo en qué punto del rango de operación se encuentre, tal como se muestra en la Fig. 2 [84].

Sin embargo, la eficiencia de una FC (η_{FC}) está dado por la siguiente ecuación:

$$\eta_{FC} = \frac{P_{FC}}{K_{H_2} \dot{m}_{H_2}} \quad (1.2)$$

donde P_{FC} es la potencia eléctrica de la celda, K_{H_2} es la entalpía y \dot{m}_{H_2} es el flujo del hidrógeno. Además, el consumo de hidrógeno de un conjunto de celdas de combustible está dado por:

$$\dot{m}_{H_2} = - \frac{N_{FC} M_{H_2} I_{FC}}{2F} \quad (1.3)$$

donde N_{FC} es el número de celdas, M_{H_2} es la masa molar del hidrógeno, I_{FC} es la corriente de las celdas de combustible y F es la constante de Faraday. De (1.2) y (1.3) se tiene que la eficiencia es una función del voltaje de la celda de combustible y parámetros fisicoquímicos del hidrógeno. Y, por lo tanto, es variable en todo el rango de operación de la celda de combustible. Simplificando ambas ecuaciones, se tiene que la eficiencia de una celda de combustible está dada por:

$$\eta_{FC} = \frac{V_{cell}}{1.254} \quad (1.4)$$

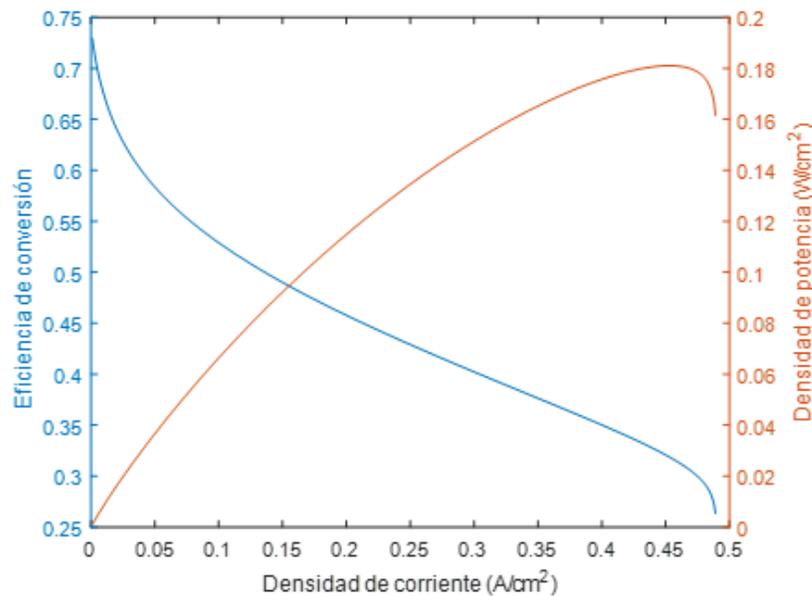


Fig. 2.- Eficiencia de una mono-celda.

La planta de potencia basada en celdas de combustible está integrada por un conjunto (varias celdas) de FC y, por lo regular, por componentes auxiliares que regulan la operación de las mismas, a lo que se le conoce como balance de planta (BOP, por sus siglas en inglés). Tales componentes consumen cierta cantidad de corriente para operar, la cual puede ser entregada por las mismas celdas o una batería auxiliar. Ya que ésta energía no es útil porque es consumida internamente por el sistema, el cálculo de la eficiencia es diferente.

Baterías (BB)

Una batería es un dispositivo que consiste en uno o más celdas electroquímicas con conexiones externas para suministrar energía eléctrica a dispositivos eléctricos/electrónicos. Un tipo de baterías, son las llamadas “recargable”, las cuales se pueden descargar y recargar varias veces utilizando una corriente eléctrica. Dentro de este tipo, se incluyen las baterías de plomo-acido (Pb-Ac, por sus siglas en inglés) o las de Iones de Litio (Li-Ion, por sus siglas en inglés), las cuales son utilizadas en vehículos eléctricos.

Las baterías tienen una energía específica mucho más baja (energía por unidad de masa) que el combustible que utilizan los vehículos convencionales. Sin embargo, en los vehículos eléctricos, este parámetro es compensando en cierta medida por el uso de motores eléctricos, cuya eficiencia es mayor que la de los motores de combustión interna.

Al igual que las celdas de combustible, las características de una batería pueden variar de acuerdo con el ciclo de carga/descarga de la misma. Asimismo, el tiempo de vida de una batería se debe a muchos factores, que incluyen su química interna, corriente de drenado, y la temperatura.

La capacidad de una batería es la cantidad de carga eléctrica que puede entregar a un voltaje nominal y a una cierta tasa de corriente de descarga. Una celda pequeña tiene menos capacidad que una celda más grande con la misma química, aunque tengan el mismo voltaje en circuito abierto. La capacidad se mide en Amper-hora (Ah). La fracción de la carga almacenada que puede entregar una batería depende de múltiples factores, incluida la química de la batería, la velocidad a la que entrega la corriente eléctrica, el voltaje requerido, entre otros factores. Cuanto mayor sea la tasa de descarga, menor será su capacidad.

El término “C-rate” es una medición de la velocidad a la cual la batería se puede cargar o descargar. Se define como la corriente de la batería dividida entre el consumo teórico bajo el cual la batería entregaría su capacidad nominal en una hora. El término “C-rate” se usa para clasificar la corriente máxima que puede suministrar una batería de manera segura en un circuito eléctrico. Sin embargo, debido a la pérdida de resistencia interna y los procesos químicos dentro de las celdas, una batería rara vez entrega la capacidad nominal de la placa de identificación en solo una hora.

En este trabajo de tesis, un modelo de batería de Li-Ion genérico se utiliza para determinar el voltaje y el estado de carga (SOC) de las baterías de acuerdo con el diagrama que se muestra en la Fig. 3².

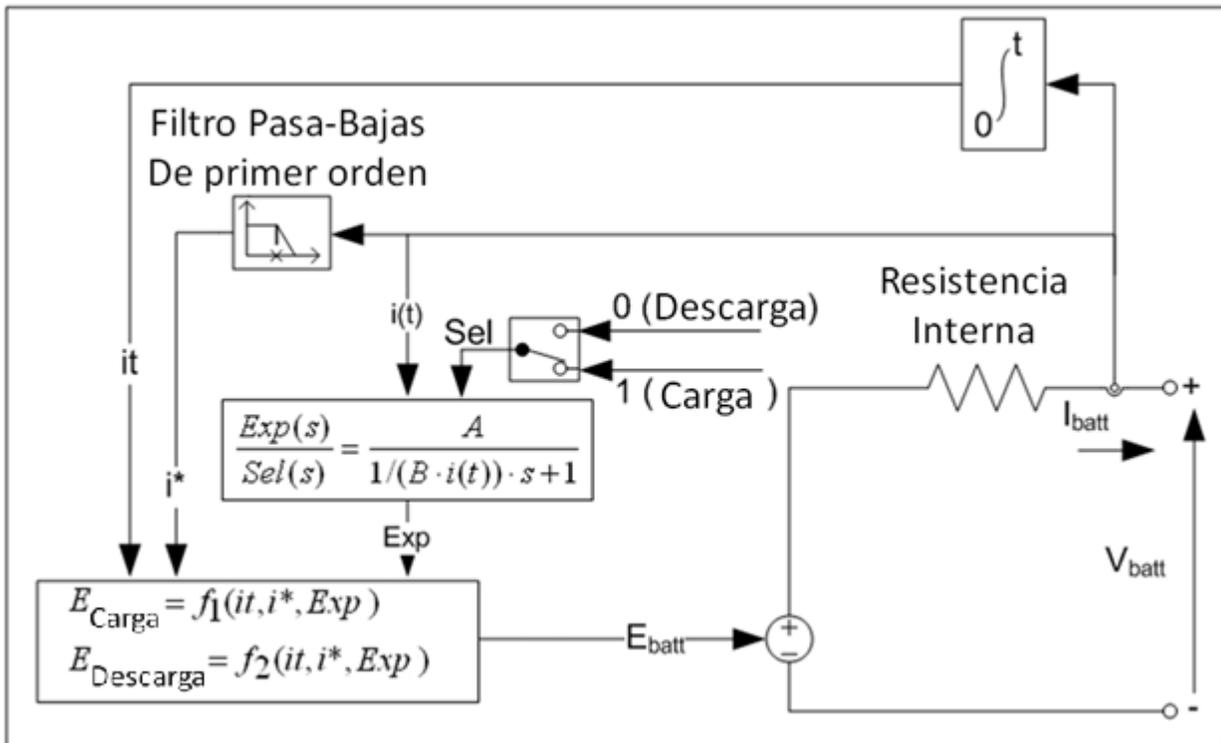


Fig. 3.- Modelo para la carga/descarga de una batería de Li-Ion

² Modelo obtenido de Simulink de Matlab 2017a.

En el caso de una batería de Li-Ion, las ecuaciones de carga/descarga que la rigen, son las siguientes:

Modelo de descarga ($i^* > 0$)

$$E_{BB} = f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q_{BB}^{\max}}{Q_{BB}^{\max} - it} i^* - K \frac{Q_{BB}^{\max}}{Q_{BB}^{\max} - it} it + A \cdot e^{(-B \cdot it)} \quad (1.5)$$

Modelo de carga ($i^* < 0$)

$$E_{BB} = f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q_{BB}^{\max}}{it + 0.1Q_{BB}^{\max}} i^* - K \frac{Q_{BB}^{\max}}{Q_{BB}^{\max} - it} it + A \cdot e^{(-B \cdot it)} \quad (1.6)$$

donde:

E_{BB} es el voltaje no lineal de la batería (V)

E_0 es un voltaje constante determinado por el fabricante (V)

K es una constante de polarización de la batería (Ah^{-1})

i^* es la corriente de la batería filtrada (a frecuencias bajas) (A)

I_{BB}^{cell} es la corriente de la batería (A)

it es la capacidad extraída (Ah)

Q_{BB}^{\max} es la capacidad máxima de la batería (Ah)

A es el voltaje exponencial (V)

B es la capacidad exponencial (Ah^{-1})

Ultracapacitores (UC)

Los ultracapacitores son capacitores con un valor de capacitancia mucho más alta que otros capacitores, pero con límites de voltaje bajos, que cierra la brecha entre los capacitores electrolíticos y las baterías recargables. Típicamente, estos capacitores almacenan de 10 a 100 veces más energía por unidad de volumen o masa que los capacitores electrolíticos. Estos pueden recibir y entregar una carga mucho más rápido que las baterías. Además, toleran muchos más ciclos de carga/descarga que las baterías recargables.

Los UC se utilizan en aplicaciones que requieren muchos ciclos de carga/descarga rápidos, tales como vehículos eléctricos donde se utilizan para almacenar la energía proveniente de los frenados regenerativos, donde el flujo de energía puede ser muy alto en tiempos muy cortos. Además, éstos tienen una densidad de potencia mayor que las baterías. Sin embargo, su densidad de energía es menor comparado con una batería.

En la Fig. 4 se muestra el diagrama de distribución de la carga en un UC de doble capa, cuando se carga (izquierda) y cuando se descarga (derecha). La combinación de la superficie ampliada y la distancia pequeña de separación de las placas incrementa la capacitancia y la energía que puede almacenar un UC. La sección transversal a la derecha muestra un separador entre los electrodos, para evitar cortocircuitos.

La carga almacenada en el UC está dada por [64]:

$$Q_{UC}^{cell} = C_{UC}^{cell} \cdot V_{UC}^{cell} \quad (1.7)$$

donde C_{UC} es la capacitancia del UC.

La corriente del UC se define como:

$$\frac{d}{dt} Q_{UC}^{cell} = -I_{UC}^{cell} \quad (1.8)$$

Y el voltaje del UC se asume como:

$$V_{UC}^{cell} = V_{UC}^{OC} - R_i \cdot I_{UC}^{cell} \quad (1.9)$$

donde V_{OC} es el voltaje del UC en circuito abierto, y R_i es su resistencia interna.

Finalmente, la energía almacenada en el UC está dado por:

$$E_{UC}^{cell} = \frac{1}{2} C_{UC}^{cell} \cdot (V_{UC}^{cell})^2 \quad (1.10)$$

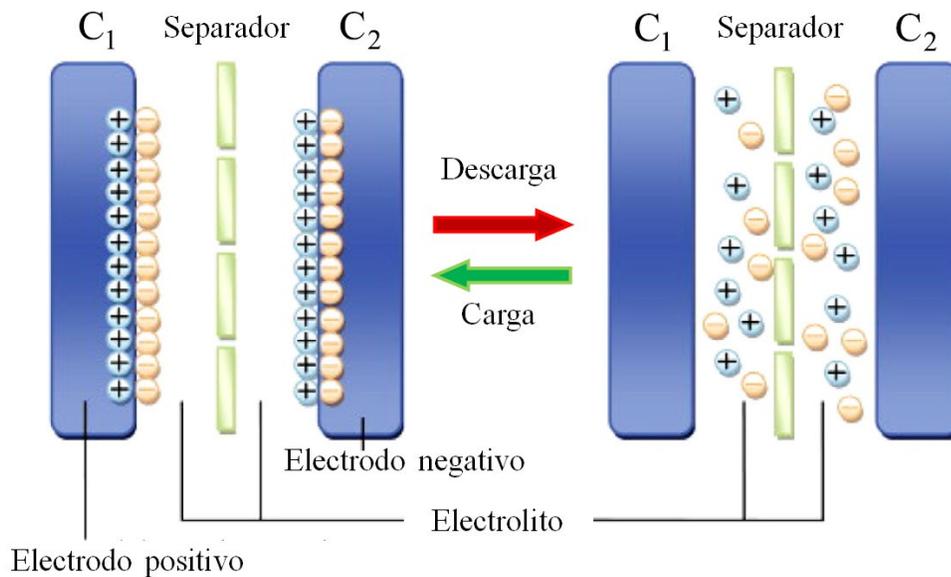


Fig. 4.- Diagrama de distribución de la carga en un UC de doble capa

1.5.3 Configuraciones híbridas

Las configuraciones híbridas de las plantas de potencia traen grandes beneficios como la reducción del tamaño de las fuentes. Además, cuando se asocia una estrategia de manejo de energía, se pueden evitar las desventajas de cada fuente, con el uso de las otras fuentes, de acuerdo con el escenario que se presente en el vehículo. La electrónica de potencia juega un papel importante en las configuraciones de plantas de potencia híbridas ya que, con el uso de convertidores de DC-DC, permite el acoplamiento de más de una fuente de energía a bordo del vehículo eléctrico. En la literatura se pueden encontrar diversas configuraciones de plantas de potencia basadas en FC. En éstas se incluye el uso de BB y/o UC. En la Fig. 5 se muestra las configuraciones más utilizadas en plantas de potencia integradas por FC y UC. En la configuración de la Fig. 5a, se muestra al banco de UC con un convertidor asociado. Lo anterior, permite utilizar toda la energía que el UC puede almacenar. Sin embargo, la dinámica se restringe a la que pueda proporcionar su convertidor asociado. Además, el convertidor añade peso y volumen al vehículo eléctrico. Por el otro lado, la configuración de la Fig. 5b, permite utilizar toda la dinámica del UC (tasas de carga/descarga de hasta miles de A/s). Sin embargo, la energía útil (utilizable en el vehículo) se acota a los límites de voltaje que opera el bus de DC del vehículo eléctrico. Es decir, se tendría energía almacenada que no se podría utilizar, pues estaría debajo de un umbral mínimo de operación del bus de DC.

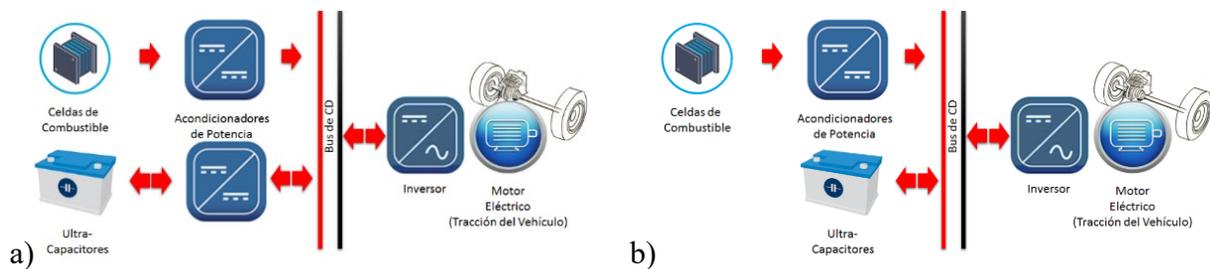


Fig. 5.- Configuraciones de plantas de potencia integradas por FC y UC.

En la literatura también se pueden encontrar configuraciones híbridas donde sólo se utiliza FC y BB. Al igual que el caso de UC, las configuraciones más utilizadas se muestran en la Fig. 6.

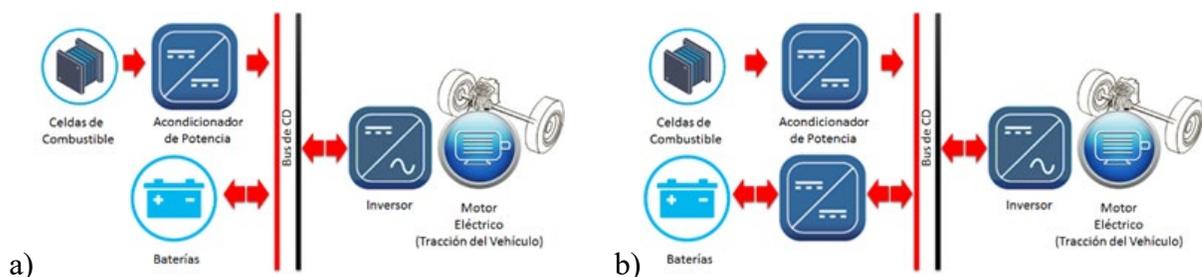


Fig. 6.- Configuraciones de plantas de potencia integradas por FC y BB.

En la configuración de la Fig. 6a se muestra a las baterías conectadas directamente al bus de DC. Con esta configuración se ahorra el uso de un convertidor de potencia, así como se disminuye el control de la distribución de energía al sólo controlar la energía proveniente de las celdas de combustible. Sin embargo, en esta configuración, se debe buscar un banco de BB, cuya resistencia interna y el voltaje nominal se acoplen al voltaje de operación del bus de DC con el fin de aprovechar al máximo la potencia y energía que pudiera entregar las baterías. En la configuración de la Fig. 6b, el convertidor de potencia asociada a las BB permite desacoplar el voltaje del bus de DC con respecto al voltaje de las baterías, por lo que da una versatilidad de configurar al banco de baterías de acuerdo a las necesidades del diseño del vehículo. Sin embargo, se incrementa la complejidad del control del sistema completo, así como se añade el peso y volumen adicional del convertidor.

Por último, en la Fig. 7 se muestran las configuraciones más utilizadas en plantas de potencia híbridas integradas por FC, BB y UC. En la Fig. 7a se muestra una configuración, donde las BB se conectan directamente al bus de DC, mientras que los UC se conectan mediante un convertidor de potencia. Esta configuración trae las ventajas mencionada para las configuraciones que se muestran en la Fig. 5a y la Fig. 6a, así con sus respectivas desventajas. En la configuración de la Fig. 7b, se tiene un control total sobre la energía y potencia de cada una de las fuentes. Sin embargo, la complejidad del control de la planta completa se eleva considerablemente. Adicionalmente, éste debe ser lo suficientemente rápido para responder de acuerdo con las necesidades del vehículo eléctrico sin comprometer su desempeño.

En la Fig. 7c se muestra la configuración de la planta de potencia híbrida que se seleccionó para el desarrollo del trabajo de esta tesis. Esta configuración permite potencializar las ventajas de las fuentes que la integran y evitar sus desventajas. Adicionalmente, la complejidad del sistema de distribución de potencia y energía, se encuentra en un punto intermedio. Ya que, ésta sólo se debe controlar el flujo de energía de las celdas de combustible y de las baterías, e indirectamente la de los ultracapacitores.

Esta configuración permite utilizar la respuesta rápida de los ultracapacitores, tanto para la recarga de energía proveniente de los frenados regenerativos, como de las demandas transitorias que pueda presentar el vehículo en su desempeño. Además, ya que en esta configuración híbrida se reduce el tamaño de las fuentes, el tamaño del banco de ultracapacitores se reduce para los objetivos mencionados anteriormente. Por lo que, con ese tamaño, la energía almacenada no útil (la que se encuentra debajo del voltaje límite inferior del bus de DC) se puede considerar despreciable. Además, se reduce el peso adicional que se podría añadir al vehículo al quitar el convertidor asociado a los ultracapacitores.

Por otro lado, el uso de un convertidor asociado al banco de baterías, permite desacoplar los voltajes de operación del bus de DC del de operación de las baterías. Esto ayuda al dimensionar el

banco de baterías, pues se pueden elegir configuraciones de celdas de baterías en serie-paralelo que no necesariamente tuvieran que cumplir con el voltaje de operación del bus de DC. Además, mediante el convertidor se puede limitar la corriente de carga/descarga de las baterías, lo que podría incrementar la vida útil de éstas, ya que la vida útil de las baterías de Li-Ion son sus susceptibles a estos parámetros.

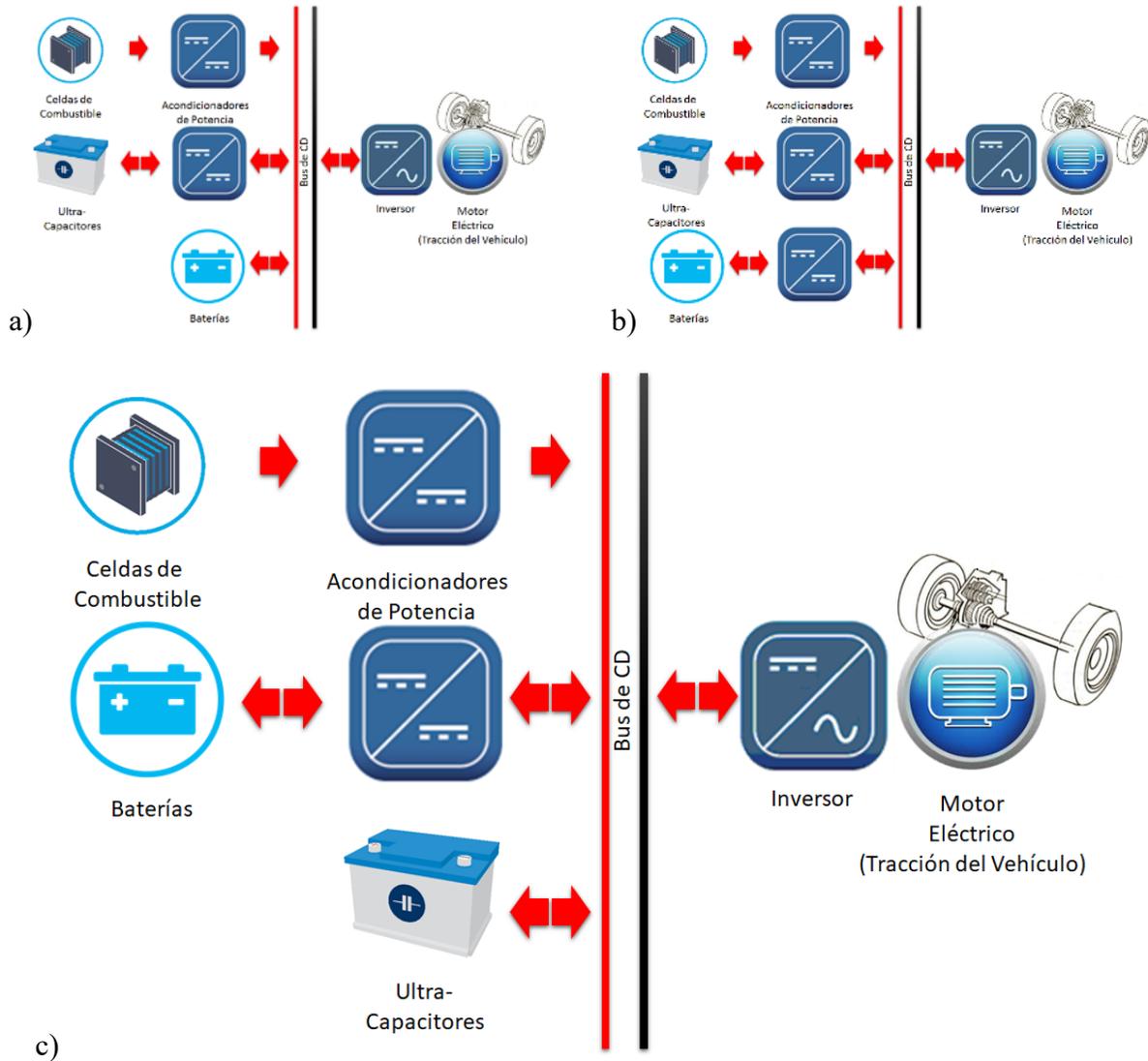


Fig. 7.- Configuraciones de plantas de potencia integradas por FC, BB y UC.

Ya que los convertidores de potencia permiten el acoplamiento de múltiples fuentes de energía a bordo de vehículo eléctrico, así como el control de la energía desde y hacia estas fuentes, en el Capítulo 2, se presenta un análisis de la operación de los mismos, en las configuraciones más utilizadas: en modo reductor y en modo elevador.

II

Diseño y análisis de convertidores de potencia

Los convertidores de potencia o de “DC-DC” son fuentes de alimentación conmutadas. Tienen grandes virtudes tales como una salida estable en un rango amplio, relación de densidad de potencia grande y una respuesta dinámica buena. Además, su eficiencia es mayor que los reguladores lineales, ya que se encuentran por encima del 90% y se utiliza ampliamente en aplicaciones portátiles, incluyendo computadoras, barcos, aviones y automóviles. Dentro de las topologías de convertidores, dos de ellos resaltan por su simplicidad en el diseño, así como su operación, éstos son los tipo reductor y elevador, o mejor conocidos como buck y boost, respectivamente. Adicionalmente, cuando hablamos de configuraciones de plantas de potencia híbrida, muy difícilmente se podría dejar de hablar de los convertidores de potencia. Ya que éstos dispositivos electrónicos de potencia permite el acoplamiento de más de una fuente a un punto de conexión en común, conocido como bus de DC.

En la literatura se encuentra diversos tipos de control para los convertidores. En [85] se presenta un control basado en la banda dinámica de histéresis que se presenta en el convertidor. La técnica de control se basa en el método de predicción de la trayectoria del modelo del estado del convertidor. La técnica fue implementada en un prototipo, donde se demuestra que con este control se mejora la respuesta transitoria en la regulación de un nivel de voltaje del convertidor tipo buck en presencia de perturbaciones. En [86] se presenta el diseño de un convertidor tipo buck para manejo de un motor de DC. La técnica de control que aquí se utiliza se basa en aplanamiento diferencial. Esta técnica se utiliza para sistemas no lineales planos diferenciales continuamente, por lo que los dispositivos de conmutación son reemplazados por fuentes ideales de voltaje. Los resultados que se muestran son mediante simulación. La ventaja de esta técnica es la eliminación de comportamientos dinámicos no deseados que ocurren por la conmutación realizada por la

técnica de modulación por ancho de pulso. En [87] se presenta el control de un convertidor buck bajo el esquema de control robusto basado en un observador proporcional integral sigma-delta generalizado. En este esquema de control se diseña un observador basado en un controlador retroalimentado lineal robusto para la regulación y el seguimiento de trayectorias. La aplicación de esta técnica toma el modelo normalizado del convertidor. El control implementado con el convertidor, vía simulaciones, muestra ser robusto con respecto a incertidumbre en la carga y variaciones con respecto al tiempo. En [88] se presenta el diseño de un convertidor buck utilizando el método de espacio de estados promediado. Se diseña un compensador para el controlador de voltaje del convertidor. La estabilidad del controlador con este compensador en lazo cerrado se mejoró considerablemente. El diseño toma en cuenta el rango de voltaje de entrada, el voltaje de salida, así como el rizado en corriente y voltaje. La respuesta y la estabilidad se comprueban mediante simulación. Existen otros controladores para este tipo de convertidores, tales como control polinomial, modos deslizantes, matrices lineales de desigualdades, etc.[89]–[91], por mencionar algunos.

A continuación, se describe a detalle los tipos de convertidores mencionados anteriormente.

2.1 Convertidor buck

El convertidor buck es un convertidor tipo reductor DC-DC sin aislamiento galvánico, que obtiene a su salida V_o un voltaje menor que en su entrada V_g . Es una clase de fuente de alimentación de potencia en modo conmutado, que normalmente contiene al menos dos semiconductores (un diodo d y un transistor Q) y al menos un elemento de almacenamiento de energía, un capacitor C , un inductor L , o una combinación de ambos. La topología del convertidor buck se muestra en la Fig. 8.

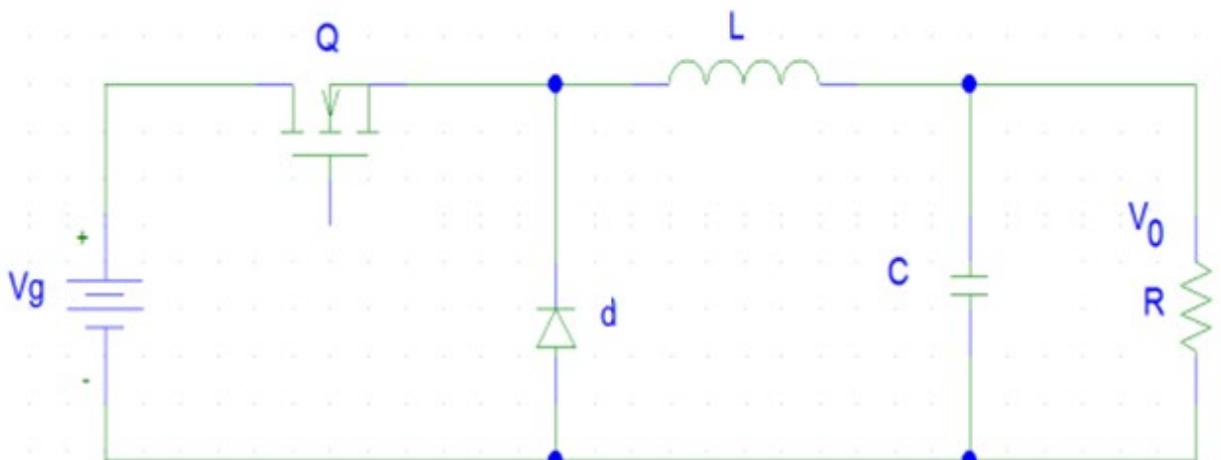


Fig. 8.- Topología del convertidor tipo buck

La operación básica del convertidor buck es controlar la corriente del inductor L mediante dos interruptores (el diodo y el transistor). En el convertidor idealizado, todos los componentes se consideran perfectos, por lo tanto, la caída de voltaje en el diodo y en el transistor se considera nula. También se considera que la resistencia del inductor es cero, y la capacitancia en la salida es infinita. Además, se supone que los voltajes de entrada y salida no cambian en el transcurso de un ciclo de conmutación. Por lo anterior, su análisis matemático se muestra a continuación.

En la Fig. 8 se muestra la topología del convertidor buck, la operación de éste incluye dos estados según la etapa de conmutación Q (encendido/apagado). Si se define el estado encendido del dispositivo conmutado en el intervalo $[0, T_{on}]$, y el estado apagado en el intervalo de tiempo $[T_{on}, T_s]$, entonces el periodo de conmutación es T_s y la frecuencia, su inverso. De lo anterior, se puede definir los parámetros siguientes:

Ciclo de trabajo:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (2.1)$$

Y la salida de voltaje y corriente promediados:

$$\begin{aligned} V_o &= DV_g \\ I_o &= \frac{V_o}{R} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Considerando dispositivos semiconductores ideales, se tiene las ecuaciones de estado siguientes. Para cuando Q está encendido, se tiene:

$$\begin{aligned} L \frac{di_L}{dt} + v_c &= v_g \\ C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} &= i_L \\ i_g &= i_L \\ v_o &= v_c \end{aligned} \quad (2.3)$$

Y para cuando Q está apagado, se tiene:

$$\begin{aligned}
L \frac{di_L}{dt} + v_c &= 0 \\
C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} &= i_L \\
i_g &= 0 \\
v_o &= v_c
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Utilizando (2.3), (2.4) y la técnica de espacio de estado promediado, se tiene que el sistema equivalente siguiente:

$$\begin{aligned}
L \frac{d\hat{i}_L(t)}{dt} &= -\hat{v}_c(t) + D\hat{v}_g(t) + V_g\hat{d}(t) \\
C \frac{d\hat{v}_c(t)}{dt} &= \hat{i}_L(t) - \frac{\hat{v}_c(t)}{R} \\
\hat{v}_o &= \hat{v}_c(t) \\
\hat{i}_g(t) &= D\hat{i}_L(t) + I_L\hat{d}(t)
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Aplicando la transformada de Laplace a (2.5), se obtiene:

$$\begin{aligned}
Ls\hat{i}_L(s) &= -\hat{v}_c(s) + D\hat{v}_g(s) + V_g\hat{d}(s) \\
Cs\hat{v}_c(s) &= \hat{i}_L(s) - \frac{\hat{v}_c(s)}{R} \\
\hat{v}_o(s) &= \hat{v}_c(s) \\
\hat{i}_g(s) &= D\hat{i}_L(s) + I_L\hat{d}(s)
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Finalmente, simplificando (2.6), se tiene:

$$\begin{aligned}
\hat{v}_o(s) = \hat{v}_c(s) &= \frac{D}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \hat{v}_g(s) + \frac{V_g}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \hat{d}(s) \\
G_{vg}(s) &= \left. \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_g(s)} \right|_{\hat{d}(s)=0} = \frac{D}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \\
G_{vd}(s) &= \left. \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_g(s)=0} = \frac{V_g}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

donde $\hat{d}(s)=0$ significa que no hay cambios en el ciclo de trabajo y $\hat{v}_g(s)=0$ que no hay variación en el voltaje de entrada. Además, $G_{vg}(s)$ es la función de transferencia de control a la salida del convertidor y $G_{vd}(s)$ es la función de transferencia de línea a la salida de la conversión.

La función de transferencia del modulador es:

$$G_{dc}(s) = \frac{\hat{d}(s)}{\hat{v}_c(s)} = \frac{1}{V_m} \quad (2.8)$$

Donde V_m es el valor máximo del pico de la señal triangular, para la generación de la modulación por ancho de pulso.

En aplicaciones típicas del convertidor buck se desea obtener un voltaje de salida constante. Sin embargo, para el uso de este convertidor con el diseño de la estrategia de manejo de energía que se propone en este trabajo de tesis, se desea tener una salida de corriente constante. Por lo anterior, se debe trasladar el sistema de ecuaciones (2.7) para utilizarlo en modo corriente. Por lo que, considerando (2.5), la función de transferencia en modo corriente se obtiene de:

$$\begin{aligned} Ls\hat{i}_L(s) &= -\hat{v}_c(s) + D\hat{v}_g(s) + V_g\hat{d}(s) \\ Cs\hat{v}_c(s) &= \hat{i}_L(s) - \frac{\hat{v}_c(s)}{R} \\ \hat{v}_o(s) &= \hat{v}_c(s) \\ \hat{i}_g(s) &= D\hat{i}_L(s) + I_L\hat{d}(s) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Por lo que:

$$\begin{aligned} \hat{v}_c(s) &= \frac{\hat{i}_L(s)}{Cs + \frac{1}{R}} \\ \hat{i}_L(s) \left[Ls + \frac{1}{Cs + \frac{1}{R}} \right] &= D\hat{v}_g(s) + V_g\hat{d}(s) \\ \hat{i}_L(s) &= \frac{(RCs + 1)(D\hat{v}_g(s) + V_g\hat{d}(s))}{R \left(LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1 \right)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Finalmente,

$$G_{ig}(s) = \left. \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{v}_g(s)} \right|_{\hat{d}(s)=0} = \frac{D(RCs+1)}{RLCs^2 + Ls + R} \quad (2.11)$$

$$G_{id}(s) = \left. \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_g(s)=0} = \frac{V_g(RCs+1)}{RLCs^2 + Ls + R} \quad (2.12)$$

donde (2.12) es la función de transferencia deseada.

Mediante (2.12) se puede diseñar un controlador para este tipo de convertidor, con el cual se puede hacer el seguimiento de referencia de corriente. Esta configuración facilita su implementación y su control en configuraciones de tren de potencia de más de una fuente. Adicionalmente, si el convertidor se diseña en tipo multi-fase (mínimo dos fases), la corriente se reparte entre el número de fases, con lo cual se mejora la eficiencia, se reduce el tamaño de los inductores, así como la magnitud el rizado total de la corriente de salida. Este tipo de configuración se utilizó en [82].

2.2 Convertidor boost

El convertidor elevador o convertidor tipo boost, es un convertidor de potencia que obtiene a su salida un voltaje mayor que el de su entrada. Al igual que el convertidor buck contiene al menos dos elementos semiconductores y dos elementos almacenadores de energía. La topología del convertidor boost se muestra en la Fig. 9.

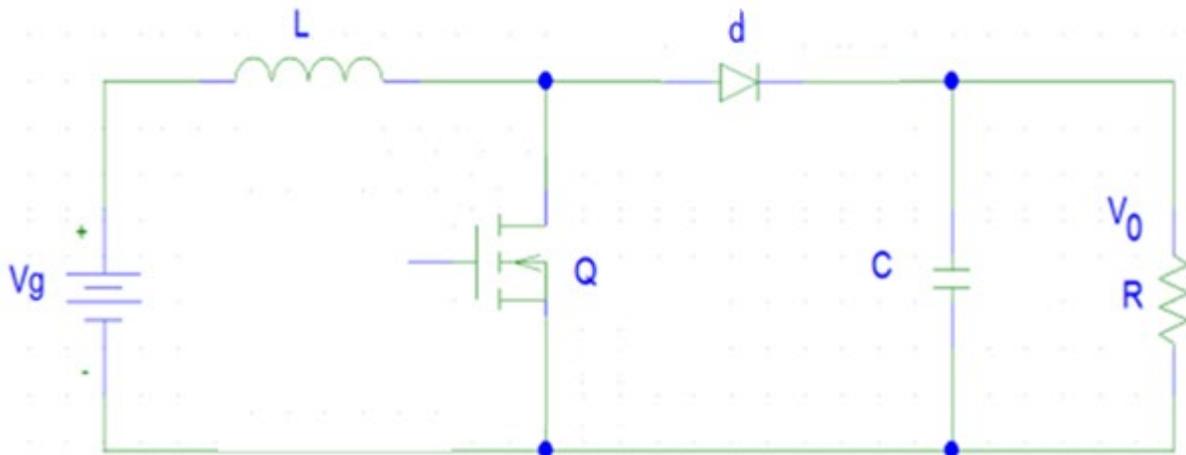


Fig. 9.- Topología del convertidor boost.

Para el análisis del convertidor boost se parte de la obtención de la función de transferencia en modo corriente. El procedimiento es similar al que se muestra para el convertidor buck, tal como se muestra a continuación.

Las ecuaciones del convertidor boost cuando el estado del interruptor está encendido son:

$$\begin{aligned} L \frac{di_L}{dt} &= v_g \\ v_c &= -CR \frac{dv_c}{dt} \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} v_g \\ y &= \begin{bmatrix} i_0 \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_i \end{aligned} \quad (2.14)$$

Y las ecuaciones cuando el interruptor está apagado son las siguiente:

$$\begin{aligned} i_L &= C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} \\ v_g &= L \frac{di_L}{dt} + v_c \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} v_g \\ y &= \begin{bmatrix} i_0 \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_g \end{aligned} \quad (2.16)$$

Por lo tanto, la evaluación del estado promediado, es la siguiente:

$$\begin{aligned}
A &= DA_1 + D'A_2, D' = (1-D) \\
A &= D \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} + (1-D) \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-D)}{L} \\ \frac{(1-D)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \\
B &= DB_1 + D'B_2 \\
B &= D \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} + (1-D) \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \\
C &= DC_1 + D'C_2 \\
C &= D \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + (1-D) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-D) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Y para un punto de equilibrio se tiene:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-D)}{L} \\ \frac{(1-D)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} v_g \tag{2.18}$$

El punto en estado inactivo es:

$$X = \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_g}{R(1-D)^2} \\ \frac{v_g}{(1-D)} \end{bmatrix} \tag{2.19}$$

Por lo tanto, el punto de salida de equilibrio está dado por:

$$Y = \begin{bmatrix} (1-D) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_g}{R(1-D)} \\ \frac{v_g}{(1-D)} \end{bmatrix} \tag{2.20}$$

El modelo en pequeña señal sobre el punto de referencia se encuentra dado por:

$$\begin{aligned}\frac{d\hat{x}(t)}{dt} &= A\hat{x}(t) + B\hat{u}(t) + [(A_1 - A_2)x + (B_1 - B_2)u] \hat{d}(t) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) + E\hat{u}(t) + [(C_1 - C_2)x + (E_1 - E_2)u] \hat{d}(t)\end{aligned}\quad (2.21)$$

Es decir:

$$\begin{aligned}(A_1 - A_2) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \\ (B_1 - B_2) &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ (C_1 - C_2) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (2.22)$$

Y entonces:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_L(t) \\ \hat{v}_c(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-D)}{L} \\ \frac{(1-D)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L(t) \\ \hat{v}_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \hat{v}_g(t) + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_c \end{bmatrix} \hat{d}(t) \\ \hat{y}(t) &= \begin{bmatrix} \hat{i}_0(t) \\ \hat{v}_0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-D) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L(t) \\ \hat{v}_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_c \\ (1-D) \end{bmatrix} \hat{d}(t)\end{aligned}\quad (2.23)$$

Es decir:

$$\begin{aligned}Ld \frac{\hat{i}_L(t)}{dt} &= -(1-D)\hat{v}_c(t) + \hat{v}_i(t) + \frac{v_i(t)}{(1-D)} \hat{d}(t) \\ C \frac{d\hat{v}_c(t)}{dt} &= (1-D)\hat{i}_L(t) - \frac{1}{R}\hat{v}_c(t) - \frac{v_i}{R(1-D)} \hat{d}(t)\end{aligned}\quad (2.24)$$

La transformada de Laplace de (2.24) es:

$$\begin{aligned}Ls\hat{i}_L(s) &= -(1-D)\hat{v}_c(s) + \hat{v}_g(s) + \frac{v_g}{(1-D)} \hat{d}(s) \\ Cs\hat{v}_c(s) &= (1-D)\hat{i}_L(s) - \frac{1}{R}\hat{v}_c(s) - \frac{v_g}{R(1-D)} \hat{d}(s)\end{aligned}\quad (2.25)$$

Al despejar \hat{v}_c en ambas ecuaciones, e igualándolos, se tiene:

$$\begin{aligned}
 -\frac{Ls\hat{i}_L(s)}{(1-D)} + \frac{\hat{v}_g(s)}{(1-D)} + \frac{v_g}{(1-D)^2}\hat{d}(s) &= \frac{R(1-D)}{RCs+1}\hat{i}_L(s) - \frac{v_g}{(RCs+1)(1-D)^2}\hat{d}(s) \\
 \hat{i}_L(s) &= \frac{(RCs+1)}{RLCs^2 + Ls + R(1-D)^2}\hat{v}_g + \frac{1}{(1-D)}\frac{v_g(RCs+1)\hat{d}(s) + v_g\hat{d}(s)}{RLCs^2 + Ls + R(1-D)^2}
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

Por lo tanto, la función de transferencia en modo corriente es:

$$\left. \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_g=0} = \frac{1}{(1-D)}\frac{v_g(RCs+1) + v_g}{RLCs^2 + Ls + R(1-D)^2} = \frac{1}{RLC(1-D)}\frac{v_g(RCs+1) + v_g}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{(1-D)^2}{LC}} \tag{2.27}$$

Al igual que en el caso del convertidor buck, (2.27) se puede utilizar para diseñar un controlador para hacer seguimiento de referencias de corriente. Además, en configuraciones multi-fase, se incrementa la eficiencia del convertidor, así como se reduce el tamaño de sus componentes. Este tipo de configuración se utilizó en [82].

2.3 Controlador del convertidor de potencia

El añadir un controlador al convertidor es con la finalidad de que éste alcance una señal de salida deseada. Y el diseño e implementación de éste, por redes de compensación, se realiza de una manera fácil relativamente.

La red de compensación se utiliza con el amplificador del error, por lo que requiere de una señal retroalimentada. Esta red se puede implementar con un simple amplificador de voltaje a voltaje, es decir, un amplificador operacional tradicional. El propósito de añadir una compensación al amplificador del error es para contrarrestar alguna de las ganancias y fases que están contenidas en la función de transferencia de control a la salida del convertidor, que pudieran desestabilizar al mismo. El objetivo de la red es hacer que la función de transferencia global del sistema (función de transferencia del convertidor junto con el de la red de compensación) satisfaga el criterio de estabilidad. Esto es, evitar que se tenga una fase en lazo cerrado cercano a los 360 grados, que el margen de fase tenga una ganancia más grande que 1(0 dB). Y también es deseable que se tenga una pendiente en la curva de ganancia en el punto de cruce un valor de -20dB/década. Los márgenes de fase de 45° a 60° (360° menos que el retraso total de la fase en lazo cerrado) son considerados como valores seguros que llevan a una respuesta de carga transitoria bien amortiguada [92].

Existen diversas clases de redes de compensación, entre las cuales se encuentran los de tipo I, II y III, con sus ventajas y desventajas propias. Sin embargo, el compensador tipo II, por lo general, es utilizado para los convertidores en modo corriente [92].

La red de compensación tipo II de la Fig. 10a ofrece una respuesta transitoria mejorada cuando el convertidor está sujeto a cambios en la carga de salida. En la Fig. 10b se muestra la respuesta en la frecuencia de la red de compensación tipo II. El amplificador compensador tipo II añade una banda RC de ganancia plana y mejora la respuesta en la fase en el rango de medianas frecuencias. El incremento de la fase se logra a partir de la separación del cero y del polo del compensador.

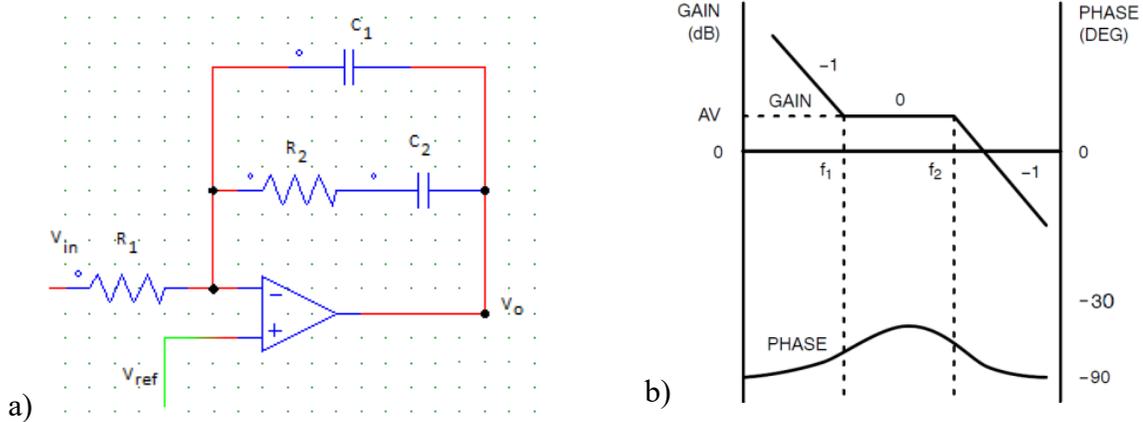


Fig. 10.- a) Compensador tipo II, utilizando un amplificador operacional, b) respuesta en frecuencia de la red de compensación tipo II.

Se debe notar que este compensador siempre tiene una red de fase negativa y no se puede utilizar para mejorar la fase en la etapa de potencia. Por esta razón, los compensadores de tipo II no pueden ser usados para el control en modo voltaje en modo de conducción continua (CCM, por sus siglas en inglés) donde hay una larga caída de la fase justo después de la frecuencia de resonancia.

La función de transferencia del compensador tipo II es la siguiente:

$$\frac{V_{OUT}(s)}{V_{IN}(s)} = \frac{R_2 C_2 s + 1}{R_1 C_1 R_2 C_2 s^2 + (R_1 C_1 + R_1 C_2) s} \quad (2.28)$$

Con esta función de transferencia y la de los convertidores en modo corriente, se procede al análisis de la estabilidad de cada uno de ellos.

2.4 Estabilidad de los convertidores

El análisis de la estabilidad del convertidor buck parte de la función de transferencia en modo corriente del convertidor, la cual se muestra a continuación:

$$G_{id} = \frac{V_g}{R} \frac{1+RCs}{LC \left(s^2 + \frac{1}{CR}s + \frac{1}{LC} \right)} = \frac{V_g}{R} \frac{\omega_n^2 (1+RCs)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\omega_n^2 = \frac{1}{LC}, 2\xi\omega_n = \frac{1}{CR} \Rightarrow \xi = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.29)$$

$$\therefore G_{id} = \frac{V_g \omega_n}{2\xi R} \frac{2\xi\omega_n + s}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} = \alpha \frac{2\xi\omega_n + s}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \alpha = \frac{V_g \omega_n}{2\xi R}$$

Posteriormente, se incluye la función de transferencia del compensador tipo II, la cual se muestra a continuación:

$$G_{com} = \frac{R_2 C_2 s + 1}{R_1 s (C_1 R_2 C_2 s + C_2 + C_1)} = \frac{\beta s + 1}{\beta \gamma s^2 + \gamma s + C_1 R_1 s}, \beta = R_2 C_2, \gamma = R_1 C_2 \quad (2.30)$$

Luego, se obtiene la función de transferencia en lazo cerrado, como se observa adelante:

$$G_{id} G_{com} = \frac{\alpha (2\xi\omega_n + s)(\beta s + 1)}{(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)(\beta \gamma s^2 + \gamma s + C_1 R_1 s)} \quad (2.31)$$

$$= \frac{\alpha (2\beta\xi\omega_n s + \beta s^2 + 2\xi\omega_n + s)}{s^4 (\beta\gamma) + s^3 (\gamma + C_1 R_1 + 2\xi\omega_n \beta\gamma) + s^2 (2\xi\omega_n \gamma + 2\xi\omega_n C_1 R_1 + \beta\gamma\omega_n^2 + \alpha\beta) + s (\omega_n^2 \gamma + C_1 R_1 \omega_n^2 + \alpha + 2\alpha\beta\xi\omega_n) + 2\alpha\xi\omega_n}$$

$$G_{LC} = \frac{G_{id} G_{com}}{1 + G_{id} G_{com}} \quad (2.32)$$

Finalmente se realiza la evaluación de la estabilidad mediante el criterio de Routh-Hurwitz, la cual indica que el sistema es estable, es decir, si la primera columna no hay cambio de signo.

s^4	$\beta\gamma$	$2\xi\omega_n \gamma + 2\xi\omega_n C_1 R_1 + \beta\gamma\omega_n^2 + 2\alpha\beta$	$4\alpha\xi\omega_n$	
s^3	$\gamma + C_1 R_1 + 2\xi\omega_n \beta\gamma$	$\omega_n^2 \gamma + C_1 R_1 \omega_n^2 + 2\alpha + 4\alpha\beta\xi\omega_n$	0	
s^2	ϕ_1	$4\alpha\xi\omega_n$	0	
s^1	ϕ_2	0	0	
s^0	$4\alpha\xi\omega_n$	0	0	(2.33)

donde:

$$\phi_1 = \frac{2\xi\omega_n(\gamma^2 + \gamma C_1 R_1 + C_1 R_1 + C_1^2 R_1^2 + 2\xi\omega_n \beta \gamma + 2\xi\omega_n C_1 R_1 \beta \gamma + \omega_n^2 \beta^2 \gamma^2)}{2\xi\omega_n \beta \gamma + C_1 R_1 + \gamma} \quad (2.34)$$

$$\phi_2 = \frac{\omega_n^2 \gamma^3 + \omega_n^2 \gamma^2 C_1 R_1 + \omega_n^2 \gamma C_1 R_1 + \omega_n^2 \gamma^2 C_1^2 R_1^2 + 2\xi\omega_n^3 \beta \gamma^3 + 4\xi\omega_n^3 \beta \gamma^2 C_1 R_1 + \dots}{\phi_1} \quad (2.35)$$

Ya que todos los valores de los parámetros del convertidor y del compensador son positivos, ϕ_1 es positivo. Y para ϕ_2 , los valores positivos son mayores que los negativos, por lo que se puede decir que ϕ_2 , también es positivo. Ya que ambos son positivos, no existe cambio de signo, y el sistema en lazo cerrado es estable. La estabilidad del sistema se valida mediante los diagramas de bode correspondientes que se muestran en el Anexo A.1.

En el caso del convertidor boost, de la ecuación (2.27) se observa que el denominador de la función de transferencia es muy similar al del convertidor buck. Por lo que, el denominador de la función de transferencia en lazo cerrado también lo es. Y, por lo tanto, en análisis de la estabilidad se realiza de la misma forma, donde se obtiene que también es estable. Para validar lo anterior, se realizó el análisis de estabilidad mediante diagramas de bode de los sistemas en lazo cerrados, los cuales se muestran en el Anexo A.2. En ese mismo anexo se muestra el seguimiento de referencias de los convertidores.

Del análisis de estabilidad de los convertidores se observa que el compensador tipo II tiene una cierta robustez ante incertidumbre y variación en sus parámetros ($\pm 50\%$ de su valor nominal). Ya que, a pesar de esta variación, el sistema controlador-convertidor es estable. La variación en el parámetro C_1 del compensador tipo II fue el que tuvo menos modificaciones en la respuesta del convertidor. Y en todas las variaciones realizadas del análisis de estabilidad, siempre se mantuvo el margen de ganancia infinita, mientras que, para el margen de fase, la mayor modificación fue de un 30° con respecto al margen de fase con el valor nominal del parámetro. Debido a estos márgenes, y al diseño del convertidor, éste puede operar en modo corriente y realizar el seguimiento de referencias bajo esta modalidad.

2.5 Validación del controlador del convertidor

Para la estrategia de manejo de energía que se propone en este trabajo, se contempla la distribución de energía mediante la regulación de la corriente de salida de las fuentes. Para ello, el controlador del convertidor debe garantizar el seguimiento de las referencias que designe la EMS.

Para validar la operación del controlador del convertidor, se desarrolló una tarjeta electrónica prototipo, donde se embebió el compensador tipo II. Este controlador se implementó en una plataforma de pruebas desarrollada por el CENIDET, en donde se incluye un convertidor reductor multifase con parámetros electromecánicos que se presentan en [82].

En la Fig. 11 se muestra el diseño del diagrama del controlador, el cual incluye el compensador tipo II, así como los generadores de señales de modulación por ancho de pulsos (PWM, por sus siglas en inglés) y el acoplamiento de éstas para su uso con el convertidor multifase de [82].

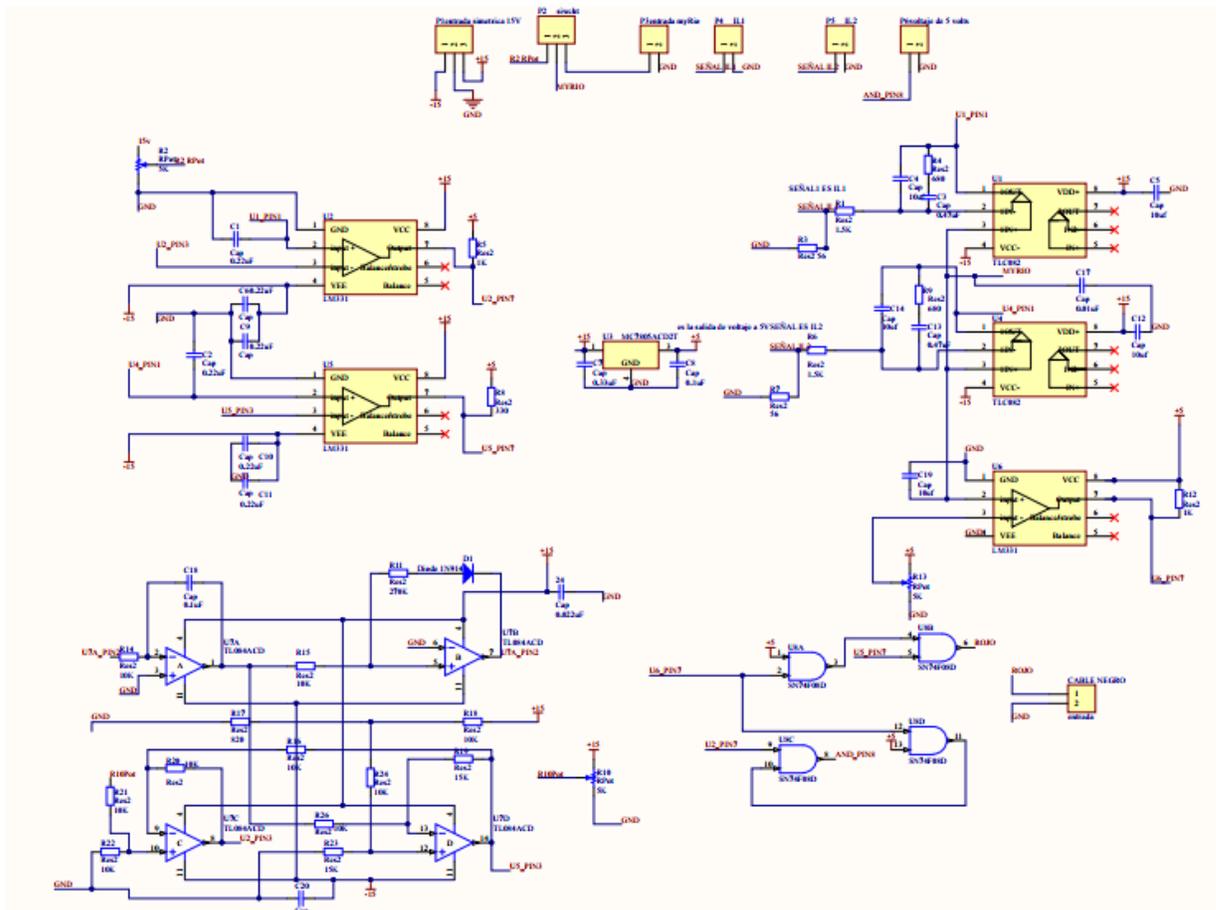


Fig. 11.- Diagrama del controlador compensador tipo II.

En la Fig. 12 se muestra la tarjeta electrónica prototipo desarrollada para controlar el convertidor modo corriente. En ésta se incluye el compensador tipo II, cuyo diseño y análisis se mostraron en las secciones anteriores. Para validar el funcionamiento del controlador, se utilizó la tarjeta prototipo de la Fig. 12 en el convertidor desarrollado en [82] y una fuente de potencia de CD de laboratorio. Se realizaron diversas pruebas variando la condición del voltaje del bus, y de la corriente de referencia. De la Fig. 13 a la Fig. 15 se muestran los resultados más representativos de las pruebas realizadas.

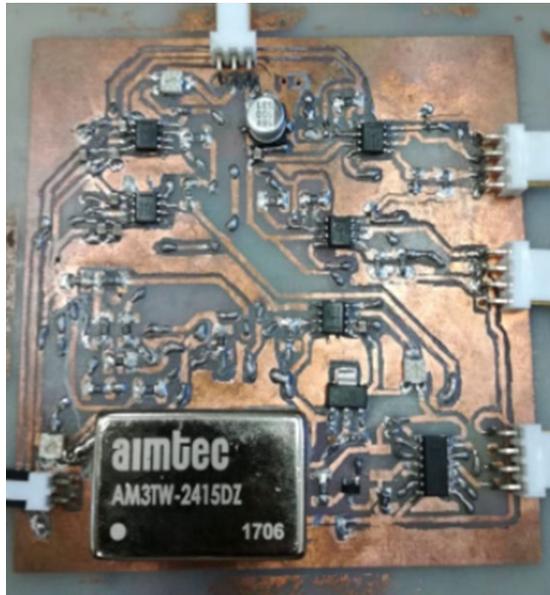


Fig. 12.- Tarjeta electrónica prototipo para el control del convertidor modo corriente.

En la Fig. 13 se muestra el comportamiento del convertidor al realizar un seguimiento en el cambio de la corriente de referencia de 0A a 5A, con un voltaje de entrada de 100V y un voltaje del bus de 51V. Se aprecia que se realiza el seguimiento de referencia (a pesar de un pequeño offset en el mismo) en el canal 4 del osciloscopio. También se estima que la eficiencia del convertidor es de un 85% aproximadamente, al comparar el voltaje y corriente de la fuente de laboratorio con la el voltaje y corriente de salida del convertidor.

CANAL 1: Voltaje de salida de la fuente de potencia de laboratorio.
 CANAL 2: Corriente eléctrica a la entrada del convertidor.
 CANAL 3: Voltaje del bus.
 CANAL 4: Corriente eléctrica a la salida del convertidor.

Prueba 1:
 Voltaje del bus: 51V. Corriente de referencia a la salida: 5A.
 Sobretiro: 0 A, 0%. Eficiencia: 85%. Aprox.

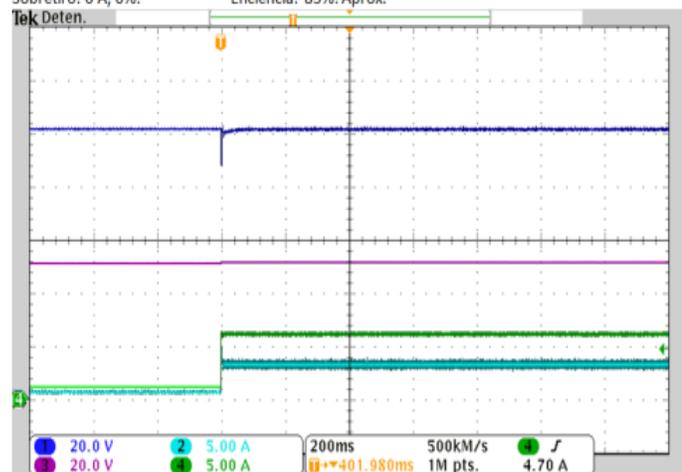


Fig. 13.- Seguimiento de referencia a 5A con un voltaje de salida del convertidor de 51V.

En la Fig. 14 se muestra el comportamiento del convertidor al realizar un seguimiento en el cambio de la corriente de referencia de 0A a 10A, con un voltaje de entrada de 100V y un voltaje del bus de 55V. Se aprecia que se realiza el seguimiento de la referencia de corriente en el canal 4 del osciloscopio. También se estima que la eficiencia del convertidor es de un 82% aproximadamente. En los cambios de referencia de corriente presentados por el momento, el seguimiento de la referencia se realiza sin presentarse ningún sobretiro. Además, el comportamiento del voltaje de la fuente, que se observa en el canal 1 del osciloscopio, no presenta un cambio drástico.

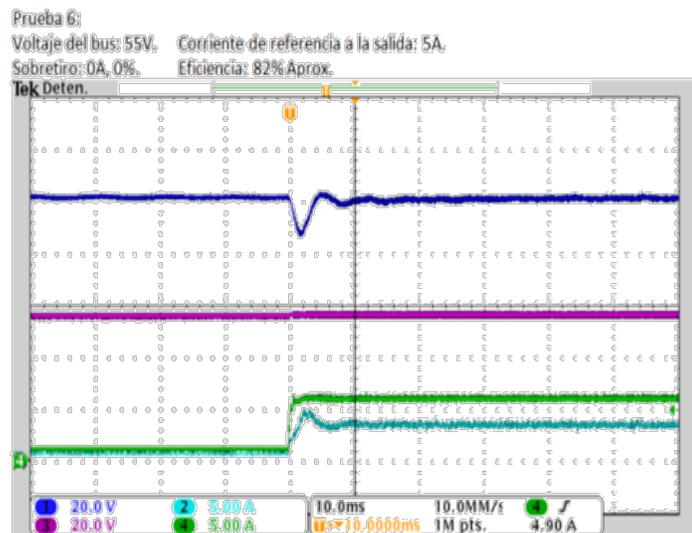


Fig. 14.- Seguimiento de referencia a 10A del convertidor con un voltaje de salida del convertidor de 55V.

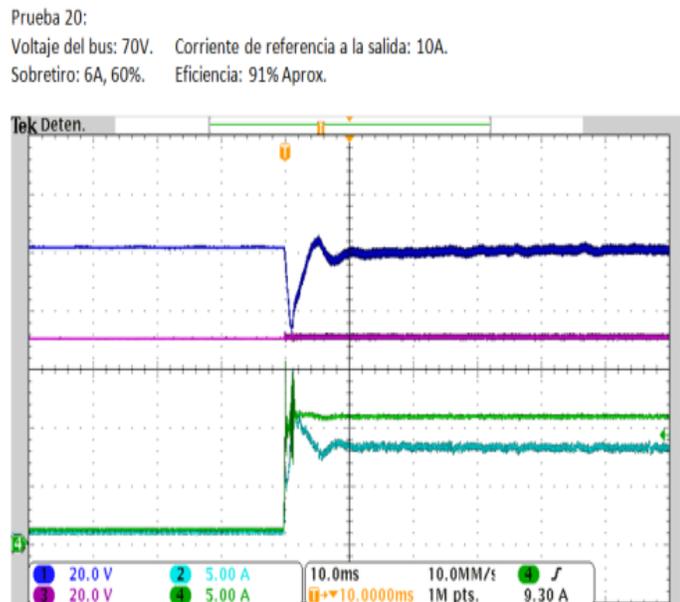


Fig. 15.- Seguimiento de referencia a 10A del convertidor con un voltaje de salida del convertidor de 70V.

En la Fig. 15 se muestra el comportamiento del convertidor al realizar un seguimiento en el cambio de la referencia de 0A a 10A, con un voltaje de entrada de 100V y un voltaje de salida de 70V. Se observa que, en esta condición, el seguimiento de referencia tiene un sobretiro de casi un 60%, además de un rizo, de corto tiempo, en la salida. Este comportamiento se debe a que el voltaje de la fuente (voltaje de entrada) cae muy cercano al voltaje de salida. Sin embargo, después de ese pequeño período, la corriente alcanza la referencia. Por lo que el control fuerza a que se alcance el valor de la referencia deseada.

Como se observaron en las figuras anteriores, el controlador compensador tipo II, garantiza que la corriente de salida del convertidor alcance la referencia deseada, de acuerdo a los escenarios y condiciones descritas en cada situación anterior.

Por lo anterior, este tipo de controlador es el deseado para integrar junto con la estrategia de manejo de energía que se propone en este trabajo, ya que facilita la integración de los convertidores al tren de potencia, así como el control del flujo de la energía de las fuentes.

III

Diseño y dimensionamiento de la planta de potencia híbrida

La integración de más de un tipo de fuente de energía en los vehículos eléctricos ha mostrado que se potencializan las ventajas y se evitan las desventajas de éstas. Sin embargo, el sistema completo se vuelve más complejo, ya que se requiere del desarrollo de técnicas de distribución de energías, conocidas como estrategias de manejo de energía (EMS). La implementación de una adecuada EMS puede mejorar la eficiencia del sistema, y en consecuencia la reducción del combustible e incremento de la autonomía. Para ello, se requiere, además de la EMS, un adecuado dimensionamiento de las fuentes a bordo. Ya que, el tamaño de éstas, define la energía adicional requerida para mover ese peso adicional incorporado al vehículo. Además, el tamaño de las fuentes determina la cantidad de energía que se les puede extraer, así como la tasa máxima de extracción de potencia de cada una de ellas en un tiempo determinado. Por lo que existe una relación entre el dimensionamiento de las fuentes y la EMS.

El dimensionamiento de las fuentes y de la EMS impacta de manera significativamente en el desempeño, costo y ahorro de combustible. Por lo que, el objetivo del dimensionamiento de la planta de potencia híbrida es buscar que el tamaño de las fuentes adicionen el menor peso³ posible al vehículo para reducir su costo energético y con ello ahorrar combustible. En este trabajo de tesis se planteó el desarrollo de una metodología para el dimensionamiento de la planta de potencia

³ Si bien, la masa y el peso son dos propiedades diferentes de la materia, en este trabajo de tesis se considera al peso como la masa del vehículo. Lo anterior, con el fin de mantener el lenguaje coloquial utilizado en el sector automotriz en las hojas de especificaciones de sus vehículos.

híbrida de un vehículo eléctrico integrado por celdas de combustible, baterías y ultracapacitores, con el enfoque mencionado anteriormente, y considerando los parámetros mecánicos de un vehículo en específico, como los que se muestran en la Fig. 16, y de un ciclo de manejo. El dimensionamiento inicia con el cálculo del requerimiento energético, el cual se plantea en la subsección siguiente.

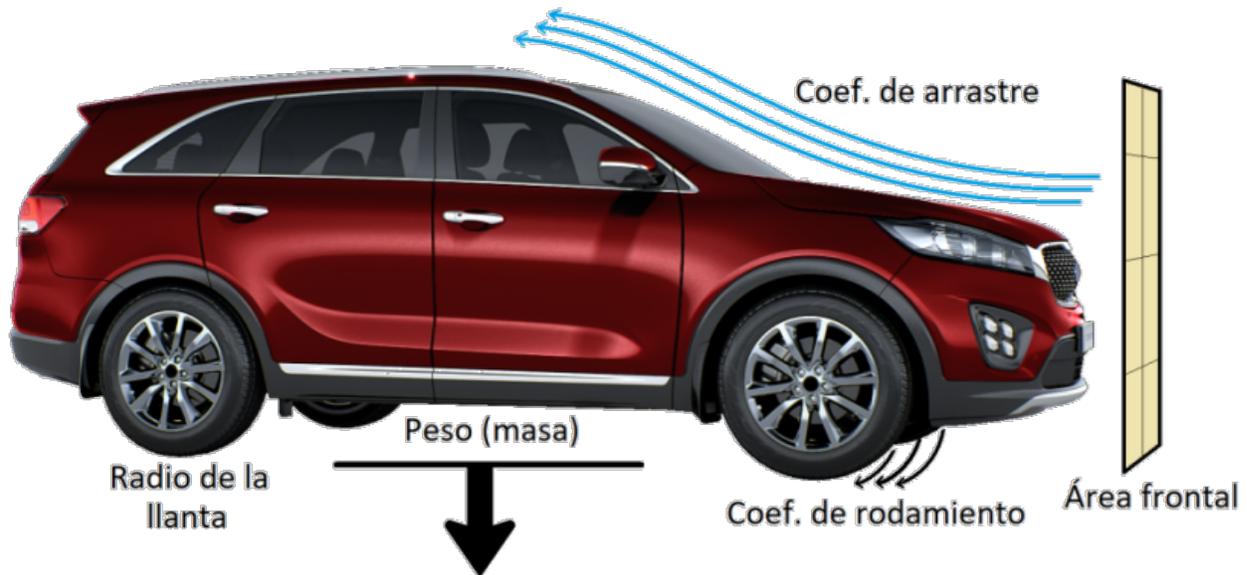


Fig. 16.- Parámetros de configuración del vehículo eléctrico híbrido basado en celdas de combustible

3.1 Cálculo del requerimiento energético

Para el cálculo del requerimiento energético y de potencia del vehículo se requiere conocer el comportamiento del mismo. Éste se puede deducir desde un ciclo de manejo y de los parámetros mecánicos del vehículo. En este trabajo de tesis, se propone una metodología para el dimensionamiento de una planta de potencia híbrida, acorde a la configuración del tren de potencia seleccionado. El método inicia con el cálculo del requerimiento energético, que se presenta a continuación.

La metodología que se propone considera que el tren de potencia debe cumplir con todo el requerimiento de potencia y energía del vehículo, de acuerdo a un ciclo de manejo seleccionado. Este método se puede usar para cualquier vehículo, definido por sus parámetros, como se muestra en la Fig. 16, y por el tren de potencia seleccionado (ver Fig. 7c), para definir la potencia y la energía requerida por el vehículo a lo largo del ciclo de manejo seleccionado. La estimación del requerimiento energético se determina a través de un balance de energía de las diferentes fuerzas que actúan en el vehículo eléctrico. La fuerza que se necesita para mover el vehículo hacia adelante F_x , tiene que vencer las fuerzas siguientes: la resistencia de rodamiento R_x , el arrastre

aerodinámico Fd , la fuerza requerida para acelerar el vehículo $m \cdot a$, y la fuerza w para superar la componente de fuerza debido al peso del vehículo que actúa en un camino con una pendiente de ángulo θ . La fuerza que se necesita para la tracción Fx , está dada por la suma de todas las fuerzas [93]:

$$Fx = m \cdot a + Rx + Fd + w \quad (3.1)$$

$$Rx = C_R \cdot m \cdot g \cdot \cos(\theta) \quad (3.2)$$

$$Fd = \frac{1}{2} \rho \cdot A_f \cdot C_a \cdot Vel^2 \quad (3.3)$$

$$w = m \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (3.4)$$

donde m es la masa total del vehículo, a es la aceleración del vehículo en (3.1). En (3.2), C_R es el coeficiente de rodamiento, g es el coeficiente de aceleración gravitacional, y θ es el ángulo de la pendiente del camino. Finalmente, ρ es la densidad del aire, A_f es el área frontal del vehículo, C_a es el coeficiente de arrastre aerodinámico, y Vel es la velocidad del vehículo.

Por lo tanto, es posible obtener la potencia mecánica requerida en las llamas P_M , la potencia eléctrica requerida por el tren de potencia P_E , y la energía requerida por toda la planta de potencia a lo largo del ciclo de manejo:

$$P_M = Fx \cdot Vel$$

$$P_E = \frac{P_M}{\eta_d \cdot \eta_{M/G} \cdot \eta_c} \quad (3.5)$$

donde η_d , $\eta_{M/G}$ y η_c , son las eficiencias de la transmisión, del motor/generador y del **driver** (controlador/manejador/acondicionador) del motor, respectivamente.

$$E = \int_0^t P_E \cdot dt \quad (3.6)$$

La fuerza inercial almacenada en los componentes rotatorios no se considera dentro del análisis, ya que, cuando se calculó, ésta representa menos del 1.36% de la energía total requerida por el vehículo [94] (ver Anexo A.3). Además, se considera que esa parte será recuperada en los frenados regenerativos.

La metodología de dimensionamiento considera la potencia y energía máximas para calcular el tamaño de cada fuente, de acuerdo a (3.1)-(3.6). El método considera tres restricciones para el dimensionamiento:

-
1. Las celdas de combustible es la principal fuente de energía, y la que debe de entregar toda la energía requerida por el vehículo a lo largo del ciclo de manejo.
 2. El vehículo eléctrico recupera parte de la energía de los frenados regenerativos.
 3. El balance energético de las baterías y los ultra-capacitores debe ser cero o cercano a ello.

Como se mencionó anteriormente, el ciclo de manejo es un factor importante en la estimación del requerimiento energético del vehículo, éste se describe a continuación.

3.1.1 Ciclo de manejo

El ciclo de manejo es un perfil de velocidades en un plano velocidad-tiempo, que representa una forma típica de conducir en una ciudad o autopista. El ciclo de manejo es una herramienta útil para conocer la energía y potencia para mover un vehículo con características específicas, las cuales se encuentran planteadas en las ecuaciones matemáticas que define su comportamiento.

Los ciclos de manejo se desarrollan en diferentes países y organizaciones en el mundo, para evaluar el rendimiento de los vehículos en varias formas, por ejemplo, estimación del consumo de combustible, emisiones contaminantes, etc. Otro uso del ciclo de manejo es para la simulación de los vehículos para la validación de su desempeño. En específico, éstos se utilizan para la evaluación de los sistemas de propulsión para predecir, no sólo el desempeño de vehículos de combustión interna, sino también para vehículos todo eléctricos, como los basados en baterías, celdas de combustible o un sistema híbrido.

Existen diversos ciclos de manejo, que inicialmente fueron diseñados para la evaluación de la emisión de los gases contaminantes de vehículos de combustión interna. Sin embargo, con el auge en el desarrollo de vehículos todo eléctricos, se han desarrollado ciclos de manejo nuevos, que consideran este tipo de vehículos, como los conocidos como WLTP. Los ciclos de manejo WLTP (World harmonized Light-duty vehicles Test Procedure), es un procedimiento global y armonizado para determinar los niveles contaminantes, emisiones de CO₂ y consumo de combustible de vehículos de combustión interna e híbridos, así como toda la gama de vehículos todo eléctricos. Uno de los objetivos principales de los procedimientos de prueba WLTP es hacer coincidir mejor las estimaciones de laboratorio del consumo de combustible y de las emisiones contaminantes, con las mediciones realizadas en una condición de conducción en carretera [95].

Los procedimientos de prueba WLTP se basan en los ciclos de manejo nuevos WLTC (Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycles) para medir el consumo medio de combustible, las emisiones de CO₂, así como las emisiones de contaminantes de vehículos turísticos y vehículos comerciales ligeros [96]. El procedimiento de prueba provee una guía estricta

con respecto a las condiciones del vehículo en la carretera (resistencia al movimiento), cambio de marcha, peso total del vehículo (que puede incluir equipo adicional, carga y pasajeros), entre otras. Se aplican un ciclo WLTC dependiendo de la clase de vehículo. Éste se encuentra definido por la relación potencia/peso PWr en W/kg (potencia nominal del motor/peso en vacío).

- CLASS I.- Para vehículos con potencia baja. Es decir, $PWr \leq 22$.
- CLASS II.- Vehículos con una relación peso potencia entre 22 y 34. Es decir, $22 < PWr \leq 34$.
- CLASS III.- Vehículos con potencias altas. Es decir, $PWr > 34$.

Para el ciclo de manejo WLTC CLASS III, éste se divide en cuatro fases de manejo, cada uno con una velocidad máxima diferente (ver Fig. 17).

- Fase baja: Hasta 56.5 km/h.
- Fase media: hasta 76.66 km/h.
- Fase alta: hasta 97.4 km/h.
- Fase extra-alta: hasta 131.3 km/h

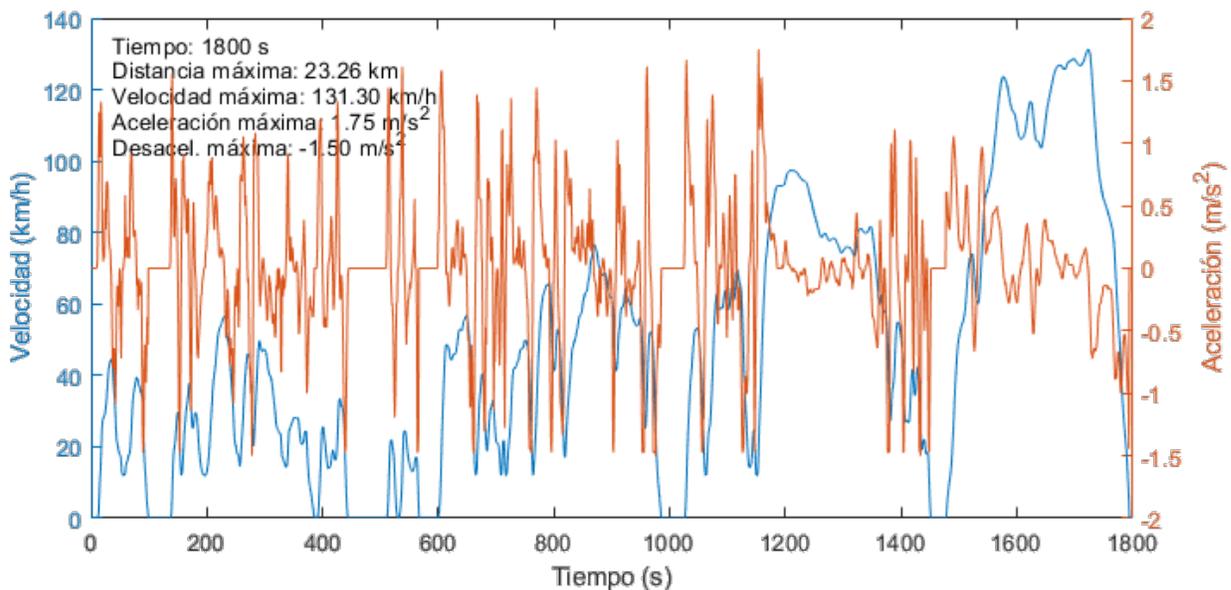


Fig. 17.- Ciclo de manejo WLTC CLASS III.

Estas fases de manejo simulan escenarios urbanos, sub-urbanos, rurales y de autopistas, respectivamente, con una división equitativa entre caminos urbanos y rurales. En la Tabla 4 se muestran los parámetros que integran el ciclo de manejo WLTC CLASS III por cada fase.

Tabla 4.- Resumen de los parámetros del ciclo de manejo WLTC CLASS III por fases.

Parámetro	Fase baja	Fase media	Fase alta	F. Extra alta	Total
Duración (s)	589	433	455	323	1800
Duración de la parada (s)	150	49	31	8	235
Distancia (m)	3095	4756	7162	8254	23266
% de paradas	26.5%	11.1%	6.8%	2.2%	13.4%
Velocidad máxima (km/h)	56.5	76.6	97.4	131.3	
Velocidad promedio sin paradas (km/h)	25.3	44.5	60.7	94.0	53.5
Velocidad promedio con paradas (km/h)	18.9	39.4	56.5	91.7	46.5
Desaceleración máxima (m/s ²)	-1.5	-1.5	-1.5	-1.44	
Aceleración máxima (m/s ²)	1.61	1.61	1.67	1.06	

Para el ciclo de manejo WLTC CLASS II, éste se divide en tres fases: baja, media y alta, como se muestra en la Tabla 5 y se observa en la Fig. 18.

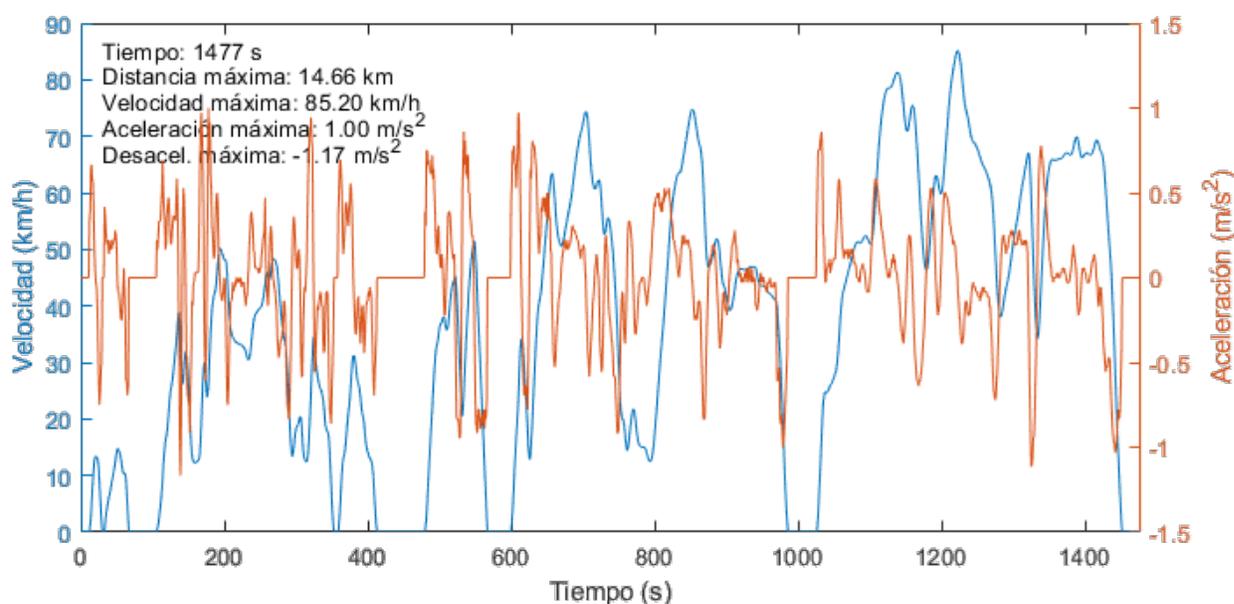


Fig. 18.- Ciclo de manejo WLTC CLASS II.

Tabla 5.- Resumen de los parámetros del ciclo de manejo WLTC CLASS II por fases.

Parámetro	Fase baja	Fase media	Fase alta	Total
Duración (s)	589	433	455	1477
Duración de la parada (s)	155	48	30	233
Distancia (m)	3132	4712	6820	14664
% de paradas	26.3%	11.1%	6.6%	15.8%
Velocidad máxima (km/h)	51.4	74.7	85.2	
Velocidad promedio sin paradas (km/h)	26.0	44.1	57.8	42.4
Velocidad promedio con paradas (km/h)	19.1	39.2	54.0	35.7
Desaceleración máxima (m/s ²)	-1.1	-1.0	-1.1	
Aceleración máxima (m/s ²)	0.9	1.0	0.8	

Por último, en el caso del ciclo de manejo WLTC CLASS I, éste cuenta con dos fases: baja y media. En la Tabla 6 se presenta un resumen de los parámetros que integran las fases del ciclo. Mientras que en la Fig. 19 se muestran las velocidades y aceleraciones del ciclo.

Tabla 6.- Resumen de los parámetros del ciclo de manejo WLTC CLASS I por fases.

Parámetro	Fase baja	Fase media	Total
Duración (s)	589	433	1022
Duración de la parada (s)	155	48	203
Distancia (m)	3324	4767	8091
% de paradas	26.3%	11.1%	19.9%
Velocidad máxima (km/h)	49.1	64.4	
Velocidad promedio sin paradas (km/h)	27.6	44.6	35.6
Velocidad promedio con paradas (km/h)	20.3	39.6	28.5
Desaceleración máxima (m/s ²)	-1.0	-0.6	
Aceleración máxima (m/s ²)	0.8	0.6	

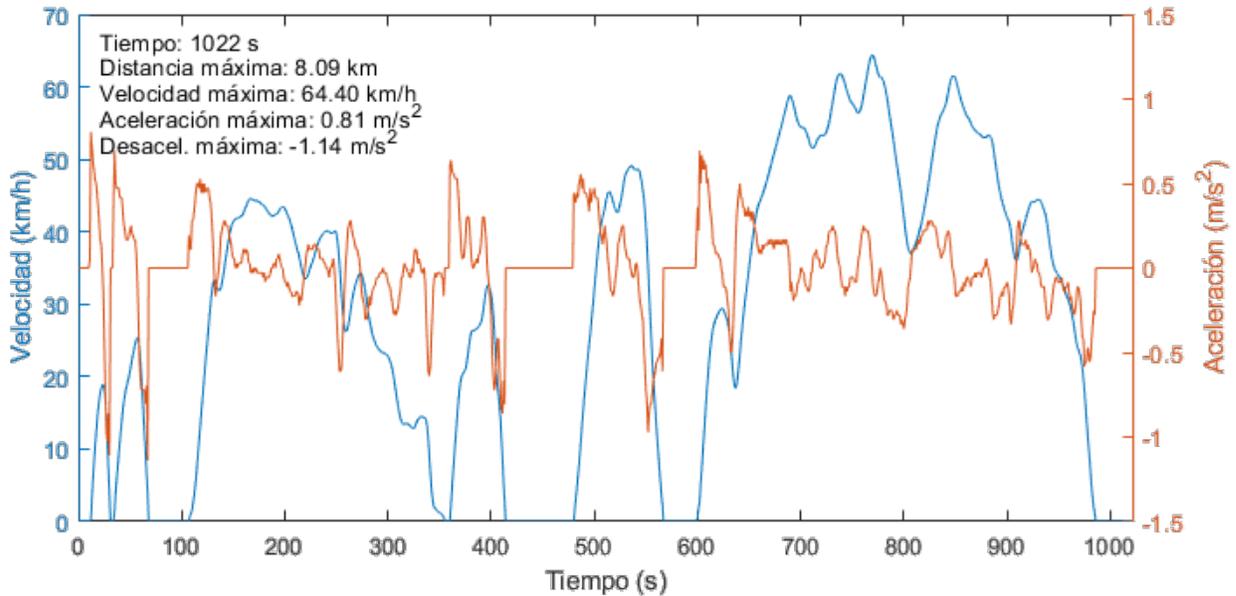


Fig. 19.- Ciclo de manejo WLTC CLASS I.

3.2 Dimensionamiento de la planta de potencia híbrida: caso de estudio

La configuración de la planta de potencia híbrida que se propone en este trabajo, como caso de estudio, se integra por un conjunto de celdas de combustible tipo PEM, un banco de baterías y uno de ultracapacitores, como se muestra en la Fig. 20. Ésta debe entregar la potencia eléctrica al motor eléctrico mediante su driver, por lo que la interconexión de éstas es mediante un bus de corriente directa (DC). Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos cuyo voltaje varía en una ventana amplia de acuerdo a la corriente que se le demande. Por lo anterior, las celdas de combustible se deben conectar a un bus de DC mediante un convertidor de potencia para acoplar los niveles de voltaje de las celdas al rango de voltaje de operación del driver del motor del EV. Al conjunto de celdas de combustible, su BOP y el convertidor asociado, se llama sistema de celdas de combustible (FCS, por sus siglas en inglés). En el caso de las baterías, éstas también se conectan al bus de DC con un convertidor para controlar el flujo de energía desde y hacia ellas. Al conjunto

del banco de baterías y su convertidor de potencia bidireccional, se llama sistema del banco de baterías (BBS, por sus siglas en inglés). Mientras que el banco de ultracapacitores se conecta directamente al bus de DC para utilizar su respuesta rápida a demandas transitorias del EV. Además, en esta configuración, la energía proveniente del frenado regenerativo se almacena directamente en los ultracapacitores sin limitar la tasa de energía recuperada.

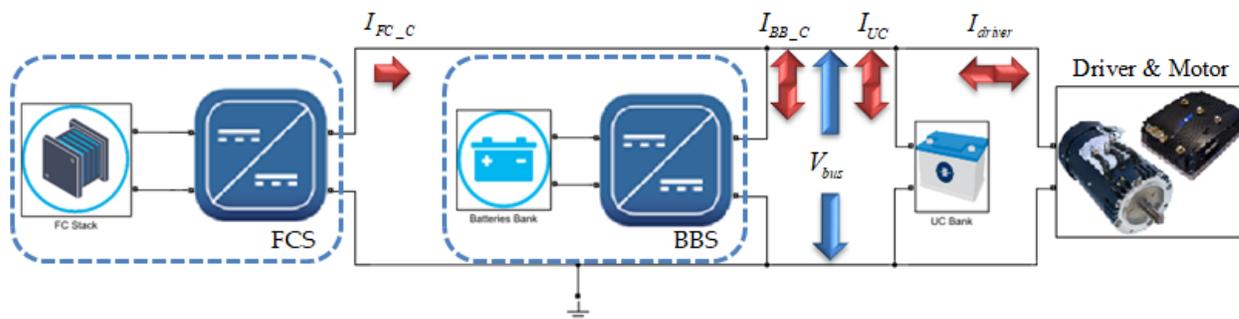


Fig. 20.- Configuración de la planta de potencia del caso de estudio.

El enfoque de este trabajo considera a las celdas de combustible como principal fuente de energía. Es decir, éstas deben proporcionar todo el requerimiento energético que demande el EV para un ciclo de manejo y una autonomía definidas. Por lo anterior, el balance energético de las demás fuentes de energía (baterías y ultracapacitores) debe ser lo más cercano a cero. En este enfoque, las baterías son recargadas por las celdas de combustible, y no mediante una conexión a red eléctrica doméstica, lo que convierte al EV en un tipo “no plug-in”. Lo anterior, permite recargar el vehículo en menos de cinco minutos, al sólo recargar el tanque de combustible de gas hidrógeno. Este tiempo es mucho menor, si se comparará con el tiempo que se tomaría recargar a las baterías mediante una conexión externa, cuyo tiempo podría ser mayor a una decena de minutos, aun utilizando cargadores ultra-rápidos [97], sin considerar posibles daños a las baterías [98].

El caso de estudio presente considera un vehículo utilitario con la configuración de la planta híbrida es la que se muestra en la Fig. 20. Este tipo de vehículo se utiliza comúnmente para el reparto de bienes y servicios en un área confinada, como los centros urbanos. Además, estos tienen rutas definidas con velocidades y aceleraciones acotadas. Por esta razón, se utilizó el ciclo de manejo WLTC CLASS I para su evaluación en el caso de estudio presente, en orden de reproducir un perfil de manejo como un vehículo eléctrico ligero o uno utilitario pequeño, como en este caso (ver Fig. 21). EL ciclo de manejo seleccionado tiene una velocidad y aceleración máxima de 64.4 km/h y 0.81 m/s², respectivamente. El ciclo de manejo simula una distancia recorrida de aproximadamente 8 km en un periodo de 1022 segundos.

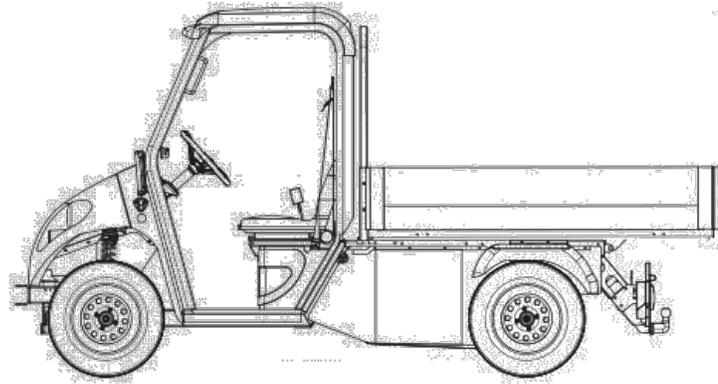


Fig. 21.- Ejemplo de vehículo utilitario.

Definiendo el tipo de vehículo, así como el ciclo de manejo, se parte con el diseño y desarrollo del dimensionamiento de la planta de potencia híbrida, la cual se describe a detalle a continuación.

El caso de estudio considera un vehículo utilitario ligero con características resumidas en la Tabla 7 [82]. El peso del vehículo, caso de estudio, incluye un 62% del peso inicial del vehículo, 30% de carga útil y el resto (8% del total) representa los componentes del balance de planta del FCS, el tanque de hidrógeno, la electrónica de potencia, el motor y su driver.

Tabla 7.- Datos del vehículo de prueba, caso de estudio.

<i>Parametro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Peso del vehículo (cargado)</i>	1500	kg.
<i>Coficiente de rodamiento</i>	0.035	-
<i>Coficiente de arrastre aerodinámico</i>	0.38	-
<i>Área frontal del vehículo</i>	2.12	m ²
<i>Radio de la llanta</i>	0.359	m
<i>Eficiencia de la transmisión</i>	98	%
<i>Eficiencia del motor/generador</i>	94	%
<i>Eficiencia del controlador</i>	93	%

Con los datos del vehículo, y el ciclo de manejo seleccionado, se realiza el dimensionamiento de las fuentes a bordo del vehículo.

3.2.1 Diseño y dimensionamiento de las celdas de combustible

En este trabajo de tesis, las celdas de combustible se consideran como la encargada de abastecer toda la energía requerida por el vehículo eléctrico de acuerdo al ciclo de manejo seleccionado, es decir, las celdas de combustible funcionan como la fuente principal de energía. Eso significa que las celdas deben entregar toda la energía requerida por el ciclo de manejo, bajo diferentes escenarios como alimentando directamente/parcialmente al driver del motor, o recargando a las BB y/o UC, como se puede observar en los diagramas Sankey de la Fig. 22.

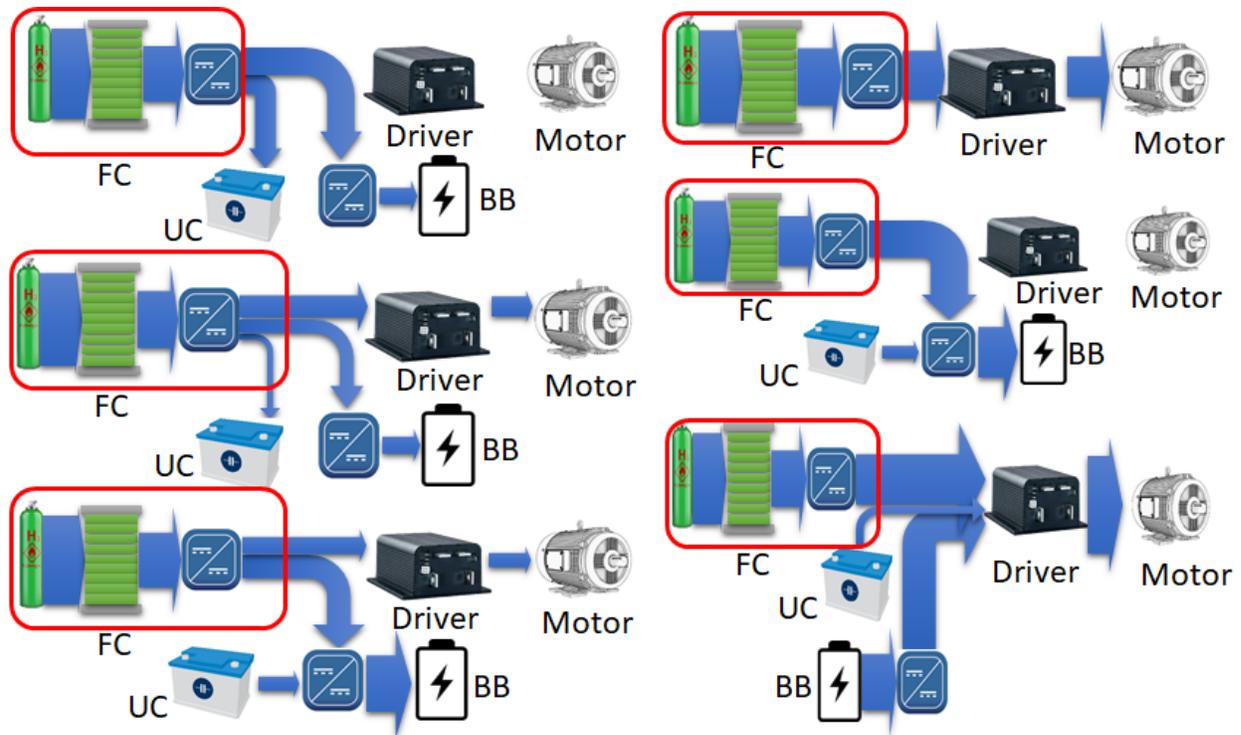


Fig. 22.- Diagramas Sankey de diferentes escenarios posibles de flujo de energía en el EV.

Por lo tanto, en este enfoque se considera que no se recibirá recargas de las baterías o de los ultracapacitores, por medio de dispositivos externos al vehículo. Por lo que, el procedimiento de dimensionamiento considera un tamaño inicial de las celdas de combustible, como se describe a continuación.

Primero, el procedimiento calcula una potencia inicial de las celdas de combustible P_{FC} . Esta potencia se define como el total de la energía requerida por el vehículo menos la energía recuperada desde los frenados regenerativos, dividido entre el tiempo del ciclo de manejo seleccionado [32], [40]. Este primer cálculo no es la capacidad en potencia de las celdas de combustible, pero es una capacidad inicial para el algoritmo que se propone y asegura que la energía suficiente que se requiere para el ciclo de manejo.

$$P_{FC} = \frac{(E_{FW} - E_{RB})}{t_{ciclo}} \left(\frac{Wh}{s} \right) \cdot 3600 \left(\frac{s}{h} \right) \quad (3.7)$$

donde E_{FW} se define como la energía total requerida para mover el vehículo de acuerdo al ciclo de manejo seleccionado sin tomar en cuenta la energía total recuperada por los frenados regenerativos E_{RB} . Para el dimensionamiento de las celdas, la energía E_{RB} se desprecia, ya que su magnitud es muy pequeña en comparación con la de E_{FW} . Por lo tanto, se puede obtener la potencia de las

celdas de combustible usando (3.7), que es el valor mínimo para la celda de combustible que debe tener para entregar toda la energía requerida para mover el vehículo de acuerdo al ciclo de manejo seleccionado. Como se mencionó anteriormente, este valor es solamente una estimación inicial que proporciona la cantidad de energía mínima abordo que debe entregar las celdas de combustible, ya que para el sistema híbrido que se propone, las celdas trabajan como una fuente de “energía operativa” para el movimiento del vehículo y para cargar baterías y ultra-capacitores. Si la potencia de las celdas es menor que la potencia estimada P_{FC} , significa que al final del ciclo de manejo, el balance energético será negativo, ya que las fuentes adicionales tendrán menos energía almacenada, de cómo iniciaron. Por lo tanto, el vehículo no cumplirá con la autonomía definida por el ciclo de manejo.

La potencia final de las celdas de combustibles se puede alcanzar mediante diferentes combinaciones del número de celdas conectadas en serie y su respectiva área activa A_{cell} , ya que el voltaje del conjunto de celdas de combustible depende del número de celdas N_{cell} , y la corriente eléctrica que pueden entregar depende de su área activa A_{cell} . También, el voltaje depende de la corriente de operación, la cual se puede modelar mediante una curva de polarización cuasi-estática, y que se puede describir por la ecuación de Nernst menos las pérdidas dentro de la celda, como [83]:

$$E_{FC} = E_{r,T,P} - \frac{R_g T}{\alpha F} \ln \left(\frac{j + i_{loss}}{i_0} \right) - \frac{R_g T}{nF} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - j} \right) - jR_i \quad (3.8)$$

donde E_{FC} es el potencial de la celda, $E_{r,T,P}$ es el potencial reversible a una cierta temperatura y presión de operación, R_g es una constante del gas, T es la temperatura de operación, α es el coeficiente de transferencia, n es el número de electrones que se transfieren en la reacción, y F es la constante de Faraday (96487 coulomb/equivalente). Por otro lado, j es la densidad de corriente, i_{loss} es la pérdida por corrientes internas, i_0 es la densidad de corriente de intercambio, i_L es el límite de la densidad de corriente, y R_i es la resistencia interna.

El voltaje del conjunto de celdas se encuentra definido por (3.9), la cual depende del número de celdas, dada una densidad de corriente específica, como:

$$V_{FC} = \sum_{j=1}^{N_{FC}} E_{FC_j} = \overline{V_{FC}^{cell}} \cdot N_{FC} \quad (3.9)$$

Esto significa que la celda opera con un voltaje específico E_{FC} , pero cada celda puede tener pequeñas diferencias, por lo que el voltaje del conjunto de celdas V_{FC} , se calcula tomando el voltaje promedio $\overline{V_{FC}^{cell}}$ para un número de celdas N_{FC} .

Por lo anterior, la potencia del conjunto de celdas P_{FC} está dado por:

$$P_{FC} = V_{FC} \cdot I_{FC} \quad (3.10)$$

Dada una corriente del conjunto de celdas I_{FC} , se puede obtener un voltaje nuevo V_{FC} . Por lo tanto, existe muchas configuraciones diferentes de N_{FC} y de A_{cell} que puede cumplir con la potencia requerida, ya que el área activa depende de la densidad de corriente de la celda de combustible, j . Por lo que, el conjunto de pesos posibles W_{FC} es una función de estos parámetros, y hay l, m combinaciones posibles, como se muestra a continuación.

$$\begin{aligned} W_{FC} &= F_w(N_{FC}, j) \\ N_{FC} &= [N_{FC}^{\min}, N_{FC}^{\max}], \text{ and } N_{FC}^l \in N_{FC}, l = \{1, \dots, 500\} \\ j &= [j^{\min}, j^{\max}], \text{ and } j^m \in j, m = \left\{ 1, \dots, \left\lfloor \frac{j^{\max} - j^{\min}}{\Delta j} \right\rfloor \right\} \\ A_{cell} &= [A_{cell}^{\min}, A_{cell}^{\max}] \\ A_{cell}^{l,m} &\in A_{cell}, A_{cell}^{l,m} = f_A(j^m, N_{FC}^l) \\ W_{FC}^{l,m} &= f_w^a(N_{FC}^l, j^m) = f_w^b(N_{FC}^l, f_A(j^m, N_{FC}^l)) = f_w^b(N_{FC}^l, A_{cell}^{l,m}) \end{aligned} \quad (3.11)$$

La función F_w depende de una tecnología de FC particular. En este trabajo de tesis, se utilizó una tecnología de PEMFC desarrollado en el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) [99]. Se utilizó, particularmente los límites inferior y superior para el número de celdas $[N_{FC}^{\min}, N_{FC}^{\max}]$, como $[1, 500]$, respectivamente. El conjunto de densidades de corriente j dependerá de los puntos evaluados en la curva de polarización, en consecuencia, el conjunto de áreas activas A_{cell} es una función de este parámetro. Es decir, el área activa es más grande cuando la densidad de corriente es baja, y viceversa. Por lo tanto, el conjunto dependerá de los límites de densidades de corriente $[j^{\min}, j^{\max}]$ y la diferencia entre ellos Δj . En otras palabras, el peso de las celdas de combustible es una función del número de celdas y de su área activa. También, la función f_w se puede determinar por el número de componentes mecánicos para construir el conjunto de celdas de combustible. Es decir, el peso del conjunto de celas depende de varios componentes, tales

como los llamados ensambles membrana-electrodos (MEA, por sus siglas en inglés), placas bipolares, placas finales, tornillos, entre otros componentes. Por lo tanto, la función f_w se puede desglosar en otras funciones que relacionan los componentes mencionados anteriormente, como (ver Fig. 23):

$$\begin{aligned}
 W_{FC}^{l,m} &= W_{MEAS}^{l,m} + W_{BP}^{l,m} + W_{EP}^{l,m} + W_S^{l,m} \\
 W_{MEAS}^{l,m} &= f_1(N_{FC}^l, A_{cell}^m) \\
 W_{BP}^{l,m} &= f_2(N_{FC}^l, A_{cell}^m) \\
 W_{EP}^{l,m} &= f_3(A_{cell}^m) \\
 W_S^{l,m} &= f_4(N_{FC}^l, A_{cell}^m)
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

donde, el peso de las MEAS W_{MEAS} , el peso de las placas bipolares W_{BP} , el peso de las placas finales W_{EP} , y el peso de los tornillos W_s , dependen de N_{FC} y de A_{cell} .

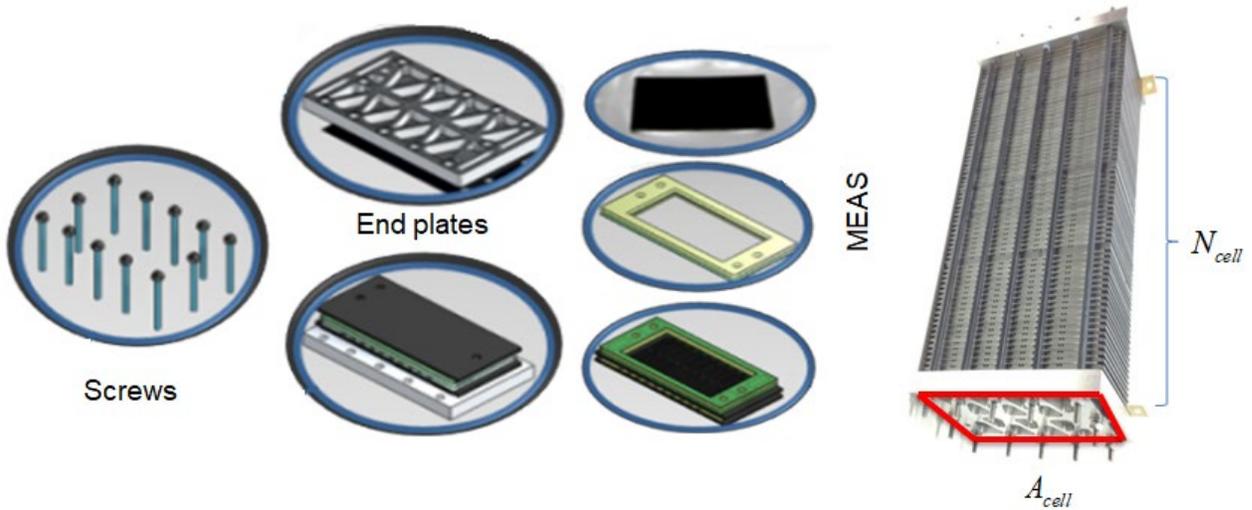


Fig. 23.- El peso de las FC depende del número de celdas, su área activa y otros componentes.

El peso de la celda de combustible W_{FC} se determina por el peso mínimo de la potencia requerida del conjunto W_{FC} , es decir,

$$W_{FC} = \min(W_{FC}) \tag{3.13}$$

La energía eléctrica de las FC se genera desde el hidrógeno que se encuentra almacenado en el tanque del vehículo. Por lo tanto, la autonomía del vehículo dependerá de la cantidad del hidrógeno almacenado y de los requerimientos del ciclo, así como del manejo de la energía abordo.

Sin embargo, el peso del tanque es mucho mayor comparado con el peso del gas hidrógeno, por lo tanto, en este trabajo, el peso del combustible se desprecia para los cálculos realizados.

El dimensionamiento de las celdas de combustible parte del cálculo del requerimiento energético del vehículo para cumplir con su desempeño, de acuerdo al ciclo de manejo seleccionado. Para ello, se desarrolló un diagrama de SIMULINK de MATLAB para el cálculo de la potencia y energía requerida por el vehículo, como se muestra en la Fig. 24.

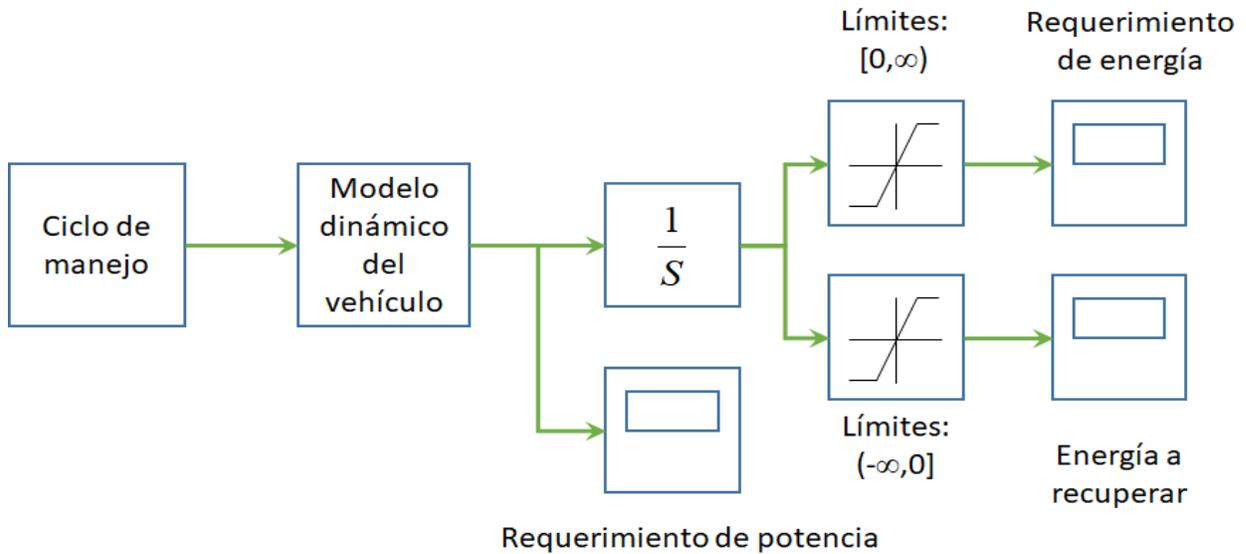


Fig. 24.- Diagrama de SIMULINK para el análisis del comportamiento del vehículo.

Utilizando el ciclo de manejo seleccionado y las ecuaciones (3.1)-(3.6), se realiza el cálculo de potencia y energía requerido por el vehículo, los cuales se muestran en la Fig. 25 y en la Fig. 26, respectivamente.

De acuerdo a (3.7), y considerando el ciclo de manejo seleccionado, la potencia del conjunto de celdas de combustible, cuya capacidad inicial se calcula de la forma siguiente:

$$P_{FC} = \frac{1529Wh}{1022 s} \cdot 3600 \left(\frac{s}{h} \right) = 5.39kW \quad (3.14)$$

Para el dimensionamiento final de las celdas de combustible es necesario tener la curva de polarización de la celda. En este caso, se utilizó una curva de polarización de una celda de combustible que se desarrolló con tecnología del INEEL [99], la cual se muestra en la Fig. 27. Se utilizó un modelo ajustado para representar los datos experimentales obtenidos de la celda de combustible del INEEL. Ésta se utilizó para construir el conjunto de las celdas de combustible que cumplen con la potencia requerida, pero el peso de éste es diferente debido a utilizar diferentes parámetros de construcción, tal como la densidad de corriente de la misma, y el número de celdas

utilizadas en serie. En la Tabla 8 se muestra los datos del modelo ajustado de la celda de combustible.

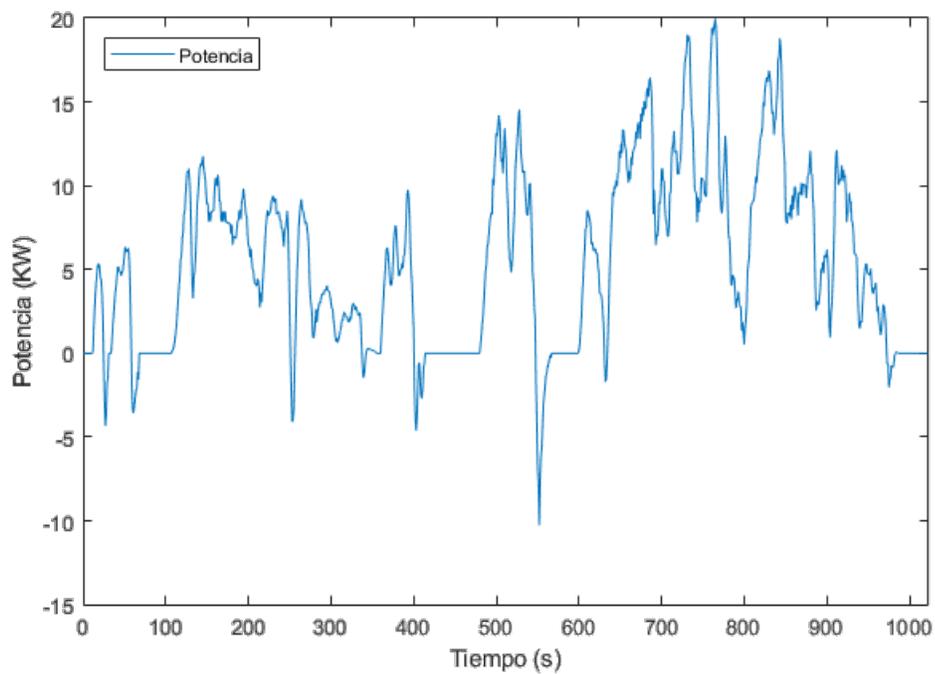


Fig. 25.- Potencia requerida por el vehículo utilitario, caso de estudio.

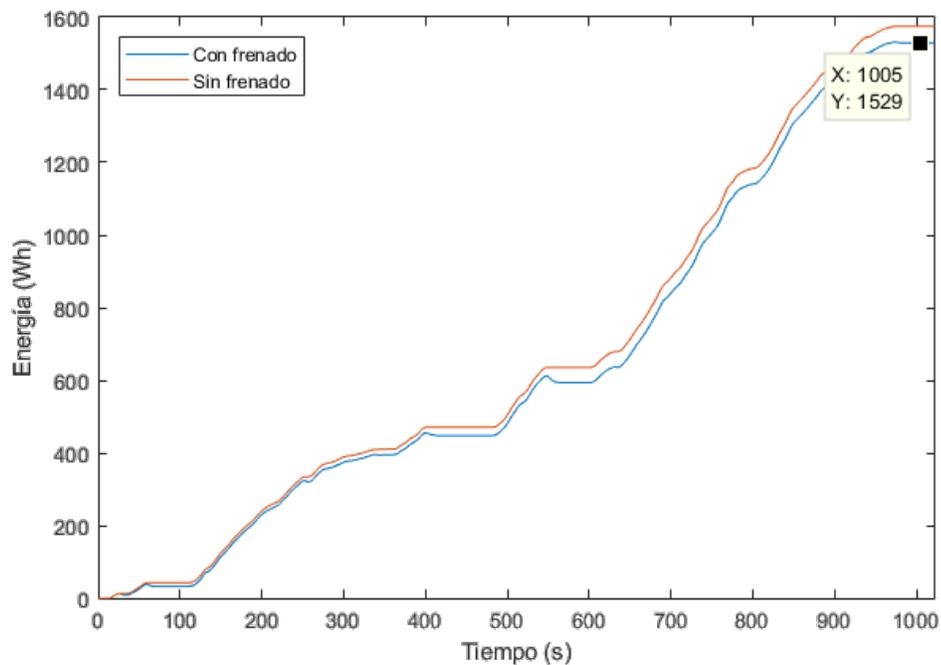


Fig. 26.- Energía requerida por el vehículo eléctrico híbrido en el ciclo de manejo seleccionado.

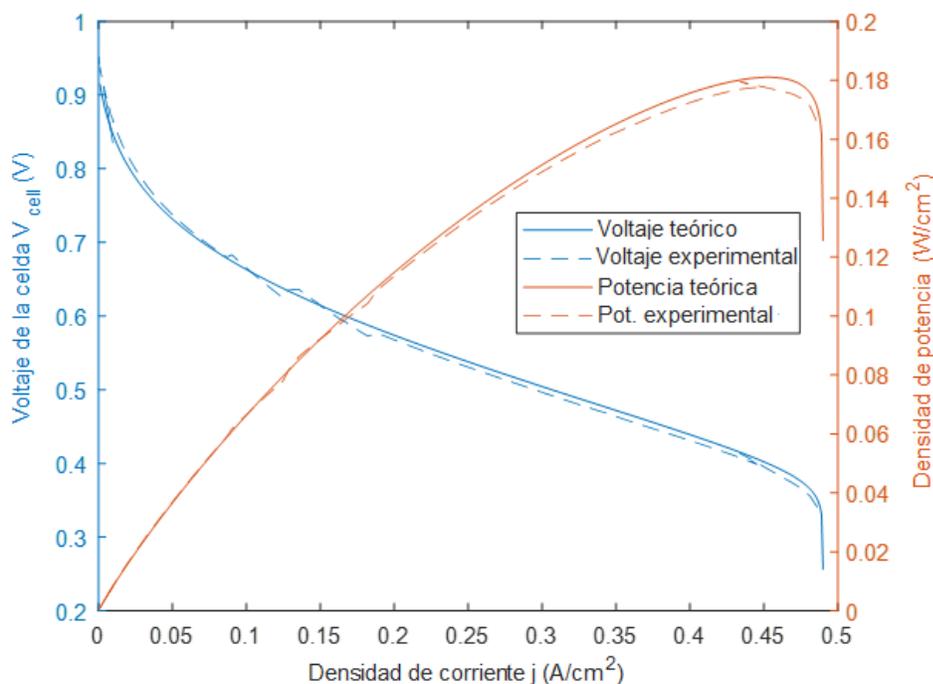


Fig. 27.- Curva de polarización de una celda combustible del INEEL, experimental y modelada.

Tabla 8.- Datos del modelo matemático de la celda de combustible

Parámetro (Símbolo)	Valor	Unidad	Parámetro (Símbolo)	Valor	Unidad
Voltage reversible ($E_{r,T,P}$)	1.254	V	Perdida de corriente interna (i_{loss})	0.006	A/cm ²
Constante del gas (R_g)	8.314	J/mol · K	Densidad de corriente de int. (i_0)	0.0001	A/cm ²
Temperatura (T)	333.15	K	Limite de densidad de corriente (i_L)	0.49	A/cm ²
Coefficiente de t. de carga (α)	0.36	-	Resistencia interna (R_i)	0.32	$\Omega \cdot cm^2$
Número de electrones (n)	2	-	Constante de Faraday (F)	96485	C/mol

El enfoque de este trabajo es diseñar un conjunto de celdas de combustible que cumpla con el requerimiento de energía requerido por el vehículo en un ciclo de manejo seleccionada y una autonomía definida, con el menor peso posible. Para ello, se construyó un conjunto de $[m, n]$ elementos de conjuntos de celdas de combustible, considerando los límites de números de celdas entre $[1, 500]$ y para la densidad de corriente fue $\left[25 \frac{\mu A}{cm^2}, 0.49 \frac{A}{cm^2}\right]$. Esta información se obtuvo experimentalmente de un prototipo de celda de combustible en el INEEL. Por lo tanto, el cambio de densidad de corriente fue determinado experimentalmente. Es decir, $\Delta j_{avg} = 4 \frac{mA}{cm^2}$, que es un valor promedio. El conjunto de pesos de celdas de combustible se construyó utilizando la curva de polarización de la Fig. 27 y las ecuaciones (3.11), y la cual se muestra en la Fig. 28. Los valores mínimos por cada número de celdas se representan por la línea roja, la cual se muestra en la Fig. 29. En este caso, el valor mínimo es de 34.95 kg. con un número de 250 celdas.

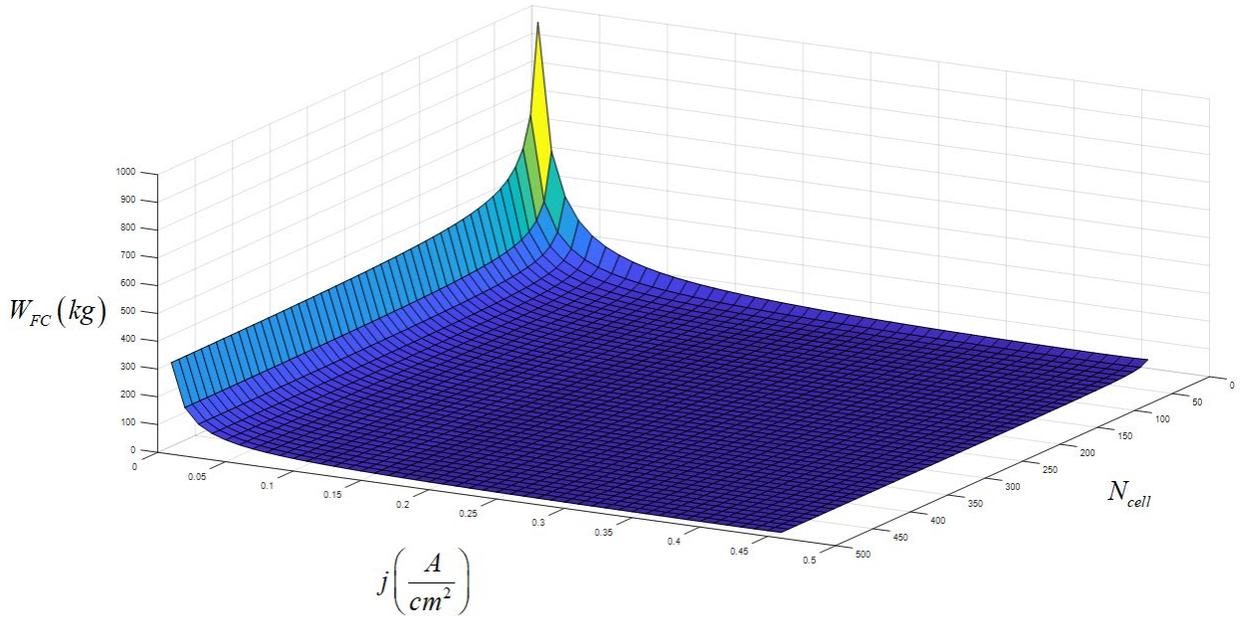


Fig. 28.- Gráfico en 3D del conjunto de pesos de las celdas de combustible

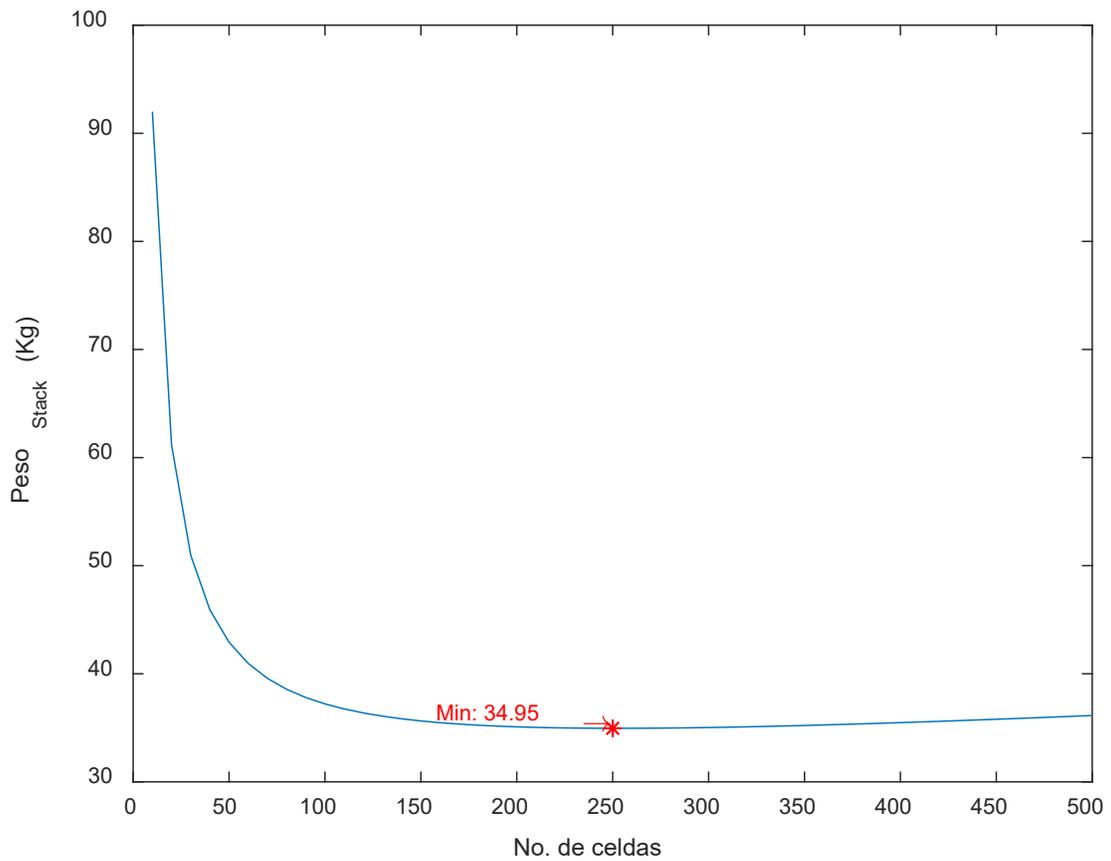


Fig. 29.- Peso mínimo por cada conjunto de número de celdas.

3.2.2 Dimensionamiento del banco de ultracapacitores

Las demandas transitorias por el motor eléctrico del vehículo pueden ser muy rápidas y la energía que se puede recuperar desde los frenados regenerativos también. Por lo que éstas tasas de flujo de energía no se pueden utilizar para recargar a las baterías, ya que podrían causarles daños permanentes. Por lo tanto, la función principal de los ultra-capacitores es suministrar o almacenar los cambios de energía transitoria presentes en el bus de DC. En este enfoque, los ultracapacitores tendrían que ser capaces de almacenar la energía cinética proveniente de los frenados regenerativos, así como suministrar la energía a tasas altas de demanda transitoria, tan rápida como el vehículo lo requiera. Por lo tanto, el dimensionamiento del banco de ultracapacitores se define inicialmente por la energía disponible máxima a ser recuperada por los frenados regenerativos, dentro del rango de voltaje donde la energía debe ser almacenada. Es decir, el rango de operación del driver del motor. Además, de tomar en cuenta la eficiencia de conversión del motor y su driver. Por lo tanto, no se puede recuperar el 100% de la energía cinética disponible, sino que se encuentra limitado al que se pueda recuperar, debido a las configuraciones electro-mecánicas del motor y su driver.

Los ultracapacitores están conectados directamente al bus de DC para disminuir el estrés que pudieran tener las baterías, especialmente durante las aceleraciones u otras demandas transitorias de energía, donde los UC pueden responder rápidamente sin ningún detrimento. Las baterías se proponen que se equipen con electrónica de potencia (convertidores), ya que éstas requieren un manejo de energía estricta durante su carga y descarga, especialmente si se consideran baterías con tecnología de Li-Ion. Por otro lado, al conectar los UC al bus de DC mediante convertidores significaría un mayor costo de inversión, en particular. Lo anterior, debido a que la electrónica asociada debería tener la robustez necesaria para suministrar grandes cantidades de corriente, en la ventana amplia de operación del driver del motor. Además, esto reduciría la eficiencia, ya que pasaría por una etapa de conversión. También, el convertidor añadiría más peso y volumen al vehículo eléctrico.

El procedimiento para dimensionar el banco de ultra-capacitores asume que el banco de baterías asistirá en proveer parte de la demanda alta de potencia, mientras que, para frenados regenerativos, los UC son los únicos que intervienen para almacenar la energía. Por lo tanto, el dimensionamiento se realiza como se describe a continuación.

La energía recuperada máxima E_{RB} se calcula mediante el comportamiento del vehículo de acuerdo al ciclo de manejo seleccionado. El porcentaje de energía recuperada $\%_{RB}$ y el rango de voltaje de operación $(V_{\max} - V_{\min})$ se definen de acuerdo a las especificaciones del motor y su driver. Por lo tanto, la energía almacenada desde el frenado regenerativo se calcula como:

$$E_{st} = E_{RB} (\%_{rec}) \quad (3.15)$$

E_{st} se debe de almacenar en el rango de voltaje definido por la operación del bus de DC, donde V_{max} y V_{min} son los límites del bus de DC.

La configuración eléctrica serie-paralelo de los ultracapacitores se calcula de acuerdo a (3.15) considerando las especificaciones eléctricas un modelo de ultracapacitor comercial, y el rango de operación del bus de DC. Primero, se calcula el número máximo de capacitores conectado en serie para cumplir con el voltaje de operación máxima V_{max} , como:

$$UC_s = \left\lceil \frac{V_{max}}{V_{UC}^{cell}} \right\rceil \quad (3.16)$$

donde el número de capacitores en serie UC_s , depende del voltaje máximo de operación del bus de DC V_{max} y el voltaje nominal de un ultracapacitor comercial V_{UC}^{cell} . De acuerdo a (3.16), la energía recuperada de un frenado regenerativo se almacena dentro del rango de operación del driver del motor eléctrico, es decir, el voltaje del bus. Por lo tanto, un número de ultra-capacitores UC_{s0} se requiere para alcanzar el voltaje mínimo de operación, el cual se calcula como:

$$UC_{s0} = \left\lceil \frac{V_{min}}{V_{UC}^{cell}} \right\rceil \quad (3.17)$$

El redondeo asegura que el voltaje del banco de ultracapacitores nunca es menor al voltaje mínimo de operación. También, la energía almacenada en un ultra-capacitor está definido por:

$$E_{UC}^{cell} = \frac{C_{UC}^{cell} (V_{UC}^{cell})^2}{7200} \quad (3.18)$$

donde E_{UC}^{cell} es la energía almacenada en Wh , C_{UC}^{cell} es la capacitancia nominal y V_{UC}^{cell} es el voltaje nominal de una celda unitaria. Además, el número de ultracapacitores en paralelo, donde la energía se almacena, se calcula como:

$$UC_p = \left\lceil \frac{E_{st}}{E_{UC}^{cell} (UC_s - UC_{s0})} \right\rceil \quad (3.19)$$

Por lo tanto, el peso total del banco de ultracapacitores se encuentra dado por (ver Fig. 30):

$$W_{UC} = W_{UC}^{cell} \cdot UC_s \cdot UC_p \quad (3.20)$$

donde W_{UC}^{cell} es el peso nominal de un ultra-capacitor, cuya capacitancia y voltaje nominales se obtienen de la hoja de datos del ultra-capacitor comercial seleccionado.

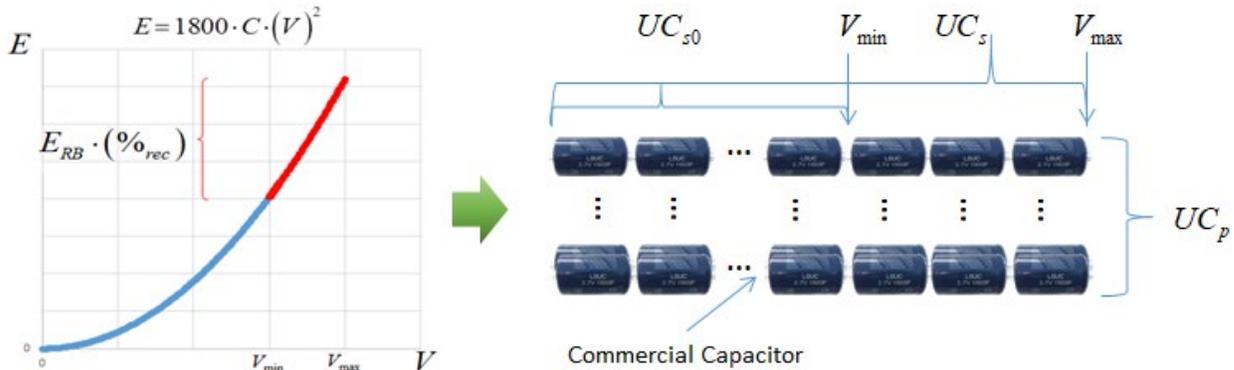


Fig. 30.- Dimensionamiento del banco de ultra-capacitores.

El banco de ultracapacitores es una fuente auxiliar el cual opera principalmente para suplir la demanda de potencia transitoria que requiera el vehículo, así como para almacenar la energía proveniente de los frenos regenerativos. Lo anterior, por su densidad de potencia alta, aunque con una densidad de energía baja. Toda la energía recuperada y almacenada se suministra inmediatamente después de que el vehículo lo requiera. En el caso de ultracapacitores, su dimensionamiento inicia con el cálculo de la máxima energía recuperada en los periodos de frenados regenerativos (ver Fig. 31) dependiendo del ciclo de manejo. En este caso, a lo largo de un ciclo de frenado regenerativo, la energía cinética posible máxima es aproximadamente 18 Wh.

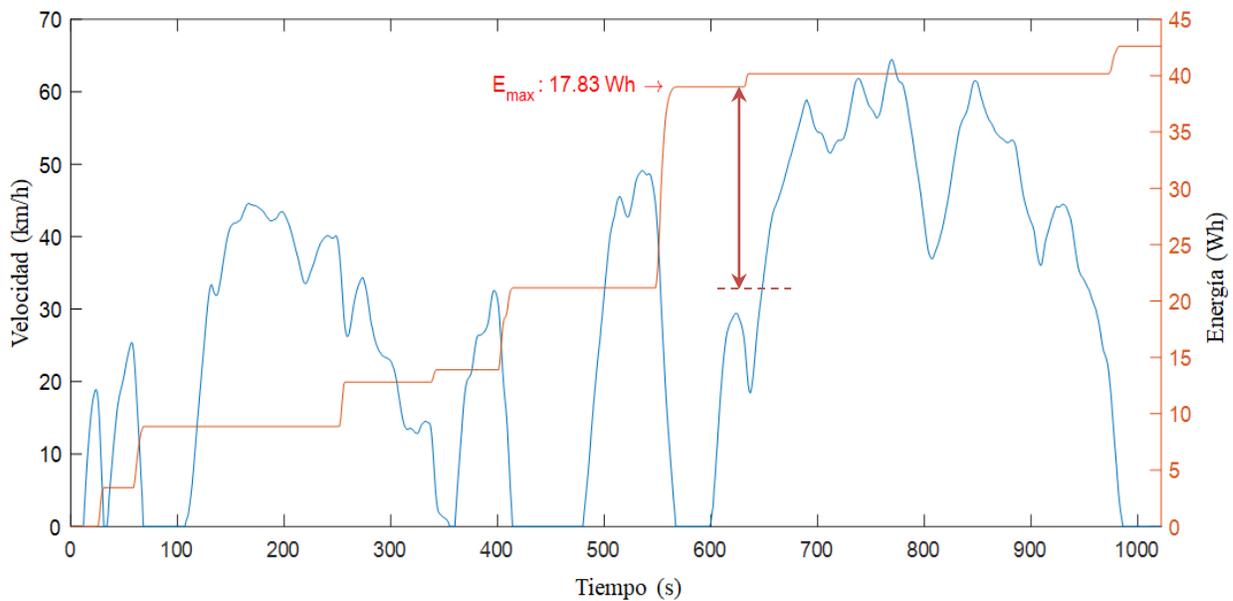


Fig. 31.- Máxima energía cinética recuperada en un ciclo de manejo WLTC CLASS I.

El rango de voltaje de operación de los ultracapacitores depende del motor del vehículo y su driver. En este caso, para el caso de estudio se utilizó un motor HPEVS AC-12 y el driver Curtis 1238E. El rango de operación del driver del motor es de 55 a 80 V y el porcentaje de recuperación de la energía cinética total se encuentra definido por el driver del motor, en este caso es de 40% [97]. Por lo tanto, utilizando (3.15), la energía almacenada es aproximadamente 7 Wh. También, usando un modelo de un ultracapacitor comercial, cuyos parámetros electroquímicos se resumen en la Tabla 9, se puede determinar la configuración del banco de ultracapacitores, tal como se muestra a continuación.

Tabla 9.- Datos del ultracapacitor Maxwell modelo BCAP3000

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Capacitancia</i>	3000	F
<i>Voltaje nominal</i>	2.7	V
<i>Densidad de energía gravimétrica</i>	5.95	Wh/kg

El número de ultracapacitores en series se determina por (3.16), el límite superior del rango de voltaje de operación y el voltaje nominal del ultracapacitor, es decir

$$UC_s = \left\lceil \frac{V_{\max}^{cell}}{V_{nom}^{cell}} \right\rceil = \left\lceil \frac{80V}{2.7V} \right\rceil = 30 \quad (3.21)$$

Mientras que, para determinar el número de cadenas en ultracapacitores en serie se utiliza las ecuaciones (3.17), (3.18) y (3.19), como se muestra a continuación:

$$UC_{s0} = \left\lceil \frac{V_{\min}^{cell}}{V_{nom}^{cell}} \right\rceil = \left\lceil \frac{55V}{2.7} \right\rceil = 21 \quad (3.22)$$

$$E_{UC}^{cell} = 1800 \cdot C_{UC}^{cell} (V_{UC}^{cell})^2 = \frac{3000F (2.7V)^2}{7200} = 3.04Wh \quad (3.23)$$

$$UC_p = \left\lceil \frac{7.132Wh}{3.04Wh(30 - 21)} \right\rceil = 1 \quad (3.24)$$

Por lo tanto, la configuración del banco de ultracapacitores es de 30s1p. Y el peso del banco es de aproximadamente de 15.3 kg. y una capacidad de almacenamiento de energía de 27 Wh.

3.2.3 Dimensionamiento del banco de baterías

En general, la dinámica de respuesta de las baterías es mayor que el de las celdas de combustible [27], [28]. En la configuración que se utiliza en este trabajo se tesis, la función principal de las baterías es de complementar la potencia de las celdas de combustible en orden de completar el requerimiento de potencia del vehículo eléctrico en todo tiempo. Por lo anterior, la potencia de las baterías complementa la potencia que las FC no pueden suplir en el ciclo de manejo seleccionado [32].

Por lo cual, la potencia de las baterías se puede calcular como:

$$P_{BB} = P_{\max} - P_{FC} \quad (3.25)$$

Donde, la potencia del banco de baterías P_{BB} se obtiene de la potencia máxima requerida por el vehículo eléctrico P_{\max} en un ciclo de manejo, menos la potencia de las celdas de combustible P_{FC} y la potencia entregada por los UC. En esta tesis se considera que la energía de los UC podría no ser suficiente en el caso extremo donde las FC no puedan entregar la energía a su máxima potencia especificada, la cual, en algunas ocasiones, se complementará con la energía de las BB, pero no bajo regímenes transitorios. En estos casos, la energía de los UC es muy pequeña y se puede despreciar.

El número de baterías en series y paralelo se calcula usando un modelo de batería comercial y la potencia del banco de baterías nominal P_{BB} (ver Fig. 32). Si se define un voltaje nominal del banco de baterías V_{BB} , el número de baterías en serie B_s , se define para cumplir con el requerimiento de voltaje como:

$$B_s = \left\lceil \frac{V_{BB}}{V_B^{cell}} \right\rceil \quad (3.26)$$

donde V_B^{cell} es el voltaje nominal de una batería unitaria (celda), la cual se toma de la hoja de datos del modelo comercial seleccionado. El redondeo asegura que se cumpla con el requerimiento de voltaje.

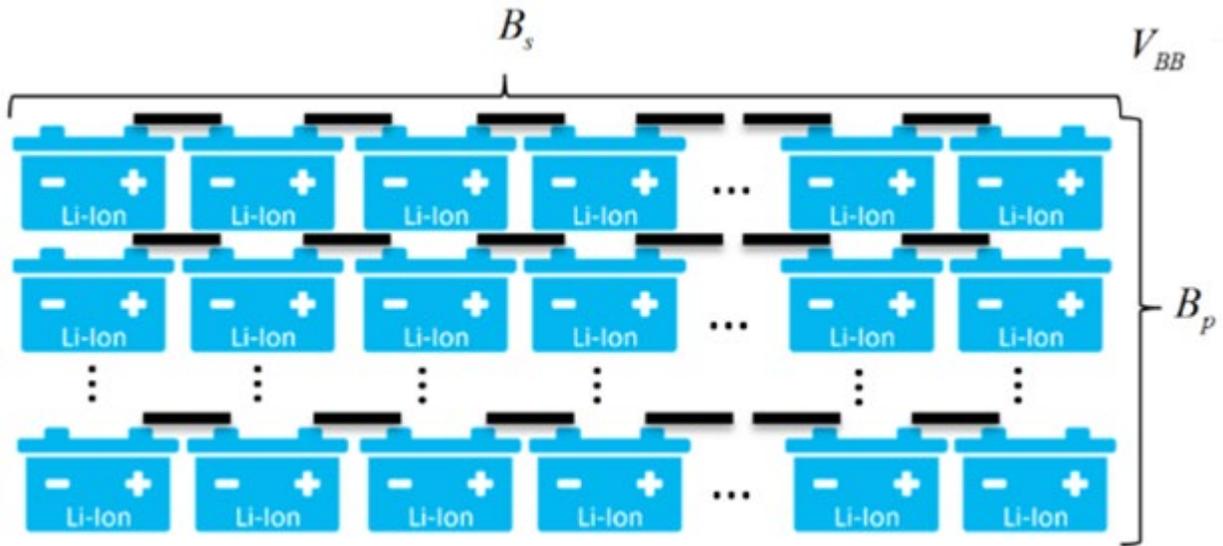


Fig. 32.- Dimensionamiento del banco de baterías.

La capacidad de una batería Q_{BB}^{cell} se expresa en “Ah”, cuyo valor nominal se conoce con el nombre de “1C”. Por lo que, el pico de corriente para baterías de Li-Ion, que lo define el fabricante de las baterías, se expresa en términos de “C” (“C-rate”). En este trabajo, se utiliza para corrientes pico, la capacidad pico de “4C”, de acuerdo a [100], [101]. Por lo tanto, con los valores de V_{BB} y de P_{BB} , se puede definir la corriente de baterías máxima, y también el número de baterías en paralelo, como:

$$B_p = \left\lceil \frac{P_{BB}}{4 \cdot Q_{BB}^{cell} \cdot V_B^{cell} \cdot B_s} \right\rceil \quad (3.27)$$

donde Q_{nom}^{cell} es la capacidad nominal de una celda, la cual se obtiene de la hoja de datos del modelo comercial seleccionado. El redondeo asegura el cumplimiento del requerimiento de corriente.

El peso total del banco de baterías se calcula como (ver Fig. 32):

$$W_{BB} = W_{BB}^{cell} \cdot B_s \cdot B_p \quad (3.28)$$

Donde W_{BB}^{cell} es el peso de una batería, que se toma de la hoja de datos del modelo seleccionado.

Para el dimensionamiento del banco de baterías, se parte con la definición del voltaje nominal del banco. En este caso, se definió un voltaje nominal de 96V para que la mayor parte del tiempo del uso de las baterías (descarga) se utilice un convertidor tipo reductor por las ventajas que se

tienen en éste. Para la recarga de las baterías se utiliza un convertidor tipo elevador. El ciclo de manejo determina el requerimiento de potencia máxima para el banco de baterías, tal como se muestra en la Fig. 33.

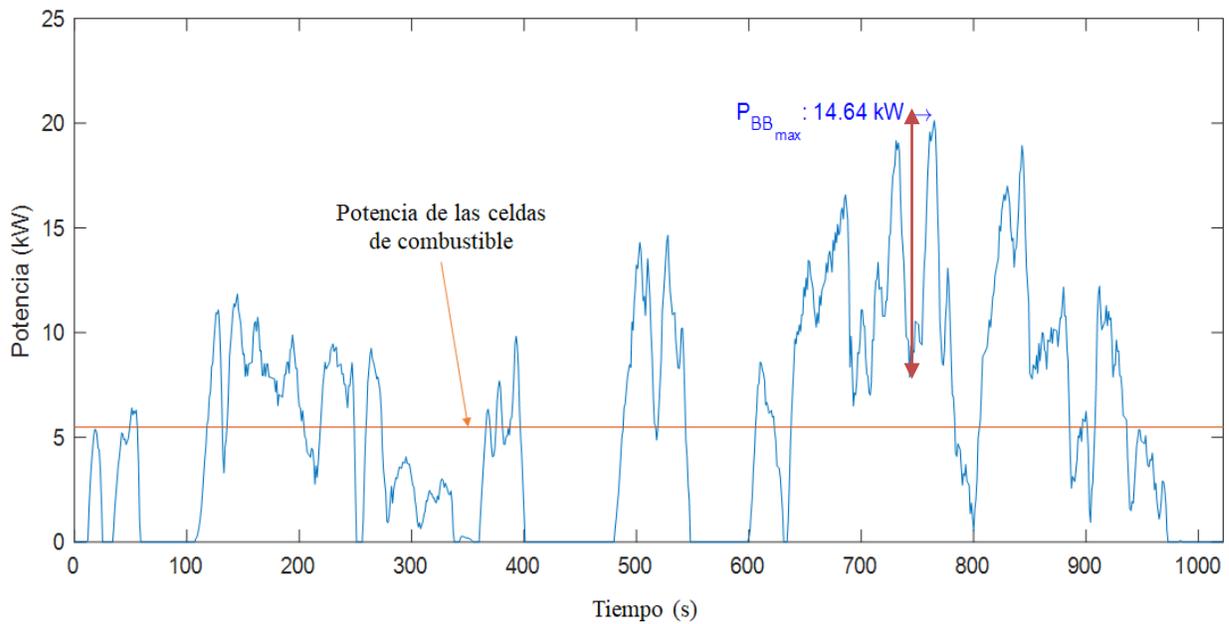


Fig. 33.- Potencia eléctrica positiva requerida por el ciclo de manejo WLTC CLASS I

Utilizando la información técnica de una celda de batería de Li-Ion, que se resume en la Tabla 10, y el procedimiento descrito anteriormente, la configuración del banco de baterías se describe a continuación.

$$B_s = \left[\frac{V_{BB}}{V_B^{cell}} \right] = \left[\frac{96V}{3.6V} \right] = 27 \quad (3.29)$$

$$B_p = \left[\frac{14.64kW}{4(2.1A)(3.6V)(27)} \right] = 18 \quad (3.30)$$

Tabla 10.- Información técnica de una batería Samsung UR17850RX

Parámetro	Valor	Unidad
Capacidad	2.1	Ah
Voltaje nominal	3.6	V
Densidad de energía gravimétrica	184	Wh/kg

Por lo tanto, la configuración del banco de baterías es de 27s18p. Y el peso del banco es de aproximadamente de 22.1 kg, de acuerdo con (3.28), y una capacidad de 3.9 kWh.

3.2.4 Validación del requerimiento energético

El dimensionamiento de cada fuente añade peso adicional al peso inicial del vehículo. En consecuencia, el peso añadido de los nuevos componentes incrementa los requerimientos de potencia y energía del vehículo eléctrico. Por lo anterior, se requiere validar el requerimiento energético incluyendo los componentes de la planta de potencia híbrida. Para ello, es necesario recalcular toda la planta de potencia en orden de validar las fuentes estimadas iniciales y completar la demanda de potencia y el consumo de energía. Los componentes de la planta de potencia incluyen la electrónica asociada a las celdas de combustible y del banco de baterías (convertidores de potencia), el motor y su driver, y el tanque de almacenamiento de hidrógeno. El redimensionamiento se realiza de acuerdo al diagrama de flujo que se muestra en la Fig. 34. En éste, el método de dimensionamiento inicia con el cálculo del requerimiento de potencia y de energía del vehículo, basado en sus parámetros de diseño, tales como peso inicial del vehículo, tamaño de llanta, coeficiente de arrastre aerodinámico, área frontal, coeficiente de rodamiento, etc. y un ciclo de manejo adecuado para la aplicación prevista. Esto asegura el cumplimiento del desempeño de la planta de potencia. Después, el dimensionamiento de las FC se determina mediante la curva de polarización y en la función peso de sus componentes, la cual se basa en una tecnología particular de FC, en este caso se utilizó la tecnología desarrollada en el INEEL. Esta información se puede ajustar dependiendo de la tecnología seleccionada. El dimensionamiento de las FC se realiza para cumplir con el requerimiento de energía estimada, la cual puede ser realizada a través de varias combinaciones de voltaje y corriente, considerando la curva de polarización de la FC. Utilizando el área activa y el voltaje de una celda unitaria, se puede determinar un número de celdas y el peso asociado. El total de combinaciones de área y número de celdas forman un conjunto de tamaños de FC, que proporcionan la potencia requerida, pero con pesos diferentes. De este conjunto se selecciona la FC con menor peso y el diseño de su dimensionamiento.

Dentro de esta metodología, la energía será suficiente para el ciclo de manejo seleccionado del cual el balance energético de los otros componentes debería ser cero o cercano a ello. Por lo anterior, la autonomía dependerá solo de la cantidad de hidrógeno almacenado en el tanque, haciendo que el vehículo eléctrico sea no enchufable (no plug-in).

Una vez que se dimensiona las FC, la capacidad de los UC se estima con el menor tamaño posible para almacenar la mayor cantidad posible de energía de los frenados regenerativos a lo largo del ciclo de manejo. El enfoque de este trabajo de tesis considera que la energía almacenada en los UC se debería entregar inmediatamente después de que el vehículo lo requiera de acuerdo a las tasas de carga y descarga de éstos. Las especificaciones finales de los UC se basan en las tecnologías disponibles comerciales, como se ha mencionado anteriormente.

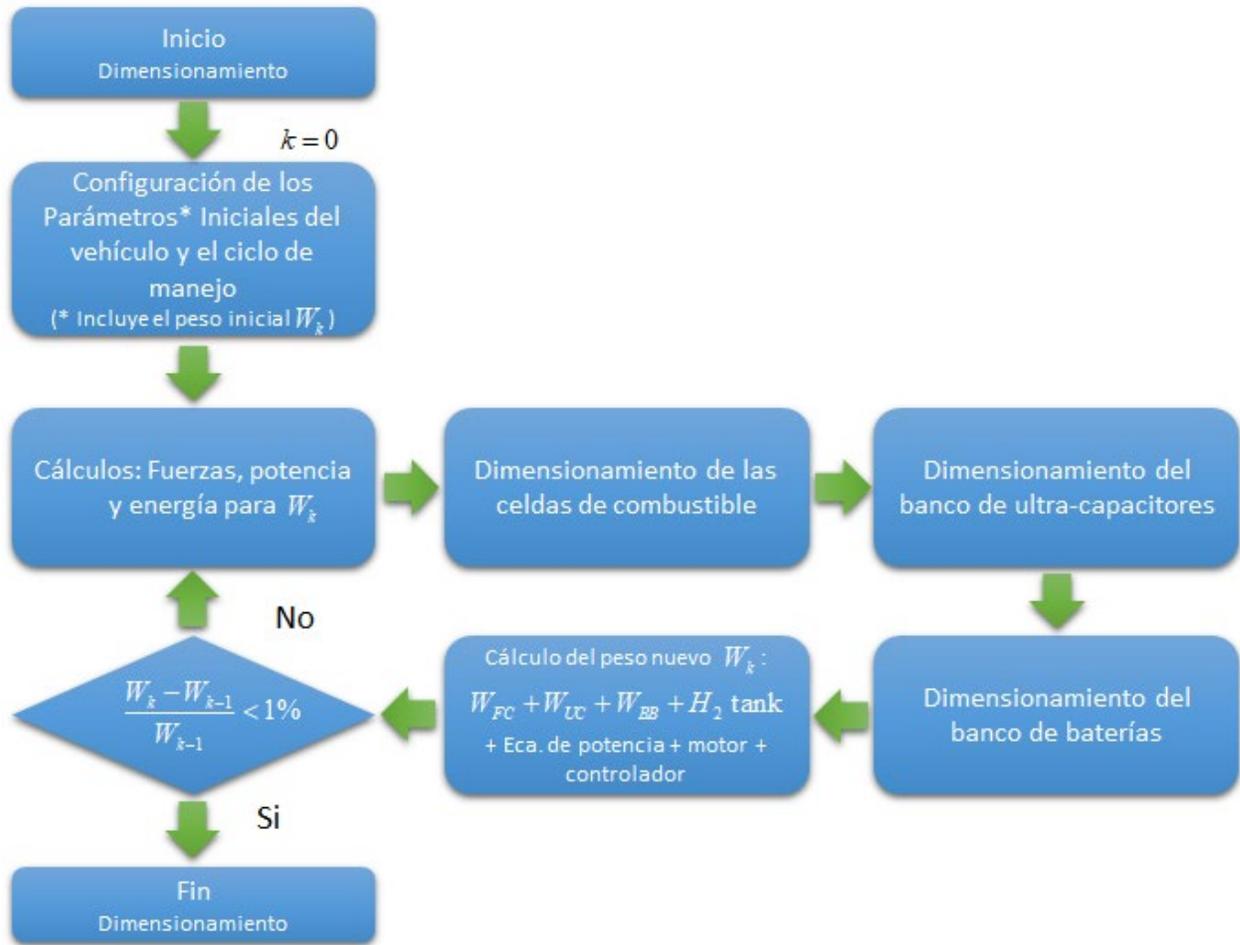


Fig. 34.- Diagrama de flujo de validación del requerimiento energético del vehículo.

El banco de baterías se dimensiona de acuerdo a la potencia pico que la FC no puede entregar según lo requiera el vehículo eléctrico. Para dimensionar el banco de baterías, el algoritmo considera un voltaje nominal propuesto y la información electroquímica de la batería comercial que se haya seleccionado.

El peso de todos los componentes se calcula con el dimensionamiento de cada fuente, y éste se añade al peso inicial del vehículo, por lo que modifica el requerimiento de potencia y de energía del vehículo, y entonces el algoritmo estima un conjunto nuevo de componentes de la planta de potencia. Las estimaciones se realizan por cada cambio del peso y se compara con el peso estimado en un paso previo. Si la diferencia de pesos es inferior al 1%, las estimaciones se dejan de realizar al alcanzar el tamaño final de todos los componentes de potencia/energía.

3.3 Re-dimensionamiento

La planta que se diseñó en los pasos anteriores añade un peso adicional al peso inicial del vehículo eléctrico, el cual incrementa el requerimiento energético y de potencia. Por lo anterior, se requiere de un re-dimensionamiento para validar que se sigue cumpliendo con el requerimiento del vehículo de acuerdo al ciclo de manejo seleccionado. Para ello, se realiza la metodología descrita en el diagrama de flujo de la Fig. 34. Adicionalmente, se utiliza dos convertidores, uno para la celda de combustible y otro para el banco de baterías, el cual se considera que ambos añaden un peso adicional de 30 kg. En el caso de estudio, un vehículo utilitario, se tiene contemplado el uso de un motor HPEVS AC-12 y un driver modelo Curtis 1238E, cuyo peso es de 57.5 kg en conjunto. Adicionalmente, se considera un tanque de hidrógeno que añade 30 kg adicionales. Por lo tanto, en el redimensionamiento de las fuentes se considera la planta de potencia más la electrónica de potencia asociada, así como el motor, su driver y el tanque de hidrógeno. En la Tabla 11 se muestra una comparación entre el dimensionamiento inicial y el final, tomando las consideraciones mencionadas anteriormente. Se muestra que hay un cambio en el tamaño del conjunto de celdas de combustible y del banco de baterías en un 10.1% y 5.2%, respectivamente. Por otro lado, el banco de ultracapacitores conserva el mismo tamaño, ya que la capacidad de almacenamiento de energía del dimensionamiento inicial, con el voltaje de operación descrito anteriormente, es suficiente para almacenar la energía requerida con el dimensionamiento de la planta final.

Tabla 11.- Comparación entre el dimensionamiento inicial y final para el caso de estudio.

<i>Fuente</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Dimensionamiento</i>	
		Inicial	Final
<i>Celda de combustible</i>	Peso:	34.95 kg	38.91 kg
	Potencia:	5.9 kW	6.7 kW
	Número de celdas:	250	270
	Área activa:	132.24 cm ²	137.49 cm ²
<i>Banco de baterías</i>	Peso:	22.11 kg	23.27 kg
	Capacidad de energía:	3.9 kWh	4.08 kWh
	Configuración:	27s19p	27s22p
<i>Banco de ultracapacitores</i>	Peso:	15.3 kg	15.3 kg
	Capacidad de energía disponible:	27 Wh	27 Wh
	Configuración:	30s1p	30s1p

El enfoque de este trabajo fue determinar la planta de potencia híbrida con el menor peso posible que sea capaz de cumplir con el requerimiento de potencia del vehículo de acuerdo al ciclo de manejo seleccionado. Sin embargo, el costo de inversión de la planta de potencia tiene una gran influencia en la toma de decisión de la configuración final del tren de potencia del vehículo eléctrico híbrido.

3.4 Comparativa entre diferentes plantas de potencia

Las celdas de combustible son una tecnología emergente y, por lo tanto, sus costos son muy altos. A pesar de ello, las celdas de combustible prometen ser una solución de propulsión factible para vehículos eléctricos de generación nueva [2], [102], [103], por las ventajas que éstas presentan. Bajo esta premisa, los vehículos eléctricos híbridos y su análisis económico, se debería considerar esta opción como fuente generadora de energía a bordo. Por otro lado, los ultracapacitores tienen densidades de potencia altas, y por esta razón, si su tamaño se incrementa, el tamaño del banco de baterías podrá disminuir considerablemente. Si se toma en cuenta esto, se puede realizar una revisión de la configuración de la planta de potencia híbrida basada en celdas de combustible, analizando cuatro posibles escenarios en la que las fuentes adicionales complementan la potencia que el sistema de celdas de combustible podría estar entregando. Los escenarios se enlistan a continuación:

1. Configuración FC y BB, un caso extremo.
2. Configuración FC, BB y UC, para recuperación de energía de frenados regenerativos y demandas transitorias.
3. Configuración FC, BB y UC, de acuerdo a un criterio de desempeño de manejo.
4. Configuración FC y UC, el otro caso extremo.

En todos los casos anteriores, el tamaño del sistema de celdas de combustible se mantiene fijo, mientras que las otras fuentes se estiman de acuerdo al caso evaluado. De acuerdo al enfoque de este trabajo, el cual define que las celdas de combustible entregarán toda la energía requerida por el vehículo de acuerdo al ciclo de manejo, este requerimiento se mantiene si se considera despreciable el requerimiento adicional con el cambio del tamaño de las otras fuentes. Por lo tanto, aún se considera válido el tamaño del sistema de las celdas de combustible para los casos mencionados.

Para los casos 1 y 2, el tamaño del banco de baterías es el mismo, considerando que éstas cumplan con el requerimiento de potencia máxima que deben complementar a la potencia de las celdas de combustible, basado en el ciclo de manejo y las consideraciones previas. Debe ser claro que la diferencia entre estas dos configuraciones implica menos o más estrés para las baterías si se utiliza o no los ultracapacitores. En el caso 3, la configuración representa un criterio de desempeño. En este caso, los ultracapacitores no sólo almacenan energía de los frenados regenerativos y atienden a las demandas transitorias, sino que también pueden suplir potencia y energía en periodos largos de aceleración. Para este caso, se propone un criterio de desempeño para que los ultracapacitores entreguen potencia y energía al vehículo para alcanzar la velocidad máxima del ciclo (64 km/h) a la máxima aceleración (0.81 m/s^2) desde un estado de reposo. Este criterio, tal como en [34], se propone para reducir la capacidad (y costo) del banco de baterías. El tiempo que se requiere para

alcanzar la velocidad máxima desde el reposo es 22.07 segundos, y se necesita 111.45 Wh de energía. Por lo tanto, la configuración del banco de ultracapacitores es de 30s5p. Con respecto al banco de baterías, el dimensionamiento inicia con la estimación del cumplimiento de la potencia promedio que deba complementar con la que debe entregar las celdas de combustible, es decir, 1.86 kW. Al seleccionar el mismo tipo de baterías (Li-Ion) descrito anteriormente, se puede definir un banco de baterías con la configuración como 27s10p. En orden de complementar con el requerimiento de potencia, se utiliza una tasa de 1C. Para el caso 4, el sistema de almacenamiento de energía solo considera ultracapacitores. Su dimensionamiento se obtiene de la potencia promedio que se mencionó anteriormente, multiplicado por el tiempo del ciclo de manejo seleccionado. La configuración del banco es entonces 30s20p. En todos los casos, el banco de baterías y el de ultracapacitores se define por los niveles de operación del bus de DC del vehículo. El dimensionamiento de las fuentes para todos los casos se resume en la Tabla 12.

Tabla 12.- Configuraciones de plantas de potencia evaluadas

<i>Cases</i>	<i>FC</i>	<i>Baterías</i>		<i>Ultracapacitores</i>	
	Series	Series	Paralelo	Series	Paralelo
<i>Case 1</i>	130	27	16	0	0
<i>Case 2</i>	130	27	16	30	1
<i>Case 3</i>	130	27	10	30	5
<i>Case 4</i>	130	0	0	30	20

Con la información de las Tablas 12, 13 y 15, se estima la capacidad de la energía almacenada instalada, así como el peso total de cada fuente de la planta de potencia. Para el costo del banco de baterías, se utilizó un costo proyectado de 176 USD por kWh [104]. Para el banco de ultracapacitores, se usó un costo promedio de 6000 USD por kWh de acuerdo a [105]. En este enfoque, la energía requerida está relacionado con el rango de voltaje de operación (55-80 V). Por esta razón, solamente la energía dentro del rango de voltaje está disponible en los UC. Aunque la energía almacenada por debajo del límite inferior del voltaje del bus de DC no es utilizable, el dimensionamiento del UC de esta forma evita la necesidad de utilizar un convertidor, el cual añadiría costo y peso a la planta de potencia. Además, se limitaría la respuesta de la dinámica de los UC a la que pudiera permitir el convertidor. Ya que en este enfoque se minimiza el tamaño de los UC, la energía no útil (por debajo del límite inferior del voltaje de operación) podría ser despreciable.

A pesar del hecho que el caso 1 ofrece el tamaño más pequeño y del menor costo del sistema, la diferencia en costo, comparado con el caso 2, es sólo el costo de inversión de integrar los UC a la planta, con un valor marginal de 164 USD (ver Tabla 13). Los beneficios de incorporar UC a la planta de potencia ofrece la posibilidad de prolongar la vida útil del banco de baterías al reducir el estrés en ella por las demandas transitorias. Además, incorpora la capacidad de almacenar energía de los frenados regenerativos de una forma más eficiente que lo haría el banco de baterías. Además,

de la posibilidad de tener ahorros a lo largo de la vida útil del vehículo, por ejemplo, con el reemplazo de las baterías. La capacidad de energía instalada de las fuentes (BB y UC) se muestra a continuación (ver Tabla 13 y Fig. 35):

Tabla 13.- Capacidad de energía instalada, peso y costo de las configuraciones de las plantas de potencia de los casos.

Case #	Baterías			Ultracapacitores				
	Energía (Wh)	Peso (kg)	Costo (USD)	Energía total (Wh)	Energía útil (Wh)	Energía no útil (Wh)	Peso (Kg)	Costo (USD)
1	3265.92	18.61	574.80	0	0	0	0	0
2	3265.92	18.61	574.80	91.12	27.33	63.78	15.3	164.02
3	2041.2	11.63	359.25	455.62	136.68	318.93	76.5	820.12
4	0	0	0	1822.5	546.75	1275.75	306	3280.5

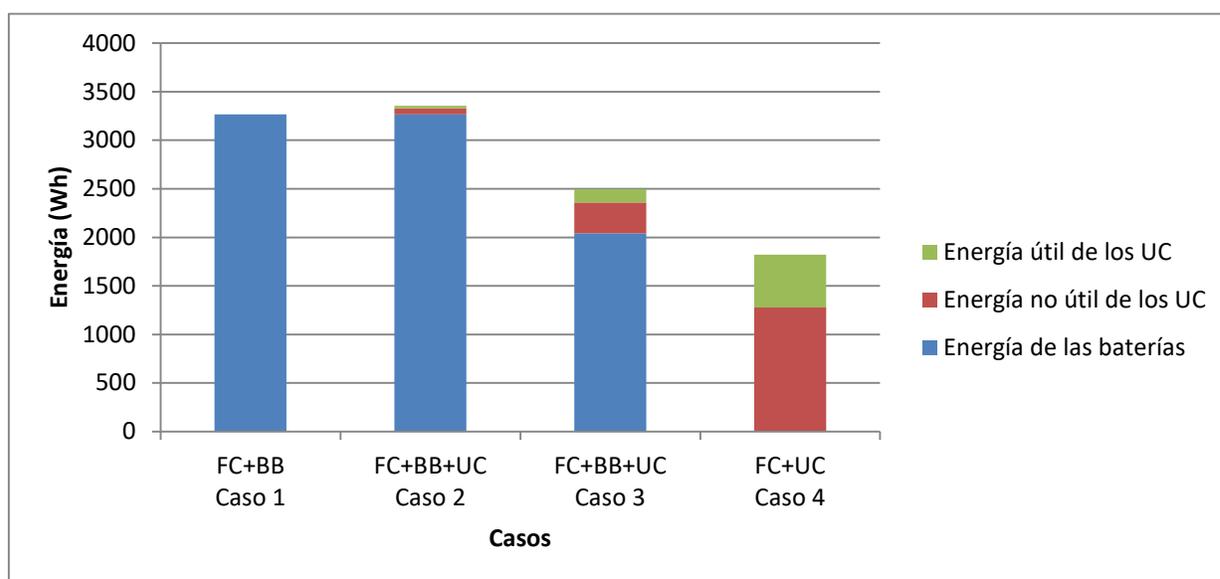


Fig. 35.- Capacidad de energía instalada para los casos evaluados.

La energía que provee las celdas de combustible proviene del hidrógeno en primer lugar, la cual se encuentra almacenada en el tanque de combustible. En todos los casos, el tanque se considera que tiene la misma capacidad de combustible, que es de 2 kg. En la Fig. 36 se muestra el peso total de la planta de potencia integrada. En esta figura, el tamaño de las celdas de combustible ya está considerada, e incluyen el tanque de hidrógeno, que en este caso es un tipo IV de 30 kg. Mientras que el peso de las baterías y de los ultracapacitores se evalúan para cada caso. En la Fig. 37 se muestra el costo aproximado de la planta de potencia para cada caso evaluado. Para las celdas de combustible, se utilizó un costo proyectado de producción a volúmenes altos de \$47.69 USD por kW.

De las Fig. 35-Fig. 37 se observa lo siguiente:

Incrementar la capacidad de los UC para reducir la capacidad y el costo del banco de baterías tiene un impacto negativo en la capacidad de energía a bordo del vehículo. Además, incrementa el peso, así como el costo del banco de UC.

Lo anterior se debe a que la densidad de potencia del UC es alta, pero la densidad de energía es baja.

Por lo tanto, los UC no son recomendables para el almacenamiento de energía “masivo”. Además, utilizar los UC directamente acoplados al bus de DC, se evita el estrés de las otras fuentes, lo que puede alargar la vida de dichos componentes, y presenta la posibilidad de reducir el peso y costo al evitar el uso de electrónica de potencia adicional.

. El uso de un EMS particular, ya sea por reglas heurísticas o por optimización, modificará el dimensionamiento que se ha presentado hasta ahora. Sin embargo, el dimensionamiento inicial, así como su procedimiento, provee una guía inicial y línea base para el diseño de una planta de potencia que cumpla con el requerimiento de potencia y energía de un vehículo en particular y su ciclo de manejo.

La configuración final de la planta de potencia se puede decidir en función de las prioridades de los requerimientos relativos al vehículo y su aplicación. Esto incluye el desempeño, vida útil, eficiencia, economía, etc. Y los cuales pueden ser diferentes a los planteados en este trabajo de tesis.

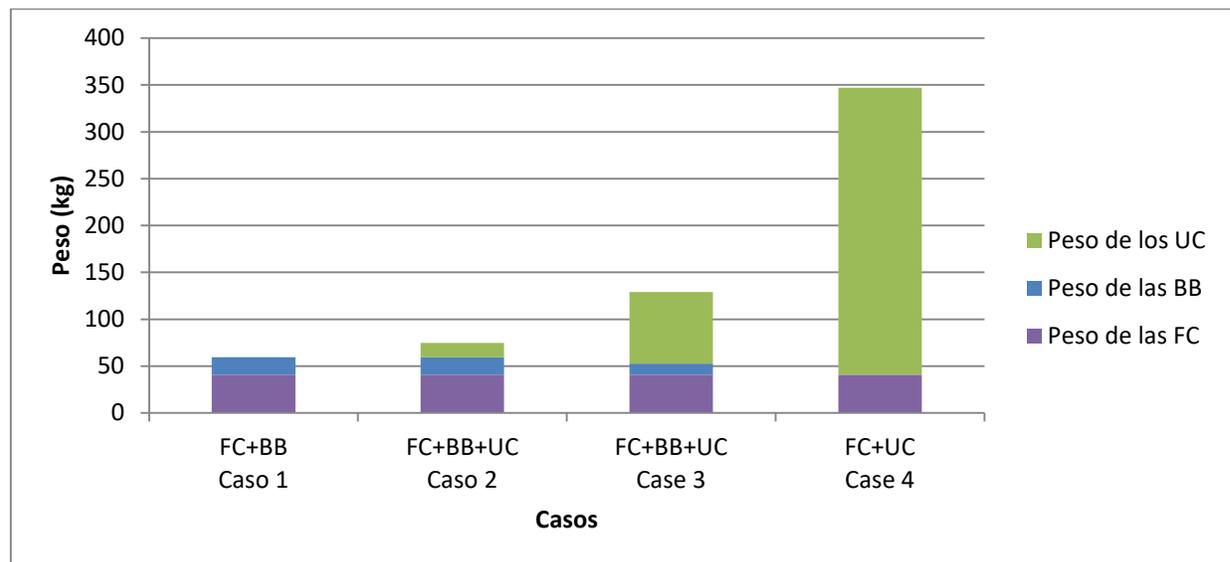


Fig. 36.- Peso de la planta de potencia para los casos evaluados.

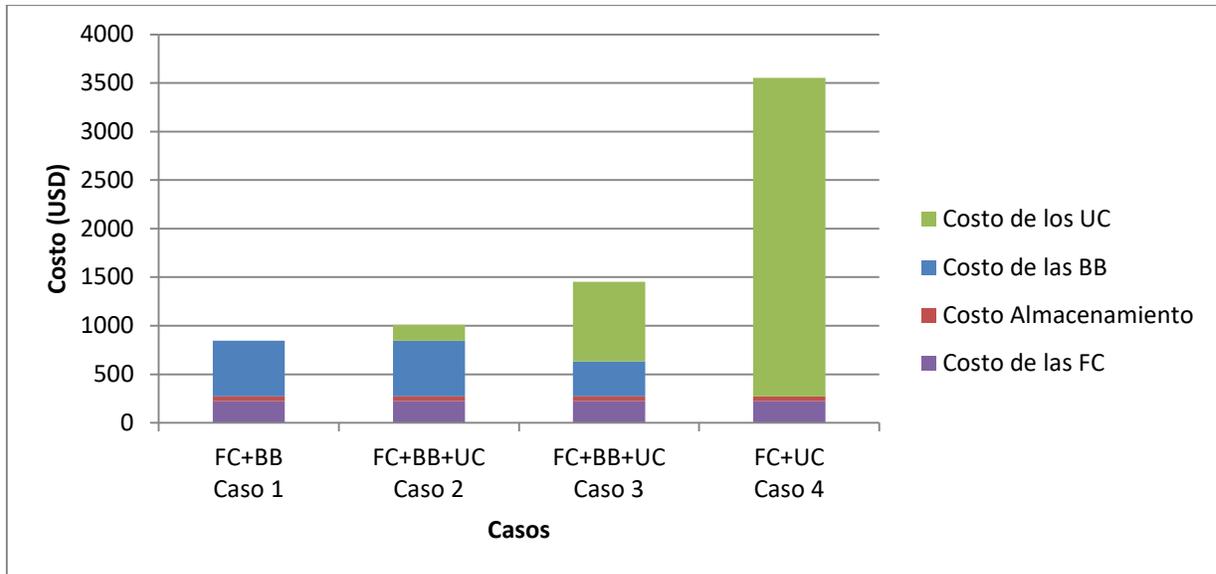


Fig. 37.- Costo de la planta de potencia para los casos evaluados.

Los ciclos de manejo son de suma importancia, ya que definen la magnitud de la velocidad a la que se mueve el vehículo y los requisitos de potencia y energía de éste.

También, los ciclos de manejo describen una forma general de manejo (hábito), en la que se utilizará el vehículo. Es decir, la aceleración, los transitorios y, en general, la dinámica intrínseca durante el uso del vehículo.

La aplicación final del vehículo, descrita por su ciclo de conducción no se puede ignorar. Sin embargo, no es la única consideración durante la definición de la planta de potencia del vehículo.

Una planta de potencia debería cumplir con todas las características descritas en el ciclo de manejo. En este análisis comparativo, para todos los casos se utilizaron el mismo ciclo de manejo y las mismas características del vehículo.

Es bien conocido que muchos fabricantes de equipos originales (OEM, por sus siglas en inglés) “convencionales” que integran sus propios sistemas de celdas de combustible, incluyendo la fabricación de sus propias celdas de combustibles, particularmente compañías asiáticas que pueden o no pueden tener subsidiarias para esto, y por lo tanto existe un espacio para incluir el diseño de plantas de energía desde la etapa del diseño de una sola celda. Otros jugadores nuevos a menudo se involucran en el diseño de las celdas de combustible, así como en el diseño del tren de potencia del vehículo. Lo que esto realmente significa es que los desarrolladores de celdas de combustible se están fusionando en proyectos en conjuntos con los OEM. A diferencia de las plantas de potencia basadas en baterías, donde las configuraciones eléctricas permiten tener varios diseños modulares, en los sistemas basados en celdas de combustible no están simple el sólo apilar una gran cantidad de celdas para lograr el voltaje deseado.

Las celdas de combustible son dispositivos mecánicamente más complejos, y el uso de su área activa como variable para definir sus especificaciones debe considerarse una ventaja durante el diseño de la planta de potencia. Los ingenieros de electrónica de potencia pueden verse desafiados innecesariamente cuando el voltaje es la única variable que se considera durante la especificación del sistema de celdas de combustible, por lo que, un compromiso de voltaje/corriente, el peso de la planta de potencia y la electrónica de potencia deben aprovecharse siempre que sea posible.

Las celdas de combustible a menudo agregan costos y resultan inadecuadas para un diseñador de una planta de potencia híbrida para un sistema de tracción eléctrica, a menos que se establezca un trabajo colaborativo con el proveedor de celdas de combustible. Si al diseñador de la planta de potencia se le proporciona flexibilidad al incluir el diseño de la propia celda de combustible al inicio, significa que habría más opciones adecuadas en su diseño. Es decir, con esta flexibilidad se podría especificar más específicamente los componentes de la planta de potencia.

3.5 Comparativa del dimensionamiento de las celdas de combustible entre diversos trabajos

En este trabajo se enfatizó en el dimensionamiento de las fuentes, de tal forma, que el peso de éstas fuera el menor posible que se añadiera al peso inicial del vehículo. Ya que, disminuyendo sus pesos, se reduce el requerimiento de energético que implica su traslado a bordo del vehículo. Además, en el desarrollo de la estrategia de manejo de energía, se consideró a las celdas de combustible como principal fuente de energía, por lo que, el incremento de la eficiencia en su punto de operación, se traduce en un menor consumo del combustible. Junto con esa condición, también se consideró el estrés de las fuentes, en donde las celdas de combustible, y las baterías tienen una menor dinámica en su respuesta. Por lo que, **en el caso de celdas se consideró una tasa de cambio de corriente máxima permitida. Y en el caso de las baterías, una tasa de máxima corriente pico de “4C” y una corriente máxima constante de “2C”**. En lo que se traduce en no incrementar el estrés de éstas fuentes. Sin embargo, en la mayoría de los trabajos (Tabla 14), sólo consideran el desempeño del vehículo, reduciendo importancia a las consideraciones anteriores.

Cada vehículo eléctrico basado en celdas de combustible tiene distintos requerimientos energéticos, debido a su caso de estudio, aplicación, estrategia de distribución de potencia y uso de un ciclo de manejo definido, entre otros. Sin embargo, con fines de comparar la metodología de diseño y dimensionamiento de las celdas de combustible que se presenta en este trabajo, en la Tabla 14 se resume el dimensionamiento de las celdas de combustible para cada trabajo analizado. En esta se muestra la configuración, caso de estudio del trabajo, la potencia pico que demanda el

vehículo y la potencia máxima que pueden entregar las celdas de combustible. De éstos últimos datos, se estimó la relación potencia máxima/potencia pico entre la que puede entregar las celdas de combustible y la que demanda el vehículo eléctrico.

De los trabajos presentados, se observa que sólo uno de ellos dimensionó a las celdas de combustible cuya potencia máxima supera a la potencia pico que demanda el EV. La mayoría de estos trabajos utilizó una celda de combustible cuya potencia máxima se encuentra en una relación de 0.35 a 0.85 con respecto a la potencia pico del EV. Y sólo 2 trabajos tienen una relación menor a 0.35, una de ellas, es la que se presenta en este trabajo.

Como se ha mencionado anteriormente, una planta de potencia de menor peso añadirá menos energía/potencia al requerimiento energético del EV que una con mayor peso. Además, con la metodología de dimensionamiento que se presenta en este trabajo, el tamaño de las fuentes se reduce al mismo tiempo que se cumple con el desempeño del EV.

Tabla 14.- Tabla comparativa del tamaño de las celdas de combustible por trabajo.

<i>Año</i>	<i>Autores</i>	<i>Configuración</i>	<i>Potencia (kW)</i>	<i>Potenica FC (kW)</i>	<i>Tasa</i>
2016	Bassam et al. [106]	FC-BB	110	90	0.81818
2015	Fletcher et al. [107]	FC-BB	12	5	0.41667
2016	Feroldi et al. [36]	FC-UC	30	10	0.33333
2015	Xu et al. [108]	FC-BB	100	80	0.8
2014	Odeim et al. [109]	FC-BB	1	1.2	1.2
2014	Koubaa et al.	FC-UC	35	20	0.57143
2009	Li et al. [110]	FC-BB	50	40	0.8
2015	Hu et al. [30]	FC-BB-UC	220	100	0.45455
2017	Bassam et al. [111]	FC-BB	110	50	0.45455
2015	Yun et al. [102]	FC-BB	85	40	0.47059
2020	Wang et al. [66]	FC-BB	1	0.55	0.55
2019	Wang et al. [23]	FC-UC	6	2.5	0.41667
2019	Fathy et al. [77]	FC-BB-UC	10	6	0.6
2019	Wang et al. [112]	FC-BB-UC	60	25	0.41667
2019	Fu et al. [79]	FC-BB-UC	40	20	0.5
2020	López et al. [113]	FC-BB-UC	20	6.4	0.32

Si bien, el tamaño de las fuentes impacta en el requerimiento energético del EV, la distribución de energía/potencia de las fuentes también es un factor importante en el uso eficiente de la energía abordo.

Por lo que, en el capítulo siguiente se describe el diseño y desarrollo de la estrategia de manejo de energía propuesto en este trabajo para hacer uso eficiente de la energía en un EV basado en celdas de combustible.

IV

Diseño de la estrategia de manejo de energía

El dimensionamiento de las fuentes disminuirá el peso adicional que se incorporaría el vehículo y reducirá el costo energético requerido por el vehículo de acuerdo al ciclo de manejo seleccionado. Sin embargo, la estrategia de manejo de energía será la encargada de hacer uso eficiente de la energía a bordo del vehículo de en todo tiempo.

El problema de la estrategia de manejo de energía se puede resumir en la búsqueda en tiempo real del flujo idóneo de la energía proveniente de las fuentes para cumplir con el desempeño del vehículo, así como los criterios de diseño tales como: uso eficiente de la energía a bordo, conservación del estado de carga de las baterías, limitación de la tasa de descarga de las baterías, conservación de los niveles de voltaje de operación de los ultracapacitores, etc.

El enfoque que se propone en este trabajo, es el de monitorear los estados de carga de las baterías y de los ultracapacitores, así como la potencia requerida por el vehículo, para controlar la energía/potencia que puedan entregar las fuentes. La estrategia de manejo de energía propuesta se encargará de estimar y generar las señales de referencia de los convertidores asociados a las celdas de combustible y de las baterías. Con lo anterior, se puede controlar indirectamente la energía de todas las fuentes de tal manera que el uso del combustible hidrógeno sea la más eficiente en todo el tiempo.

4.1 Clasificación de las estrategias de manejo de energía

Los objetivos de las EMS propuestas de la revisión bibliográfica han sido la maximización de la eficiencia global del sistema, reducción de pérdidas en el sistema, minimización del uso del combustible, aumento de la autonomía del vehículo, entre otros. Sin embargo, todas estas EMS se pueden agrupar en basados en reglas (RB) y en optimización (OB), como se muestra en la Tabla 15 [14], [20], [42].

Tabla 15.- Clasificación de las Estrategias de Manejo de Energía

Estrategias de manejo de energía	Objetivos	Estrategias	
	Incremento: <ul style="list-style-type: none"> En autonomía Eficiencia del sistema Vida útil de las baterías Reducción: <ul style="list-style-type: none"> Del consumo de combustible 	Basados en reglas	Reglas determinísticas Lógica difusa
	Basado en Optimización	Optimización en tiempo real Optimización global	Inteligente Robusta Estática Dinámica

De acuerdo de la técnica que se utiliza, ésta tiene sus ventajas, desventajas y un potencial de aplicabilidad en los vehículos eléctricos, tal como se muestra en la Tabla 16. De esta tabla se observa que la técnica más idónea, de acuerdo a sus ventajas, aplicabilidad y practicidad en un vehículo eléctrico híbrido, es la *lógica difusa*. Esta técnica es un buen método para realizar una compensación óptima entre las eficiencias de todos los componentes del vehículo híbrido. Además, es robusta porque es tolerante a medidas imprecisas y a la variabilidad de los componentes, y se puede utilizar para mejorar la eficiencia operacional del sistema de generación de energía híbrida (FC, BB y UC).

Tabla 16.- Comparativa de los tipos de estrategias de manejo de energía

Tipo de EMS	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Basado en reglas determinísticas	Eficiente computacionalmente Fácil de implementar	Requiere de una calibración amplia y sintonización de los parámetros No garantiza la optimización No es portable	Usado ampliamente en vehículos eléctricos híbridos a nivel prototipo y comercial
Basado en Lógica difusa	Robusto en ruido de medición y variabilidad de componentes Cálculo computacional bajo Fácil de implementar	No se garantiza la optimización Requiere calibración de las funciones de pertenencia y las reglas difusas No es portable	Usado en vehículos eléctricos híbridos a nivel prototipo y comercial

Optimización en tiempo real	Tiene potencial de implementación en los vehículos híbridos	No se puede obtener una solución óptima global Aún es difícil de implementar en los controladores actuales de los vehículos	Usado en prototipos de vehículos eléctricos híbridos
Optimización global	Se puede obtener una solución óptima No requiere calibración	Requiere un conocimiento a-priori del ciclo de manejo El cálculo computacional es la más compleja No se puede implementar directamente	Identifica el desempeño potencial máximo del vehículo Evalúa la efectividad de otras EMS

4.2 Propuesta de diseño de la estrategia de manejo de energía

El dimensionamiento de las fuentes disminuirá el peso adicional que se incorporaría el vehículo y reducirá el costo energético. Pero, la EMS será la encargada de hacer uso eficiente de la energía a bordo del vehículo de manera dinámica.

El problema de la estrategia de manejo de energía consiste en la búsqueda en tiempo real del flujo idóneo de la energía proveniente de las celdas de combustible y de las baterías, así como mantener el estado de carga de éstas últimas, así como los capacitores, en sus niveles de voltaje requeridos por el sistema de tracción. La arquitectura que en este trabajo se propone se divide en dos niveles, uno de interpretación de la demanda energética y distribución de la energía (“control supervisor”), y uno de control de convertidores (“control local”), como se muestra en la Fig. 38.

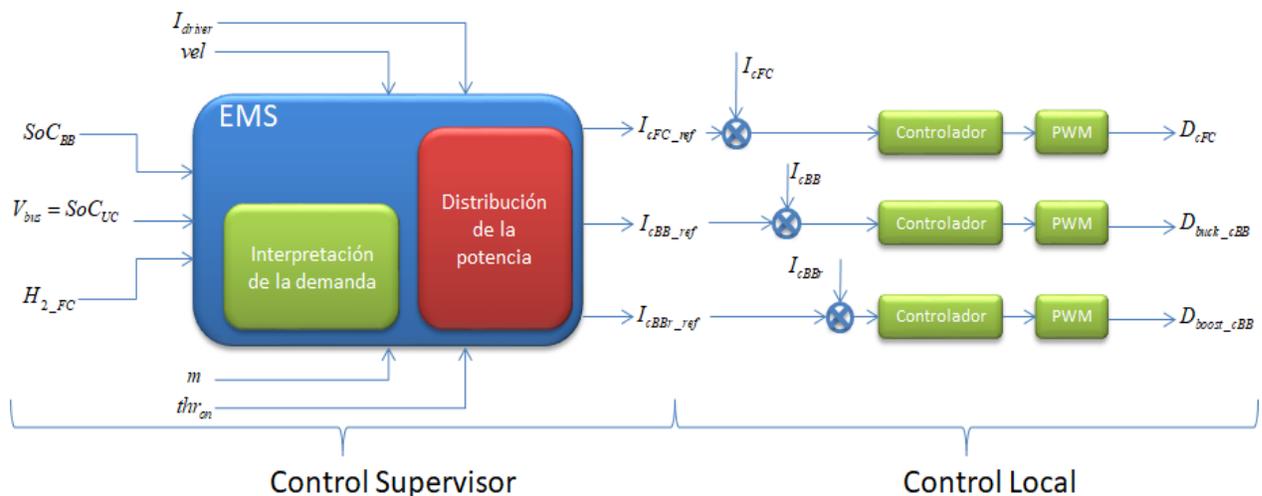


Fig. 38.- Arquitectura propuesta para la EMS.

El enfoque que se propone en este trabajo, es el de monitorear el estado de carga de las baterías, los niveles de voltaje del banco de ultracapacitores, así como la potencia requerida por el vehículo, para controlar la potencia/energía que deben entregar las fuentes. La estrategia de manejo de energía se implementará para calcular y proveer señales de referencia a las celdas de combustible, baterías, capacitores y los convertidores de DC-DC asociados a ellas. Es decir, las señales D_{cFC} , D_{buck_cBB} y D_{boost_cBB} , que representa el ciclo de trabajo para los convertidores de las celdas de combustible y de las baterías en modo descarga y recarga, respectivamente. Estas señales son utilizadas por el “control local” para regular la corriente de los convertidores. Por otro lado, la estrategia de manejo energía está embebida en el “control supervisor”, ambos controles se detallan en los apartados siguientes.

4.2.1 Diseño del control local

Para la EMS que se propone en este trabajo, se contempla la distribución de energía mediante la regulación de la corriente de salida de las fuentes. Para ello, se utilizan convertidores de potencia, tanto para la celda de combustible, como para las baterías. De acuerdo con el dimensionamiento de las fuentes, y del voltaje de operación del driver del motor, se selecciona el tipo de convertidor asociado a cada fuente. Los cuales pueden ser reductor, tipo buck, o elevador, tipo boost. En el caso de las baterías, el convertidor asociado debe contemplar las dos funciones, ya que será de un tipo para la descarga y del otro tipo para la recarga de éstas. Para la regulación de corriente de éstos tipos de convertidores, se contempla el uso de un controlador compensador tipo II.

El control de los convertidores debe garantizar el seguimiento de las referencias que designe la EMS. Por ello, se realizó el análisis de la estabilidad de la corriente de los convertidores, el cual se presenta en el Anexo A.1 y Anexo A.2.

4.2.2 Diseño del control supervisor

En esta sección se presenta el diseño propuesto de la estrategia para el manejo de la energía del VE híbrido, la cual utiliza la lógica difusa para controlar los convertidores asociados a las celdas de combustible y baterías. Ésta considera la dinámica de las celdas de combustible, la velocidad del vehículo, el estado de carga de las baterías y el voltaje del banco de ultracapacitores.

En la estrategia que se propone en este trabajo, se utiliza la técnica de control llamada lógica difusa, ya que esta no requiere de modelos matemáticos complejos, como los que se utilizan en el control clásico. Además, se ha mostrado que ésta técnica se utiliza ampliamente en aplicaciones reales, como el caso del control de vehículos eléctricos. **El enfoque de esta estrategia considera**

a las celdas de combustible como principal fuente de energía, por lo que éstas entregarían toda la energía requerida para el ciclo de manejo estándar WLTC CLASS I, por lo que el balance de energía al final del ciclo debe ser cercano a cero. Bajo esta premisa, **la autonomía del vehículo quedaría subordinada a la cantidad de hidrógeno a bordo de éste**. Además, la estrategia contempla la recuperación de energía mediante el frenado regenerativo. Por lo que, la funcionalidad de los ultracapacitores es el almacenamiento instantáneo de esta energía recuperada, la cual se entregaría de manera inmediata para suplir una demanda transitoria del motor, y de esta manera reducir el estrés de las otras fuentes. En el caso de las baterías, su funcionalidad es la de complementar el requerimiento de potencia que se demande cuando se exceda al de la capacidad de las celdas. Así mismo, almacenar la energía que los capacitores no puedan albergar de los frenados regenerativos o para controlar de manera indirecta el estado de carga de los ultracapacitores. Es decir, del voltaje del bus de DC.

El objetivo natural de la EMS que se propone en este trabajo es encontrar las referencias de corriente de los convertidores asociados a las celdas de combustible y las baterías, y la potencia entregada por los ultracapacitores, para suplir el requerimiento energético del VE. Por lo que el balance energético se puede definir como:

$$P_{driver} = P_{FC} + P_{BB} + P_{UC} \quad (4.1)$$

Para definir las referencias de corriente (potencia) de los convertidores de la planta híbrida del vehículo eléctrico, y que se cumpla (4.1), se requiere de un sistema que sea capaz de determinar dichas referencias de acuerdo a los escenarios posibles del vehículo eléctrico. Para ello, en este trabajo se plantea utilizar un sistema por lógica difusa, de acuerdo a lo que se presentó en la Tabla 16.

Sistema de control por lógica difusa

La lógica difusa (FL, por sus siglas en inglés) es una forma de lógica de muchos valores de verdad de variables que pueden ser cualquier número real entre 0 y 1, incluyendo éstos últimos, que permite representar matemáticamente la incertidumbre y la vaguedad, proporcionando herramientas formales para su tratamiento. Se emplea para manejar el concepto de verdad parcial, donde el valor de verdad puede variar entre completamente verdadero (“1”) y completamente falso (“0”). Por el contrario, en la lógica booleana, los valores de verdad sólo pueden ser valores enteros (“0” o “1”) [114].

La FL se basa en la observación que la gente toma decisiones basadas en información imprecisa y no numérica. Los modelos o conjuntos difusos son medios matemáticos para representar información imprecisa (de ahí el término difuso). Estos modelos tienen la capacidad de reconocer, representar, manipular, interpretar y utilizar datos e información que carecen de

certeza. Mientras que las variables en matemáticas usualmente toman valores numéricos, en aplicaciones de FL, los valores numéricos se usan para facilitar la expresión de variables lingüísticas [115].

Una variable lingüística como la edad, puede aceptar valores como “joven” o “viejo”. Debido a que los lenguajes naturales no siempre contienen términos suficientes para expresar una escala de valor difuso, es una práctica común modificar los valores lingüísticos con adjetivos o adverbios. En algunos casos, los adjetivos pueden abarcar los términos “grande”, “mediano”, “pequeño”, que se conocen, en la FL, como inferencias.

Un sistema de inferencia difusa (FIS, por sus siglas en inglés) es una forma de transformar un espacio de entrada en un espacio de salida utilizando FL. Los FIS tratan de formalizar, mediante FL (construyendo reglas SI-ENTONCES), razonamientos del lenguaje humano, que se utilizan para resolver un problema de decisión. Es decir, tomar una decisión y actuar en consecuencia. Para ello, se introduce la noción de *conjuntos difusos*, los cuales asocian valores de pertenencia [116].

De este modo, a diferencia de la teoría clásica de conjuntos que se basa en el principio básico de la lógica, de forma que un elemento pertenece o no pertenece a un conjunto, la idea básica de un conjunto difuso es que un elemento forma parte de un conjunto con un determinado *grado de pertenencia*.

En general, un FIS cuenta con cuatro módulos, como se muestra en la Fig. 39.

- Módulo de fuzzificación: convierte las entradas al sistema, que son valores numéricos, en conjuntos difusos aplicando una función de fuzzificación.
- Base de conocimientos: Almacena las reglas SI-ENTONCES obtenida por experiencia.
- Motor de inferencia: simula el razonamiento humano haciendo inferencia sobre las entradas y las reglas SI-ENTONCES.
- Módulo de defuzzificación: convierte el conjunto difuso obtenido por el motor de inferencia en un valor numérico.

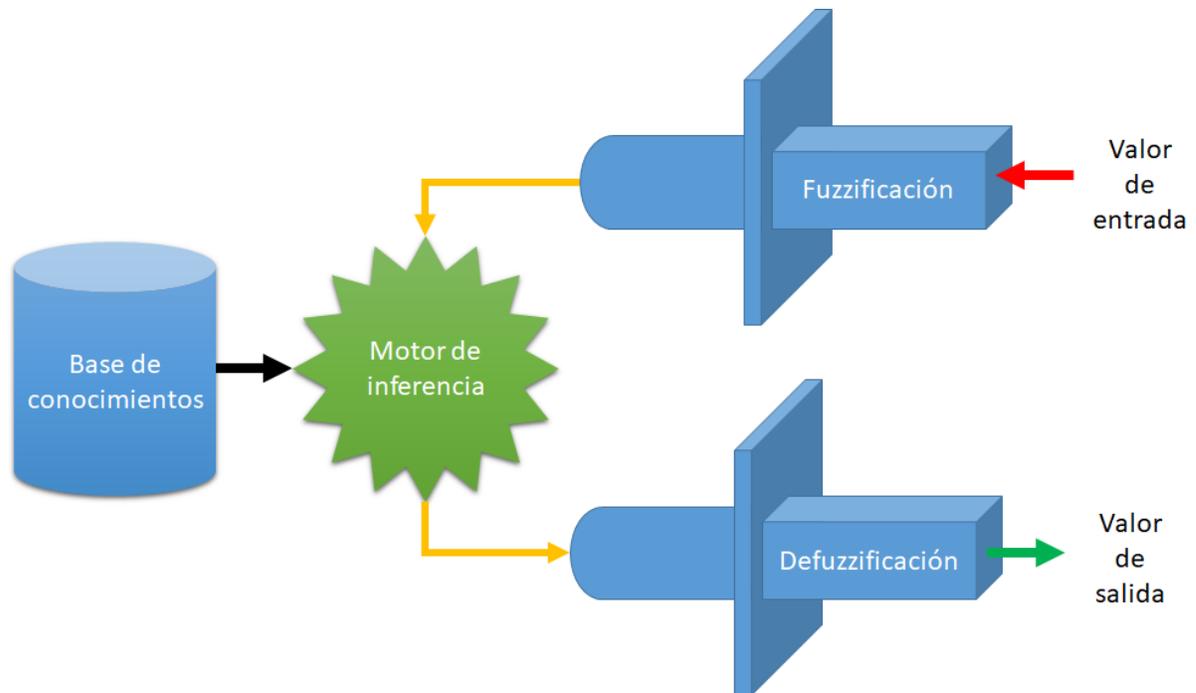


Fig. 39.- Sistema de inferencia difusa (FIS).

Los métodos de inferencia difusa se clasifican en métodos directos e indirectos. Los métodos directos son los más utilizados, como por ejemplo los de Mamdani y Sugeno, mientras que los métodos indirectos son más complejos. En este trabajo de tesis, se utilizó el método Mamdani, que en el Anexo A.4 se explica más a detalle. Mediante este método se obtiene las referencias para los convertidores que integran la planta de potencia híbrida y que se explica a continuación.

La arquitectura que en este trabajo se propone se divide en dos niveles, uno de interpretación de la demanda energética y distribución de la energía (“control supervisor”), y uno de control de convertidores (“control local”), como se muestra en Fig. 38.

4.3 Desarrollo del control local

Para la EMS que se propone en este trabajo, se contempla la distribución de energía mediante la regulación de la corriente de salida de las fuentes. Para ello, se utilizan convertidores de potencia, tanto para la celda de combustible, como para las baterías. De acuerdo con el dimensionamiento de las fuentes, y del voltaje de operación del driver del motor, se selecciona el tipo de convertidor asociado a cada fuente. Los cuales pueden ser de tipo reductor (buck), o tipo elevador (boost). En el caso de las baterías, el convertidor asociado debe contemplar las dos funciones, ya que será de

un tipo para la descarga y del otro tipo para la recarga de éstas. Para la regulación de corriente de éstos tipos de convertidores, se contempla el uso de un controlador compensador tipo II [117].

El enfoque de la estrategia de manejo de energía propuesta es de estimar y proveer señales de referencia a los convertidores de DC-DC asociados a las celdas de combustible y de las baterías.

La EMS debe estimar y generar las señales: D_{cFC} , D_{buck_cBB} y D_{boost_cBB} , que representa el ciclo de trabajo para los convertidores de las celdas de combustible y de las baterías en modo descarga y recarga, respectivamente. Estas señales son utilizadas por el “control local” para regular la corriente de los convertidores (ver Fig. 38).

En el Capítulo 2 se presentó los análisis matemáticos asociados a los convertidores, tanto para el tipo reductor, como para el elevador. Mientras que en los Anexos A.2 y A.3 se presenta el análisis de la estabilidad de los mismos. De estos resultados, se demuestra que el controlador es estable y permite el seguimiento de trayectorias.

Ya que los convertidores son los responsables de controlar el flujo de energía desde y hacia las fuentes, estos deben garantizar el seguimiento de las referencias que designe la EMS propuesta en este trabajo. Por lo anterior, se desarrolló un diagrama de SIMULINK (ver Fig. 40) para validar que el control “local” genere las señales de control de los convertidores que permitan el seguimiento de referencias que defina la EMS. Para la validación se utilizaron los valores nominales de los convertidores y de los controladores de los Anexo A.2 y A.3.

Para validar el control “local”, se propone un convertidor reductor para las celdas de combustible y para las baterías en modo descarga, y un convertidor elevador para las baterías en modo recarga. Los resultados del seguimiento de referencia se muestran a continuación.

Para el convertidor reductor, se validó que el convertidor realizara el seguimiento de las referencias de corrientes en escalones de amplitud de 10 A. Primero, en forma ascendente y, posteriormente, en forma descendente. En el caso del convertidor reductor de las baterías, se realiza ocho escalones ascendentes, seguidos de ocho escalones descendentes. En la Fig. 41 se muestra el comportamiento de las baterías, la salida de su convertidor asociado, y del voltaje de los ultracapacitores. Mientras que en la Fig. 42, se muestra el comportamiento de las celdas de combustible, la salida de su convertidor asociado, y del voltaje los ultracapacitores para el seguimiento de referencias de corriente. Para este convertidor se evaluó tres escalones ascendentes, seguidos por dos descendentes y uno final ascendente, todos con una amplitud de 10 A. Lo anterior, debido a que se considera que las baterías suministraran más potencia (en consecuencia, corriente) que las celdas de combustible.

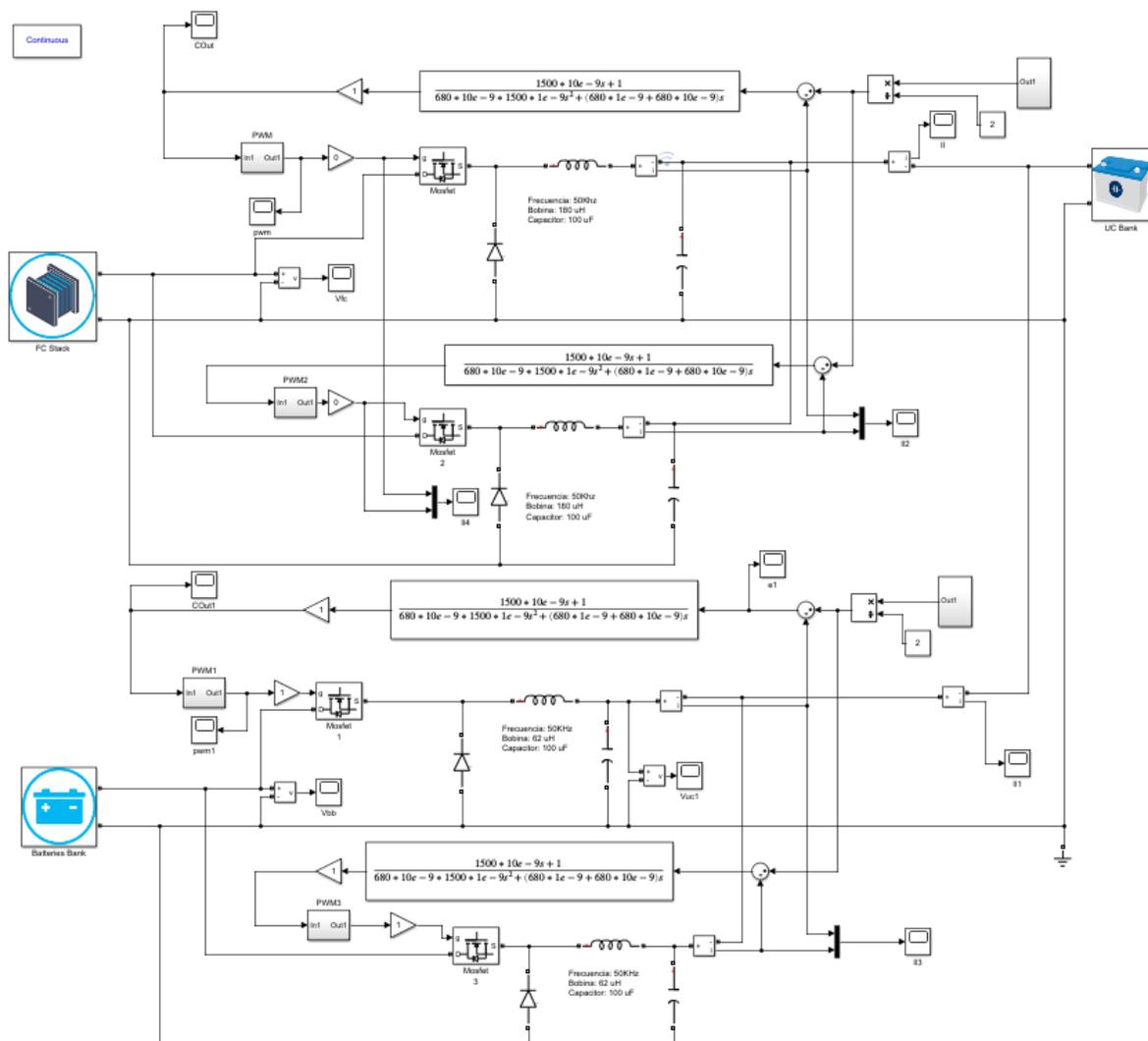


Fig. 40.- Diagrama para validar el control de los convertidores (control “local”)

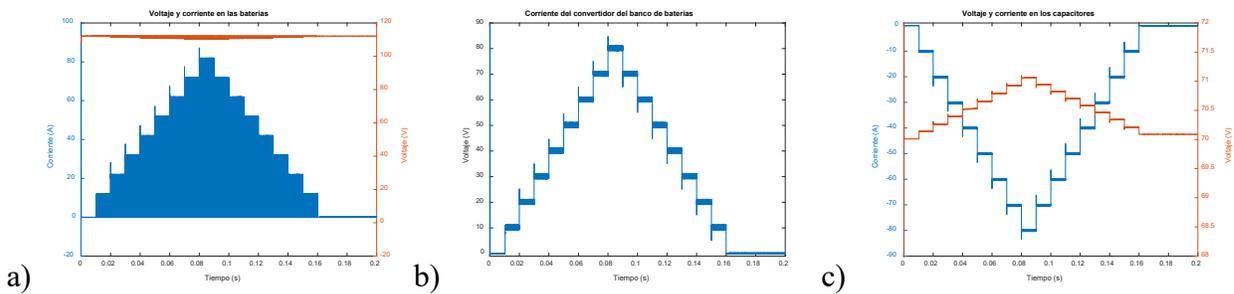


Fig. 41.- a) Comportamiento de las baterías, b) de su convertidor, y c) de los ultracapacitores en el seguimiento de referencias de corrientes.

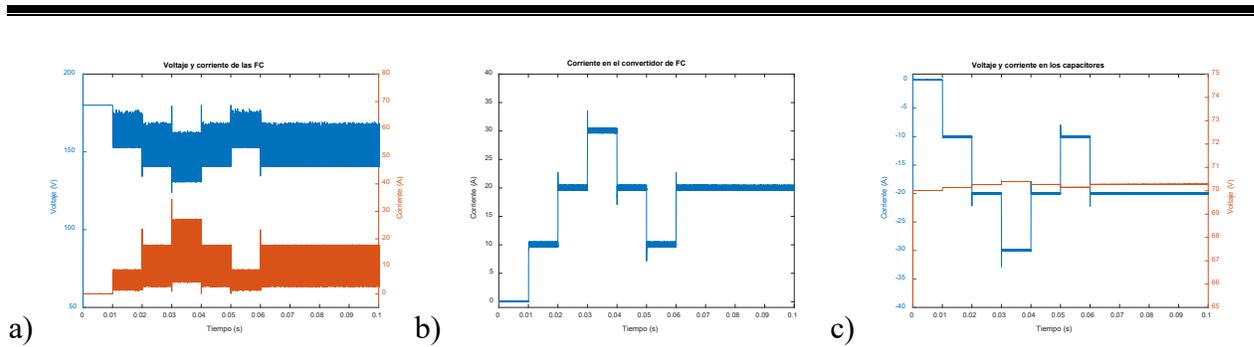


Fig. 42.- . a) Comportamiento de las celdas de combustible, b) de su convertidor, y c) de los ultracapacitores en el seguimiento de referencias de corrientes

En el caso del convertidor elevador, en la Fig. 43 se muestra el comportamiento de las baterías, de su convertidor asociado y de los ultracapacitores, para el seguimiento de referencias escalonadas de amplitud de 10 A. Éstos fueron aplicados de la siguiente forma: ocho escalones descendentes, seguidos de ocho ascendentes. Esto se debe a que, en el caso de las baterías, la corriente negativa representa el flujo de corriente contraria, es decir, se están recargando. Y, cuando ésta es positiva, las baterías se están descargando.

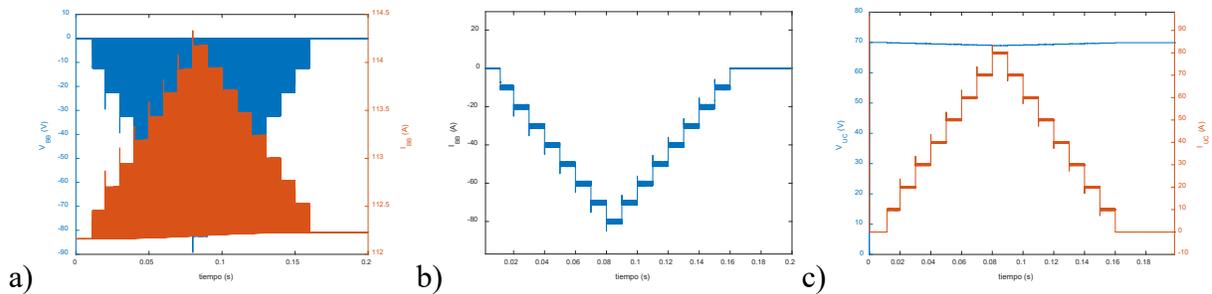


Fig. 43.- a) Comportamiento de las baterías, b) de su convertidor, y c) de los ultracapacitores en el seguimiento de referencias de corrientes.

4.4 Desarrollo del control supervisor

En la literatura se ha encontrado el desarrollo de EMS utilizando diversas técnicas de control. Sin embargo, en este trabajo se propone una EMS que utiliza la lógica difusa y un divisor de frecuencias (ver Fig. 45). Ambas técnicas de control no requieren modelos matemáticos complejos y su implementación es relativamente sencilla. Además, son ampliamente utilizadas en la industria automotriz [42].

El objetivo de la EMS que se propone en este trabajo es el de controlar el flujo de energía y potencia proveniente del conjunto de celdas de combustible, así como que la que entregan y reciben las baterías y los ultracapacitores, con las consideraciones siguientes:

1. Cumplir con el desempeño del vehículo (requerimiento de potencia)
2. Mantener el voltaje de los ultracapacitores (conectados directamente al bus de DC) en el rango de operación del driver del motor.
3. Mejorar el punto de operación de las celdas de combustible (mejora en la conversión de la energía proveniente del hidrógeno) cada que le sea posible.
4. Limitar la corriente de salida de las celdas de combustible y su tasa de cambio.
5. Mantener el estado de carga (SOC) de las baterías dentro del especificado por el proveedor.
6. Establecer el SOC final de las baterías lo más cercano a la inicial⁴.

Además, de manera global, se debe cumplir lo siguiente:

$$P_{driver} = P_{FCS} + P_{BBS} + P_{UC} \quad (4.2)$$

Donde P_{driver} es la potencia requerida en el driver del motor del vehículo considerando las eficiencias de las partes electro-mecánicas, tales como la transmisión, el motor y su driver.

Recordando las definiciones presentadas en la Sección 3.2.2 se tiene que: al conjunto de celdas de combustible, su BOP y el convertidor asociado, se llama sistema de celdas de combustible (FCS). Y, al conjunto del banco de baterías y su convertidor de potencia bidireccional, se llama sistema del banco de baterías (BBS), de acuerdo a la Fig. 44.

El FCS, el BBS, los ultracapacitores y el driver del motor están conectados al mismo punto, es decir, a un bus de DC. Por lo tanto, en este punto, el voltaje (el bus) es común para todos, y la ecuación (4.2) se puede reescribir como sigue:

$$I_{driver} = I_{FC_C} + I_{BB_C} + I_{UC} \quad (4.3)$$

Donde I_{driver} es la corriente que demanda el driver del motor del EV, I_{FC_C} es la corriente de salida del convertidor de las celdas de combustible, I_{BB_C} es la corriente del convertidor del banco de baterías e I_{UC} es la corriente de los ultracapacitores (Fig. 44)

⁴ De acuerdo al SOC de referencia establecido en el diseño de la EMS.

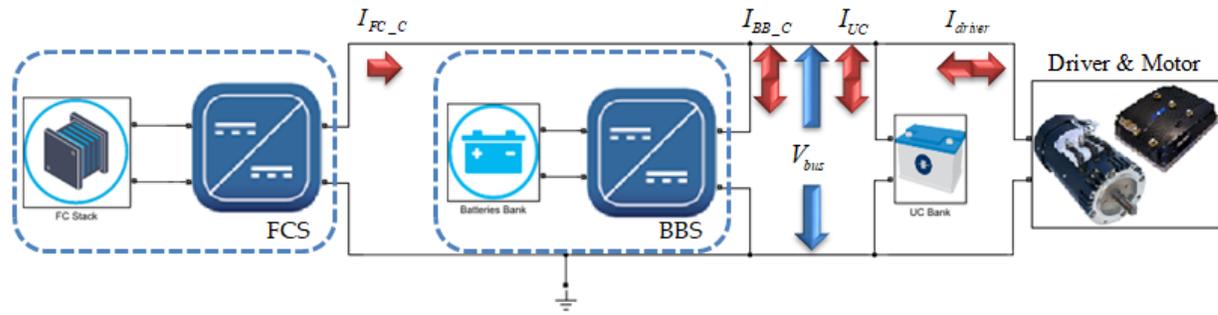


Fig. 44.- Configuración de la planta de potencia del vehículo, caso de estudio.

El objetivo de la EMS es encontrar las referencias de corriente a cada convertidor asociado a las celdas de combustible y al de las baterías. Se debe notar, que el control de flujo de energía hacia y desde los ultracapacitores se controla de manera indirecta a través de los convertidores mencionados anteriormente.

La EMS se divide en tres partes, como se puede observar en la Fig. 45: uno para el cálculo del requerimiento energético (potencia), otro para el FCS (control de las celdas de combustible), en el cual se diseña un controlador con la técnica de control por FL, y finalmente uno para las demás fuentes, en donde se utiliza un divisor de frecuencias para definir la potencia que deben aportar el BBS y los ultracapacitores (control de las baterías y de los ultracapacitores).

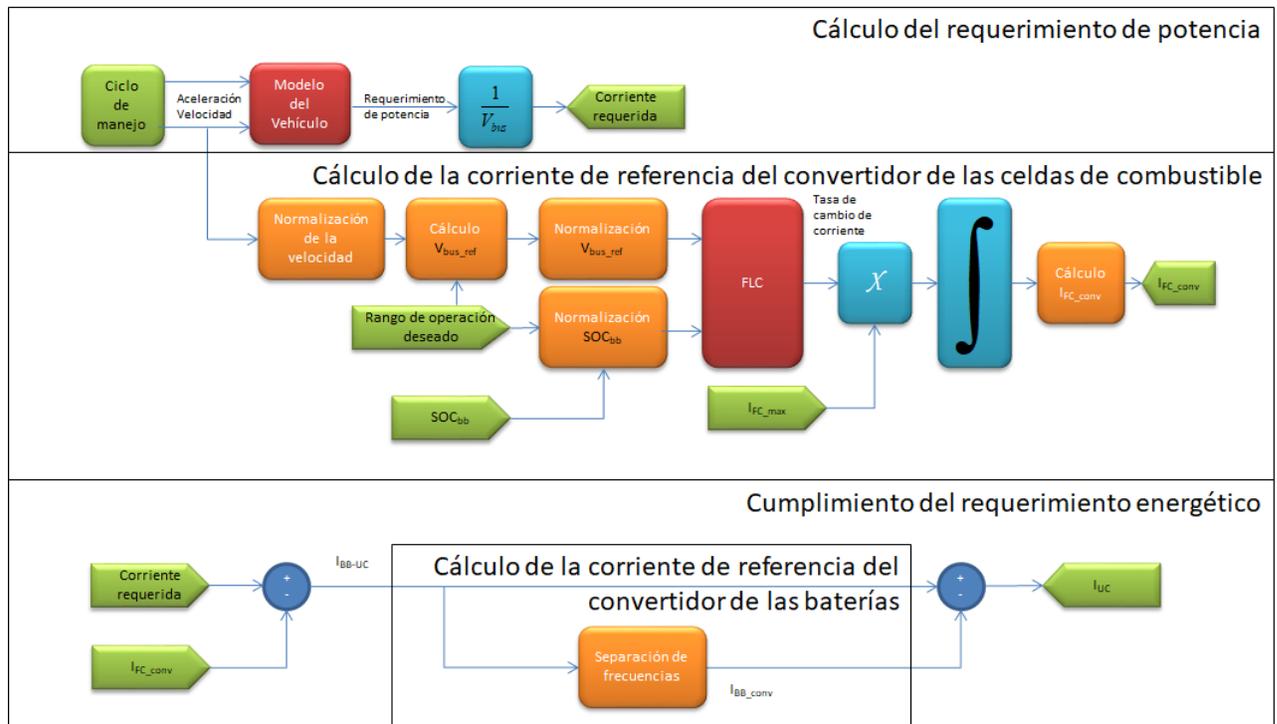


Fig. 45.- Diagrama del control “supervisor”.

4.4.1 Control de las celdas de combustible

El enfoque de este trabajo considera a las celdas de combustible como principal fuente de energía del tren de potencia. Por lo que éstas deben suministrar todo el requerimiento energético del EV para una autonomía definida. Por lo tanto, con el flujo de energía de las celdas de combustible se controla indirectamente el SOC de las baterías y de los ultracapacitores. En este trabajo se propone un controlador asociado a las celdas de combustible basado en la técnica de control de lógica difusa. Esta técnica permite definir leyes de control usando etiquetas lingüísticas, reduciendo su complejidad y facilitando su implementación [14].

El controlador por lógica difusa (FLC, por sus siglas en inglés) que se propone en este trabajo para las celdas de combustible tiene dos entradas y una salida. La salida es la referencia de corriente del convertidor de las celdas. Como se había mencionado antes, las celdas de combustible son las responsables de cumplir con el requerimiento de energía en todo el EV. Por lo tanto, el SOC de las baterías y de los ultracapacitores dependen de la cantidad de energía que éstas puedan entregar. Por lo anterior, las entradas al FLC están relacionadas al SOC de las baterías y de los UC, éste último representado por el voltaje en el bus de DC. A continuación, se describe la obtención de dichas entradas al FLC.

Entradas del FLC

La energía cinética que puede adquirir el EV depende de la velocidad a la que vaya. A mayor velocidad, mayor energía cinética, y viceversa. Por lo que, entre más rápido vaya el EV más energía se podría recuperar mediante el frenado regenerativo. Y entre más energía se pueda recuperar, se requiere que los UC tengan dicha capacidad de almacenamiento. Por lo tanto, entre mayor velocidad lleve el EV, el voltaje del bus debe ser más bajo, y viceversa. De lo anterior, se propone un voltaje de referencia del bus de DC respecto a la velocidad del vehículo, de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$V_{bus_ref} = V_{max} - \frac{Vel}{Vel_{max}}(V_{max} - V_{min}) \quad (4.4)$$

Donde V_{bus_ref} es el voltaje de referencia del bus de DC, mientras que V_{max} y V_{min} , representan los límites superior e inferior del rango de voltaje de operación del bus de DC. Vel representa la velocidad del EV, y Vel_{max} es la velocidad máxima que puede alcanzar de acuerdo al ciclo de manejo seleccionado. De (4.4) se observa que, cuando el EV este detenido, el voltaje del bus debería ser el máximo de operación para una mayor capacidad de suministro de potencia en el arranque del vehículo. Además, en este estado no hay posibilidad de almacenar energía proveniente del frenado regenerativo. Mientras que, si el EV va a su máxima velocidad, el voltaje del bus

debería ser el mínimo para almacenar la mayor cantidad de energía proveniente del frenado regenerativo. Con fines de diversificar el uso del FLC en distintitos tipos de vehículos con diferentes límites de velocidad y voltajes de operación del bus de DC, se normaliza la entrada al FLC mediante la siguiente ecuación:

$$V_{bus_ref}^{nor} = \frac{V_{bus_ref} - V_{bus}}{V_{max} - V_{min}} \quad (4.5)$$

Donde $V_{bus_ref}^{nor}$ es el voltaje de referencia normalizado y V_{bus} es el voltaje presente en el bus de DC.

Por otro lado, el enfoque de este trabajo considera a un EV “no plug-in”. Por lo que, la energía proveniente de las baterías y los ultracapacitores debería ser recuperada al término de la autonomía definida para el vehículo. Ya que la única fuente de energía que se considera a bordo del EV son las celdas de combustibles, éstas deben entregar mayor energía cuando el SOC de las baterías se encuentren por debajo de un SOC de referencia definida por la aplicación y el fabricante de las baterías (SOC_{ref}). Mientras que, si el SOC de las baterías es superior a dicha referencia las celdas deben entregar menos potencia paulatinamente.

Dichas relaciones se definen mediante las ecuaciones siguientes:

Si el SOC de las baterías es mayor al de referencia

$$Ad_{SOC} = \frac{SOC_{ref} - SOC_{BB}}{SOC_{max} - SOC_{ref}} \quad (4.6)$$

Mientras que si el SOC de las baterías es menor al de referencia

$$Ad_{SOC} = \frac{SOC_{ref} - SOC_{BB}}{SOC_{ref} - SOC_{min}} \quad (4.7)$$

Donde SOC_{min} y SOC_{max} representan los límites del estado de carga a los cuales se desea operar a las baterías. Mientras que SOC_{ref} representa el estado de carga de las baterías al cual debería estar la mayor parte del tiempo. Todos estos parámetros se definen por la aplicación y por sugerencia del fabricante de las baterías. En la Fig. 46 se muestra ejemplos diferentes de límites de SOC para diferentes aplicaciones, tales como, cuando las baterías es la principal fuente de energía o cuando éstas sólo se utilizan para complementar la potencia requerida por el vehículo. Por lo anterior, en (4.6) y (4.7), Ad_{SOC} representa la tasa de potencia que las celdas deberían de incrementar o reducir para alcanzar el SOC de referencia sugerida por el fabricante o requerida por

la aplicación. Tanto Ad_{SOC} como $V_{bus_ref}^{nor}$ son valores normalizados, es decir, sus valores fluctúan en el intervalo $[-1,1]$, y funcionan como valores de entradas del sistema de inferencia difusa para obtener la salida de referencia del punto de operación de las celdas de combustible, como se muestra en la subsección siguiente.

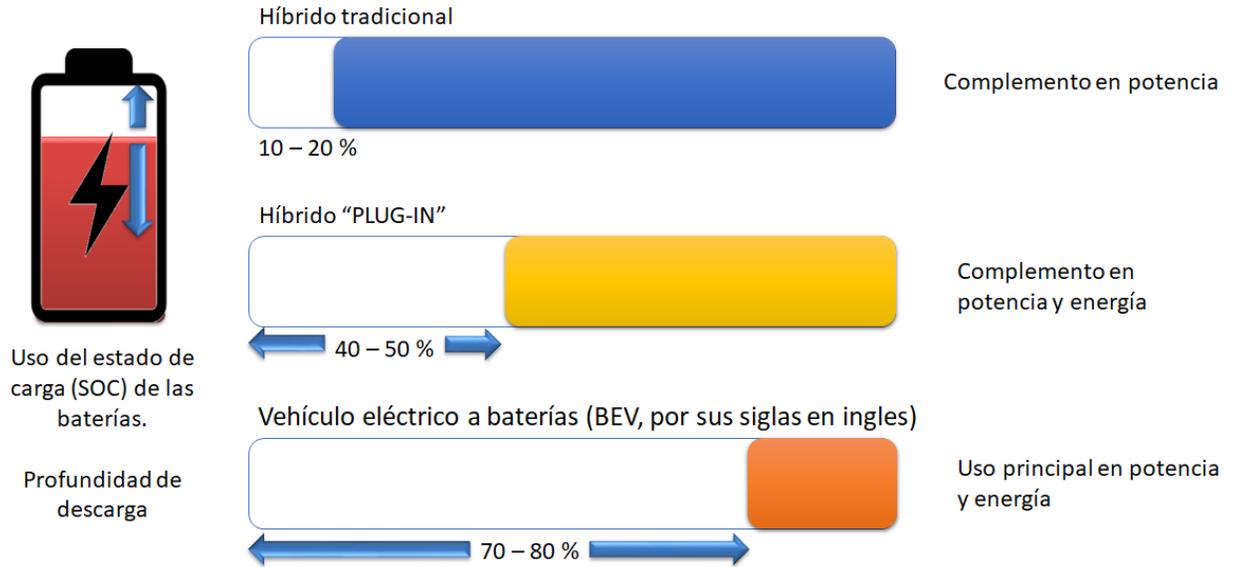


Fig. 46.- Profundidad de descarga en diferentes aplicaciones

Salida del FLC

El FLC que se propone en este trabajo, convierte las dos entradas normalizadas en una salida normalizada utilizando un sistema de lógica difusa, tal como se muestra en la ecuación siguiente:

$$\Delta I_{FC}^{nor} = f(V_{bus_ref}^{nor}, Ad_{SOC}) \quad (4.8)$$

donde las entradas normalizadas $V_{bus_ref}^{nor}$ y Ad_{SOC} representan el voltaje de referencia del bus de DC y el estado de carga del banco de baterías. Y la salida del FLC ΔI_{FC}^{nor} es la tasa de corriente de las celdas de combustible normalizada.

En este trabajo se consideró que la salida del FLC es el cambio relativo de la corriente de salida de las celdas de combustible. Para la aplicación que se propone en este trabajo, esta salida es des-normalizada para encontrar la tasa de cambio en la corriente de las celdas de combustible. Es decir, $dI_{FC}^{(t)}/dt$, que se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$\frac{dI_{FC}}{dt} = \Delta I_{FC} = \Delta I_{FC}^{nor} \Delta I_{FC}^{max} \quad (4.9)$$

Para la des-normalización, se utiliza la tasa máxima de cambio permisible en el tiempo de la corriente de las celdas de combustible ΔI_{FC}^{\max} . Dónde este parámetro es particular para cada celda de combustible, y la cual depende de su construcción física.

Ya que ΔI_{FC}^{\max} es una razón de cambio máxima permisible en el tiempo de la corriente de la celda de combustible, la cual en este trabajo se encuentra definida el cambio máximo en la corriente eléctrica en un periodo de tiempo (A/s). Por lo que este parámetro se considera cómo la “dinámica” máxima permitida por las celdas de combustible.

Posteriormente, la derivada de la corriente de las celdas es integrada para encontrar la referencia de las celdas de combustible mediante la ecuación siguiente:

$$I_{FC}^{ref} = \int_{\text{limited}} \Delta I_{FC} dt \quad (4.10)$$

La acción de la integral es limitada al valor máximo de la corriente de las celdas de combustible. Esto es para asegurar que a las celdas de combustible no se le demande una corriente superior a las que éstas pueden entregar.

Sistema de Inferencia Difusa (FIS)

En este trabajo, para el controlador de las celdas de combustible, se propuso un sistema de inferencia difusa tipo Mamdani. Ya que este tipo de sistema tiene bases de reglas más intuitivas y fáciles de entender, que se adaptan bien a las aplicaciones donde las reglas se crean a partir del conocimiento experto humano. Para nuestro diseño del sistema de lógica difusa se utilizaron las funciones de pertenencias que se muestran en la Fig. 47-Fig. 49 [118].

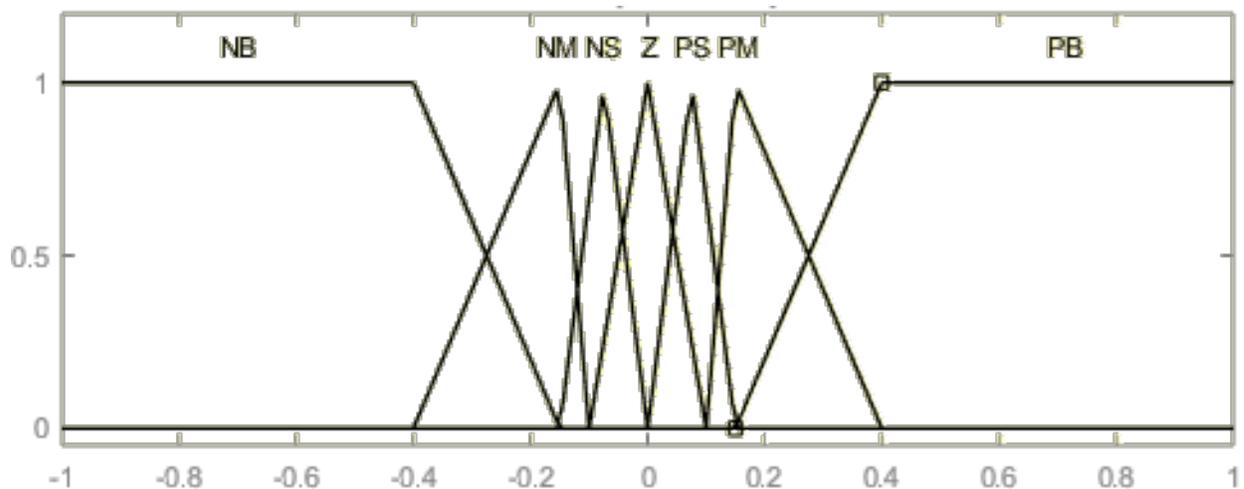


Fig. 47.- Grados de pertenencia para la entrada V_{bus_nom} .

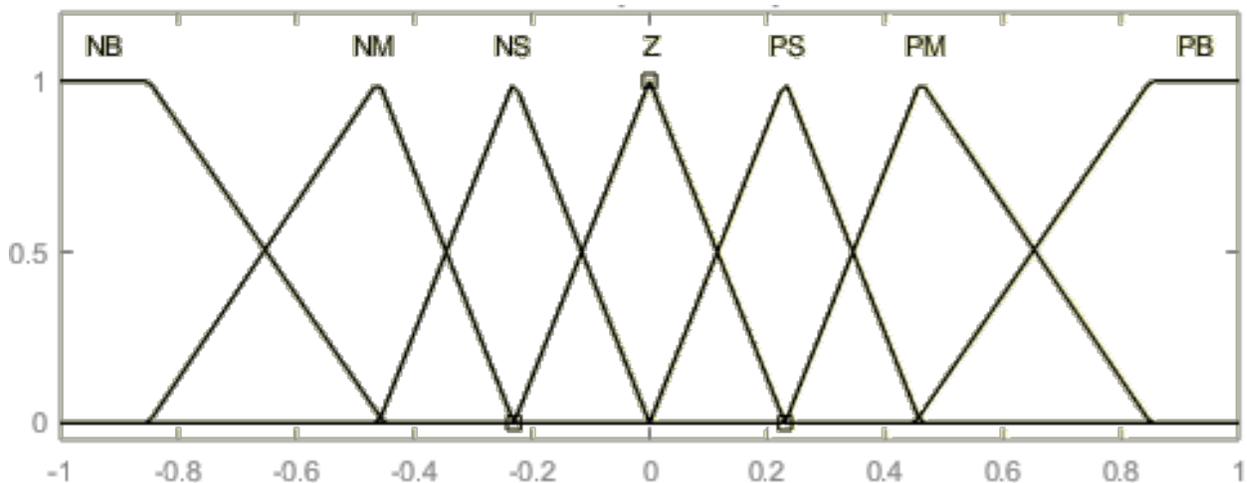


Fig. 48.- Grados de pertenencia para la entrada Adsoc.

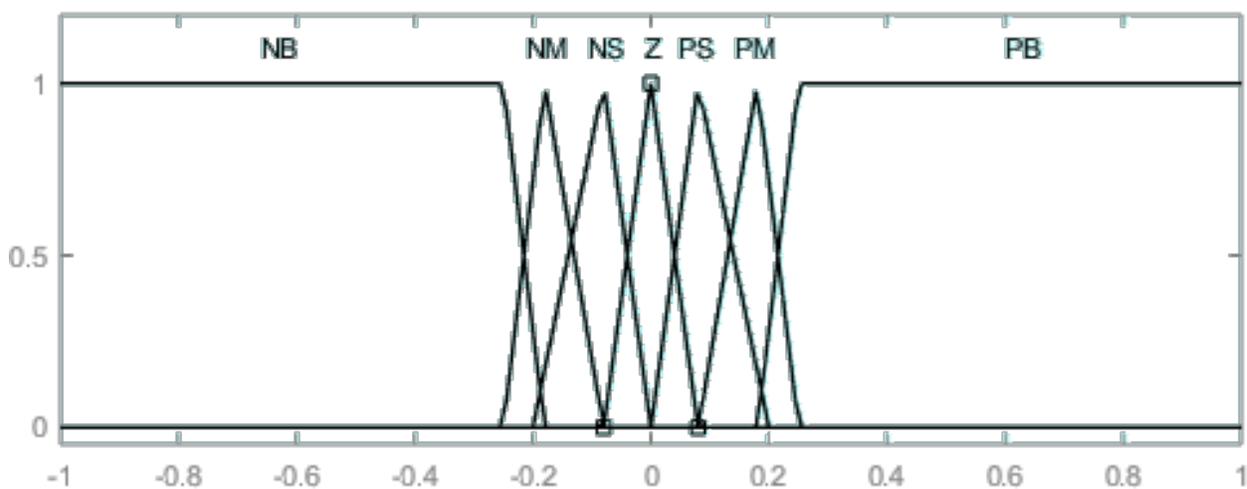


Fig. 49.- Grados de pertenencia para la salida di_{FC}/dt

donde:

Tabla 17.- Identificadores para los grados de pertenencias

<i>ID.</i>	<i>Descripción</i>
<i>NB</i>	Negative Big / Negativo grande
<i>NM</i>	Negative Medium / Negativo mediano
<i>NS</i>	Negative Small/ Negativo pequeño
<i>Z</i>	Zero / Cero
<i>PS</i>	Positive Small / Positivo pequeño
<i>PM</i>	Positive Medium / Positivo mediano
<i>PB</i>	Positive Big / Positivo grande

Mientras que, en la Tabla 18 se muestran las reglas de inferencia para el sistema de inferencia difuso.

Tabla 18.- Reglas de inferencia para el FIS

$V_{bus_ref}^{nom} \setminus Ad_{SOC}$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
NM	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
PM	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
PB	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB

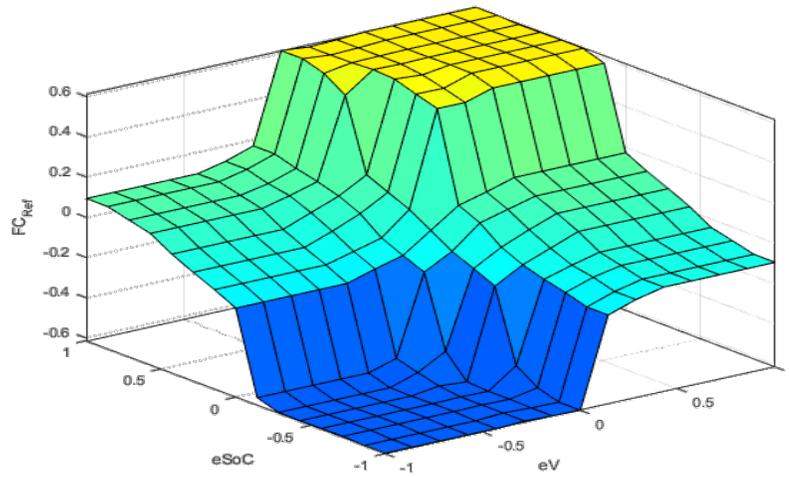


Fig. 50.- Grafica de la superficie del FIS.

Referencia del convertidor de las celdas de combustible

Para determinar la referencia de los convertidores asociados a las celdas de combustible, previamente se calcula la potencia que entregan las celdas mediante la ecuación siguiente:

$$P_{FC} = V_{FC} I_{FC}^{ref} \quad (4.11)$$

Y la potencia del sistema de celdas de combustible se encuentra dado por:

$$P_{FCS} = \eta_{conv} P_{FC} \quad (4.12)$$

donde η_{conv} es la eficiencia del convertidor de las celdas de combustible.

Posteriormente, la referencia del convertidor de las celdas se calcula considerando el voltaje presente en el bus de DC, mediante la ecuación siguiente:

$$I_{FC_C} = \frac{P_{FCS}}{V_{bus}} \quad (4.13)$$

4.4.2 Control del banco de baterías

En este trabajo, las baterías y los capacitores se consideran fuentes auxiliares. La potencia que pueden entregar en su conjunto, deben complementar a la que entrega el convertidor asociado a las celdas de combustible, para cumplir con el requerimiento de potencia del EV. La potencia que ambos deben entregar P_{BBS-UC} se encuentra definido por:

$$P_{BBS-UC} = P_{driver} - P_{FCS} \quad (4.14)$$

Donde la corriente de éstas está dada por:

$$\begin{aligned} I_{BBS-UC} &= \frac{P_{BBS-UC}}{V_{bus}} \\ I_{BBS-UC} &= \frac{P_{driver}}{V_{bus}} - I_{FC_C} \\ I_{BBS-UC} &= I_{driver} - I_{FC_C} \end{aligned} \quad (4.15)$$

I_{BBS-UC} representa la suma de corrientes del BBS y de los UC. Para determinar el valor de cada uno de los elementos, se propuso utilizar una técnica llamada separación de frecuencias. Ésta técnica es muy utilizada en el diseño de EMS. En este trabajo se propone el uso de un filtro “pasa-bajas” como separador de frecuencias para determinar la corriente del BBS, ya que las baterías tienen un menor tiempo de respuesta en comparación de los UC. La señal que entrega el filtro determina la corriente del BBS, mientras que la diferencia entre la señal de entrada y de la salida es la corriente que debe entregar los UC. El filtro de primer orden tiene la función de transferencia siguiente:

$$H(s) = \frac{1}{1 + T_b s} \quad (4.16)$$

donde T_b es una constante de tiempo, y “ s ” es el operador de Laplace. La constante de tiempo se determinó mediante valores reportados [28], [30] y [32], y de acuerdo a los diagramas de Ragone que se presentan en los trabajos [26], [63], [119]. En este trabajo se consideró una frecuencia de corte de 667 mHz. Por lo que, la señal de la corriente de referencia del banco de baterías se determina de la siguiente manera:

$$I_{BB_C} = \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{1 + 1.5s} \right) I_{BBS-UC} \quad (4.17)$$

4.4.3 Control del banco de ultracapacitores

Ya que los capacitores no cuentan con un convertidor asociado, su control es de manera indirecta. El voltaje de los ultracapacitores se regula con el control del flujo de energía de las celdas de combustible y del banco de baterías. Mientras que la corriente que éstos pueden entregar se puede calcular mediante la expresión siguiente:

$$I_{UC} = I_{BBS-UC} - I_{BB_C} \quad (4.18)$$

4.4.4 Diseño de la estrategia

Como se ha mencionado en las sub-secciones anteriores, el diseño de la estrategia de manejo de energía que se propone en este trabajo estima las referencias para los convertidores asociados al sistema de celdas de combustible y del banco de baterías. Además, la estrategia de manejo de energía tiene como principales objetivos los siguientes:

- Desempeño del vehículo (cumplimiento del requerimiento de potencia)
- Uso eficiente de la conversión de la energía del hidrógeno (celdas de combustible)
 - Limitar la corriente de salida de las celdas de combustible
 - Mantener rango de voltaje de operación
 - Mantener el rango del SOC de las baterías definida

Y para ello, se tiene contemplado el uso de los parámetros de entrada como: velocidad, estado de carga, voltaje del bus, etc., como se muestra en la Fig. 51.

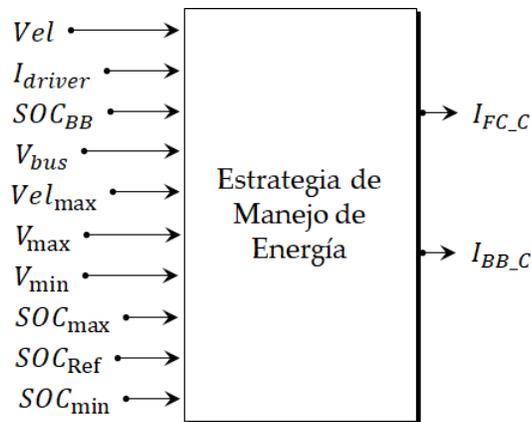


Fig. 51.- Diseño de la estrategia de manejo de energía.

Y la EMS tiene dos sistemas de control, uno para las celdas de combustible y otro para el banco de baterías. Para las celdas de combustible, el control se basa en un sistema de inferencia difusa. Mientras que, para el banco de baterías, el control se basa en un separador de frecuencias, como se muestra en la Fig. 52.

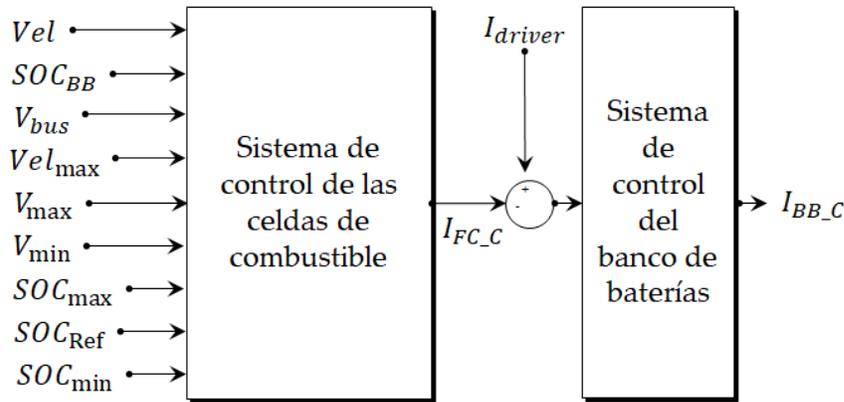


Fig. 52.- Sistemas de control de la EMS.

El sistema de control de las celdas de combustible, basado en lógica difusa, tiene dos entradas y una salida. Las entradas del controlador contemplan variables para la regulación del voltaje bus y del estado de carga de las baterías. Mediante el controlador, se estima la corriente de las celdas de combustible, de acuerdo al diagrama de la Fig. 53.

En la Fig. 53 se observa que la dinámica de las celdas de combustible, definida por la EMS, depende de múltiples parámetros como lo son: el estado de carga de las baterías y de los ultracapacitores, éste último representado por el voltaje del bus de DC.

La aportación de las celdas de combustible no necesariamente “reaccionará” a la “dinámica” del vehículo, pues el comportamiento de las celdas se ve influenciado por los parámetros de la Fig. 52.

Lo anterior se puede observar mediante el siguiente ejemplo: Si dentro del recorrido establecido del vehículo (autonomía meta), éste se encuentra detenido, no habría demanda de potencia/energía por parte del vehículo. Sin embargo, si en este punto, tanto el voltaje del bus de DC y el SOC de las baterías se encuentran por debajo de los niveles estimados por la EMS, las celdas de combustible operaran para alcanzar los umbrales definidos por los criterios de la EMS.

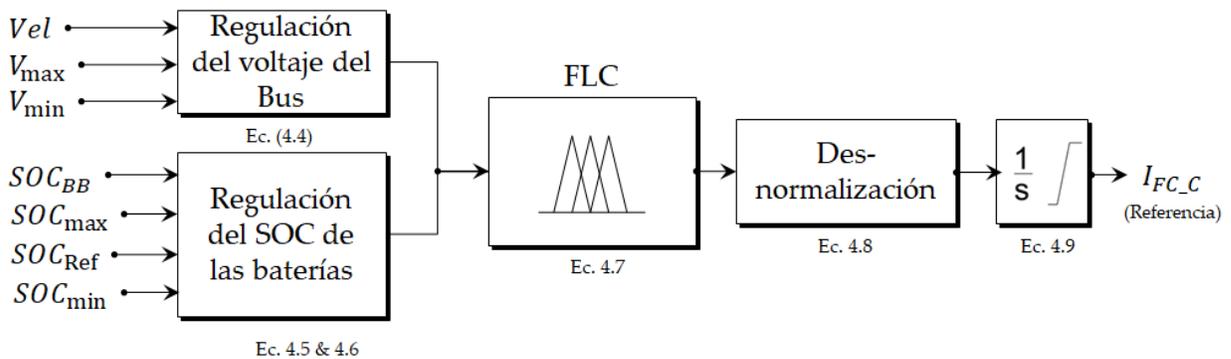


Fig. 53.- Sistema de control de las celdas de combustible basado en lógica difusa.

En el caso del banco de baterías, el control se basa en separación de frecuencias. Mediante un filtro pasa-bajas se estima la referencia del convertidor de las baterías. La frecuencia se estima mediante el análisis de la demanda de potencia y de las características electroquímicas de la batería, así como el tamaño del banco de ultracapacitores. En la Fig. 54, se muestra un filtro pasa-bajas para definir la aportación del banco e baterías.

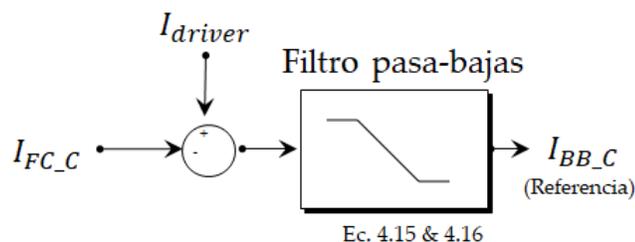


Fig. 54.- Sistema de control del banco de baterías basado en separación de frecuencias.

Con el diseño de la EMS que se presenta en la Fig. 51 se procedió a la validación del mismo.

4.5 Validación de la estrategia

Para validar la estrategia de manejo que se propone en este trabajo, el diseño de la EMS que se muestra en los diagramas de la subsección 4.2.4, se trasladó a un diagrama de simulación en SIMULINK de MATLAB. Además, se utilizaron los parámetros del vehículo resumidas en la Tabla 7 y el dimensionamiento final de la planta de potencia que se muestra en la Tabla 19, para una autonomía (recorrido) de 60 kms. y utilizando el ciclo de manejo WLTC CLASS I. Además, se definieron un SOC inicial, igual al de la referencia del EMS, de un 80%, una tasa de cambio de corriente máxima de las celdas de combustible de 15 A/s y un voltaje inicial de los ultracapacitor de 70V. Los resultados, para el ciclo de manejo seleccionado, se muestran en Fig. 55. Mientras que para la autonomía definida (60 km.) se muestran en la Fig. 56.

Tabla 19.- Dimensionamiento final de la planta de potencia.

<i>Fuente</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Celda de combustible</i>	Peso:	38.91 kg
	Potencia:	6.7 kW
	Número de celdas:	270
	Área activa:	137.49 cm ²
<i>Banco de baterías</i>	Peso:	23.27 kg
	Capacidad de energía:	4.08 kWh
	Configuración:	27s22p
<i>Banco de ultracapacitores</i>	Peso:	15.3 kg
	Capacidad de energía disponible:	27 Wh
	Configuración:	30s1p

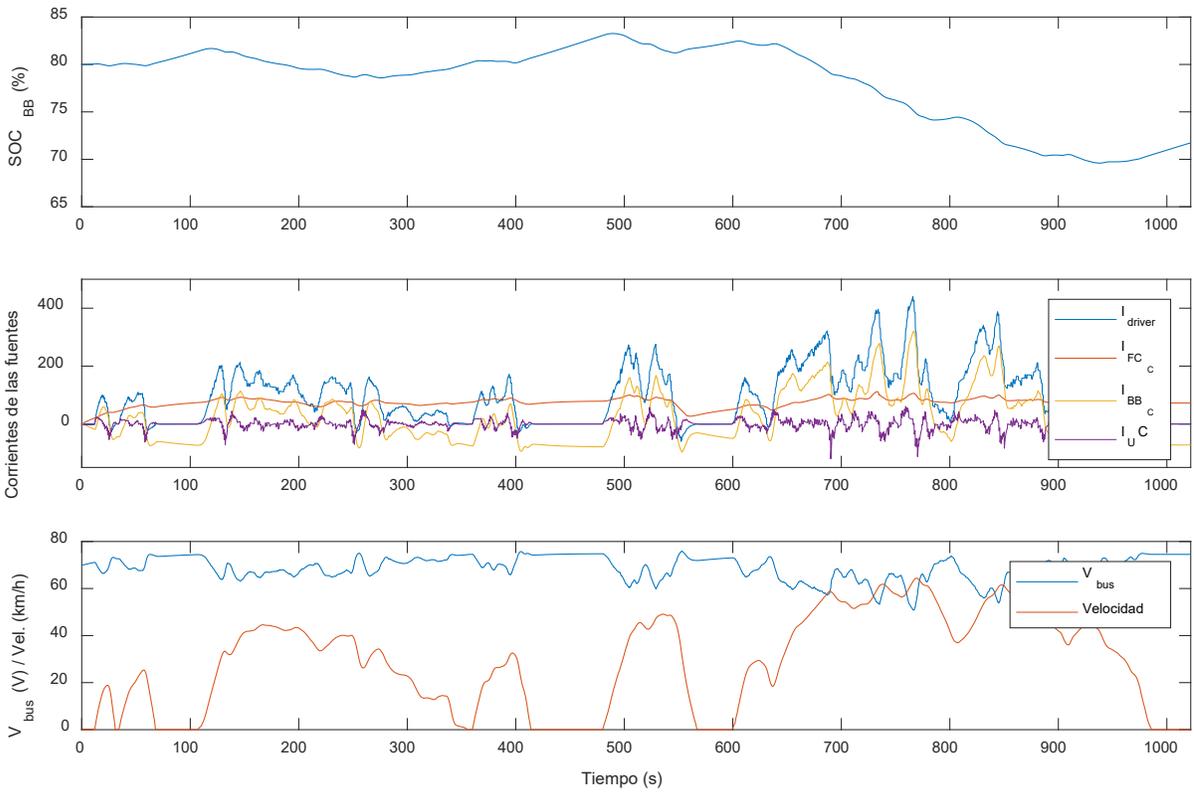


Fig. 55.- Desempeño de las fuentes del vehículo de acuerdo al dimensionamiento y EMS propuestos para el ciclo de manejo seleccionado.

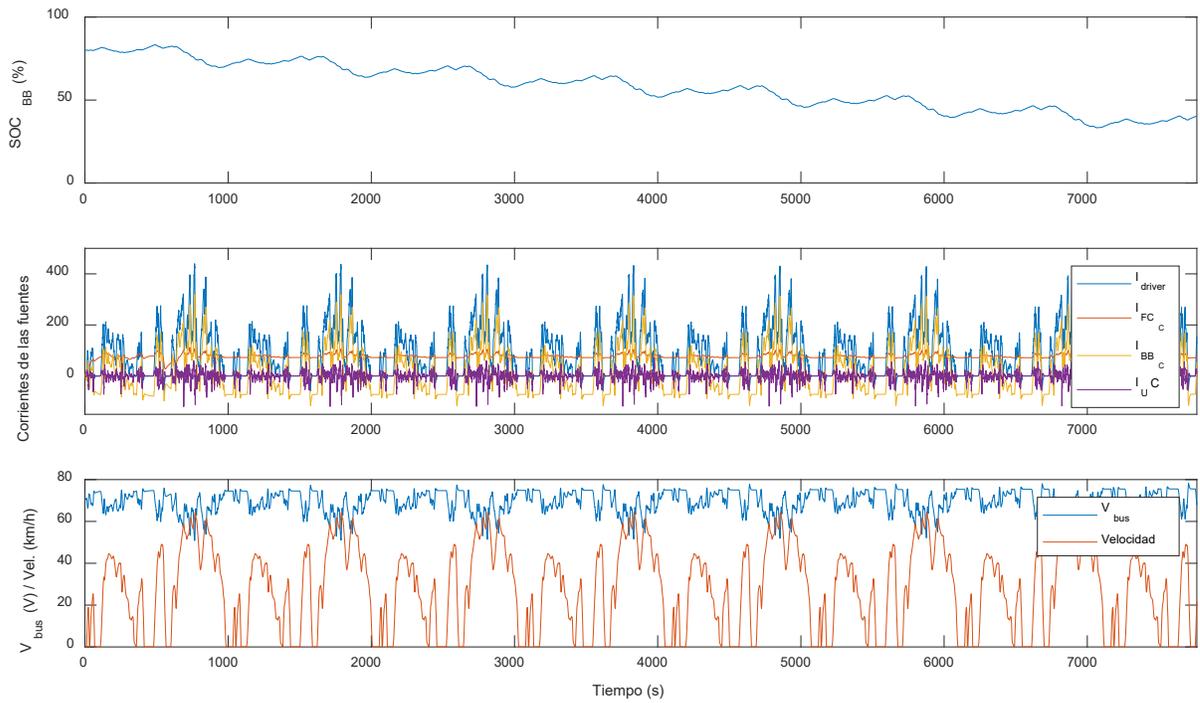


Fig. 56.- Desempeño de las fuentes para la autonomía definida (60 km)

Como se observa en la Fig. 55, la EMS cumple con la distribución de energía/potencia de las fuentes para cumplir con el requerimiento energético. También se puede observar que la aportación de las celdas de combustible inicia antes de que haya una demanda de potencia por parte del vehículo de acuerdo al ciclo de manejo seleccionado. Esto se debe a que el comportamiento de las celdas de combustible depende del estado de carga de las baterías y del voltaje del bus de DC. En ese caso, ya que el vehículo se encuentra detenido (velocidad de 0 km/h), el voltaje del bus debería ser 80 volts, de acuerdo al criterio de diseño de la EMS, por lo que las celdas empiezan aportar energía para alcanza dicha condición.

Mientras que en la Fig. 56, se muestra que también la EMS cumple con la distribución de energía/potencia de las fuentes para cumplir con el requerimiento energético del vehículo. Además, el SOC del banco de ultracapacitores se mantiene dentro del voltaje de operación del bus de DC. Sin embargo, el estado de carga de las baterías (SOC_{ref}) no se mantiene. Es decir, el SOC final de las baterías se encuentra por muy debajo del SOC_{ref} , que en este caso corresponde al SOC inicial, y el cual se definió en un 80%. Por lo tanto, no se cumple que el SOC final sea muy cercano al SOC inicial. Y esta condición incumple con la premisa de que las celdas de combustible sea la fuente principal de la planta de potencia del vehículo eléctrico. Ya que, con el SOC final debajo del SOC inicial, se tiene un déficit de energía, por lo que el vehículo no podría cumplir con su recorrido sin hacer una recarga inicial al banco de baterías.

Debido a que la potencia nominal de las celdas de combustible se definió como la potencia mínima requerida, éstas operan la mayor parte del tiempo a su potencia máxima, lo que se traduce en que éstas hacen uso del combustible con una eficiencia baja.
--

Ya que se diseñó una EMS que intenta operar a las celdas con una mayor eficiencia, significa que la mayor parte del tiempo de operación las celdas deberían de trabajar lejos de su máxima potencia. Por lo anterior, se procedió a realizar un dimensionamiento nuevo de las celdas de combustible. Para ello, se realizó un análisis de la eficiencia de conversión del combustible con respecto a la potencia de las celdas, la cual se muestra en la Fig. 57 (ver Anexo A.5). El análisis consistió en determinar la eficiencia de conversión de combustible a una potencia sobredimensionada con respecto al dimensionamiento final descrito anteriormente. En cada potencia nueva de celdas de combustible se calculó la eficiencia de conversión del hidrógeno comparado con la potencia inicial requerida. Además, también se calculó la tasa de cambio de la eficiencia nueva con respecto a la inmediata anterior. Las potencias evaluadas fueron desde la potencia inicial hasta un 200% más, con un paso de evaluación de un 2% respecto a la potencia inicial. De acuerdo a la gráfica, y los resultados, se determinó incrementar la potencia de las celdas hasta que el cambio de eficiencia fuera menor al 4% respecto a la inmediata anterior. Por lo que, el dimensionamiento nuevo de las celdas se determinó que fuese un 26% respecto a la inicial

evaluada. Con este tamaño nuevo de celdas de combustible, se evaluó el desempeño de la EMS propuesta en este trabajo.

Con el nuevo sobredimensionamiento de las celdas de combustible, la potencia nominal de éstas es de 8.46 kW. Y el desempeño de la EMS con este sobredimensionamiento se muestran a continuación.

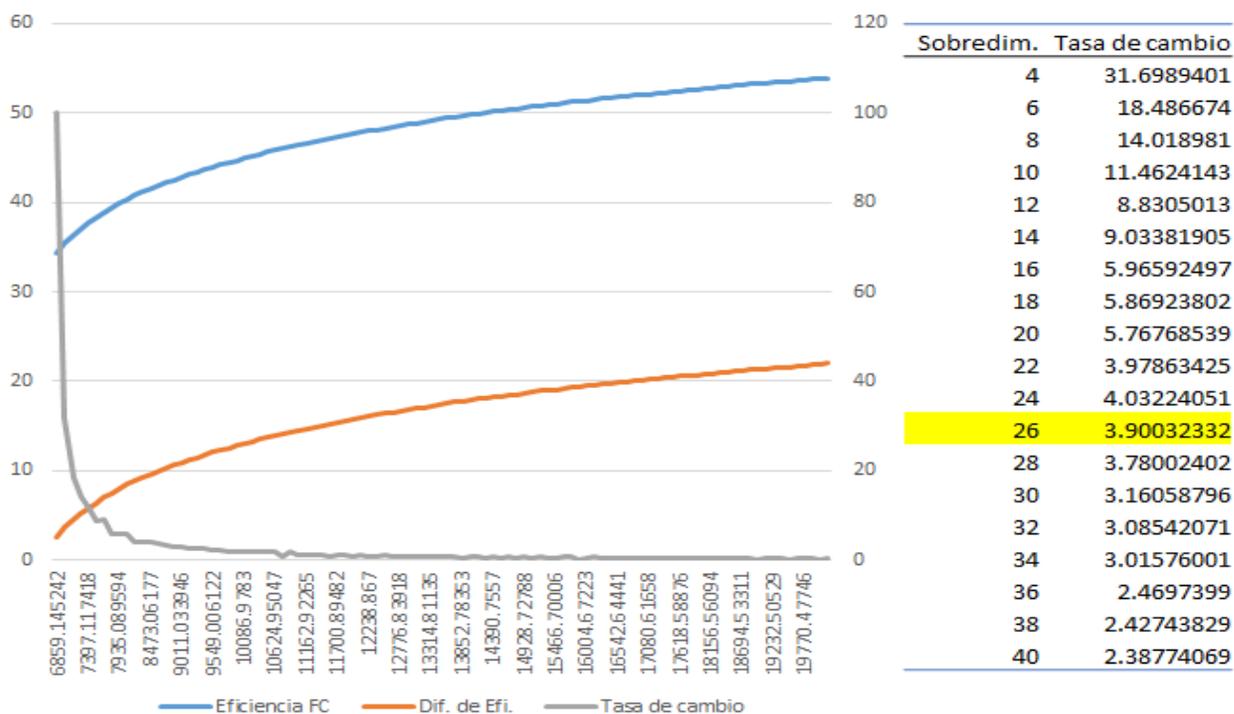


Fig. 57.- Análisis de eficiencias de la conversión del combustible a potencias mayores de las celdas.

En la Fig. 58 se muestra la distribución de las potencias en el vehículo eléctrico con un **SOC inicial de las baterías en un 80% y voltaje del bus de DC en 70V**. Al tener un bus de DC en común para todos, la potencia queda representada por la corriente que el vehículo requiere, así como las corrientes eléctricas que las fuentes aportan. En dicha figura se observa, en línea negra, la corriente de demanda por parte del vehículo, de acuerdo a sus parámetros mecánicos y del ciclo de manejo seleccionado. En línea roja, se muestra la aportación del sistema de celdas de combustible. En línea azul, se muestra la potencia que las baterías aportan o absorben desde el bus de DC. Si ésta es mayor que cero, las baterías están aportando energía, mientras que, si es debajo de cero, las baterías se encuentran recargando. Por último, en línea verde, se muestra la energía que entregan/almacenan los ultracapacitores. Al igual que las baterías, si ésta es positiva, los ultracapacitores están entregando energía, mientras que, si es negativa, éstos se encuentran almacenándola. En ella se puede observar la dinámica de las fuentes, en el caso de los ultracapacitores, éstos son los que presentan una dinámica mayor que las baterías y que las celdas

de combustible. Las baterías tienen una dinámica mayor de las celdas, pero menor que los ultracapacitores. Y el que presenta menor dinámica, es el de las celdas de combustible. Lo cuales están contempladas en el diseño de la EMS.

En la Fig. 59 se muestra el estado de carga de las baterías a lo largo de la autonomía definida de 60 km. con el ciclo de manejo WLTC CLASS I seleccionado. Como se observa, el estado final del estado de carga de las baterías es muy cercano al SOC inicial (SOC_{ref}). Y, por lo tanto, se cumple uno de los objetivos de la EMS.

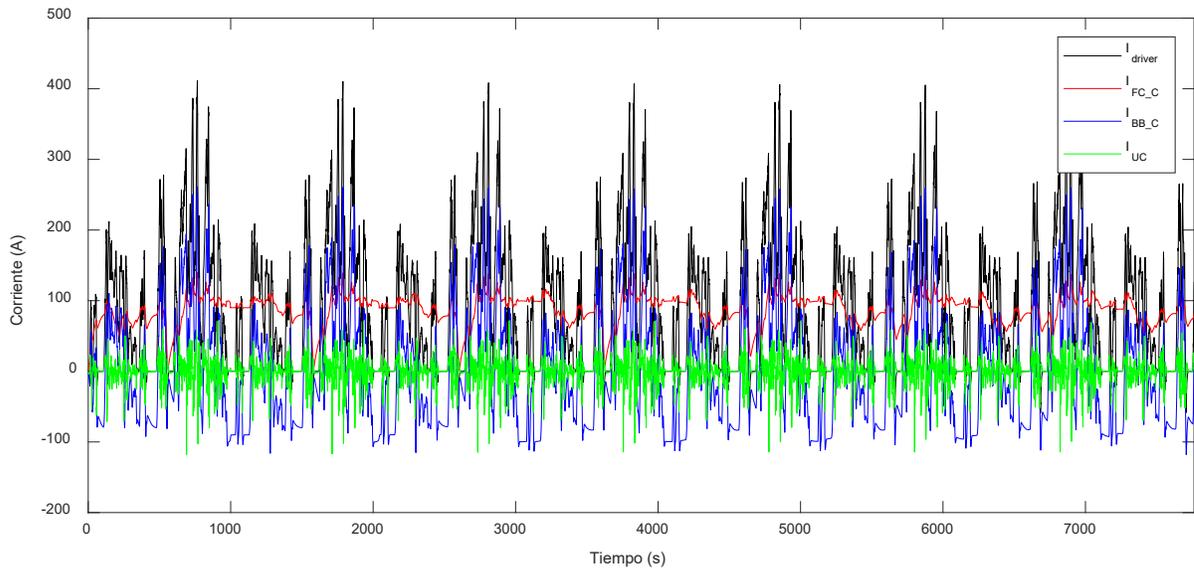


Fig. 58.- Distribución de las corrientes de los subsistemas de la planta de potencia, en el desempeño del vehículo.

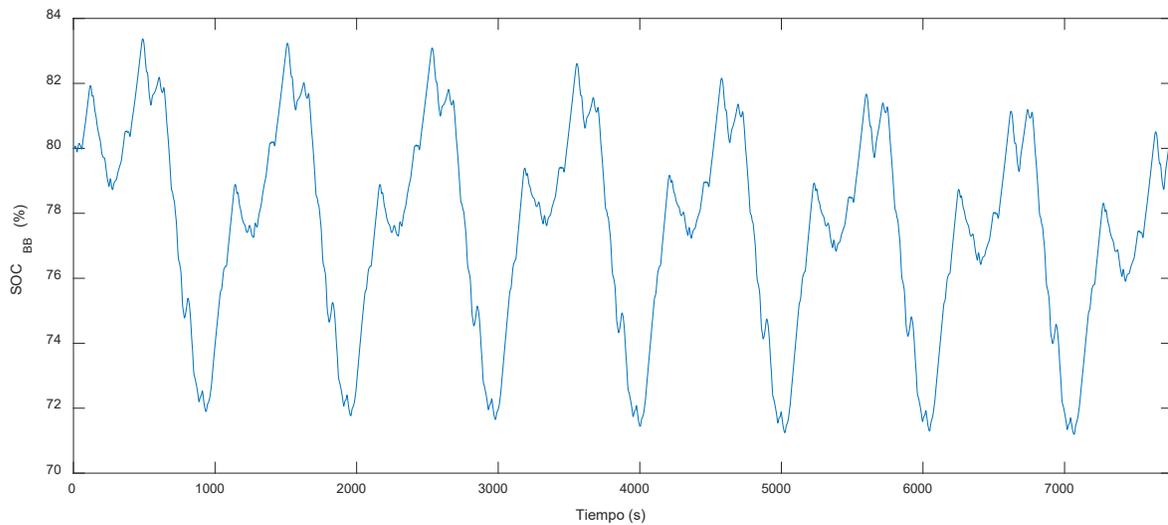


Fig. 59.- Estado de carga de las baterías a lo largo del recorrido (autonomía de 60 km)

En las figuras siguientes se muestran las potencias que entregan las fuentes de la planta de potencia híbrida. En la Fig. 60 se presenta la potencia que entrega las celdas de combustible a lo largo de la autonomía del vehículo, un recorrido de 60 km. Mientras que en la Fig. 61 y en la Fig. 62 se muestran las potencias que entregan/reciben el banco de baterías y de ultracapacitores, respectivamente.

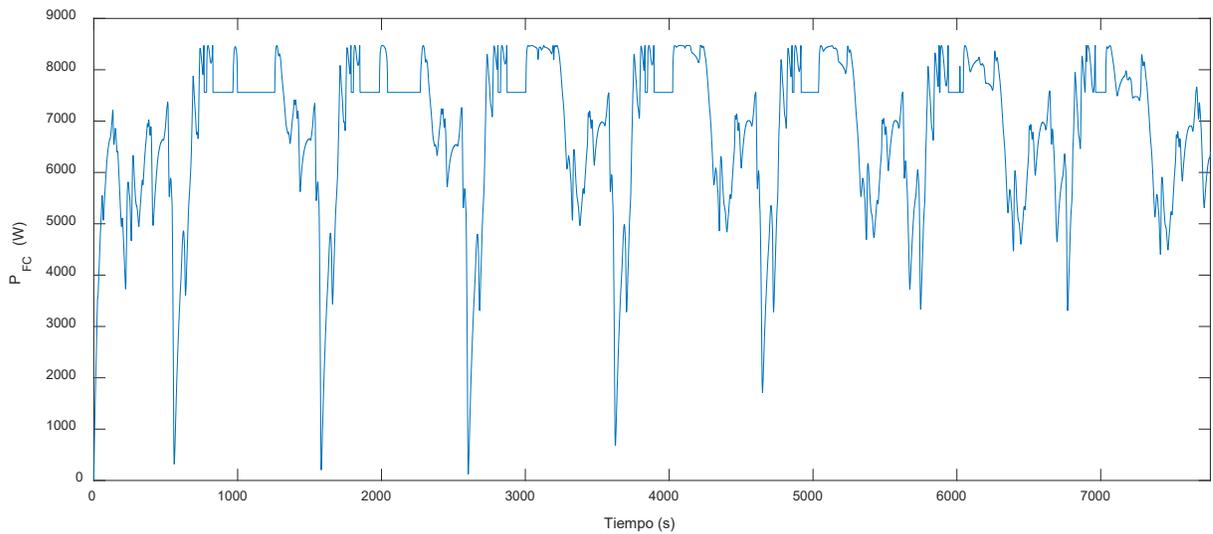


Fig. 60.- Potencia que entrega las celdas de combustible a lo largo del recorrido del vehículo.

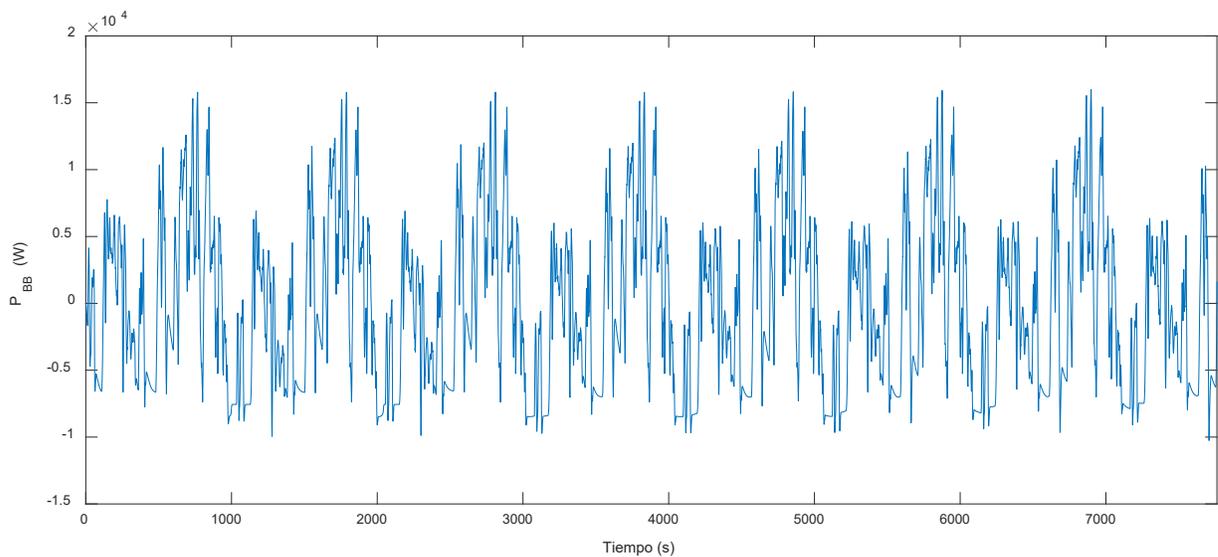


Fig. 61.- Potencia que entrega/recibe el banco de baterías a lo largo del recorrido del vehículo.

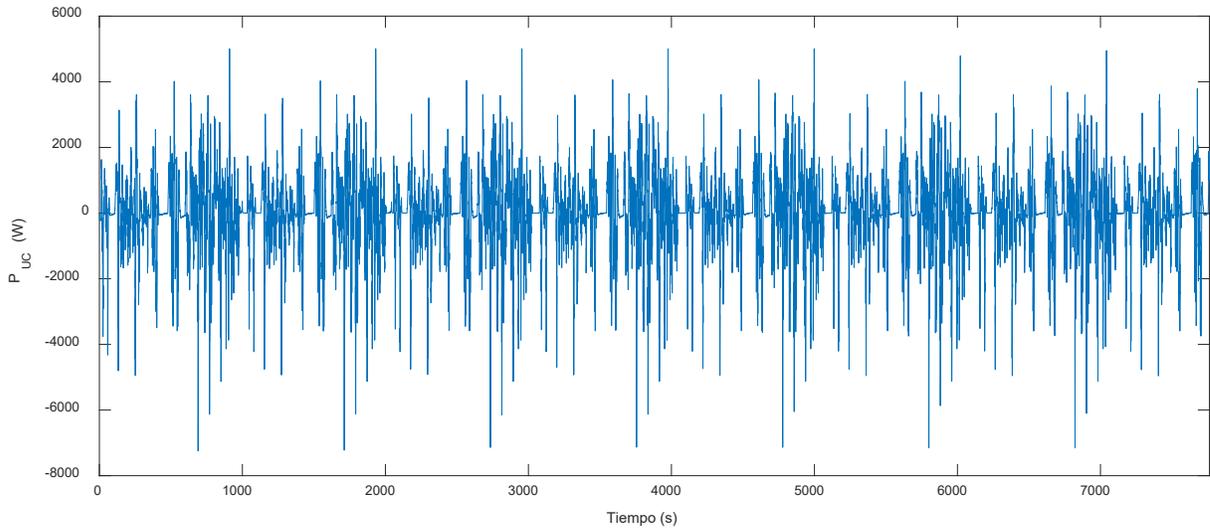


Fig. 62.- Potencia que entrega/recibe el banco de ultracapacitores a lo largo del recorrido del vehículo.

En la Fig. 63 se muestra el voltaje presente en el bus de DC del vehículo eléctrico. En ésta se observa que los niveles se encuentran dentro del rango de operación del driver del motor, que en este caso se encuentra entre 55 a 80 V. Por lo tanto, se cumple con otro de los objetivos de la EMS. En la Fig. 64 se muestra con más detalle (primeros 300 s del ciclo de manejo seleccionado) de la distribución de potencias de las fuentes para cumplir con el desempeño del vehículo de acuerdo a sus parámetros mecánicos y del ciclo de manejo seleccionado. En ésta se observa que las celdas de combustible, al inicio del ciclo, cuando el vehículo se encuentra detenido, empiezan aportar energía (condiciones iniciales mencionados anteriormente). Por lo que pareciera, que dinámicamente, éstas responden antes que los ultracapacitores.

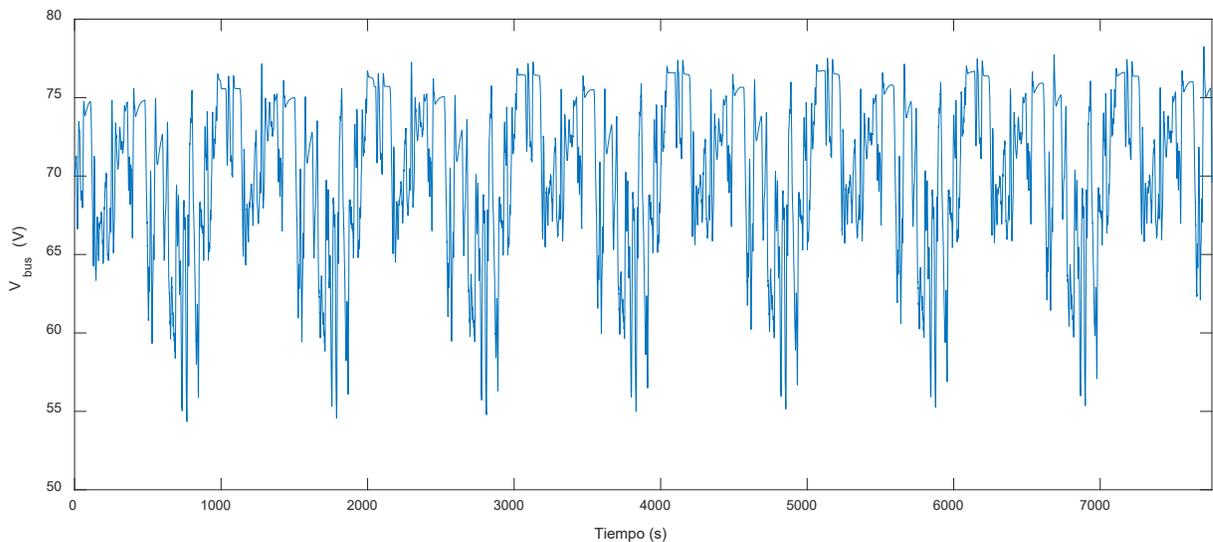


Fig. 63.- Voltaje del bus a lo largo del recorrido del vehículo eléctrico.

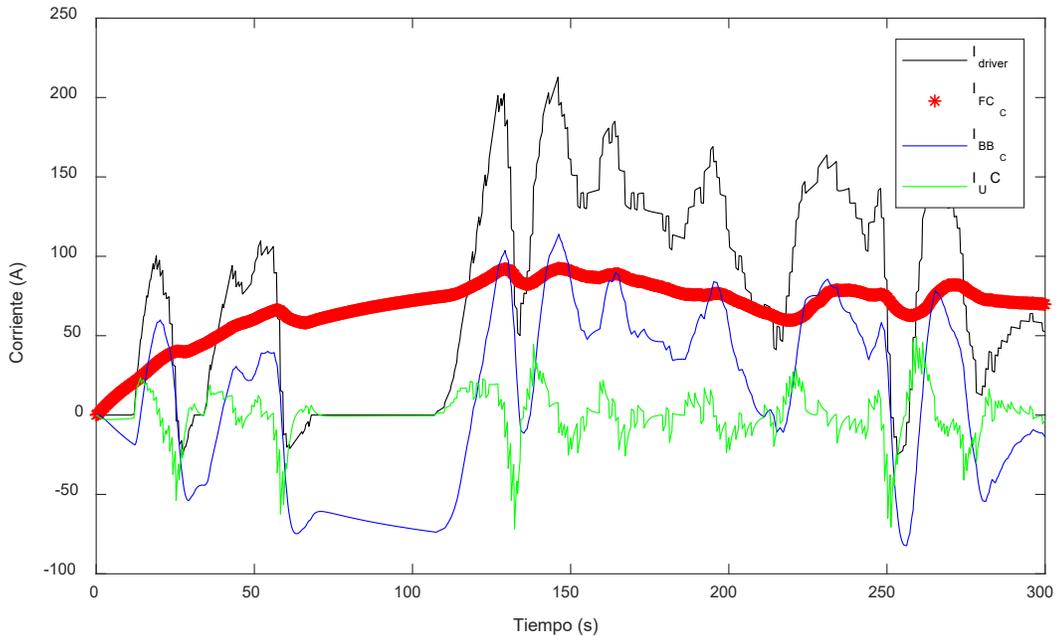


Fig. 64.- Distribución de corrientes por cada fuente en los primeros 300 s del ciclo de manejo seleccionado con un voltaje inicial del bus de DC de 70V.

Sin embargo, en la Fig. 65, cuando el voltaje inicial del bus de DC es de 80 V, las celdas de combustible empiezan a aportar con una “dinámica” menor. Esto se debe a que la aportación de las celdas de combustible no necesariamente “reaccionará” a la “dinámica” del vehículo, pues el comportamiento de las celdas se ve influenciado por el voltaje presente en el bus de DC y del SOC de las baterías. En el primer caso, Fig. 64, el bus de DC inicial es 70V, y el vehículo está detenido. Ya que éste último no se encuentra en movimiento, entonces, de acuerdo a la estrategia propuesta, el voltaje del bus debe ser el mayor posible, es decir, 80V. Por lo tanto, las celdas empiezan a aportar para que esta condición se cumpla. En caso contrario, en el segundo caso, Fig. 65, el bus de DC inicia en 80V, por lo tanto, se cumple con la condición en que este debe ser el voltaje cuando el vehículo se encuentra detenido, por lo tanto, su aportación es menor. Debe ser claro que estos casos presentados son para evidenciar que el control de las celdas de combustible está monitoreando el voltaje del bus, el estado de carga de las baterías y la velocidad del vehículo.

Por lo anterior, la aportación de éstas debe de ser con el mejor uso de la energía presente en el tanque de combustible. En el caso del nivel de DC, su aportación debe ser rápida para mantener el rango de voltaje en la que opera del driver del motor. Mientras que, para recargar a las baterías, su aportación puede ser reducida para hacer la recarga con una mejor eficiencia en la conversión de la energía del hidrógeno. En ambos escenarios, el control busca que el punto de operación de las celdas sea con la mejor eficiencia posible.

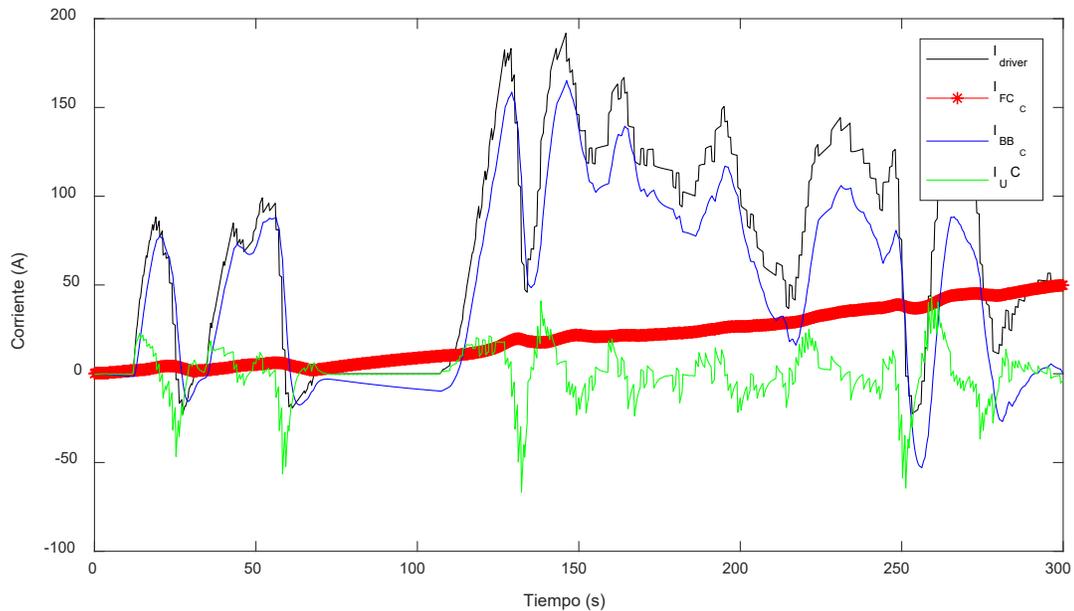


Fig. 65.- Distribución de corrientes por cada fuente en los primeros 300 s del ciclo de manejo seleccionado con un voltaje inicial del bus de DC de 80V.

En la Fig. 66 se muestra la eficiencia puntual de la conversión del combustible (H_2) a lo largo del recorrido. La eficiencia promedio se estima como la eficiencia acumulada al final del recorrido entre el tiempo que dura el mismo, en este caso, la **eficiencia promedio es de 38.27%**. Como se observa en la figura, la eficiencia es variable. Esto se debe a que la EMS busca que las celdas de combustible operen lejos de punto de menor eficiencia, que en la gráfica es aproximadamente 26%.

El punto de operación, así como la eficiencia de conversión del combustible, cambia de acuerdo a los escenarios del vehículo, pues la EMS debe cumplir con sus criterios de diseño, como lo son: cumplir con el desempeño requerido por el vehículo, mantener el voltaje de operación del bus de DC y mantener el estado de carga de las baterías.

En la gráfica del comportamiento de las eficiencias, la EMS trata de mantener a las celdas en una operación con una mayor eficiencia de conversión. Además, de acuerdo a las gráficas que se mostraron anteriormente, se cumple con los objetivos diseñados para la EMS.

En la literatura existen muchos trabajos relacionados con vehículos eléctricos basados en celdas de combustible. En cada uno de ellos se direcciona el esfuerzo a encontrar una solución al problema que se plantea, que va desde cumplir con el desempeño del vehículo, reducir del gasto de combustible, el costo de inversión o el costo operativo, hasta simplemente la evaluación de una propuesta de estrategia de manejo de energía. Aunado a lo anterior, cada trabajo plantea una configuración de tren de potencia específica para su aplicación, que incluye FC, BB y/o UC. Y el número de posibles combinaciones se incrementa con el uso de convertidores asociados, o no, a cada fuente.

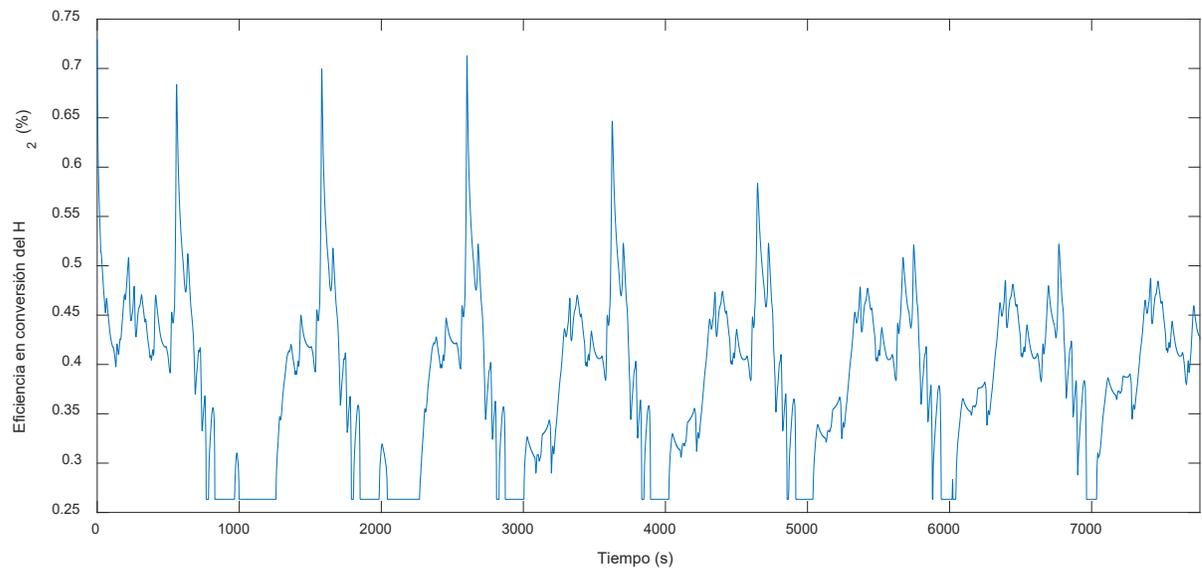


Fig. 66.- Eficiencia puntual de conversión del combustible a lo largo del recorrido del vehículo.

Una comparación entre los diversos trabajos encontrados en la literatura se vuelve difícil de realizar ya que, cada trabajo considera parámetros diferentes, que incluyen y no limitan, al tipo de vehículo, su peso inicial, ciclo de manejo evaluado, etc. Por lo que, la modificación de uno de ellos puede afectar considerablemente a los otros.

Si bien, la eficiencia de conversión del combustible está ligada fuertemente con el consumo del mismo, pocos trabajos analizan este parámetro, ya que los resultados reflejan sólo la cantidad de combustible utilizado para el vehículo eléctrico, caso de estudio, con un ciclo de manejo y autonomía definidas. Además, pocos trabajos consideran a las celdas de combustible como principal fuente de energía, por lo que, dentro del cálculo del consumo de combustible, se incluye la energía entregada por las fuentes auxiliares, como baterías y/o ultracapacitores. Por lo que, pocas investigaciones reportan la eficiencia promedio de operación de las celdas, lo que limita la comparación de este trabajo con otros. Sin embargo, en la Tabla 20 se muestra el porcentaje de mejora de eficiencia promedio de conversión del combustible comparado con cinco trabajos en las que se rescató el valor de este parámetro.

Tabla 20.- Mejora de eficiencia en comparativa con otros trabajos.

<i>Trabajo</i>	<i>Mejora de eficiencia promedio</i>
<i>Pourabdollah et al., 2017 [120]⁵</i>	15%
<i>Mokrani et al., 2017 [93]⁵</i>	15%
<i>Bendjedia et al., 2018 [28]⁵</i>	15%
<i>Wang et al., 2019 [23]⁵</i>	9%
<i>López et al., 2020 [113]⁶</i>	12%

⁵ Asumiendo una eficiencia de conversión del combustible a su máxima potencia del 23%.

⁶ Comparado con el dimensionamiento inicial.

En la mayoría de los trabajos revisados, las celdas de combustible operan en potencias altas la mayor parte del tiempo, por lo que, si se considera que, en este punto la eficiencia de conversión del combustible es del 23%, se tiene una mejora de un 15% en dichos trabajos. Sin embargo, en [23] muestran que, para su estrategia de manejo de energía y su caso de estudio, la eficiencia promedio de las celdas de combustible es de un 29%, por lo que se tiene un 9% de mejora. Y comparando los resultados obtenidos con el dimensionamiento inicial de las celdas de combustible, se tiene una mejora de la eficiencia promedio en un 12%.

Sin embargo, a pesar de estos resultados, y de la mejora del uso del combustible, surge la duda sobre si el sobredimensionamiento de las celdas de combustible fue el más adecuado. Por lo tanto, para esclarecerla, se realizó un análisis de sensibilidad en el sobredimensionamiento de las celdas de combustible, para comparar el desempeño de la EMS y el cumplimiento de los objetivos de la misma. Sin embargo, el sobredimensionamiento de las celdas de combustible no es el único factor que puede afectar el desempeño del EV, por lo que, también se realizaron análisis de sensibilidad en el dimensionamiento del banco de baterías y de ultracapacitores, que se presentan en las secciones siguientes.

4.6 Análisis de sensibilidad de la EMS propuesta

4.6.1 Análisis de sensibilidad de la EMS de acuerdo al sobredimensionamiento de las celdas de combustible.

En las subsecciones anteriores se mostró que el dimensionamiento de las celdas de combustible impacta considerablemente en los resultados en el momento de aplicar la EMS que se diseñó en este trabajo. En el caso de utilizar el dimensionamiento final de la metodología para el diseño de las celdas de combustible, se observó que, si bien cumple con el desempeño del vehículo y con el rango de operación de voltajes del bus de DC, no se cumple con los objetivos de mantener a las celdas de combustible en puntos de operación con eficiencias altas de conversión del combustible. Además, con este dimensionamiento el SOC final de las baterías se alejó, por mucho, al SOC inicial (SOC_{ref}). En cambio, al utilizar un tamaño de celdas de combustible con un sobredimensionamiento del 26% con respecto al original, se cumple con todos los objetivos, y la eficiencia promedio de conversión del combustible se incrementó en, aproximadamente, un 10%. Sin embargo, este sobredimensionamiento podría no ser el más adecuado, y para verificarlo, se realizó el estudio siguiente.

Se evaluó la EMS que se propone en este trabajo para diferentes tamaños de celdas de combustible. El tamaño inicial fue de un 2% de sobredimensionamiento, hasta un 54% con un

incremento en el tamaño del 4% con respecto al tamaño original. Los resultados se muestran en las figuras siguientes.

En la Fig. 67 se muestra el estado de carga de las baterías cuando se evalúa la EMS a diferentes tamaños de celdas de combustible. Se observa que, con el tamaño original, y hasta un 14% de sobredimensionamiento, el estado de carga final de las baterías difiere por mucho con respecto al estado de carga inicial. Por otro lado, se puede decir que a partir de un 18% de sobredimensionamiento de las celdas de combustible, el estado de carga final es muy cercano al estado de carga inicial (SOC_{ref}). Es decir, con un 18% de sobredimensionamiento ya se cumple el objetivo de que la EMS deje el estado de carga final de las baterías cercana al estado inicial, el cual se definió en el diseño mismo de la EMS. Sin embargo, éste sólo es uno de los objetivos de la EMS, ya que otro de los objetivos es la eficiencia en la conversión de la fuente de energía.

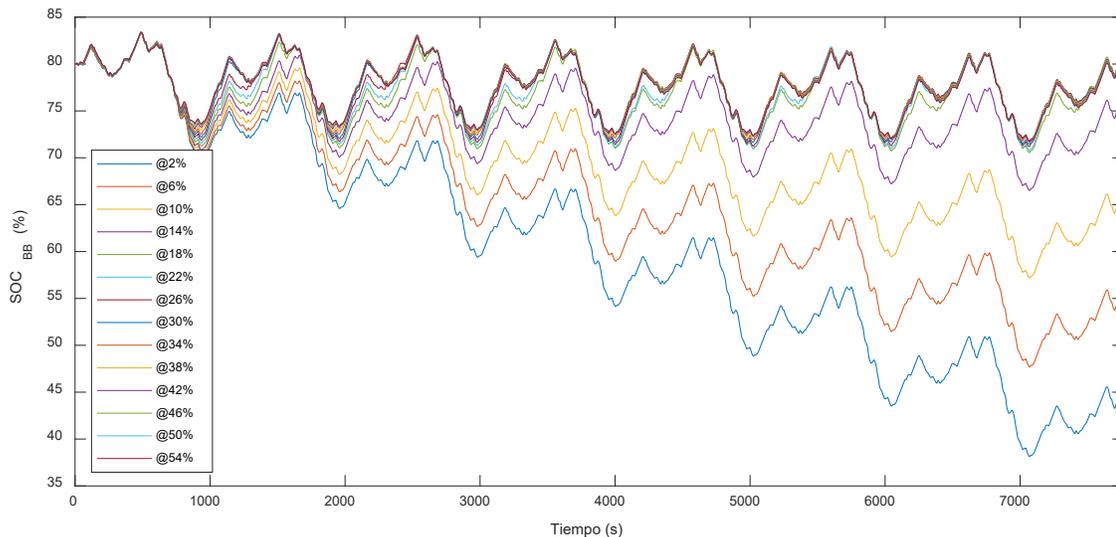


Fig. 67.- Estado de carga de las baterías a diferentes tamaños de celdas de combustible.

Por lo anterior, en la Fig. 68 se muestra la eficiencia de conversión puntual del combustible H_2 a lo largo del recorrido. Si bien, se puede observar las regiones en las que, por cada tamaño de celdas de combustible, se encuentra la eficiencia, se requiere un valor cualitativo para observar aquél tamaño que pueda proporcionar una eficiencia más alta con respecto a la que se puede obtener con otros tamaños de celdas de combustible. Por ello, en la Fig. 69 se muestra la eficiencia acumulada de la conversión del combustible a lo largo del recorrido del vehículo.

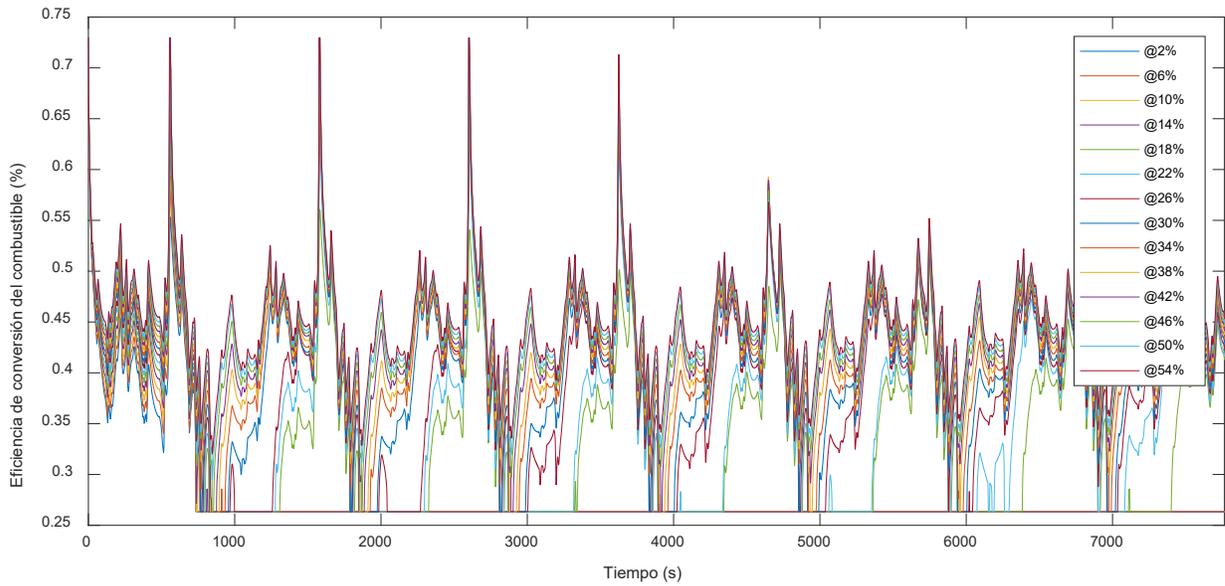


Fig. 68.- Eficiencia de conversión puntual del combustible a lo largo del recorrido del vehículo.

De la Fig. 69 se observa que no existe diferencia significativa en los sobredimensionamiento del 2% al 14%. Sin embargo, a partir del sobredimensionamiento del 18% se ve que la eficiencia acumulada se incrementa considerablemente, lo que se refleja en la eficiencia promedio del sistema de celdas de combustible. También se observa que a medida que se incrementa el tamaño de las celdas de combustible desde este punto, la eficiencia acumulada también lo hace. Sin embargo, se observa que a partir del 26% de sobredimensionamiento, el incremento en la eficiencia acumulada empieza a reducirse. Esto se puede observar claramente cuando se obtiene la eficiencia promedio para cada caso de sobredimensionamiento, la cual se resume en la Tabla 21.

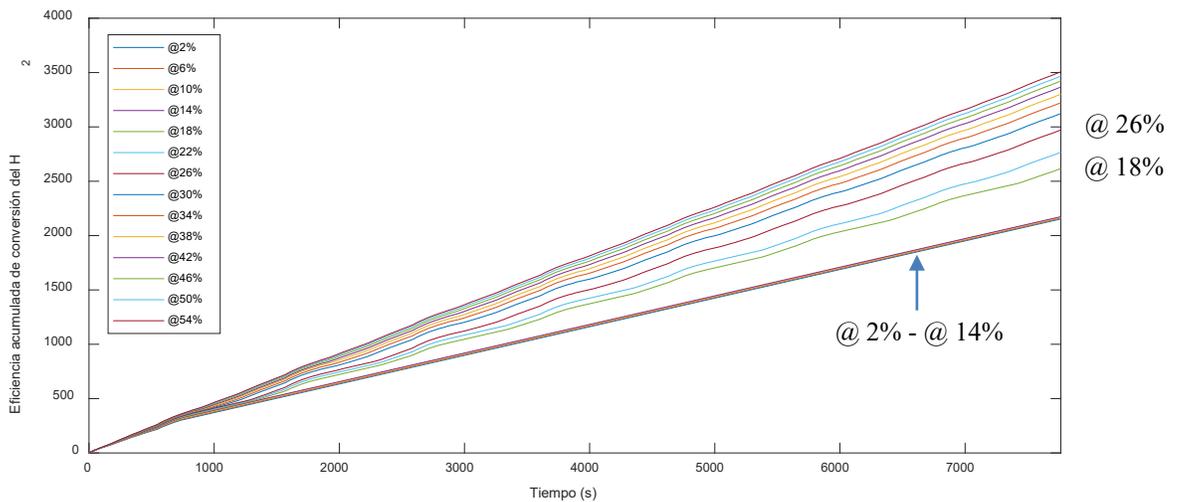


Fig. 69.- Eficiencia acumulada de conversión del combustible a lo largo del recorrido del vehículo.

Tabla 21.- Eficiencia promedio por cada caso de sobredimensionamiento de las celdas de combustible.

<i>Sobredimensionamiento</i>	<i>Eficiencia promedio (%)</i>
2%	27.7258069
6%	27.8225966
10%	27.9156111
14%	27.9989212
18%	33.7013103
22%	35.6244074
26%	38.2712443
30%	40.2202189
34%	41.5000547
38%	42.5069509
42%	43.359059
46%	44.0725288
50%	44.6586503
54%	45.1757456

De la Tabla 21 se observa que un sobredimensionamiento inferior o igual al 14% el incremento en la eficiencia promedio no supera el 0.1%. Por otro lado, a partir del 18% se tiene un incremento mayor al 5%. Sin embargo, en este punto, las celdas cumplen con el requerimiento energético del EV, y mantiene el SOC de las baterías, por lo que éstas operan en puntos de mayor eficiencia y se ve reflejado en dicho incremento. Pero esto no significa que sea el punto más “ad-Hoc” ya que, como se observa en la Fig. 70, seguir incrementando el tamaño de las celdas se traduce en mejoras en la eficiencia promedio. Si bien, en un 22% de sobredimensionamiento se tiene incremento menor al paso previo, el incremento es mayor a 1%. Esto vuelve a suceder cuando se tiene un sobredimensionamiento del 26%, cuyo incremento es superior al 2%. Es decir, existe una tendencia de seguir mejorando la eficiencia promedio. Sin embargo, a partir de este punto, los incrementos de eficiencia promedio por incremento de sobredimensionamiento de las celdas no supera el 2%, y de acuerdo a la Fig. 70, se observa una tendencia a la baja.

De lo anterior, se puede concluir que el sobredimensionamiento del 26% es el más adecuado para operar con la EMS propuesta en este trabajo ya que, aunque se pueda seguir incrementando el tamaño de las celdas, no se tiene un incremento sustancial en la eficiencia a costa del sobredimensionamiento.

Además, este punto de sobredimensionamiento coincide con la estimación hecha en la subsección anterior a esta. Y para validarlo, se realizó el análisis en el consumo de H₂ para cada caso de sobredimensionamiento, como se muestra en la Fig. 71.



Fig. 70.- Incremento en la eficiencia de acuerdo al sobredimensionamiento de las celdas de combustible.

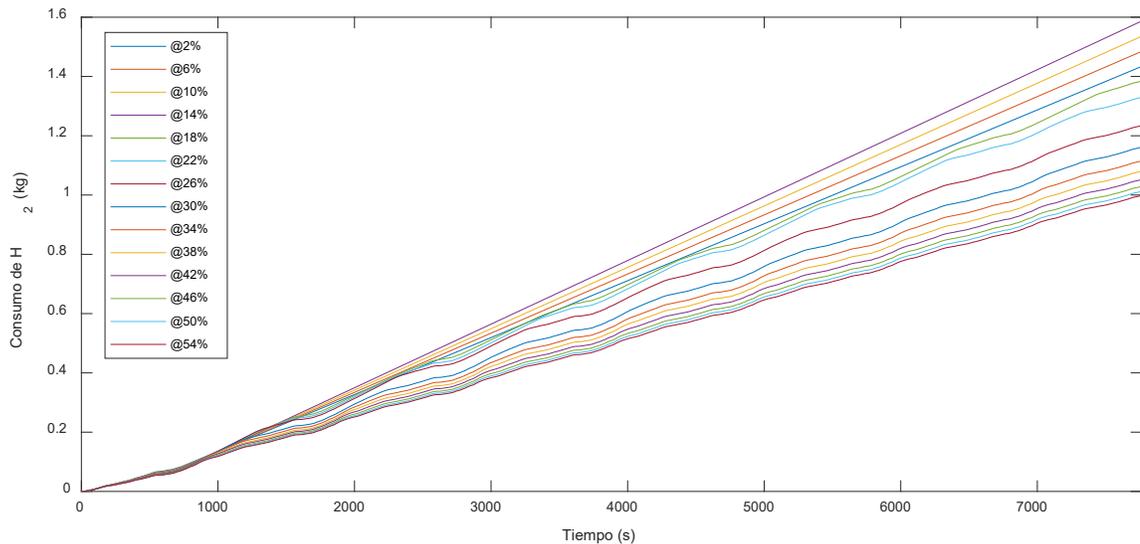


Fig. 71- Consumo de hidrógeno para cada caso de sobredimensionamiento de las celdas de combustible.

Si bien, la eficiencia promedio de conversión del combustible se incrementa cuando se incrementa el tamaño de las celdas de combustible, esto no ocurre en el consumo del H_2 , como se observa en la Tabla 22 y en la Fig. 72. De ésta última, se observa que, en los primeros sobredimensionamientos de las celdas (hasta un 14%) no se tiene ahorro de combustible, por el contrario, se incrementa el gasto de combustible. Esto se debe a que, las celdas de combustible debe “restituir” el “déficit” de energía en el balance energético de los bancos de baterías y de ultracapacitores (ver Fig. 67). Por lo que, a partir del sobredimensionamiento del 18% el consumo de hidrógeno se empieza a reducir. En este punto, se tiene un ahorro de 200g de combustible, pero al incrementar aún más el tamaño de las celdas se sigue teniendo más ahorro de combustible, con un 22% de sobredimensionamiento se ahorra un poco más de 50g de H_2 , y en el caso de un

sobredimensionamiento del 26% se tiene un ahorro de 100g. Sin embargo, a partir de ese punto, en cada incremento de sobredimensionamiento de las celdas, la reducción del consumo de combustible es en el orden de decenas de gramos.

Por lo que se puede deducir que la relación de sobredimensionamiento – consumo de combustible es el más adecuado cuando este se establece al 26% de acuerdo a los análisis previos y de la información de la Tabla 22 y Fig. 72.

Tabla 22.- Consumo de combustible para cada caso de sobredimensionamiento

<i>Sobredimensionamiento</i>	<i>Consumo de H₂ (kg)</i>
2%	1.434
6%	1.485
10%	1.536
14%	1.587
18%	1.385
22%	1.330
26%	1.235
30%	1.162
34%	1.115
38%	1.080
42%	1.052
46%	1.029
50%	1.013
54%	0.999

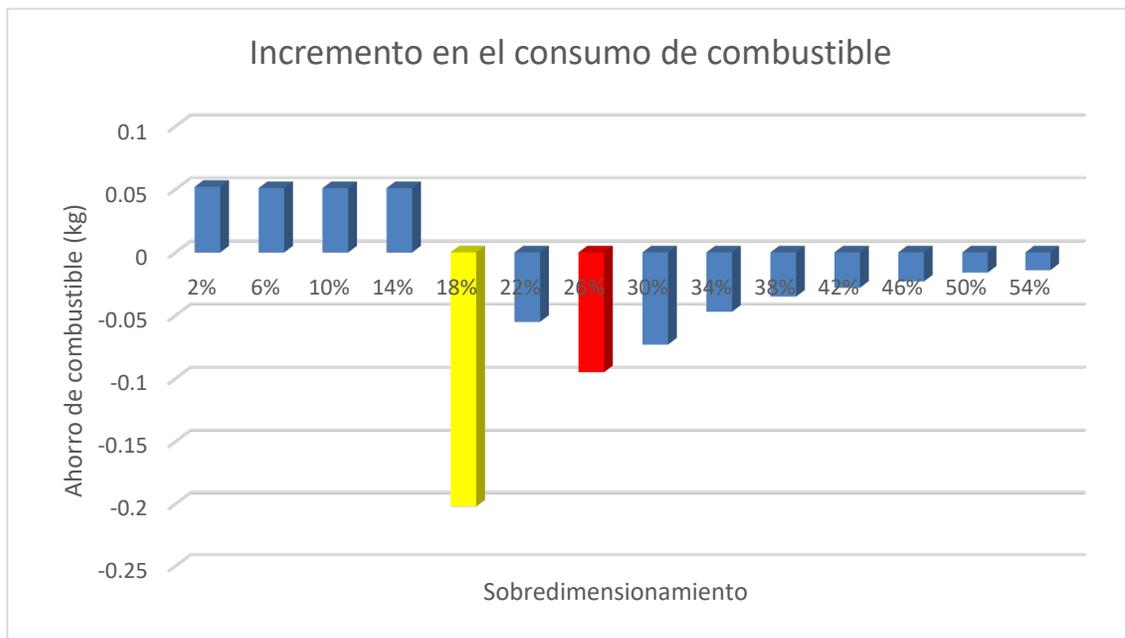


Fig. 72.- Incremento en el consumo de combustible de acuerdo al sobredimensionamiento de las celdas de combustible.

4.6.2 Análisis de sensibilidad de la EMS de acuerdo al estado de carga inicial de las baterías.

El enfoque de este trabajo considera a las celdas de combustible como principal fuente de energía, que debe entregar toda la energía requerida para mover un vehículo eléctrico de acuerdo a un ciclo de manejo seleccionado y una autonomía definida. Por lo anterior, el balance energético de las fuentes auxiliares (baterías y ultracapacitores) debe ser cero o cercano a ello. Por lo tanto, **si el SOC inicial de las baterías coincide con el SOC de referencia, entonces el SOC final debería ser igual o cercano al SOC inicial.** De acuerdo a los resultados de las secciones anteriores, la EMS propuesta en este trabajo, cumple con el enfoque de este trabajo cuando el SOC inicial coincide con el de referencia. Sin embargo, si el SOC inicial no coincide con el de referencia, la EMS debería llevar el SOC final de las baterías al SOC de referencia. Para validar lo anterior, se realizó un análisis de sensibilidad de la EMS de acuerdo al estado de carga inicial de las baterías.

En la Fig. 73 se muestra el comportamiento del estado de carga de las baterías de acuerdo a un SOC inicial comprendido entre 60% y 100%. De ésta se observa que, independientemente del valor inicial del SOC ($60\% \leq \text{SOC inicial} \leq 100\%$), el valor final del SOC es muy cercano al SOC de referencia, que en este caso es del 80%.

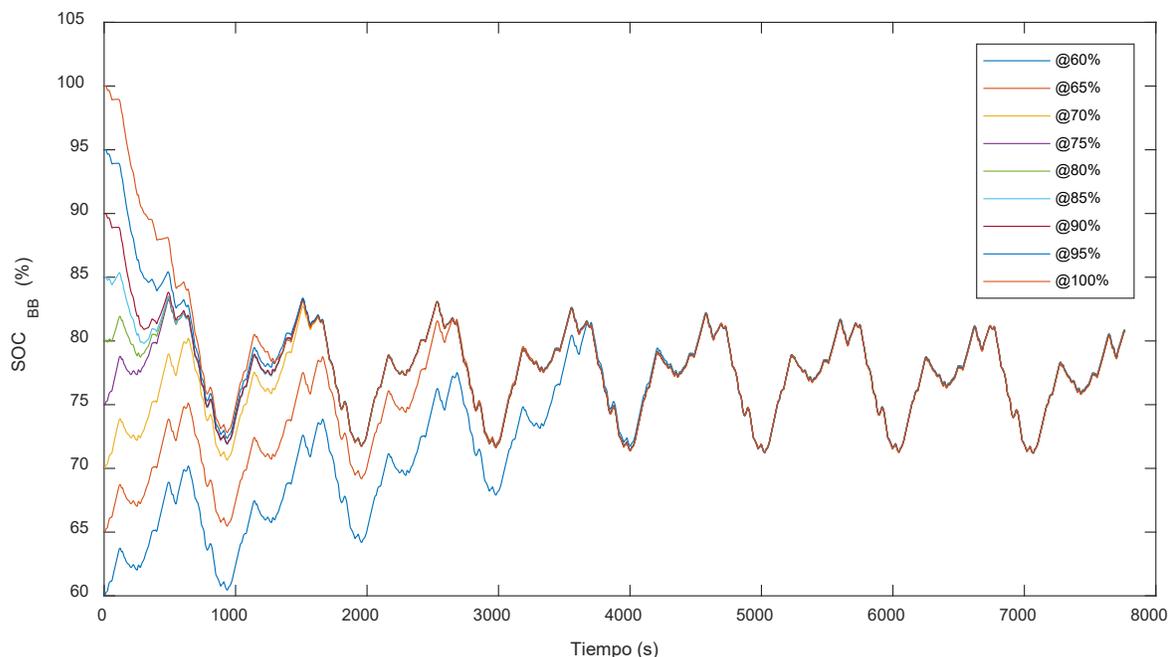


Fig. 73.- Comportamiento del SOC de las baterías a diferentes condiciones del SOC inicial.

En la Fig. 74 se muestra el comportamiento de la eficiencia puntual de la conversión del combustible a condiciones diferentes de SOC inicial con respecto al SOC de referencia (80%). En

la Fig. 75 se muestra la eficiencia acumulada, mientras que en la Tabla 23 se muestra la eficiencia promedio para cada caso condición inicial de SOC evaluada de las baterías. En la Fig. 76 se muestra el consumo de hidrogeno para los diferentes casos de SOC inicial de las baterías.

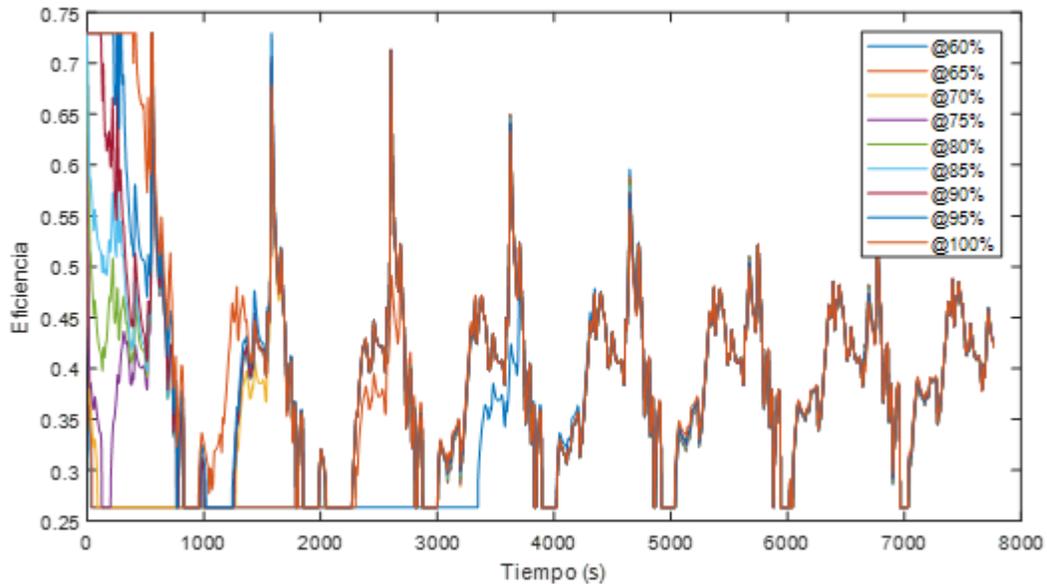


Fig. 74.- Comportamiento de la eficiencia puntual de la conversión del combustible a diferentes condiciones del SOC inicial.

De lo anterior, se observa que a mayor SOC inicial (con respecto al SOC de referencia) mayor es la eficiencia promedio de la conversión del combustible y por lo tanto menor es el consumo del combustible. Lo anterior se debe a que inicialmente, cuando el SOC es mayor al de la referencia, a las celdas de combustible se les permite operar en zonas de mayor eficiencia. Por el contrario, si el SOC inicial es menor al SOC de referencia, las celdas de combustible deben operar mayormente en potencia altas para suplir el “déficit” inicial de energía a bordo del vehículo. Y a mayor potencia que entregue las celdas de combustible menor es su eficiencia de conversión del combustible. En consecuencia, mayor es el consumo del mismo.

Tabla 23.- Eficiencia promedio para diferentes condiciones del SOC inicial de las baterías.

<i>Estado de carga inicial (%)</i>	<i>Eficiencia promedio (%)</i>	<i>Estado de carga inicial (%)</i>	<i>Eficiencia promedio (%)</i>	<i>Estado de carga inicial (%)</i>	<i>Eficiencia promedio (%)</i>
60	33.34	75	37.74	90	39.25
65	35.00	80	38.27	95	39.86
70	36.32	85	38.65	100	40.81

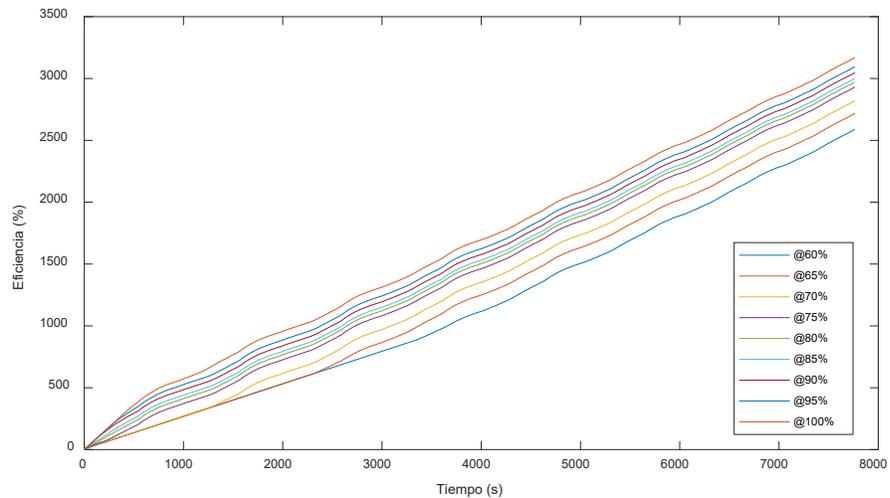


Fig. 75.- Eficiencia acumulada para diferentes condiciones del SOC inicial de las baterías.

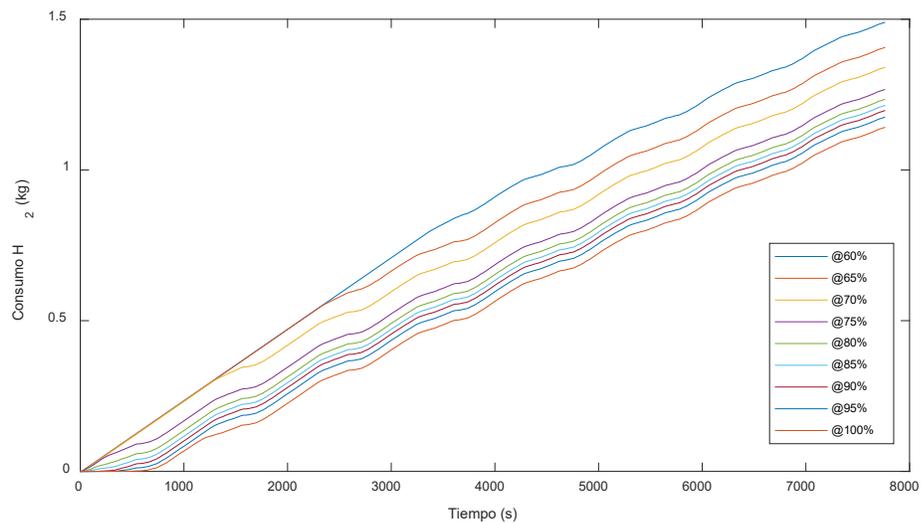


Fig. 76.- Consumo de combustible para diferentes condiciones de SOC inicial de las baterías.

En la Fig. 77 se muestra el comportamiento del SOC de las baterías a diferentes valores de SOC inicial de las baterías con un SOC de referencia del 75%. Mientras que en la Fig. 78 y en la Fig. 79 se muestran el comportamiento del SOC de las baterías para referencias del 85 y 90%, respectivamente.

Del análisis se concluye que la EMS propuesta en este trabajo mantiene al SOC final muy cercano al SOC de referencia definido, independiente de su condición inicial. Además, si la condicional final es mucho menor que el SOC de referencia, menor será la eficiencia promedio de conversión de combustible y mayor será el consumo de hidrógeno. Por el contrario, si el SOC inicial es mucho mayor que el de referencia, mayor será la eficiencia promedio y menor será el consumo de combustible.

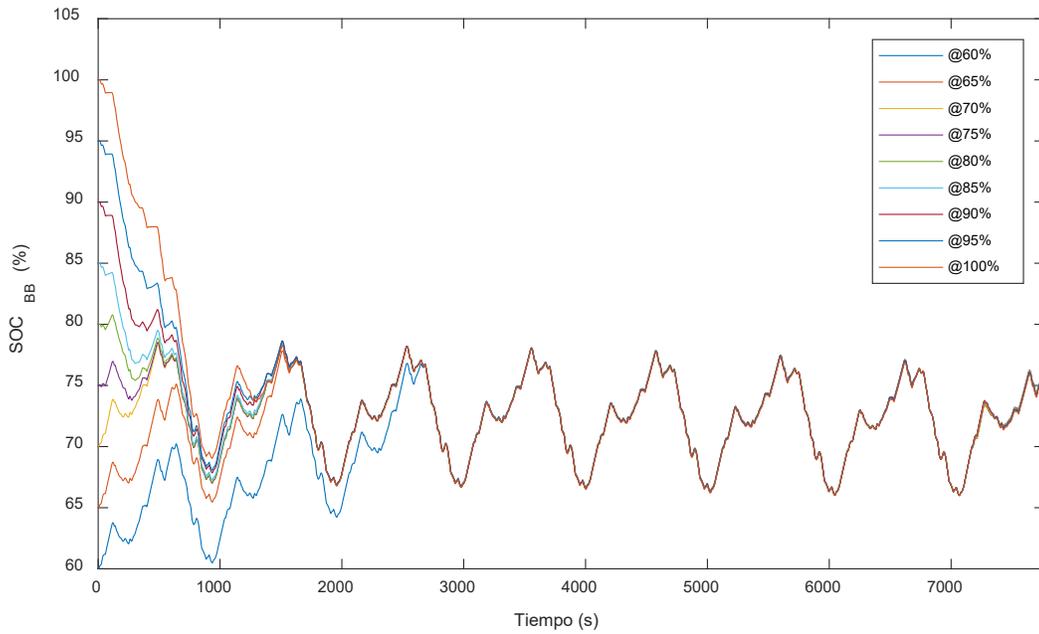


Fig. 77.- Comportamiento del SOC de las baterías a condiciones iniciales diferentes del SOC de referencia al 75%.

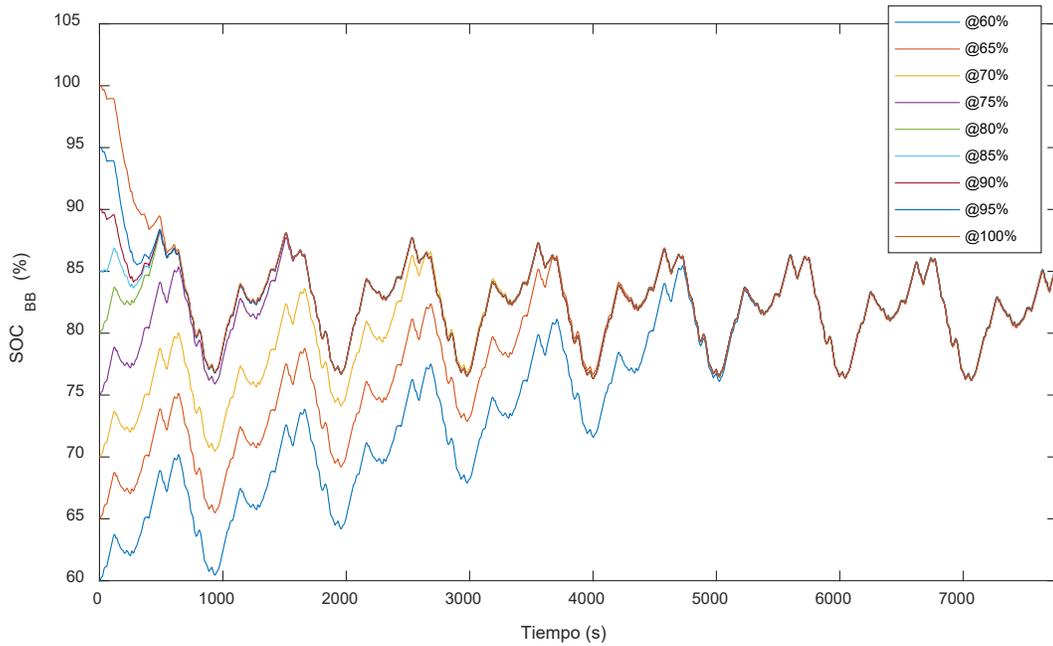


Fig. 78.- Comportamiento del SOC de las baterías a condiciones iniciales diferentes del SOC de referencia al 85%.

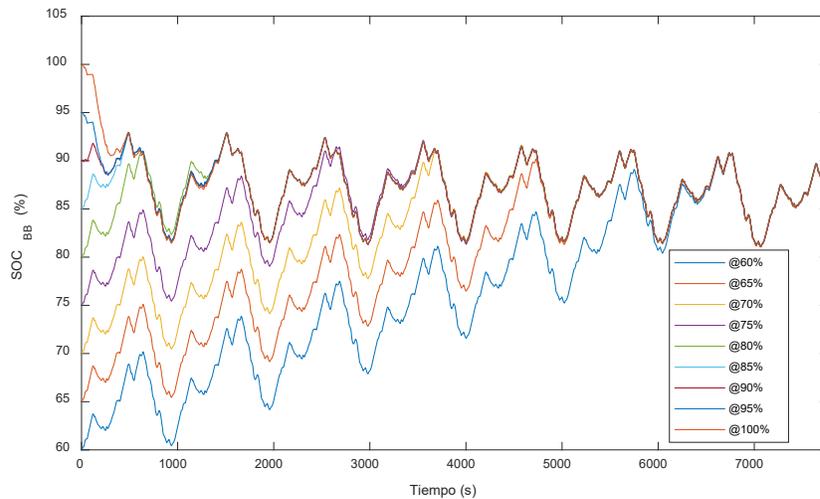


Fig. 79 Comportamiento del SOC de las baterías a condiciones iniciales diferentes del SOC de referencia a 90%.

4.6.3 Análisis de sensibilidad de la EMS de acuerdo al tamaño del banco de las baterías.

En este trabajo se realizó un análisis de sensibilidad en el sobredimensionamiento de las celdas de combustible para validar que el tamaño de éstas fuera el más “Ad-Hoc” de acuerdo a la EMS que se planteó en este trabajo y en las condiciones de uso del vehículo eléctrico. Se encontró que incrementando el tamaño de las celdas se incrementa la eficiencia promedio de conversión del combustible, pero no necesariamente se reduce el consumo del H₂. Por lo que el análisis se centró en encontrar aquella que pudiera encontrar mayores beneficios sin incrementar en exceso el dimensionamiento de las celdas. Por ello, a continuación, se realiza un análisis de sensibilidad de la EMS que se plantea en este trabajo de acuerdo al tamaño del banco de baterías, considerando un tamaño fijo de celdas de combustible.

El análisis parte del número de cadenas en paralelo que integra el banco de baterías. En el caso del número de baterías en serie, éste se conserva para cumplir con el voltaje nominal del banco. El análisis parte de cinco cadenas menos (configuración: 27s17p) al estimado por la metodología de dimensionamiento de las baterías, que se propuso en este trabajo (27s22p), hasta cinco cadenas más a éste valor (27s27p).

En la Fig. 80, Fig. 81, Fig. 82 y Fig. 83 se muestra el comportamiento, a diferentes tamaños del banco de baterías, de la corriente, voltaje, estado de carga y “C-rate”, respectivamente. Ya que el tamaño de las celdas de combustible es la misma, el requerimiento de potencia del banco de baterías se mantiene de acuerdo al EMS propuesto en el trabajo. Por lo tanto, el requerimiento de corriente eléctrica es muy similar en todos los casos, al igual que el voltaje.

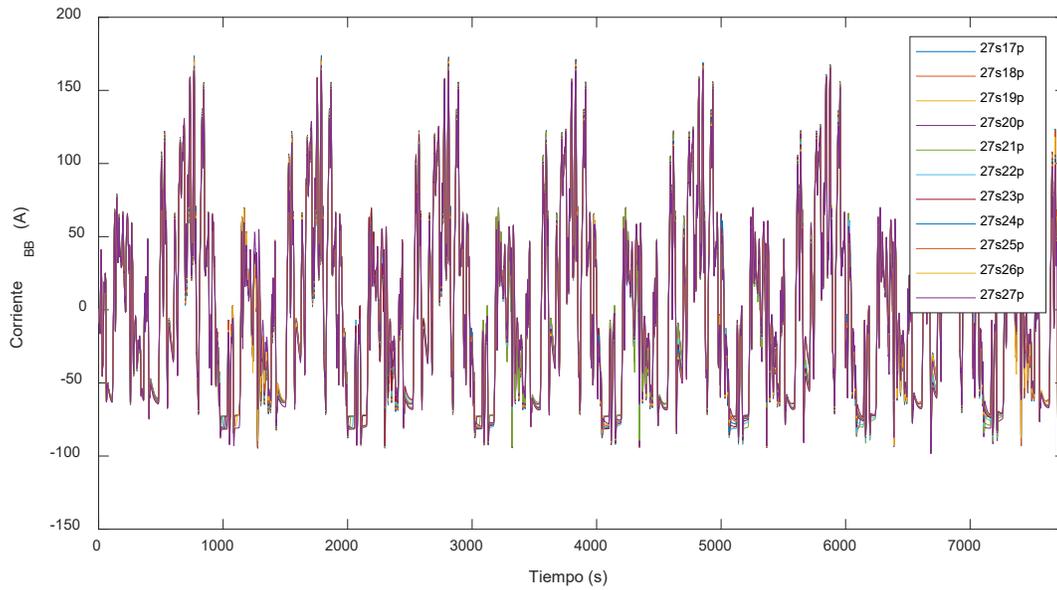


Fig. 80.- Comportamiento de la corriente de las baterías para diferentes tamaños del banco.

Un efecto parecido se puede observar en la Fig. 82. Si la potencia requerida por el sistema de baterías se mantiene, entonces también el requerimiento de energía. Por lo tanto, un banco más pequeño (27s17p) disminuirá en menor cantidad su SOC en comparación con un banco más grande (27s27p). Como se observa en dicha figura, la diferencia máxima en el comportamiento del SOC de los bancos es alrededor de un 8%. Sin embargo, el SOC final se mantiene muy cercano a la referencia, con el uso de la EMS. Lo que implica que, aunque el tamaño del banco de baterías cambie, se cumple con el objetivo que el SOC final del banco sea muy cercano al de la referencia, que en este caso es el mismo que el inicial.

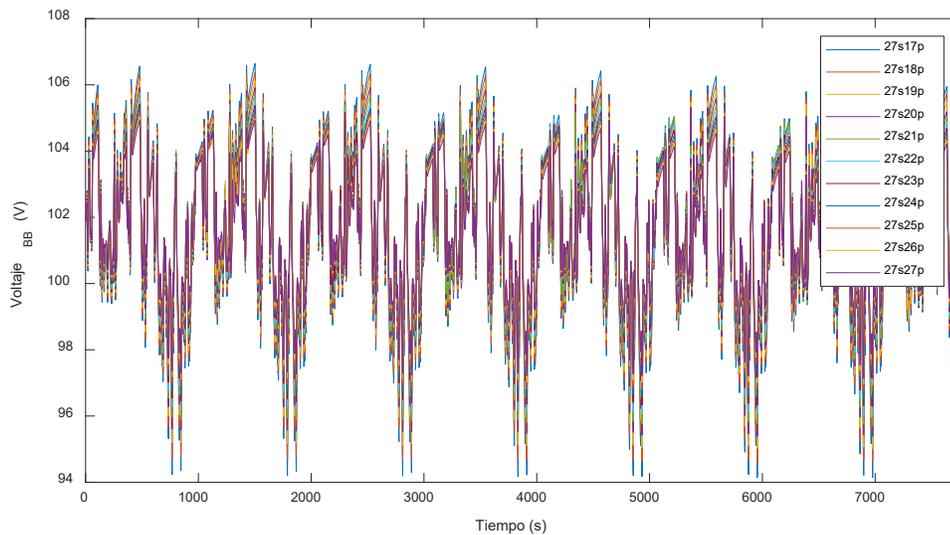


Fig. 81.- Comportamiento del voltaje de las baterías para diferentes tamaños del banco.

Tabla 24.- Corrientes y voltajes máximos y mínimos para los diferentes tamaños del banco de baterías.

<i>Configuración</i>	<i>Corriente Máxima en descarga(A)</i>	<i>Corriente Máxima en recarga(A)</i>	<i>Voltaje Máximo (V)</i>	<i>Voltaje Mínimo</i>
27s17p	173.78	-94.28	106.64	94.15
27s18p	171.72	-94.35	106.37	94.61
27s19p	169.92	-94.48	106.13	95.02
27s20p	168.02	-94.70	106.18	95.39
27s21p	166.68	-96.14	106.00	95.71
27s22p	166.44	-96.97	105.81	96.01
27s23p	166.30	-98.01	105.70	96.29
27s24p	166.15	-98.63	105.58	96.53
27s25p	165.99	-99.39	105.45	96.75
27s26p	165.87	-100.26	105.32	96.95
27s27p	165.74	-101.20	105.20	97.13

En la Tabla 24 se muestran las corrientes máximas en descarga y recarga del banco de baterías, así como el voltaje máximo y mínimo para cada caso.

En ésta se observa que, cuando el banco es el más pequeño (27s17p) se tiene la corriente de descarga más alta (con respecto a los demás tamaños) y el voltaje más pequeño. Sin embargo, se tiene la corriente de recarga más baja, pero el voltaje más alto. Lo anterior se debe por el número de cadenas conectadas, ya que es el menor de los casos evaluados. Con menos cadenas, se requiere más corriente por cadena, y dado por su resistencia interna, se traduce en un nivel de voltaje más bajo. Lo anterior tiene un efecto contrario cuando se recarga. Ya que la corriente de recarga se reparte entre las cadenas conectadas, lo que implica mayor corriente por cadena y por su resistencia interna, se alcanza un voltaje más alto.

En la Fig. 83 se muestra la corriente de descarga y recarga del banco de baterías en términos de “C-rate” para cada tamaño de banco de baterías evaluado.

En ésta se observa que, a un menor tamaño del banco, el C-rate de descarga se incrementa, y viceversa, a un mayor tamaño del banco, el C-rate de descarga se reduce. Lo anterior se debe a que, al reducir el tamaño del banco, se reduce también su capacidad (C-rate). Por lo tanto, aunque la corriente de demanda no incrementa sustancialmente, en términos de C-rate si lo hace, ya que ésta corriente se mide en términos de su capacidad nominal. Por otro lado, si el tamaño del banco incrementa, también su capacidad, y la corriente máxima, en términos de C-rate se reduce, tal como se muestra en la Tabla 25.

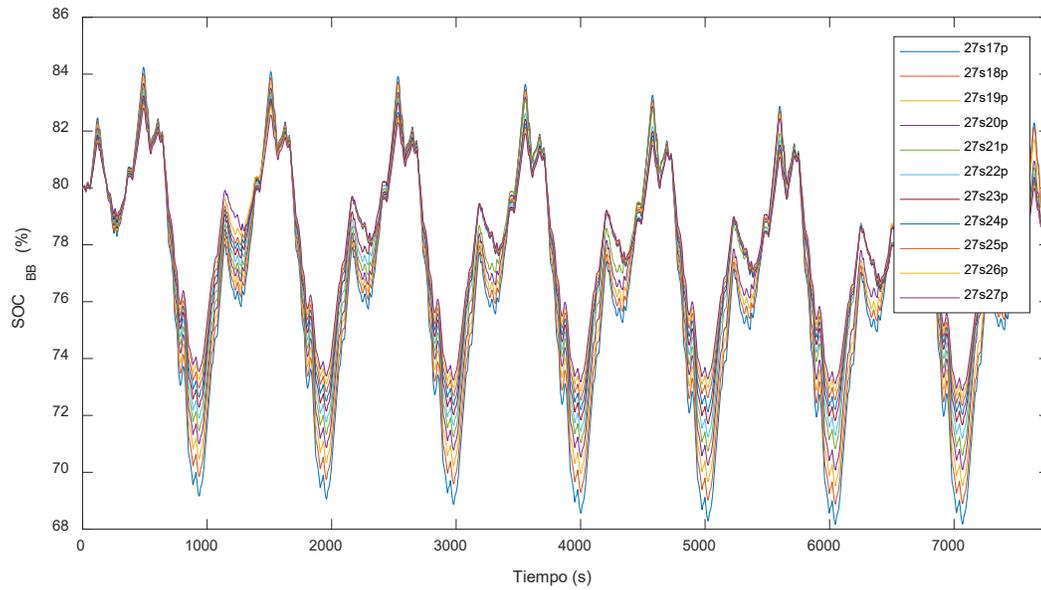


Fig. 82.- Comportamiento del SOC de las baterías para diferentes tamaños del banco.

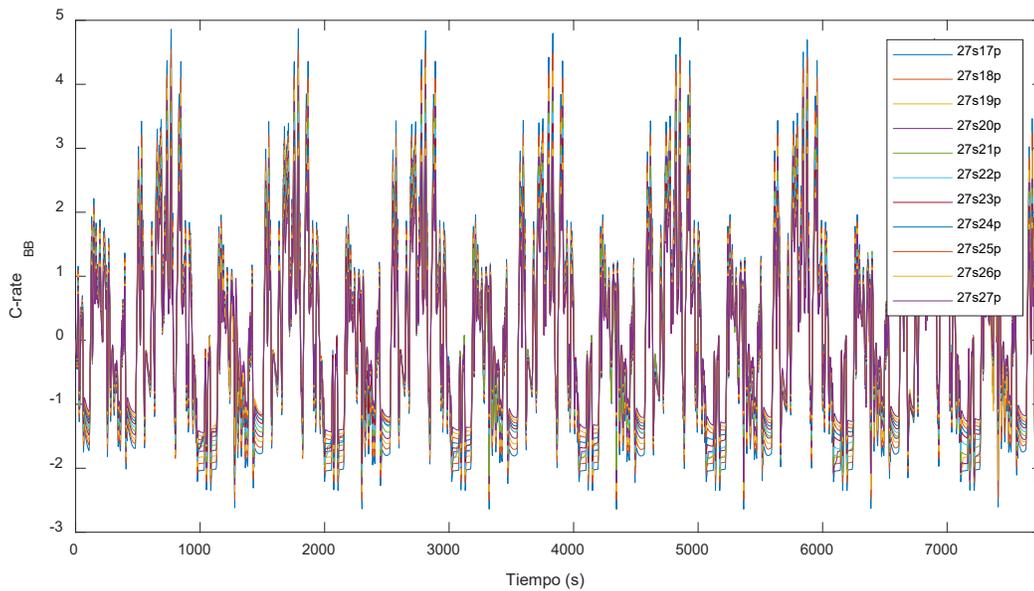


Fig. 83.- Comportamiento del C-rate de las baterías para diferentes tamaños del banco.

En la Tabla 25 se muestra, en términos de C-rate, las corrientes pico del banco de baterías en modo descarga y recarga. En este trabajo se presentó una metodología para dimensionar el banco de baterías que considera una demanda pico de corriente, en términos de C-rate, de “4C”. De acuerdo a esta metodología, la configuración del banco de baterías fue de 27s22p, y de acuerdo a la Tabla 25, se observa que la corriente máxima, en términos de C-rate, es de 3.6. Por lo tanto, se cumple el criterio de desempeño en la metodología propuesta.

A una mayor demanda de corriente del banco de baterías, mayor es el estrés en éstas. Por lo que es importante evaluar la corriente de demanda en términos de la capacidad del banco de baterías. Ya que el estrés del banco de baterías se traduce en un incremento en la temperatura de operación de las baterías, y en consecuencia una reducción sustancial en la vida útil del banco.

Tabla 25.- C-rate máximos (descarga/recarga) para cada tamaño de banco de baterías.

<i>Configuración</i>	<i>C-rate (descarga)</i>	<i>C-rate (recarga)</i>
27s17p	4.87	-2.64
27s18p	4.54	-2.50
27s19p	4.26	-2.37
27s20p	4.00	-2.25
27s21p	3.78	-2.18
27s22p	3.60	-2.10
27s23p	3.44	-2.03
27s24p	3.30	-1.96
27s25p	3.16	-1.89
27s26p	3.04	-1.84
27s27p	2.92	-1.78

De lo anterior, se concluye que el dimensionamiento del banco de baterías, para el caso de estudio, cumple con el desempeño requerido, así como los criterios de diseño. Por lo que:

El dimensionamiento de las fuentes, así como el diseño de la estrategia de manejo de energía impacta sustancialmente en el desempeño de las mismas, en la eficiencia del uso del combustible, en el estrés de cada una de ellas, así como su vida útil, entre otros parámetros.

4.6.4 Análisis de sensibilidad de la EMS de acuerdo al tamaño del banco de ultracapacitores

En este trabajo de tesis, se planteó una metodología de dimensionamiento de una planta de potencia híbrida que incluye: celdas de combustible, baterías y ultracapacitores. Esta metodología se propuso para dimensionar el tamaño de las fuentes, que cumplan con el requerimiento de potencia y energía, pero a su vez, fuesen de menor tamaño posible. Del resultado de la aplicación de la metodología se obtuvo un tamaño pequeño de ultracapacitores que, de acuerdo a los resultados mostrados hasta la subsección anterior, pareciera que la aportación de los ultracapacitores fuese insignificante y, en consecuencia, no necesario en la planta de potencia propuesta para el vehículo del caso de estudio. Por lo tanto, se realizó un análisis de sensibilidad en el tamaño del banco de ultracapacitores para evaluar el efecto de la EMS en el desempeño del vehículo eléctrico.

Para el análisis de sensibilidad del tamaño del banco de ultracapacitores se proponen cuatro casos con las características siguientes, y el uso de la misma EMS.

Caso I.- Se considera la integración de la planta de potencia del vehículo eléctrico sólo por celdas de combustible y de baterías. Es decir, no se incluye el banco de ultracapacitores.

Caso II.- Se considera la planta de potencia del vehículo integrado por celdas de combustible, baterías y ultracapacitores. El dimensionamiento de éstos últimos se realiza de acuerdo a la metodología propuesta en este trabajo de tesis (tamaño mínimo del banco de ultracapacitores).

Caso III.- Se considera la planta de potencia del vehículo integrado por celdas de combustible, baterías y ultracapacitores. El dimensionamiento del banco de ultracapacitores es acorde al criterio de desempeño siguiente: La energía almacenada en los ultracapacitores debe ser capaz de suplir la demanda del vehículo eléctrico, desde un estado de reposo hasta su velocidad máxima, con una aceleración constante máxima permitida por el ciclo de manejo seleccionado.

Caso IV.- Se considera la planta de potencia del vehículo integrado sólo por celdas de combustible y ultracapacitores. El dimensionamiento de éstos últimos se realiza de acuerdo al criterio de desempeño descrito en el Caso III.

Caso I

En la Fig. 84 se muestra el desempeño de las fuentes para el Caso I propuesto. Es decir, sin utilizar un banco de ultracapacitores. En esta gráfica se puede apreciar que los ultracapacitores no aportan potencia ni energía al motor del vehículo eléctrico para toda la autonomía propuesta de acuerdo al ciclo de manejo seleccionado. Se puede observar que todo el requerimiento energético se dividió entre las celdas de combustible y las baterías. Se aprecia que, para ambas fuentes, su aportación es mayor que si se tuviera el banco de ultracapacitores propuesto.

En la Fig. 85 se muestra la estimación del estado de carga del banco de baterías para toda la autonomía propuesta del vehículo eléctrico. En ésta se observa que el estado de carga al final de la autonomía es menor a un 5% con respecto al estado de carga inicial. Por lo que se podría decir, que su estado final es cercano al estado inicial y cumple con uno de los objetivos de la EMS que se propone en este trabajo. Por otro lado, en la Fig. 86 se muestra la tasa de descarga del banco de baterías en términos de C-rate. En ésta se observa, que en términos de C-rate, la tasa de descarga supera los “4C” propuesto para la EMS, y el cual se encuentra fuera de las condiciones de descarga permitidos por el fabricante. Por lo que, superando este umbral, la condición de descarga del banco de baterías excede la condición máxima del mismo, lo que conlleva a escenarios no deseados de operación del banco de baterías. Este escenario podría incluir un sobrecalentamiento del banco de baterías, si no se cuenta con un sistema de enfriamiento adecuado. Además, ya que se supera el umbral máximo permitido por el fabricante, se puede inferir que este escenario degradaría las

baterías, que impactaría en una disminución de su tiempo de vida, lo que podría llevar a necesitar un cambio del banco de baterías prematuro.

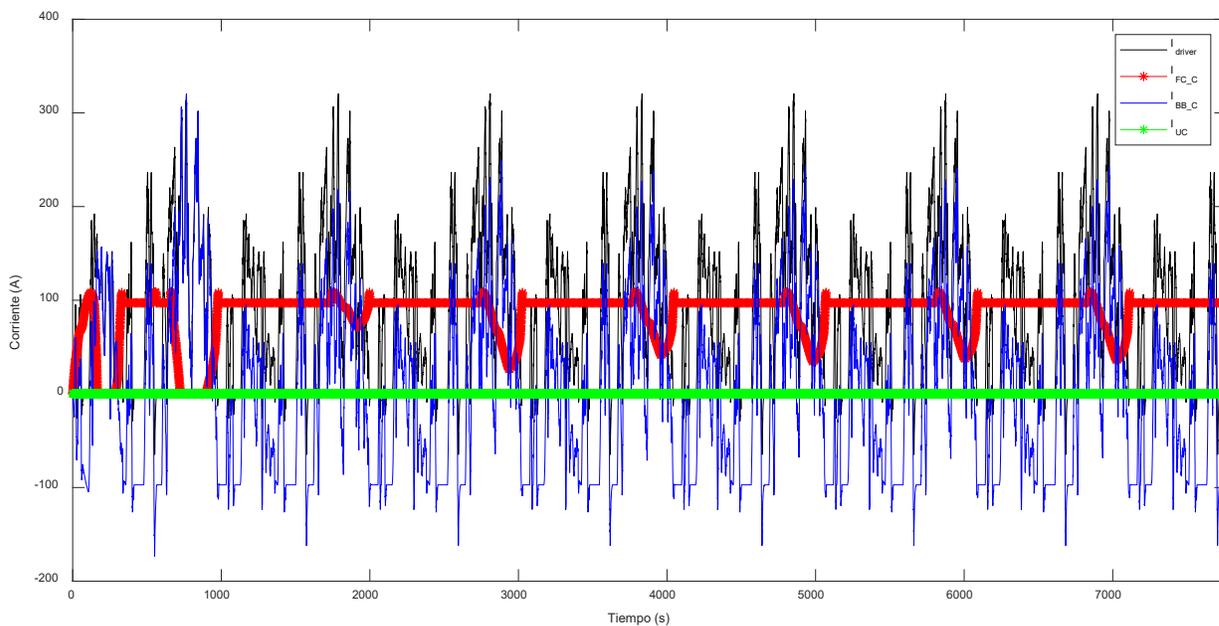


Fig. 84.- Desempeño de las fuentes del vehículo eléctrico para el Caso 1 propuesto.

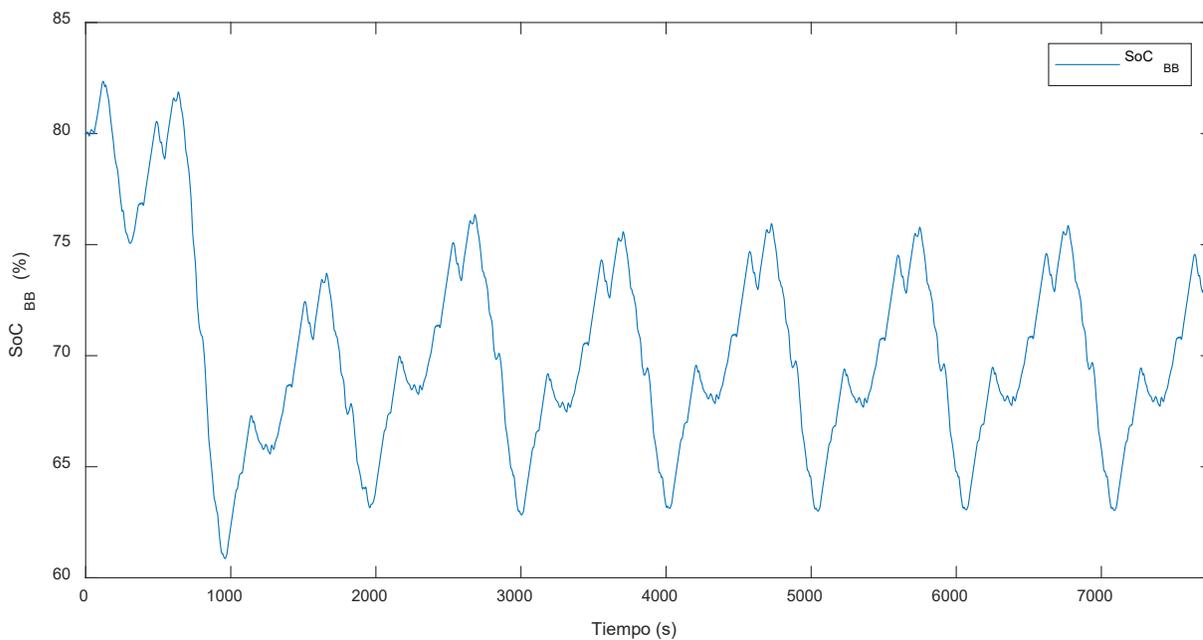


Fig. 85.- Estado de carga de las baterías para el Caso 1 propuesto.

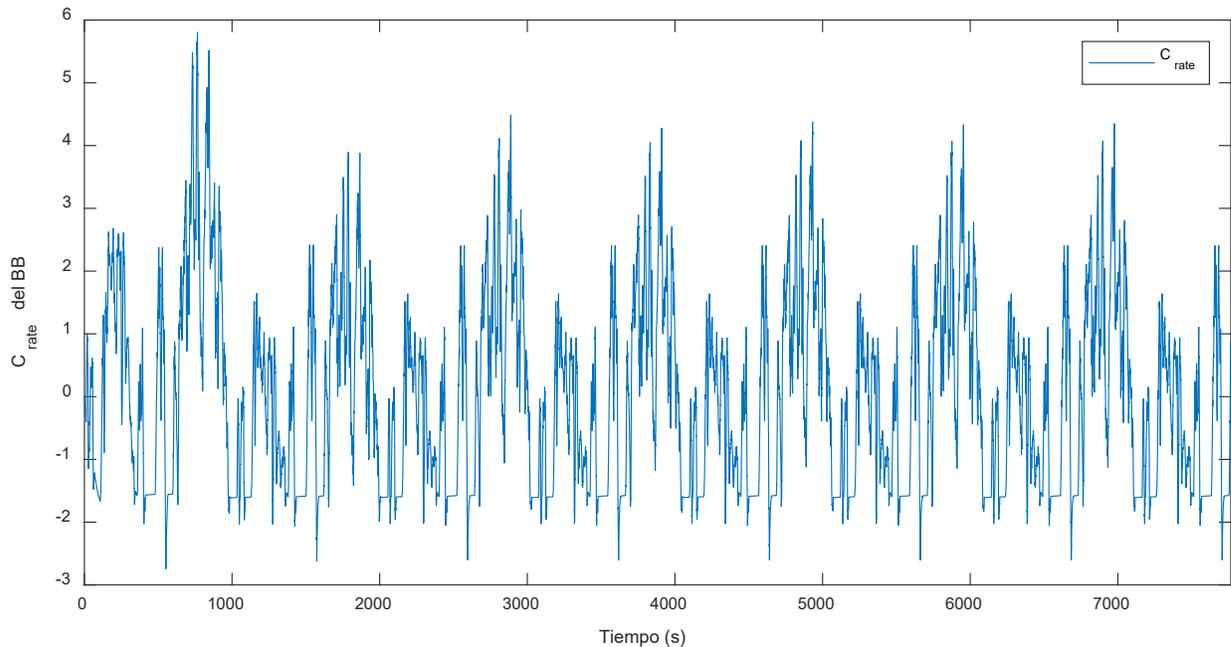


Fig. 86.- Tasa de descarga del banco de baterías en términos de “C-rate”.

Por otra parte, en esta configuración sin banco de ultracapacitores, de acuerdo a la Fig. 84, las celdas de combustible operan por tiempos prolongados en potencia máxima, por lo que la eficiencia de conversión disminuye. En este escenario la eficiencia promedio de conversión del combustible es del 33%.

Caso II

La configuración del Caso II, es el resultado de aplicar la metodología de dimensionamiento que se propone en este trabajo, así como el diseño de la EMS con los objetivos particulares definido en la Sección 4.5. Por lo que el análisis de este caso se presentó en esa misma sección.

Caso III

Para el Caso III, se utilizó la configuración híbrida propuesto en este trabajo. Sin embargo, para el dimensionamiento de los ultracapacitores se utilizó un criterio de desempeño del vehículo. Para cumplir dicho desempeño, la energía proveniente de los ultracapacitores debería ser suficiente para que el vehículo alcance, desde un estado de reposo, la velocidad máxima, con la aceleración máxima permitida por el ciclo de manejo seleccionado. Del resultado de aplicar este criterio, se obtiene que la configuración del banco de ultracapacitores es de 30s20p. Ya que el banco de ultracapacitores es más grande en esta configuración, se estableció una frecuencia de corte para el divisor de frecuencia quién determina el porcentaje de aportación entre las baterías y los

ultracapacitores. La nueva frecuencia se estableció en 22.2 mHz. El resultado de estos cambios se observa en la Fig. 87, en donde se muestra el desempeño de cada fuente con dicha configuración.

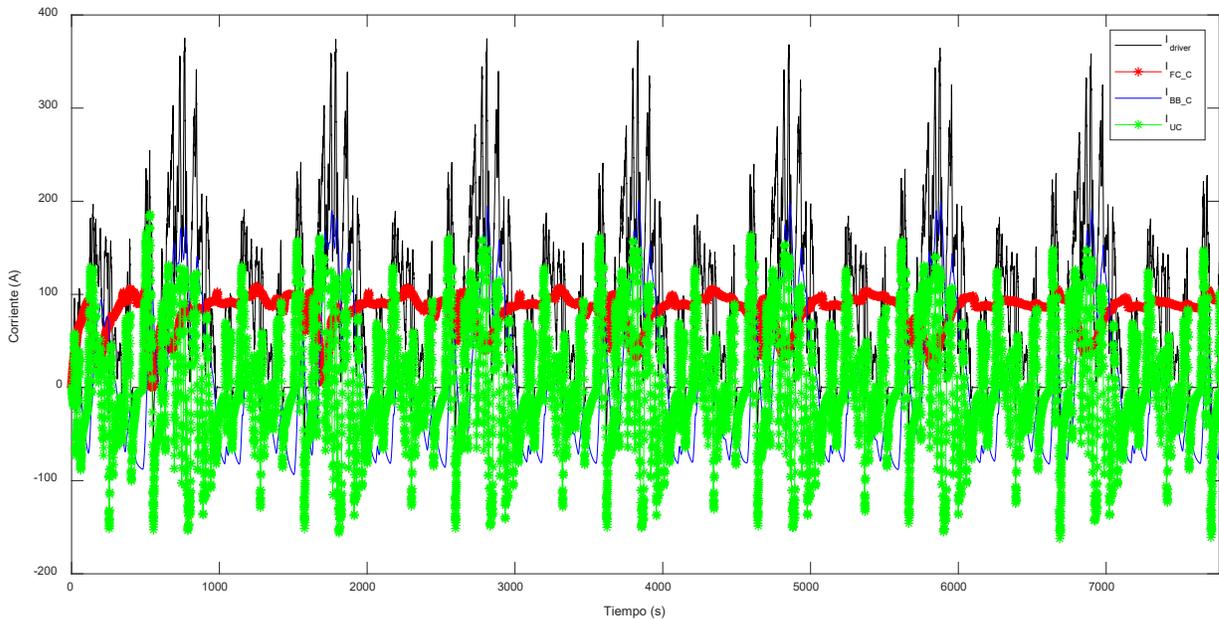


Fig. 87- Desempeño de las fuentes del vehículo eléctrico para el Caso III propuesto

En la Fig. 87 se muestra que la aportación de energía y potencia de los ultracapacitores se incrementó en comparación de los casos anteriores. También se observa una disminución en la aportación de las celdas de combustible, lo que implica un mejor uso del combustible, es decir, un incremento en su eficiencia. Sin embargo, en la Fig. 88, se observa que el estado de carga final del banco de baterías difiere a su estado inicial en poco menos de un 10%. Esta diferencia es aceptable, si se considera que se pueda recuperar si el vehículo permanece encendido por una decena de minutos antes de iniciar su autonomía. Por otro lado, como se puede observar en la Fig. 89, la tasa de descarga y recarga del banco de baterías, en términos de “C-rate” disminuye en un 50% en comparación en donde no se utiliza los ultracapacitores, es decir, el Caso I. También, como se observa en la Fig. 87, esta configuración permite operar a las celdas de combustible en regiones de mayor eficiencia, lo que se traduce que la eficiencia de conversión del combustible promedio también sea mayor. Para este caso, la eficiencia promedio es de 39.7%.

Un banco de ultracapacitores más grande reduce el estrés del banco de baterías, e incrementa la vida útil de éstas, ya que se reducen sus tasas de descarga y recarga. Además, en la configuración de la planta de potencia propuesta, este banco de ultracapacitores incrementa la eficiencia del uso de la energía a bordo, es decir, la conversión de la energía del combustible hidrógeno.

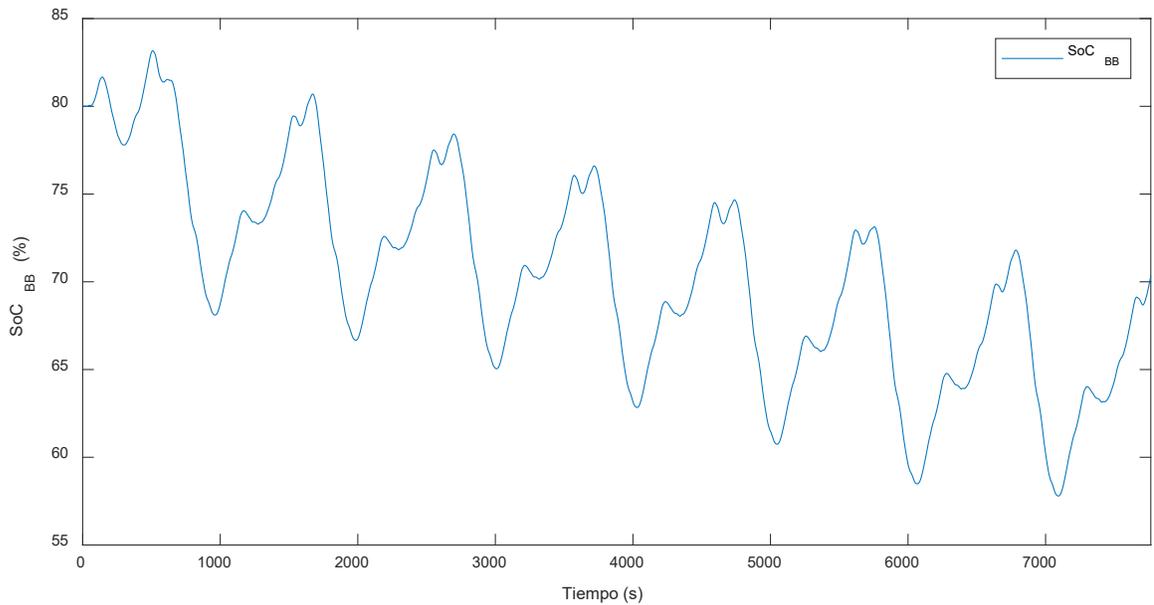


Fig. 88.- Estado de carga de las baterías para el Caso III propuesto.

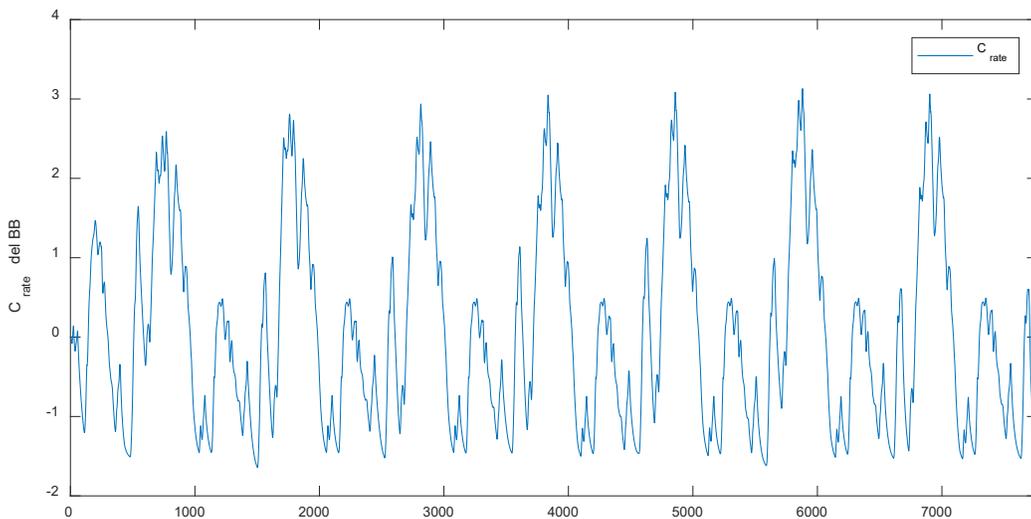


Fig. 89.- Tasa de descarga del banco de baterías en términos de “C-rate” para el Caso III.

Caso IV

Finalmente, para el Caso IV, se considera una planta de potencia integrado sólo por las celdas de combustible y ultracapacitores. El dimensionamiento de éste último es el mismo que para el Caso III. En la Fig. 90 se muestra el desempeño de las fuentes con la configuración del Caso IV. En ésta se observa que las no hay aportación por parte de las baterías, y que para suplir la demanda requerida por el vehículo se encarga las celdas de combustible y los ultracapacitores. Sin embargo,

en esta figura se encuentra acotado el tiempo de simulación a 750 s. Lo anterior se debe a que, según se muestra en la Fig. 91, los ultracapacitores no son capaces de mantener la demanda del vehículo por tiempos prolongados. Se debe recordar que los ultracapacitores tienen una densidad de potencia alta, pero una densidad de energía baja, por lo que, ante una demanda constante, los ultracapacitores se descargan rápidamente, cayendo su voltaje a niveles inferiores por debajo del umbral de la aplicación, en este caso, menores a 55 V.

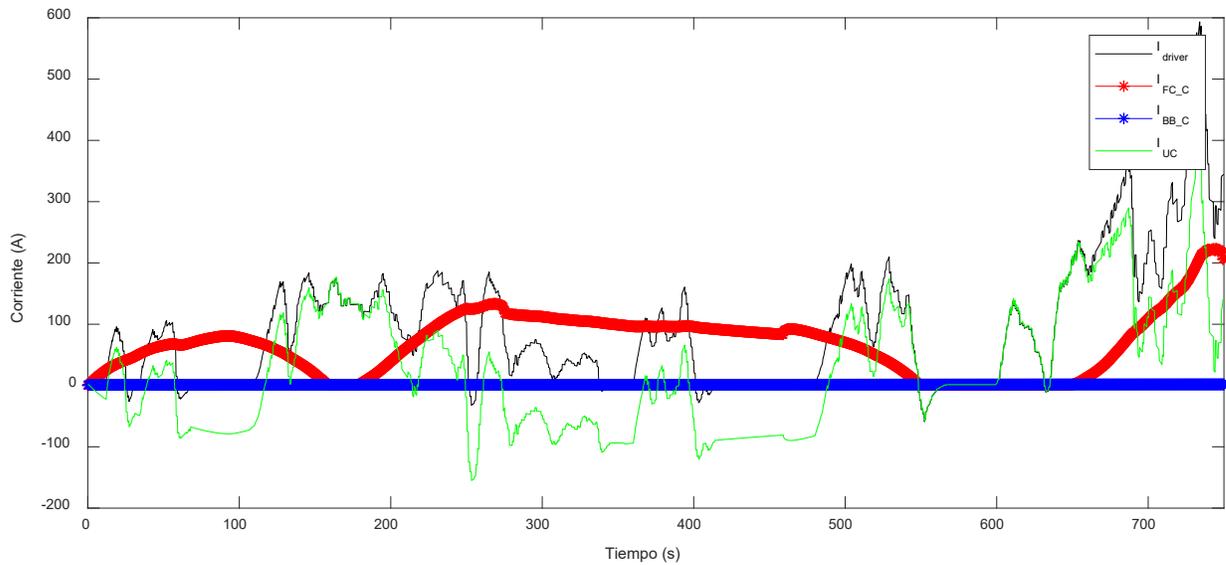


Fig. 90.- Desempeño de las fuentes para el Caso 4.

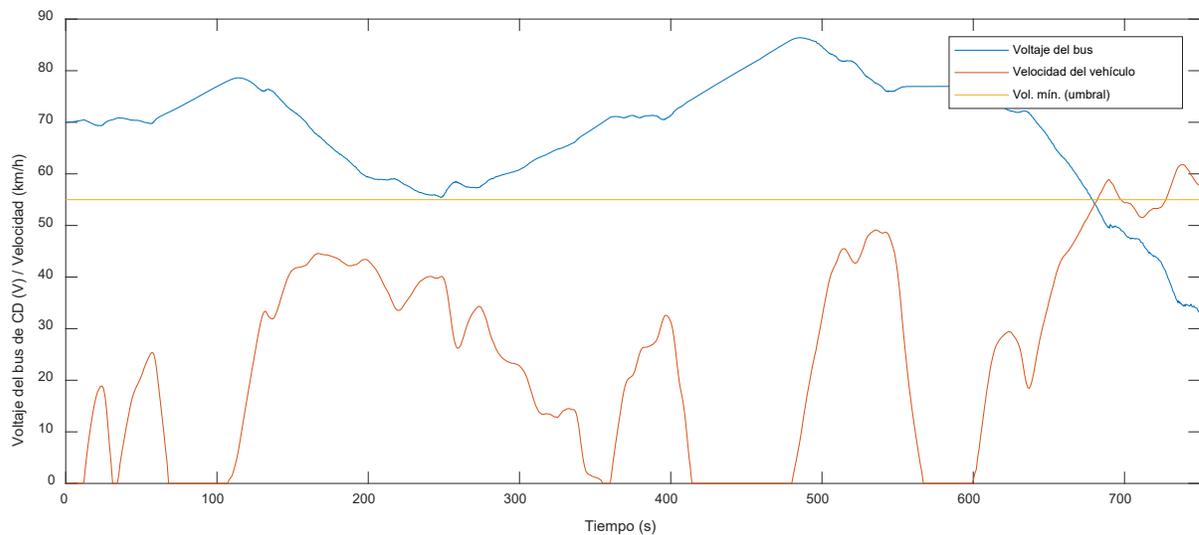


Fig. 91.- Voltaje de los ultracapacitores (bus de CD) y velocidad del vehículo de acuerdo al ciclo de manejo.

Bajo el escenario mostrado anteriormente, esta configuración no permite cumplir con la autonomía definida con el ciclo de manejo seleccionado y cumplir con los objetivos de la EMS propuesta en este trabajo.

Discusión

Como se ha mostrado en los casos propuestos, el desempeño de las fuentes con la EMS propuesta en este trabajo distinta a diferentes tamaños del banco de ultracapacitores, desde no contar con ellos hasta tener un tamaño que pueda cumplir con un criterio de desempeño del vehículo eléctrico. En todos los casos se pueden observar que existe una mejoría en un parámetro de desempeño, pero también una reducción en otros. Por ejemplo, en el Caso I, se redujo el peso de la planta de potencia al suprimir la integración del banco de ultracapacitores. Sin embargo, en esta configuración, se incrementó la aportación de energía/potencia por parte del banco de baterías, por lo que el estrés de ellas también lo hizo. Esta condición podría reducir la vida útil de las mismas e incrementar el costo de inversión de esa fuente en un periodo igual en que las baterías tuvieran un estrés menor. En el Caso III, se reduce el estrés de las baterías al reducir su aportación de potencia/energía, por lo que se podría cumplir con la vida útil de las mismas propuestas por el fabricante. Sin embargo, al incrementar en tamaño el banco de ultracapacitores, también se incrementa el costo de inversión. Finalmente, en el Caso IV, se suprime la integración del banco de baterías al tren de potencia, con el objetivo de reducir costo y peso al vehículo, considerando el criterio de desempeño para dimensionar el banco de ultracapacitores según el Caso III. Sin embargo, esta configuración del tren de potencia no es suficiente para cumplir con el desempeño propuesto del vehículo de acuerdo a la autonomía y el ciclo de manejo seleccionado, de acuerdo con lo que se muestra en la Fig. 90 y en la Fig. 91

En la Tabla 26 se puede resumir algunos parámetros de desempeño de los cuatro casos.

Tabla 26.- Comparación entre cuatro casos para el análisis de dimensionamiento del banco de ultracapacitores.

Caso	SOC final de las baterías	“C-rate” máximo en descarga de las baterías	Eficiencia promedio de conversión de las FC	Costo de inversión inicial diferencial comparado con el Caso II.
I	~75%	5.9 C	33.0 %	-164.02 USD
II	~80%	3.6 C	38.2 %	-
III	~70%	3.1 C	39.7 %	+ 3280.50 USD
IV	-	-	-	+ 2705.70 USD

Cómo se observa en la Tabla 26, incrementar la eficiencia promedio de conversión de combustible no es inversamente proporcional con la reducción de la tasa máxima de descarga, y mucho menos con el costo de inversión en el cambio de la configuración de la planta de potencia.

El enfoque de este trabajo de tesis fue el de obtener la mejor eficiencia del uso de la energía a bordo del vehículo. Ya que la energía total del vehículo la tiene que entregar las celdas de combustible, la EMS que se propuso en este trabajo tuvo como objetivo principal mejorar el uso del combustible de las mismas, es decir, del hidrógeno. Por lo que el Caso II, no sólo se obtiene una mejora del uso de combustible (comparado con otros trabajos), sino también se cumple con otros objetivos particulares como lo son:

- Tasa de descarga de las baterías menor a 4C (en términos de C-rate).
- Estado de carga final de las baterías cercano al estado inicial (80%)
- Reducción del costo de inversión (reduciendo el tamaño de las fuentes).

Sin embargo, como se muestra en la Tabla 26, se pueden obtener mejoras en algunos de éstos parámetros (por ejemplo: eficiencia del uso del combustible y reducción del estrés a las baterías), pero con la reducción de otras (por ejemplo: incremento en el costo del tren de potencia).

Por lo anterior, puede existir otras soluciones al problema que se plantea en esta tesis, pero bajo otras condiciones y escenarios. Finalmente, en este trabajo se presenta diferentes escenarios, tanto de configuración de planta de potencia, así como de variaciones de la misma, las cuales pueden ser utilizadas para diseñar y desarrollar una planta de potencia y una EMS para un vehículo diferente con una aplicación y con objetivos diferentes a los que se plantea en este trabajo.

En el capítulo siguiente se resumen todas las conclusiones alcanzadas en el desarrollo de este trabajo.

V

Conclusiones

Este trabajo presenta una metodología para especificar una planta de potencia híbrida basada en celdas de combustible y sus componentes, para vehículos eléctricos híbridos. La hibridación de la planta de potencia utilizando a las celdas de combustible con otras fuentes, como baterías y ultracapacitores, permiten maximizar las ventajas de cada fuente, mientras que se compensan sus limitaciones. Un enfoque simple se utiliza para especificar una planta de potencia base, con el objetivo de minimizar el peso de sus componentes y tomando en consideración la posibilidad de especificar desde un inicio el diseño de la celda de combustible. El peso del vehículo eléctrico híbrido, que incluye su peso inicial, así como el peso de la planta de potencia, tiene una influencia fuerte en el desempeño del vehículo, y afecta el requerimiento de potencia y de energía. Al reducir el tamaño de la planta de potencia manteniendo el suministro de energía y potencia, el enfoque propuesto también mantiene bajos los requisitos de energía y potencia, promoviendo el ahorro de combustible y costos. La metodología de dimensionamiento que se propone mantiene el cumplimiento del requerimiento de potencia y energía del ciclo de manejo seleccionado, mientras que se aprovecha las limitaciones electroquímicas de los componentes del vehículo eléctrico híbrido basados en celdas de combustible. El algoritmo propuesto considera el peso agregado de las fuentes y se realiza un re-dimensionamiento de la planta para compensar el requerimiento adicional. El algoritmo utiliza un proceso iterativo que considera el peso añadido por las fuentes hasta que se cumplan los requisitos de potencia y energía del vehículo.

El enfoque de este trabajo considera a las celdas de combustible como única fuente de energía (del hidrógeno, una vez reaccionado), ofreciendo una carga de combustible rápida conveniente para su aceptación en el mercado. Las celdas de combustible fueron diseñadas de acuerdo a los requerimientos de potencia y energía del ciclo de manejo, minimizando su tamaño con niveles de eficiencias suficientes. Los ultracapacitores se consideraron en este enfoque para suplir las

demandas transitorias requeridas por el ciclo de manejo del vehículo, y para recuperar energía de los frenados regenerativos, obteniéndose un tamaño reducido. El banco de baterías se considera como una fuente auxiliar de potencia que suple la potencia complementaria cuando la demanda del vehículo excede la que pudiera entregar las celdas de combustible, pero excluye los transitorios, que en este caso debería atender el banco de ultracapacitores. Para especificar el banco de baterías se toma en consideración los niveles de corriente para su carga y descarga, así como el rango de voltaje de operación, en orden de no estresar demasiado a las baterías y acortar su vida útil e incrementar su costo.

Un análisis comparativo sobre diferentes configuraciones de planta de potencia, sin utilizar una estrategia de manejo de energía, muestra que el tamaño de las fuentes impacta en el peso y costo total de la misma. Por lo que, una planta de potencia minimizada reduce estos parámetros, factores importantes en el diseño del vehículo eléctrico.

En este trabajo se presentó el diseño y desarrollo de una estrategia de manejo de energía que toma en consideración una planta de potencia híbrida constituida por un sistema de celdas de combustible (como principal fuente de energía), uno de baterías y un banco de ultracapacitores (como fuentes auxiliares). La estrategia de manejo de energía que se presenta en este trabajo considera las dinámicas de las fuentes, que incluyen la tasa de descarga y la potencia pico que se les puede demandar. Además, tiene como objetivo principal hacer uso eficiente de la energía en el vehículo, por lo que la estrategia se focaliza en mejorar continuamente la conversión de la energía a bordo, del combustible hidrógeno.

La estrategia se diseñó bajo un sistema de control basado de lógica difusa. La técnica de control considera los objetivos siguientes:

1. Cumplir con el desempeño del vehículo (requerimiento de potencia).
2. Mantener el voltaje de los ultracapacitores (conectados directamente al bus de DC) en el rango de operación del driver del motor.
3. Mejorar el punto de operación de las celdas de combustible (mejora en la conversión de la energía proveniente del hidrógeno) cada que le sea posible.
4. Limitar la corriente de salida de las celdas de combustible y su tasa de cambio.
5. Mantener el estado de carga (SOC) de las baterías dentro del especificado por el proveedor.
6. Establecer el SOC final de las baterías lo más cercano a un SOC de referencia.

El objetivo de la estrategia fue la de estimar las señales de referencia de corriente para los convertidores de potencia asociados a un conjunto de celdas de combustible y un banco de baterías. Lo anterior, permite el acoplamiento de potencia entre las fuentes, y el control del flujo de energía desde y hacia éstas. Además, la estrategia controla, indirectamente, el estado de carga de los

ultracapacitores, que es el rango del voltaje de operación del bus de DC en la que trabaja el driver del motor eléctrico del vehículo.

La estrategia incluye un filtro pasa-bajas para separar la operación del banco de baterías y de los ultracapacitores de acuerdo a la dinámica de demanda de potencia que se presente de acuerdo al escenario de conducción determinado por el ciclo de manejo seleccionado.

El diseño de la estrategia de manejo de energía se basó en un dimensionamiento “*ab-initio*” de las fuentes para disminuir el requerimiento energético adicional requerido al incorporar la planta de potencia híbrida. Este dimensionamiento estableció la capacidad de energía disponible a bordo del vehículo, que se hace uso para cumplir con el desempeño del vehículo evaluado. El caso de estudio fue un vehículo eléctrico ligero utilitario para aplicaciones de entrega de bienes en un área urbana acotada.

Un ajuste en el dimensionamiento de las celdas de combustible fue necesario para cumplir con los objetivos de la estrategia de manejo de energía. Este re-dimensionamiento en las celdas de combustible, además de cumplir con el desempeño del vehículo y los objetivos de la estrategia, mejoró la eficiencia promedio de conversión del combustible, hasta en un 12%. Comparados con otros trabajos, donde las celdas operan la mayor parte de su tiempo en su potencia máxima, se tiene una mejora en la eficiencia promedio de la conversión del combustible de hasta un 15%.

Diversos análisis de sensibilidad en los parámetros de operación inicial de las fuentes impactan en menor o mayor medida en el desempeño del vehículo, que se ve reflejando en el consumo de combustible para la autonomía definida utilizando el ciclo de manejo seleccionado.

De los análisis presentados en este trabajo muestran lo siguiente:

- El incrementar el tamaño del banco de ultracapacitores, incrementa la eficiencia en el uso del combustible a bordo. Sin embargo, también se incrementa el peso adicional de esta fuente, así como el costo de la misma. Éste último con el mayor costo por kWh.
- La eficiencia en el uso de la energía es mayor si el estado de carga inicial de las baterías es superior al estado de carga de referencia, definida en la estrategia de manejo de energía.
- La eficiencia disminuye si el estado de carga inicial es inferior a la definida en la estrategia.
- La reducción el tamaño el banco de baterías, incrementa la tasa de demanda de corriente (en términos de C-rate), que provoca un incremento en el estrés de las baterías, así como su temperatura, y una disminución en su vida útil.
- El incremento en el tamaño de las celdas de combustible, incrementa la eficiencia de conversión del combustible. Sin embargo, existe un punto en el sobre-dimensionamiento en el que el incremento de la eficiencia es la mayor, y el cual se utilizó al definir el tamaño de las celdas.

5.1 Aportaciones de la tesis

Con los resultados que se obtuvieron mediante el caso de estudio, un vehículo eléctrico utilitario basado en celdas de combustible, se demuestra que, mediante un dimensionamiento “ab-initio” y un diseño de una estrategia de manejo de energía, se hace uso eficiente de la energía a bordo con la mejora de la eficiencia promedio de conversión del combustible y de la disminución del requerimiento energético adicional por parte del peso de la planta de potencia híbrida. Adicionalmente, se muestra que en el dimensionamiento de las fuentes se puede incorporar parámetros de diseño como lo es la capacidad de las fuentes adicionales como fueron las baterías y los ultracapacitores.

Además, se presentaron diferentes estudios, un análisis económico con respecto a diferentes casos de tamaños de la planta de potencia y diversos análisis de sensibilidad respecto a parámetros importantes en el diseño del vehículo eléctrico.

En resumen, las contribuciones de esta tesis son:

- Una metodología de dimensionamiento de una planta de potencia híbrida “ab-initio” para un vehículo eléctrico utilitario basado en celdas de combustible.
- Una reducción del tamaño de las celdas de combustible que cumple con el requerimiento energético del vehículo de hasta un 70% en comparación de los trabajos que no contemplan un dimensionamiento “ab-initio” en el diseño del vehículo. Y de hasta un 40% promedio, para los trabajos que si contemplan un dimensionamiento de la planta de potencia.
- Un diseño de estrategia de manejo de energía basado en lógica difusa, para un vehículo eléctrico utilitario tipo non-plug-in, que considera las dinámicas de respuestas de las fuentes para disminuir el estrés de las mismas y con la posibilidad de alargar su vida útil.
- Un incremento en la eficiencia de conversión de la energía del combustible de hasta un 15%, en comparación de los trabajos que obligan a las celdas de combustible a operar en potencias altas la mayoría del tiempo, que permite mejorar el ahorro de combustible para la autonomía establecida.
- Diversos análisis de sensibilidad que muestran el impacto en el desempeño del vehículo cuando las condiciones iniciales son diferentes a las nominales que se presentan en este trabajo.

5.2 Trabajos futuros

Todas las estimaciones realizadas en este trabajo se validaron mediante una plataforma de simulación, las cuales permitieron cuantificar y cualificar el trabajo realizado. Sin embargo, se requiere de la validación de éstos en un ambiente físico antes de su implementación en una aplicación real. Debido a que la tecnología principal de estos vehículos eléctricos son las celdas de combustible, se dificultó su validación en físico, ya que es una tecnología emergente, y por consiguiente su costo es muy elevado. Por lo que, adquirir una celda de combustible con las especificaciones definidas en este trabajo fueron muy remotas. Aunado a lo anterior, el costo del banco de baterías y de ultracapacitores, si bien son tecnologías maduras, aún su costo representa un reto para su integración a la planta de potencia híbrida que se propone en este trabajo. Además, de una revisión realizada en la identificación de posibles convertidores para las fuentes propuestas en este trabajo, se encontró que la existencia de convertidores de potencia en operación en modo corriente es poca o nula. Y la especificación de éstos, de acuerdo a las necesidades energéticas requeridas por el vehículo eléctrico, se dificultó. Una solución posible para este reto es el diseño y desarrollo propio de los convertidores “Ad-Hoc” a los requerimientos presentados en este trabajo. Sin embargo, esto implica tiempo y costo en su desarrollo, que para el desarrollo de esta tesis no se tuvo contemplado.

Debido a la implicación económica de la adquisición de las fuentes, así como los convertidores y sus elementos auxiliares, se presenta como trabajo futuro las actividades siguientes:

- Especificar los convertidores de potencia para las fuentes descritas en este trabajo, en caso de no encontrarse comercialmente, diseñar y validar que los convertidores operen en modo corriente.
- Integrar los sistemas de celdas de combustible y de baterías para su validación en una plataforma de pruebas física (control local).
- Especificar la unidad de control y desarrollar la programación de la estrategia de manejo de energía que se propone en este trabajo.
- Integrar la planta de potencia híbrida con la configuración propuesta en este trabajo, y validar su operación en una plataforma de pruebas física (control supervisor).
- Analizar y validar en la plataforma de pruebas la estrategia de manejo de energía propuesta.
- Proponer un método comparativo de las eficiencias en diversos trabajos de vehículos eléctricos basados en celdas de combustible.
- Incorporar en el modelo de las fuentes el parámetro de envejecimiento para validar cualitativamente la reducción de costos operativos con la implementación de la estrategia propuesta en este trabajo.

Estos trabajos futuros que se consideran que en un corto o mediano plazo se puedan desarrollar, así como otros que se pueden identificar en un largo plazo, representan grandes retos que se requieren resolver con respecto a los vehículos eléctricos basados en celdas de combustible. Sin embargo, éste trabajo, como los que puede derivar, abrirán los caminos para el desarrollo tecnológico de la electro-movilidad en nuestro país.

La electro-movilidad es un tema de suma importancia a nivel mundial, donde se han considerado actividades para su desarrollo y promoción en diferentes países. Por lo que México, no debe ser la excepción, y que las investigaciones recientes deben de considerar todos los aspectos mencionados en este trabajo.

Bibliografia

- [1] M. Guarnieri, “Looking back to electric cars,” in *2012 Third IEEE HISTory of ELection-technology CONference (HISTELCON)*, Sep. 2012, pp. 1–6, doi: 10.1109/HISTELCON.2012.6487583.
- [2] Q. Li, W. Chen, Z. Liu, M. Li, and L. Ma, “Development of energy management system based on a power sharing strategy for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway,” *J. Power Sources*, vol. 279, pp. 267–280, 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.12.042.
- [3] J. W. Grizzle, “Energy management strategy for a parallel hybrid electric truck,” *Proc. 2001 Am. Control Conf.*, vol. 5, pp. 2878–2883, 2001, doi: 10.1109/ACC.2001.946337.
- [4] N. J. Schouten, M. A. Salman, and N. A. Kheir, “Energy management strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic,” *Control Eng. Pract.*, vol. 11, no. 2, pp. 171–177, 2003, doi: 10.1016/S0967-0661(02)00072-2.
- [5] H. Banvait, S. Anwar, and Y. Chen, “A rule-based energy management strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV),” *2009 Am. Control Conf.*, pp. 3938–3943, 2009, doi: 10.1109/ACC.2009.5160242.
- [6] M. Koot, J. T. B. a Kessels, B. de Jager, W. P. M. H. Heemels, P. P. J. Van den Bosch, and M. Steinbuch, “Energy management strategies for vehicular electric power systems,” *Veh. Technol. IEEE Trans.*, vol. 54, no. 3, pp. 771–782, 2005, doi: 10.1109/TVT.2005.847211.
- [7] C. Musardo, G. Rizzoni, and B. Staccia, “A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management,” *Proc. 44th IEEE Conf. Decis. Control*, no. December 2005, pp. 1816–1823, 2005, doi: 10.3166/ejc.11.509-524.
- [8] M. Nadal and F. Barbir, “Development of a hybrid fuel cell/battery powered electric vehicle,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 21, no. 6, pp. 497–505, 1996.
- [9] NREL, “Fuel Cell Electric Vehicles: Paving the Way to Commercial Success,” 2016. http://www.nrel.gov/continuum/sustainable_transportation/fuel_cell_ev.html (accessed Nov. 21, 2016).
- [10] S. Gair, “Scotland’s first fuel cell battery powered electric vehicles,” *Platinum Metals Review*, vol. 48, no. 2, p. 61, 2004.
- [11] T. Motors, “What, How & Why of Hidrogen Fuel,” 2015. <https://ssl.toyota.com/mirai/fuel.html>.
- [12] P. Thounthong, S. Pierfederici, J. P. Martin, M. Hinaje, and B. Davat, “Modeling and control of fuel cell/supercapacitor hybrid source based on differential flatness control,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 2700–2710, 2010, doi: 10.1109/TVT.2010.2046759.
- [13] P. Thounthong, S. Raël, and B. Davat, “Energy management of fuel

-
- cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications,” *J. Power Sources*, vol. 193, no. 1, pp. 376–385, 2009, doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.12.120.
- [14] N. Sulaiman, M. A. Hannan, A. Mohamed, P. J. Ker, E. H. Majlan, and W. R. Wan Daud, “Optimization of energy management system for fuel-cell hybrid electric vehicles: Issues and recommendations,” *Appl. Energy*, vol. 228, no. May, pp. 2061–2079, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.087.
- [15] “US Department of Energy: Where the Energy Goes.” .
- [16] D. Feroldi, M. Serra, and J. Riera, “Energy Management Strategies based on efficiency map for Fuel Cell Hybrid Vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 190, no. 2, pp. 387–401, 2009, doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.01.040.
- [17] D. Gao, Z. Jin, and Q. Lu, “Energy management strategy based on fuzzy logic for a fuel cell hybrid bus,” *J. Power Sources*, vol. 185, no. 1, pp. 311–317, 2008, doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.06.083.
- [18] Q. Li, W. Chen, Y. Li, S. Liu, and J. Huang, “Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 514–525, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.06.026.
- [19] S. Njoya Motapon, L. A. Dessaint, and K. Al-Haddad, “A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 3, pp. 1320–1334, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2257152.
- [20] N. Sulaiman, M. A. Hannan, A. Mohamed, E. H. Majlan, and W. R. Wan Daud, “A review on energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle: Issues and challenges,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 802–814, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.132.
- [21] J. Morales-Morales, I. Cervantes, and U. Cano-Castillo, “On the Design of Robust Energy Management Strategies for FCHEV,” *Veh. Technol. IEEE Trans.*, vol. PP, no. 99, p. 1, 2015, doi: 10.1109/TVT.2014.2336214.
- [22] O. Erdinc, B. Vural, and M. Uzunoglu, “A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system,” *J. Power Sources*, vol. 194, no. 1, pp. 369–380, 2009, doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.04.072.
- [23] Y. Wang, S. J. Moura, S. G. Advani, and A. K. Prasad, “Optimization of powerplant component size on board a fuel cell/battery hybrid bus for fuel economy and system durability,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 33, pp. 18283–18292, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.160.
- [24] B. Bendjedia, N. Rizoug, M. Boukhniher, and F. Bouchafaa, “Experimental energy management of hybrid fuel cell/battery system,” *2017 14th Int. Multi-Conference Syst. Signals Devices, SSD 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 492–498, 2017, doi: 10.1109/SSD.2017.8166941.
- [25] G. Graber, V. Galdi, V. Calderaro, and A. Piccolo, “A method to size the stack and the battery of a fuel cell vehicle reducing the fuel consumption,” *2017 AEIT Int. Annu. Conf. Infrastructures Energy ICT Oppor. Foster. Innov. AEIT 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1–6, 2017, doi: 10.23919/AEIT.2017.8240527.
-

-
- [26] B. Bendjedia, N. Rizoug, M. Boukhnifer, and F. Bouchafaa, "Hybrid Fuel Cell/Battery Source Sizing and Energy Management for Automotive Applications," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 4745–4750, 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.869.
- [27] J. Snoussi, S. Ben Elghali, M. Benbouzid, and M. F. Mimouni, "Optimal sizing of energy storage systems using frequency-separation-based energy management for fuel cell hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 10, pp. 9337–9346, 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2863185.
- [28] B. Bendjedia, N. Rizoug, M. Boukhnifer, F. Bouchafaa, and M. Benbouzid, "Influence of secondary source technologies and energy management strategies on Energy Storage System sizing for fuel cell electric vehicles," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 25, pp. 11614–11628, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.166.
- [29] N. Marx, D. Hissel, F. Gustin, L. Boulon, and K. Agbossou, "On the sizing and energy management of an hybrid multistack fuel cell – Battery system for automotive applications," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 2, pp. 1518–1526, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.111.
- [30] X. Hu, J. Jiang, B. Egardt, and D. Cao, "Advanced Power-Source Integration in Hybrid Electric Vehicles: Multicriteria Optimization Approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 12, pp. 7847–7858, 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2463770.
- [31] C. M. Lee and W. S. Lin, "Stochastic self-optimizing power management for fuel cell hybrid scooters of different sized components," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 15, pp. 5197–5209, 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.02.062.
- [32] S. Ziaeinejad, Y. Sangsefidi, and A. Mehrizi-Sani, "Fuel Cell-Based Auxiliary Power Unit: EMS, Sizing, and Current Estimator-Based Controller," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 6, pp. 4826–4835, 2016, doi: 10.1109/TVT.2016.2552722.
- [33] J. Snoussi, S. Ben Elghali, and M. F. Mimouni, "Sizing and Control of Onboard Multisource Power System for Electric Vehicle," *19th Int. Conf. Sci. Tech. Autom. Control Comput. Eng. STA 2019*, pp. 347–352, 2019, doi: 10.1109/STA.2019.8717231.
- [34] D. Feroldi, "Sizing and energy management for fuel cell hybrid vehicles with supercapacitors," *2015 16th Work. Inf. Process. Control. RPIC 2015*, 2016, doi: 10.1109/RPIC.2015.7497096.
- [35] R. Dominguez and J. Solano, "Sizing of Fuel Cell - Ultracapacitors Hybrid Electric Vehicles Based on the Energy Management Strategy," *2018 IEEE 88th Veh. Technol. Conf.*, 2018.
- [36] D. Feroldi and M. Carignano, "Sizing for fuel cell/supercapacitor hybrid vehicles based on stochastic driving cycles," *Appl. Energy*, vol. 183, pp. 645–658, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.09.008.
- [37] D. Arora, M. Hinaje, C. Bonnet, S. Raël, and F. Lapique, "Sizing supercapacitor for direct hybridization with polymer electrolyte membrane fuel cell," *2018 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2018 - Proc.*, 2019, doi: 10.1109/VPPC.2018.8605027.
- [38] T. H. Kwan, X. Wu, and Q. Yao, "Parameter sizing and stability analysis of a highway fuel cell electric bus power system using a multi-objective optimization approach," *Int. J.*
-

-
- Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 45, pp. 20976–20992, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.113.
- [39] X. Wu, X. Hu, X. Yin, L. Li, Z. Zeng, and V. Pickert, “Convex programming energy management and components sizing of a plug-in fuel cell urban logistics vehicle,” *J. Power Sources*, vol. 423, no. March, pp. 358–366, 2019, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.03.044.
- [40] S. D. Gaikwad and P. C. Ghosh, “Sizing of a fuel cell electric vehicle: A pinch analysis-based approach,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 15, pp. 8985–8993, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.116.
- [41] H. Li, A. Ravey, A. N’Diaye, and A. Djerdir, “A novel equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicle powered by fuel cell, battery and supercapacitor,” *J. Power Sources*, vol. 395, no. February, pp. 262–270, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.05.078.
- [42] N. Xu *et al.*, “Towards a smarter energy management system for hybrid vehicles: A comprehensive review of control strategies,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 10, 2019, doi: 10.3390/app9102026.
- [43] P. Garcia, J. P. Torreglosa, L. M. Fernandez, and F. Jurado, “Control strategies for high-power electric vehicles powered by hydrogen fuel cell, battery and supercapacitor,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, no. 12, pp. 4791–4804, 2013, doi: 10.1016/j.eswa.2013.02.028.
- [44] M. Sellali, A. Betka, and A. Djerdir, “Power management improvement of hybrid energy storage system based on H_∞ control,” *Math. Comput. Simul.*, vol. 167, pp. 478–494, 2020, doi: 10.1016/j.matcom.2019.05.003.
- [45] S. J. Andreasen, L. Ashworth, S. Sahlin, H. C. Becker Jensen, and S. K. Kær, “Test of hybrid power system for electrical vehicles using a lithium-ion battery pack and a reformed methanol fuel cell range extender,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 4, pp. 1856–1863, 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.11.068.
- [46] B. L. Casolari *et al.*, “Model study of a fuel cell range extender for a neighborhood electric vehicle (NEV),” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 20, pp. 10757–10787, 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.001.
- [47] F. Sergi, L. Andaloro, G. Napoli, N. Randazzo, and V. Antonucci, “Development and realization of a hydrogen range extender hybrid city bus,” *J. Power Sources*, vol. 250, pp. 286–295, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.11.006.
- [48] R. Á. Fernández, F. B. Cilleruelo, and I. V. Martínez, “A new approach to battery powered electric vehicles: A hydrogen fuel-cell-based range extender system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 8, pp. 4808–4819, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.01.035.
- [49] K. S. Jeong, W. Y. Lee, and C. S. Kim, “Energy management strategies of a fuel cell/battery hybrid system using fuzzy logics,” *J. Power Sources*, vol. 145, no. 2, pp. 319–326, 2005, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.01.076.
- [50] J. Moreno, M. E. Ortuzar, and J. W. Dixon, “Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 2, pp. 614–623, 2006, doi: 10.1109/TIE.2006.870880.
-

-
- [51] P. Thounthong, S. Raël, and B. Davat, "Control strategy of fuel cell/supercapacitors hybrid power sources for electric vehicle," *J. Power Sources*, vol. 158, no. 1, pp. 806–814, 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.09.014.
- [52] E. Faggioli, P. Rena, V. Danel, X. Andrieu, R. Mallant, and H. Kahlen, "Supercapacitors for the energy management of electric vehicles," *J. Power Sources*, vol. 84, no. 2, pp. 261–269, 1999, doi: 10.1016/S0378-7753(99)00326-2.
- [53] P. Thounthong, V. Chunkag, P. Sethakul, S. Sikkabut, S. Pierfederici, and B. Davat, "Energy management of fuel cell/solar cell/supercapacitor hybrid power source," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 1, pp. 313–324, 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.01.051.
- [54] B. Vural *et al.*, "Fuel cell and ultra-capacitor hybridization: A prototype test bench based analysis of different energy management strategies for vehicular applications," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 20, pp. 11161–11171, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.07.063.
- [55] L. Xu, F. Yang, J. Li, M. Ouyang, and J. Hua, "Real time optimal energy management strategy targeting at minimizing daily operation cost for a plug-in fuel cell city bus," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 20, pp. 15380–15392, 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.074.
- [56] S. Kelouwani, K. Agbossou, Y. Dubé, and L. Boulon, "Fuel cell plug-in hybrid electric vehicle anticipatory and real-time blended-mode energy management for battery life preservation," *J. Power Sources*, vol. 221, pp. 406–418, 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.08.016.
- [57] C. Y. Li and G. P. Liu, "Optimal fuzzy power control and management of fuel cell/battery hybrid vehicles," *J. Power Sources*, vol. 192, no. 2, pp. 525–533, 2009, doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.03.007.
- [58] Q. Li, W. Chen, Y. Li, S. Liu, and J. Huang, "Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic," *Int. J. Electr. Power & Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 514–525, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.06.026.
- [59] X. Liu and D. Diallo, "Cycle-based design methodology of hybrid electric vehicle powertrain: Application to fuel cell vehicles," *5th IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC '09*, no. 1, pp. 1853–1857, 2009, doi: 10.1109/VPPC.2009.5289677.
- [60] R. S. Ashok, Y. B. Shtessel, and M. Ghanes, "Sliding Mode Control of Hydrogen Fuel Cell and Ultracapacitor Based Electric Power System: Electric Vehicle Application," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 14794–14799, 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.2552.
- [61] A. Behdani and M. R. Naseh, "Power management and nonlinear control of a fuel cell–supercapacitor hybrid automotive vehicle with working condition algorithm," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 38, pp. 24347–24357, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.197.
- [62] G. Lopez Lopez, R. Schacht Rodriguez, V. M. Alvarado, J. F. Gomez-Aguilar, J. E. Mota, and C. Sandoval, "Hybrid PEMFC-supercapacitor system: Modeling and energy management in energetic macroscopic representation," *Appl. Energy*, vol. 205, no.

-
- November 2016, pp. 1478–1494, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.063.
- [63] C. Sandoval, V. M. Alvarado, J. C. Carmona, G. Lopez Lopez, and J. F. Gomez-Aguilar, “Energy management control strategy to improve the FC/SC dynamic behavior on hybrid electric vehicles: A frequency based distribution,” *Renew. Energy*, vol. 105, pp. 407–418, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.12.029.
- [64] B. Allaoua, K. Asnoune, and B. Mebarki, “Energy management of PEM fuel cell/supercapacitor hybrid power sources for an electric vehicle,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 33, pp. 21158–21166, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.209.
- [65] D. Shin, K. Lee, and N. Chang, “Fuel economy analysis of fuel cell and supercapacitor hybrid systems,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 3, pp. 1381–1390, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.10.103.
- [66] T. Wang *et al.*, “An optimized energy management strategy for fuel cell hybrid power system based on maximum efficiency range identification,” *J. Power Sources*, vol. 445, no. April 2019, 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.227333.
- [67] D. Li, B. Xu, J. Tian, and Z. Ma, “Energy Management Strategy for Fuel Cell and Battery Hybrid Vehicle Based on Fuzzy Logic,” *Processes*, vol. 8, no. 882, pp. 1–14, 2020.
- [68] P. M. Muñoz, G. Correa, M. E. Gaudiano, and D. Fernández, “Energy management control design for fuel cell hybrid electric vehicles using neural networks,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 48, pp. 28932–28944, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.09.169.
- [69] C. D. A. and M. A. E. G. Amaya, H. Chiacchiarini, “The Energy Management Strategy of FC/Battery Vehicles Winner of the 2017 IEEE VTS Motor Vehicles Challenge,” *IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1–6, 2017.
- [70] N. Mebarki, T. Rekioua, Z. Mokrani, D. Rekioua, and S. Bacha, “PEM fuel cell/ battery storage system supplying electric vehicle,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 45, pp. 20993–21005, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.208.
- [71] J. E. Valdez-Resendiz, J. C. Rosas-Caro, J. C. Mayo-Maldonado, A. Claudio-Sanchez, O. Ruiz-Martinez, and V. M. Sanchez, “Improvement of ultracapacitors-energy usage in fuel cell based hybrid electric vehicle,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 26, pp. 13746–13756, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.201.
- [72] Q. Zhang, J. Han, G. Li, and Y. Liu, “An adaptive energy management strategy for fuel cell/battery/supercapacitor hybrid energy storage systems of electric vehicles,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 15, pp. 3410–3433, 2020, doi: 10.20964/2020.04.50.
- [73] Z. Amjadi, “Energy management of fuel cell/battery and ultra-capacitor hybrid energy storage system for electric vehicle,” *2020 IEEE Power Energy Soc. Innov. Smart Grid Technol. Conf. ISGT 2020*, pp. 4–8, 2020, doi: 10.1109/ISGT45199.2020.9087635.
- [74] T. C. Do *et al.*, “Energy management strategy of a PEM fuel cell excavator with a supercapacitor/battery hybrid power source,” *Energies*, vol. 12, no. 22, 2019, doi: 10.3390/en12224362.
- [75] H. Jiang, L. Xu, J. Li, Z. Hu, and M. Ouyang, “Energy management and component sizing for a fuel cell/battery/supercapacitor hybrid powertrain based on two-dimensional
-

-
- optimization algorithms,” *Energy*, vol. 177, pp. 386–396, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.04.110.
- [76] Y. Wang, Z. Sun, and Z. Chen, “Rule-based energy management strategy of a lithium-ion battery, supercapacitor and PEM fuel cell system,” *Energy Procedia*, vol. 158, no. 2018, pp. 2555–2560, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.003.
- [77] A. Fathy, H. Rezk, and A. M. Nassef, “Robust hydrogen-consumption-minimization strategy based salp swarm algorithm for energy management of fuel cell/supercapacitor/batteries in highly fluctuated load condition,” *Renew. Energy*, vol. 139, pp. 147–160, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.02.076.
- [78] Y. Wang, Z. Sun, and Z. Chen, “Energy management strategy for battery/supercapacitor/fuel cell hybrid source vehicles based on finite state machine,” *Appl. Energy*, vol. 254, no. December 2018, p. 113707, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113707.
- [79] Z. Fu, Z. Li, P. Si, and F. Tao, “A hierarchical energy management strategy for fuel cell/battery/supercapacitor hybrid electric vehicles,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 39, pp. 22146–22159, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.06.158.
- [80] M. Rasheed, B. Riar, and R. Zane, “Power Sharing Based Algorithm for Sizing Components in Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles,” *2019 IEEE 20th Work. Control Model. Power Electron. COMPEL 2019*, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1109/COMPEL.2019.8769628.
- [81] H. Marzougui, M. Amari, A. Kadri, F. Bacha, and J. Ghouili, “Energy management of fuel cell/battery/ultracapacitor in electrical hybrid vehicle,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 13, pp. 8857–8869, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.190.
- [82] J. E. Valdéz Reséndiz, “Manejo de Energía en el Sistema de Potencia de un Vehículo Eléctrico Híbrido Basado en Celdas de Combustible.,” Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2016.
- [83] F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, 1st. Academic Press, 2005.
- [84] R. Barbosa, B. Escobar, V. M. Sanchez, J. Hernandez, R. Acosta, and Y. Verde, “Sizing of a solar/hydrogen system for high altitude long endurance aircrafts,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 29, pp. 16637–16645, 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.152.
- [85] K. Ka-Sing Leung and H. Shu-Hun Chung, “Dynamic Hysteresis Band Control of the Buck Converter With Fast Transient Response,” *IEEE Trans. CIRCUITS Syst.*, vol. 52, no. 7, pp. 398–402, 2005.
- [86] F. Anritter, P. Maurer, and J. Reger, “Flatness based control of a buck-converter driven DC motor,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 4, no. PART 1, pp. 36–41, 2006.
- [87] H. Sira-Ramirez, C. A. Nunez, and N. Visairo, “Robust sigma-delta generalised proportional integral observer based control of a ‘buck’ converter with uncertain loads,” *Int. J. Control*, vol. 83, no. 8, pp. 1631–1640, 2010, doi: Pii 923453904rDoi 10.1080/00207179.2010.484467.
- [88] Q. He and Y. Zhao, “The design of controller of buck converter,” *ICCASM 2010 - 2010*
-

-
- Int. Conf. Comput. Appl. Syst. Model. Proc.*, vol. 15, no. ICCASM, pp. 1–5, 2010, doi: 10.1109/ICCASM.2010.5622609.
- [89] V. M. Nguyen and C. Q. Lee, “Tracking control of buck converter using sliding-mode with adaptive hysteresis,” in *Proceedings of PESC '95 - Power Electronics Specialist Conference*, 1995, vol. 2, pp. 1086–1093, doi: 10.1109/PESC.1995.474950.
- [90] M. Camara Bailo, H. Gualous, F. Gustin, A. Berthon, and B. Dakyo, “DC/DC Converter Design for Supercapacitor and Battery Power Management in Hybrid Vehicle Applications—Polynomial Control Strategy,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 2, pp. 587–97, 2010.
- [91] C. Olalla, R. Leyva, A. El, and I. Queinnec, “Robust LQR Control for PWM Converters: An LMI Approach,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 7, pp. 2548–58, 2009.
- [92] L. SW, “Demystifying Type II and Type III Compensators Using Op- Amp and OTA for DC/DC Converters,” 2014.
- [93] Z. Mokrani, D. Rekioua, N. Mebarki, T. Rekioua, and S. Bacha, “Proposed energy management strategy in electric vehicle for recovering power excess produced by fuel cells,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 30, pp. 19556–19575, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.106.
- [94] L. Jeongwoo and D. J. Nelson, “Rotating inertia impact on propulsion and regenerative braking for electric motor driven vehicles,” *2005 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC*, vol. 2005, pp. 308–314, 2005, doi: 10.1109/VPPC.2005.1554575.
- [95] “WLTP Facts.” <https://www.wltpfacts.eu/purpose-lab-tests-wltp/>.
- [96] Informal working group on Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP), “WLTP-DHC: WLTC cycles for validation 2, based on the following preliminary vehicle classification,” 2012. <http://www.unece.org/index.php?id=29541&type=111> (accessed Sep. 05, 2019).
- [97] G. Solberg, “The Magic of Tesla Roadster Regenerative Braking,” 2007. https://www.tesla.com/es_MX/blog/magic-tesla-roadster-regenerative-braking?redirect=no (accessed Dec. 16, 2019).
- [98] A. Salvadori, D. Grazioli, and M. G. D. Geers, “International Journal of Solids and Structures Governing equations for a two-scale analysis of Li-ion battery cells,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 59, pp. 90–109, 2015, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2015.01.014.
- [99] U. Cano and F. Loyola, “Conacy Report,” 2003.
- [100] T. Inl, “Battery Test Manual for Plug-In Hybrid Electric Vehicles,” 2010. doi: INL/EXT-07-12536.
- [101] IEC, “Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles – Part 1: Performance testing,” 2010.
- [102] H. Yun *et al.*, “Energy management for fuel cell hybrid vehicles based on a stiffness coefficient model,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 633–641, 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.10.135.

-
- [103] K. Ettahir, L. Boulon, and K. Agbossou, "Optimization-based energy management strategy for a fuel cell/battery hybrid power system," *Appl. Energy*, vol. 163, pp. 142–153, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.10.176.
- [104] L. (BloombergNEF) Goldie-Scot, "A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices," 2019. <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes.take.lithium-ion-battery-prices/> (accessed Sep. 10, 2019).
- [105] R. AndMarkets.com, "Global Supercapacitor Market 2018-2022: Increasing Investments in R&D for the Development of Hybrid Supercapacitors," 2018. <https://www.businesswire.com/news/home/20180618005984/en/Global-Supercapacitor-Market-2018-2022-Increasing-Investments-Development> (accessed Sep. 10, 2019).
- [106] A. M. Bassam, A. B. Phillips, S. R. Turnock, and P. A. Wilson, "Sizing optimization of a fuel cell/battery hybrid system for a domestic ferry using a whole ship system simulator," *2016 Int. Conf. Electr. Syst. Aircraft, Railw. Sh. Propuls. Road Veh. Int. Transp. Electrif. Conf. ESARS-ITEC 2016*, 2016, doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841333.
- [107] T. Fletcher, R. Thring, and M. Watkinson, "An Energy Management Strategy to concurrently optimise fuel consumption & PEM fuel cell lifetime in a hybrid vehicle," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 46, pp. 21503–21515, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.157.
- [108] L. Xu, C. D. Mueller, J. Li, M. Ouyang, and Z. Hu, "Multi-objective component sizing based on optimal energy management strategy of fuel cell electric vehicles," *Appl. Energy*, vol. 157, pp. 664–674, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.02.017.
- [109] F. Odeim, J. Roes, L. Wülbeck, and A. Heinzl, "Power management optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles with experimental validation," *J. Power Sources*, vol. 252, pp. 333–343, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.12.012.
- [110] C. Y. Li and G. P. Liu, "Optimal fuzzy power control and management of fuel cell/battery hybrid vehicles," *J. Power Sources*, vol. 192, no. 2, pp. 525–533, 2009, doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.03.007.
- [111] A. M. Bassam, A. B. Phillips, S. R. Turnock, and P. A. Wilson, "An improved energy management strategy for a hybrid fuel cell/battery passenger vessel," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 47, pp. 22453–22464, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.049.
- [112] X. Fu, Q. Zhang, J. Tang, and C. Wang, "Parameter matching optimization of a powertrain system of hybrid electric vehicles based on multi-objective optimization," *Electron.*, vol. 8, no. 8, pp. 7–10, 2019, doi: 10.3390/electronics8080875.
- [113] M. López-Pérez, A. Claudio-Sánchez, U. Cano-Castillo, and F. Loyola-Morales, "Hybrid electric power plant sizing strategy based on ab-initio fuel cell design for weight minimization," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 41, pp. 21738–21753, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.157.
- [114] W. L.X., *A Course in Fuzzy Systems and Control*. Prentice Hall, 1997.
- [115] J. Shing and R. Jang, *Neuro-Fuzzy and Soft computing*. Prentice Hall, 1997.
- [116] H. t. Nguyen and N. R. Prasad, *A First Course in Fuzzu and Neural Control*. CRC Press,

2003.

- [117] T. Azib, O. Bethoux, G. Remy, and C. Marchand, “Saturation Management of a Controlled Fuel-Cell / Ultracapacitor Hybrid Vehicle,” vol. 60, no. 9, pp. 4127–4138, 2011.
- [118] J. Solano Martínez, D. Hissel, M. C. Péra, and M. Amiet, “Practical control structure and energy management of a testbed hybrid electric vehicle,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 9, pp. 4139–4152, 2011, doi: 10.1109/TVT.2011.2169821.
- [119] B. Bendjedia, N. Rizoug, M. Boukhniher, F. Bouchafaa, and M. Benbouzid, “Influence of secondary source technologies and energy management strategies on Energy Storage System sizing for fuel cell electric vehicles,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 25, pp. 11614–11628, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.166.
- [120] M. Pourabdollah, B. Egardt, N. Murgovski, and A. Grauers, “Convex Optimization Methods for Powertrain Sizing of Electrified Vehicles by Using Different Levels of Modeling Details,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 3, pp. 1881–1893, 2018, doi: 10.1109/TVT.2017.2767201.
- [121] B. A. Nieto Arias, “Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,” Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2015.

A

Anexos

A.1 Estabilidad del convertidor buck

Para validar la estabilidad del convertidor buck con el compensador tipo II se procedió a la obtención de los márgenes de ganancia y de fase de la función de transferencia en lazo cerrado. Para ello, se utilizaron los valores nominales de los componentes del convertidor buck que se presentó en el trabajo de Valdez en [82], y los valores nominales del compensador tipo II, los cuales son los siguientes (ver Fig. 10):

$$\begin{aligned}R_1 &= 1500 \Omega \\R_2 &= 680 \Omega \\C_1 &= 47nF \\C_2 &= 10nF\end{aligned}\tag{6.1}$$

En la Fig. 92 se muestra el margen de fase y de ganancia del convertidor buck y su compensador tipo II con sus valores nominales. En esta figura se observa que se cumple el criterio de estabilidad, es decir, el compensador evita que se tenga una fase en lazo cerrado cercano a los 360° . Además, se tiene que el margen de ganancia es mayor a uno y que tiene una pendiente de -20dB/década en la curva de ganancia en el punto de cruce de $1.08\text{e}06 \text{ rad/s}$. Que en dicho punto de cruce se tiene un margen de fase de 61.3° , o que conlleva a una respuesta de carga transitoria bien amortiguada.

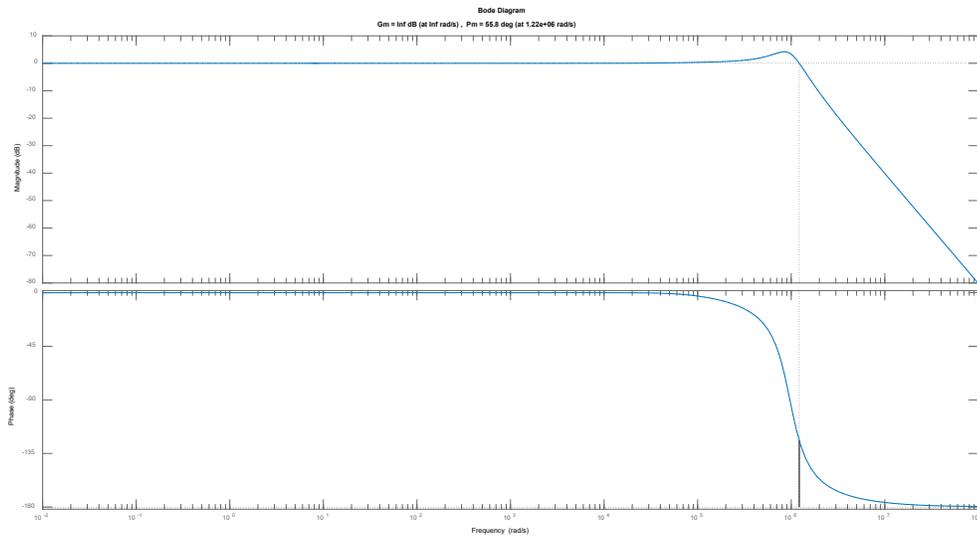


Fig. 92.- Diagrama de bode de la respuesta del convertidor buck con el compensador.

El análisis de la robustez del compensador para el convertidor buck se realizó mediante el análisis de los márgenes de fase y ganancia de los diagramas de bode con una variación desde el 50% del valor nominal del parámetro, incluyendo su valor nominal, y hasta el 150% del valor nominal de cada parámetro del compensador. En la Fig. 93 se muestra los márgenes de ganancias y de fase ante la variación del parámetro R1. Mientras que en la Fig. 94, se muestra para el parámetro R2, en la Fig. 95 para el compensador C1, y finalmente, en la Fig. 96 se muestra para la variación en el compensador C2.

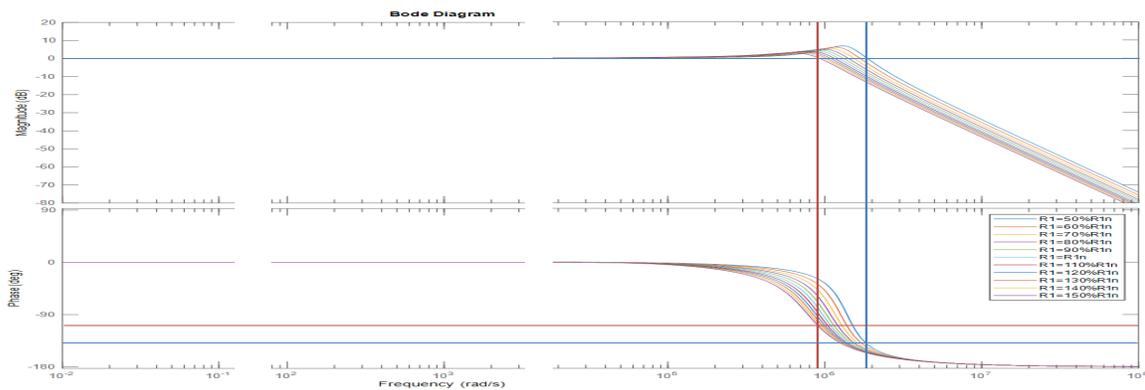


Fig. 93.- Márgenes de ganancia y de fase ante la variación del parámetro R1 del compensador.

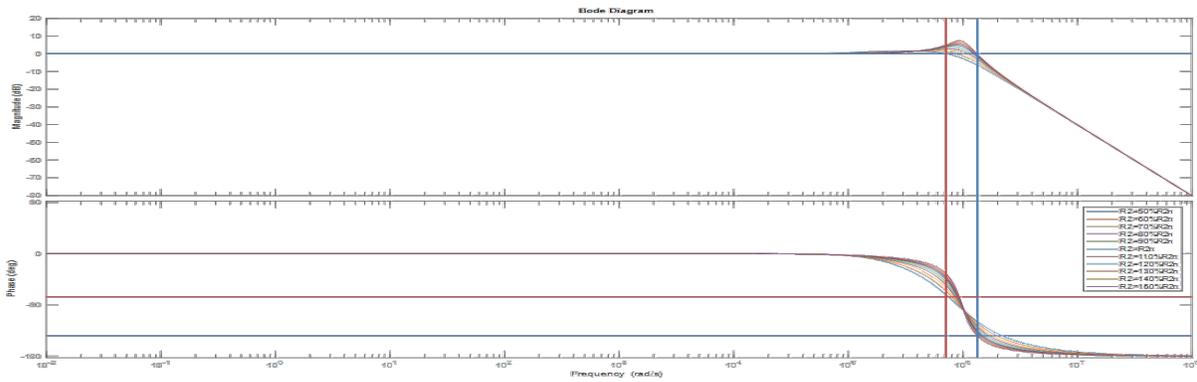


Fig. 94.- Márgenes de ganancia y de fase ante la variación del parámetro R2 del compensador.

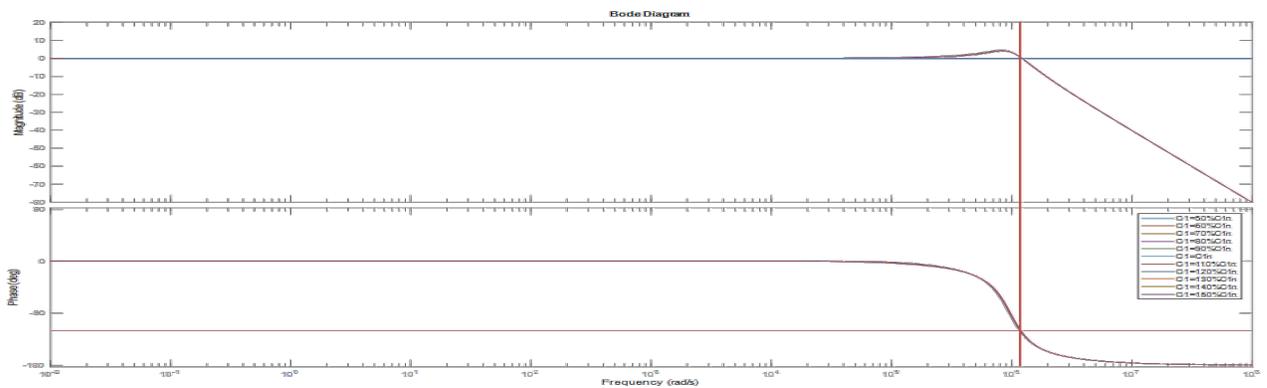


Fig. 95.- Márgenes de ganancia y de fase ante la variación del parámetro C1 del compensador.

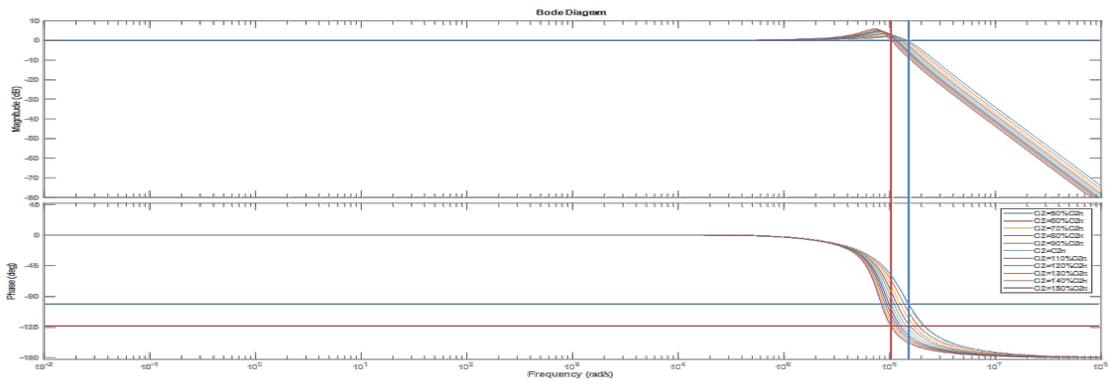


Fig. 96.- Márgenes de ganancia y de fase ante la variación del parámetro C2 del compensador

De las variaciones de los parámetros del compensador tipo II con el convertidor se tiene que en todos los casos se tiene margen de ganancia infinita y el margen de fase se encuentra en el rango de 35 a 105°, lo cual es un indicativo de su estabilidad.

En la Subsección A.2 se muestra el análisis de estabilidad para el convertidor boost.

A.2 Estabilidad del convertidor boost

Para validar la estabilidad del convertidor boost con el compensador tipo II se procedió a la obtención de los márgenes de ganancia y de fase de la función de transferencia en lazo cerrado. Para ello, se utilizaron los valores nominales de los componentes del convertidor boost que se presentó en el trabajo de Valdez en [82], y los valores nominales del compensador (6.1) y del parámetro $D = [0, 0.5]$. En la Fig. 97 se muestra los márgenes de fase y de ganancia ante variaciones del parámetro R1 del compensador. Esta variación corresponde a un 50% del valor nominal de R1, incluyendo el valor nominal, hasta el 150% del valor nominal de este parámetro. En la gráfica de la izquierda corresponde a un valor del parámetro $D=0$. Mientras que la gráfica de la derecha corresponde a un valor de $D=0.5$.

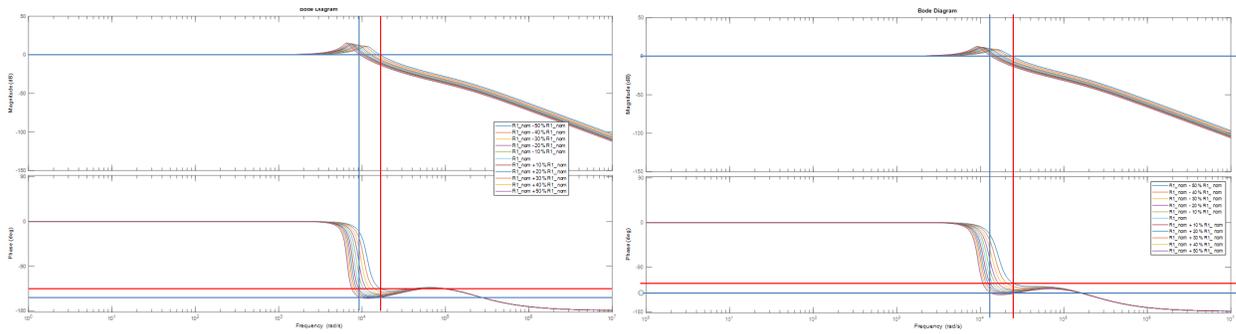


Fig. 97.- Márgenes de fase y de ganancia ante variaciones del parámetro R1 del compensador.

En la Fig. 98 se muestra los diagramas de bode para la variación del parámetro R2 del compensador. En la gráfica de la izquierda se muestran los márgenes de fase y de ganancia con un valor del parámetro $D=0$. Mientras que, en la gráfica de la derecha se muestran los márgenes de fase y de ganancia con un valor del parámetro $D=0.5$.

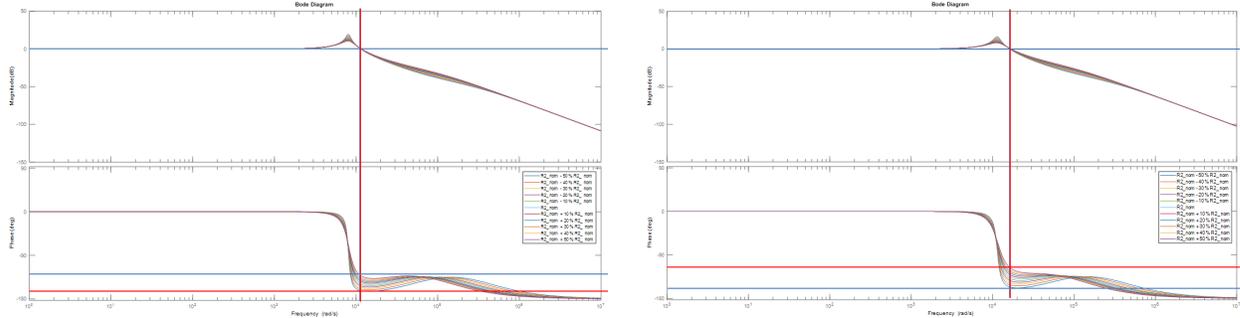


Fig. 98. Márgenes de fase y de ganancia ante variaciones del parámetro R2 del compensador.

En la Fig. 99 se muestra los diagramas de bode para la variación del parámetro C1 del compensador. En la gráfica de la izquierda se muestran los márgenes de fase y de ganancia con un valor del parámetro $D=0$. Mientras que, en la gráfica de la derecha se muestran los márgenes de fase y de ganancia con un valor del parámetro $D=0.5$.

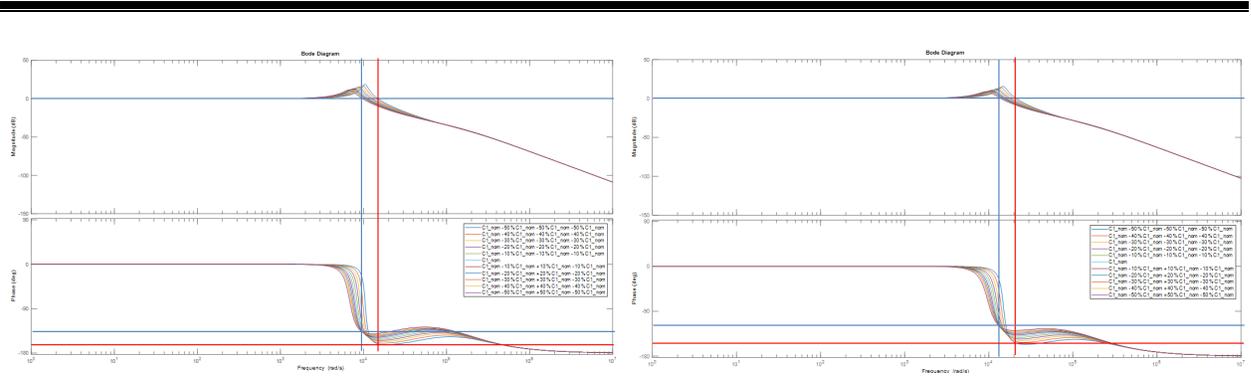


Fig. 99.- Márgenes de fase y de ganancia ante variaciones del parámetro C1 del compensador.

En la Fig. 100 se muestra los diagramas de bode para la variación del parámetro C2 del compensador. En la gráfica de la izquierda se muestran los márgenes de fase y de ganancia con un valor del parámetro D=0. Mientras que, en la gráfica de la derecha se muestran los márgenes de fase y de ganancia con un valor del parámetro D=0.5

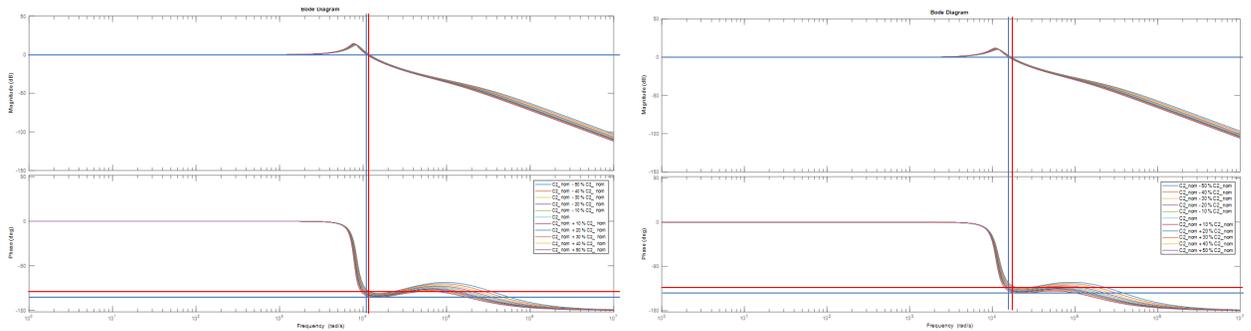


Fig. 100.- Márgenes de fase y de ganancia ante variaciones del parámetro C2 del compensador

De las variaciones de los parámetros del compensador tipo II y del parámetro D, con el convertidor, se tiene que en todos los casos se tiene margen de ganancia infinita y el margen de fase se encuentra en el rango de 30 a 55°, lo cual es un indicativo de su estabilidad.

A.3 Energía almacenada en los componentes rotacionales del EV

En esta subsección se describe el procedimiento del cálculo de la energía almacenada en los componentes rotacionales en un EV.

La fuerza que se necesita para mover un vehículo hacia adelante F_x tiene que vencer las fuerzas siguientes: la resistencia de rodamiento R_x , el arrastre aerodinámico F_d , la fuerza w para vencer la componente debido al peso del vehículo que actuado sobre una elevación θ del camino, y todas las fuerzas inerciales que incluyen la fuerza inercial traslacional y la fuerza inercial rotacional $m_{eff} \cdot a$. Por lo tanto, la fuerza requerida para la tracción F_x está dado por la suma de todas esas fuerzas [94]:

$$F_x = m_{eff} \cdot a + R_x + F_d + w \quad (6.2)$$

$$Rx = C_R \cdot m \cdot g \cdot \cos(\theta) \quad (6.3)$$

$$Fd = \frac{1}{2} \rho \cdot A_f \cdot C_a \cdot v^2 \quad (6.4)$$

$$w = m \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (6.5)$$

$$m_{eff} = m_v + 4 \frac{I_{w/t}}{r^2} + \frac{I_{dl}}{r^2} + \frac{I_{M/G} N_t^2 N_f^2}{r^2} \quad (6.6)$$

Donde m_{eff} representa la masa efectiva del vehículo de prueba y a es su aceleración en la ecuación (6.2). En (6.3), C_R es el coeficiente de resistencia de rodamiento, g es la aceleración de la gravedad, y θ es el ángulo de inclinación del camino. En (6.4), ρ es la densidad del aire, A_f es el área frontal del vehículo, C_a es el coeficiente de arrastre aerodinámico, y v es la velocidad del vehículo. Finalmente, m_v es la masa del vehículo de prueba, $I_{w/t}$ es la inercia rotacional del ensamble de la llanta, I_{dl} es la inercia rotacional de la transmisión, $I_{M/G}$ es la inercia rotacional del motor/generador (M/G), N_t es la relación de transmisión, N_f es la relación de transmisión final, y r es el radio de la llanta.

Entonces, es posible obtener la potencia mecánica que se requiere en las llantas P_M , y la potencia eléctrica requerida en el tren de potencia P_E , y la energía requerida por toda la planta de potencia eléctrica, de la forma siguiente:

$$P_M = Fx \cdot v$$

$$P_E = \frac{P_M}{\eta_d \eta_{M/G} \eta_c} \quad (6.7)$$

$$E = \int_0^t P_E \cdot dt \quad (6.8)$$

Donde $\eta_d, \eta_{M/G}$ y η_c son las eficiencias de la transmisión, del motor/generador, y de su driver, respectivamente.

Sin embargo, la potencia almacenada en inercia rotacional se puede estimar de (6.2) a (6.6):

$$\begin{aligned}
 P_{w/t,I} &= F_{w/t,I} \cdot v = \left(4 \frac{I_{w/t}}{r^2} a \right) v \\
 P_{dl,I} &= F_{dl,I} \cdot v = \left(\frac{I_{dl} N_t^2 N_f^2}{r^2} a \right) v \\
 P_{M/G,I} &= F_{M/G,I} \cdot v = \left(\frac{I_{M/G} N_t^2 N_f^2}{r^2} a \right) v
 \end{aligned}
 \tag{6.9}$$

La ecuación (6.9) representa la potencia inercial rotacional de las llantas, la transmisión y el del motor/generador, solamente en la propulsión. La energía inercial rotacional se puede obtener al integrar la potencia con respecto al tiempo.

El caso de estudio de este trabajo considera un vehículo ligero urbano basado en celdas de combustible con parámetros mecánicos que se resumen en la Tabla 27. El caso de estudio es un vehículo utilitario que se utiliza para entregas en el centro de una ciudad. La masa gruesa del vehículo es de un 62% de la masa definida en la Tabla 27. Por otro lado, un 8% de la masa del vehículo representa el tanque de hidrógeno, electrónica de potencia, motor y su driver. Y, un 30% es para la carga o para seis pasajeros de 75 kg cada uno. También, en este caso se utiliza el ciclo de manejo WLTC CLASS I en orden de reproducir un ciclo de manejo estándar de un vehículo ligero durante un uso normal.

Tabla 27.- Datos del vehículo de prueba

Parámetro	Valor	Unidad	Parámetro	Valor	Unidad
Masa del vehículo	1500	kg.	Inercia rotacional de la llanta [94]	1.223	kg m ²
Coefficiente de rodamiento	0.035	-	Inercia rotacional de la transmisión [121]	0.02	kg m ²
Coefficiente de arrastre	0.38	-	Inercia rotacional del M/G [121]	0.04	kg m ²
Área frontal	2.12	m ²	Relación de transmisión	4	-
Radio de la llanta	0.359	m	Relación final de transmisión	3.265	-
Eficiencia de la transmisión	98	%	Eficiencia de driver	93	%
Eficiencia del motor/generador	94	%			

Los resultados son los siguientes:

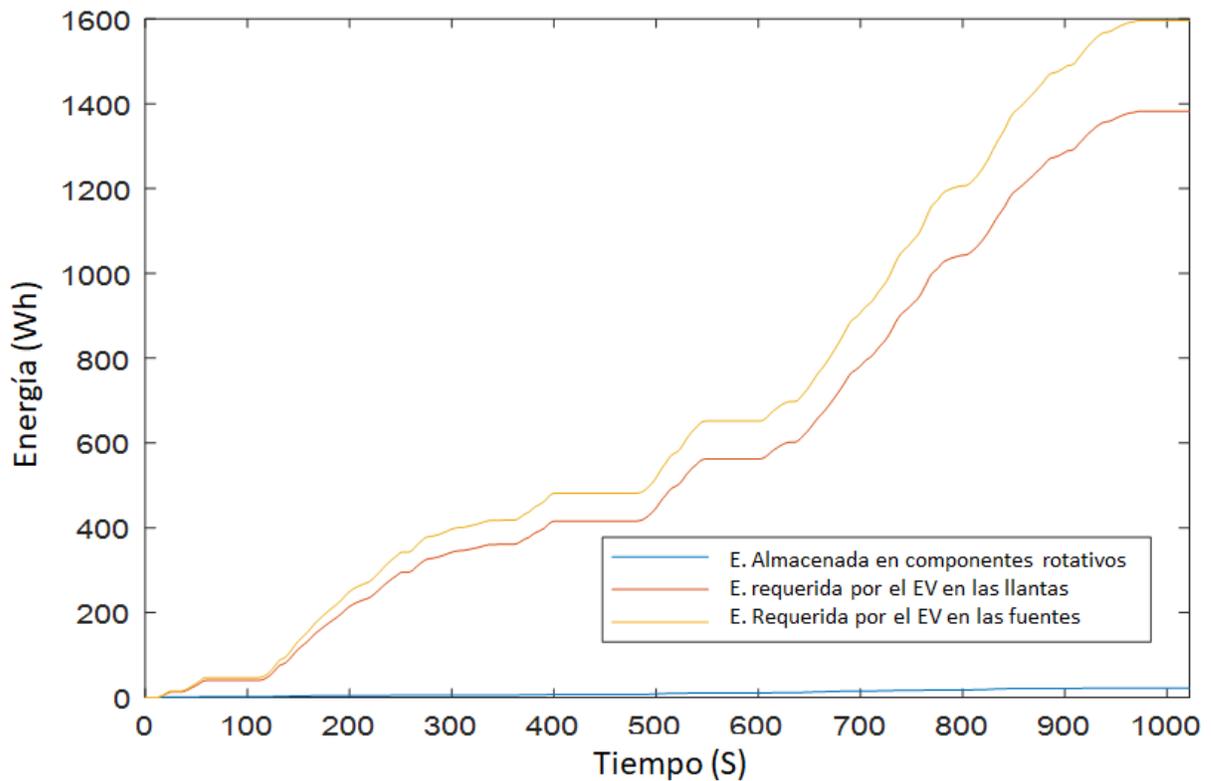


Fig. 101.- Resultados de la energía requerida considerando la energía almacenada en los componentes rotativos.

La energía total almacenada en los componentes rotativos es de 21.71 Wh.

La energía total requerida por el vehículo eléctrico en las llantas: 1382 Wh.

La energía total requerida por el vehículo eléctrico en las fuentes: 1596 Wh.

El porcentaje de energía en los componentes rotativos sin incluir la eficiencia de la transmisión, el motor, y su driver: **1.57%**.

El porcentaje de energía en los componentes rotativos incluyendo las eficiencias de los componentes electromecánicos del vehículo eléctrico: **1.36%**.

A.4 Sistema de inferencia difusa

Un sistema de inferencia difuso es un marco computacional basado en conceptos de teoría de conjuntos difusos, reglas difusas del tipo condición-consecuencia, y razonamiento difuso. Este tipo de sistemas se utilizan en diversas aplicaciones y en una variedad de campos que incluyen, y no limitan, control automático, robótica, reconocimiento de patrones, etc.

La estructura básica de un sistema de inferencia difuso consiste de tres componentes conceptuales:

-
1. Un conjunto de reglas, que contiene una colección de reglas difusa
 2. Una base de datos, que define las funciones de pertenencias
 3. Un mecanismo de razonamiento, que efectúa del proceso de inferencia sobre las reglas y hechos para derivar una salida

Los sistemas de inferencia difusos básicos pueden tomar entradas difusas o exactas, las cuales pueden ser vistas como *singletons* difusos (un sólo valor). Pero a la salida casi siempre produce conjuntos difusos. En algunas ocasiones es necesario tener a la salida valores exactos, en especial cuando el sistema de inferencia se utiliza como controlador. Por lo tanto, es necesario un método de defusificación para extraer un valor exacto que represente de la mejor manera al conjunto difuso de salida.

Existen diferentes tipos de sistemas de inferencia difusos. En este trabajo se utiliza el tipo Mamdani, cuyo procedimiento es el siguiente.

1. Definición las *variables lingüísticas* de entrada y sus rangos numéricos.
2. Definición de las *variables lingüísticas* de salida y sus rangos numéricos.
3. Definición de las *funciones de pertenencias* para las variables de entrada y salida.
4. Construcción de la base de datos reglas que representan la estrategia de control.
5. *Fusificación* de los valores de entrada.
6. Ejecución del sistema de inferencia para determinar la fuerza de las reglas activadas.
7. *Defusificación*, usando el *centroide* para determinar la acción a ser ejecutada.

Variable lingüística

Una variable lingüística se caracteriza por cinco términos: $x, T(x), X, G, M$. En donde x es el nombre de la variable, $T(x)$ es el conjunto de términos de x (conjunto de valores o términos lingüísticos), X es el universo, G es una regla sintáctica que genera los términos en $T(x)$, y M es una regla semántica, la cual está asociada a cada valor lingüístico A , donde $M(A)$ es un conjunto difuso en X .

Función de pertenencia

Existen diferentes tipos de *funciones de pertenencia*, las de mayor uso son: triangular, trapezoidal y gaussiana. En el sistema difuso que se implementó en este trabajo se utilizaron funciones de pertenencia de tipo triangular y trapezoidal.

Una función de pertenencia triangular se especifica por medio de tres parámetros $\{a, b, c\}$, como:

$$\text{Triangular}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & c \leq x \end{cases} \quad (6.10)$$

Mientras que una función de pertenencia trapezoidal se especifica por medio de cuatro parámetros $\{a, b, c, d\}$ como:

$$(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & d \leq x \end{cases} \quad (6.11)$$

Razonamiento difuso

El razonamiento difuso se aplica al proceso de inferencia para evaluar cada una de las reglas y hechos para derivar en una salida o conclusión, la cual se puede aplicar para una regla con un antecedente, o con múltiples antecedentes, como se muestra a continuación.

Una regla con un antecedente. Sea A, A' y B conjuntos difusos de X, X y Y , respectivamente. Asúmase que si la implicación difusa siguiente: $A \rightarrow B$ (si x es A entonces y es igual a B) se expresa como una relación R en $X \times Y$. Entonces el conjunto difuso B inducido “ x es A' ” y la regla difusa “si x es A , entonces y es B ” se define como:

$$\mu_{B'}(y) = \max_x \min[\mu_{A'}(x), \mu_R(x, y)] = \vee_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x, y)] \quad (6.12)$$

O equivalente:

$$B' = A' \circ R = A' \circ (A \rightarrow B) \quad (6.13)$$

La definición para un sistema de inferencia de una sola regla con un solo antecedente se define en la ecuación siguiente:

$$\mu_{B'}(y) = [\vee_x (\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x))] \wedge \mu_B(y) = \omega \wedge \mu_B(y) \quad (6.14)$$

Donde ω es el grado de coincidencia, calculado como el máximo de $\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x)$ (el área sombreada del antecedente en la Fig. 102. Como se puede apreciar la función de pertenencia

resultante B' es igual a la función de pertenencia B cortada por ω . Intuitivamente ω representa el grado de creencia para la parte del antecedente de la regla, este grado de creencia se ve propagado hasta la función de pertenencia de salida.

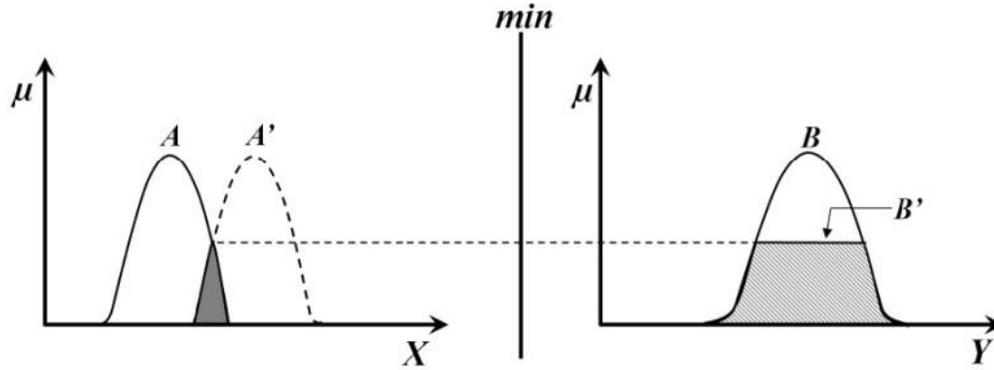


Fig. 102.- Razonamiento difuso para un antecedente.

Una regla con múltiples antecedentes. Esta regla es de la forma: “si x es A y y es B , entonces z es C ”. Este enunciado se puede expresar como $A \times B \rightarrow C$.

Lo anterior se puede transformar en una relación de tres elementos como sigue:

$$R_m(A, B, C) = (A \times B) \times C = \int \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \wedge \mu_C(z) / (x, y, z) \quad (6.15)$$

El conjunto C' resultante se puede expresar como:

$$\begin{aligned} C' &= (A' \times B') \circ (A \times B \rightarrow C) \\ \mu_{C'}(z) &= \vee_{x,y} [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y)] \wedge [\mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \wedge \mu_C(z)] \\ &= \vee_{x,y} \{ [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y) \wedge \mu_A(x) \wedge \mu_B(y)] \} \wedge \mu_C(z) \\ &= \underbrace{\left\{ \vee_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x)] \right\}}_{\omega_1} \wedge \underbrace{\left\{ \vee_y [\mu_{B'}(y) \wedge \mu_B(y)] \right\}}_{\omega_2} \wedge \mu_C(z) \\ &= \underbrace{(\omega_1 \wedge \omega_2)}_{\text{fuerza}} \wedge \mu_C(z) \end{aligned} \quad (6.16)$$

Donde ω_1 y ω_2 son las máximas de las funciones de pertenencia $A \cap A'$ y $B \cap B'$, respectivamente. En general, ω_1 denota el grado de compatibilidad entre A y A' , similarmente para ω_2 . Ya que el antecedente está compuesto del conectivo “y”, $\omega_1 \wedge \omega_2$ se le llama disparo o grado de cumplimiento de la regla difusa, que representa el grado en que el antecedente se cumple. Una representación gráfica de esto se muestra en la Fig. 103, en donde la función de pertenencia de la resultante C' es igual a la función de pertenencia C cortada por la “fuerza” $\omega = \omega_1 \wedge \omega_2$.

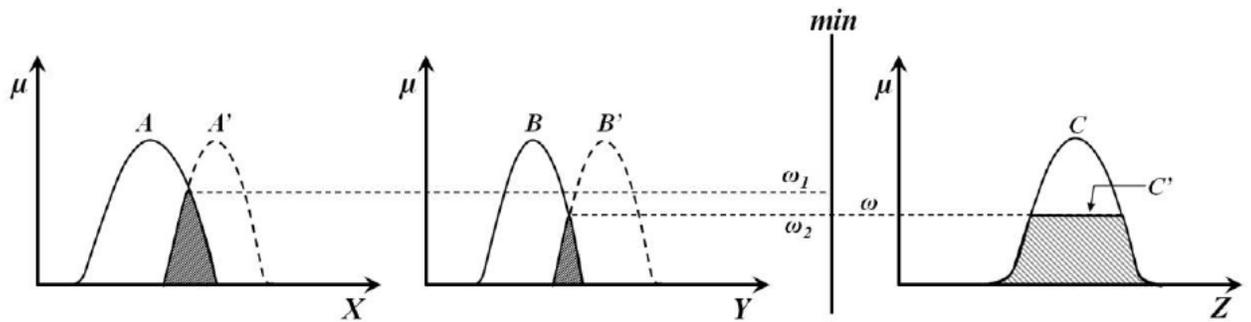


Fig. 103.- Razonamiento difuso para múltiples antecedentes.

Múltiples reglas con múltiples antecedentes. La interpretación de reglas múltiples se toma usualmente como la unión de relaciones difusas. Por ejemplo, considérese las premisas siguientes:

Premisa 1 (hecho): x es A' y y es B'

Premisa 2 (regla 1): Si x es A_1 y y es B_1 entonces z es C_1

Premisa 3 (regla 2): Si x es A_2 y y es B_2 entonces z es C_2

Conclusión: z es C'

Para verificar este procedimiento de inferencia, considere:

$$\begin{aligned} R_1 &= A_1 \times B_1 \rightarrow C_1 \\ R_2 &= A_2 \times B_2 \rightarrow C_2 \end{aligned} \quad (6.17)$$

Por lo tanto, el conjunto resultante se puede expresar como sigue:

$$\begin{aligned} C' &= (A' \times B') \circ (R_1 \cup R_2) \\ &= [(A' \times B') \circ R_1] \cup [(A' \times B') \circ R_2] \\ &= C'_1 \cup C'_2 \end{aligned} \quad (6.18)$$

En donde C'_1 es C'_2 son los conjuntos difusos inferidos por las reglas 1 y 2, respectivamente. La Fig. 104 muestra de forma gráfica la operación del razonamiento difuso para varias reglas con múltiples antecedentes.

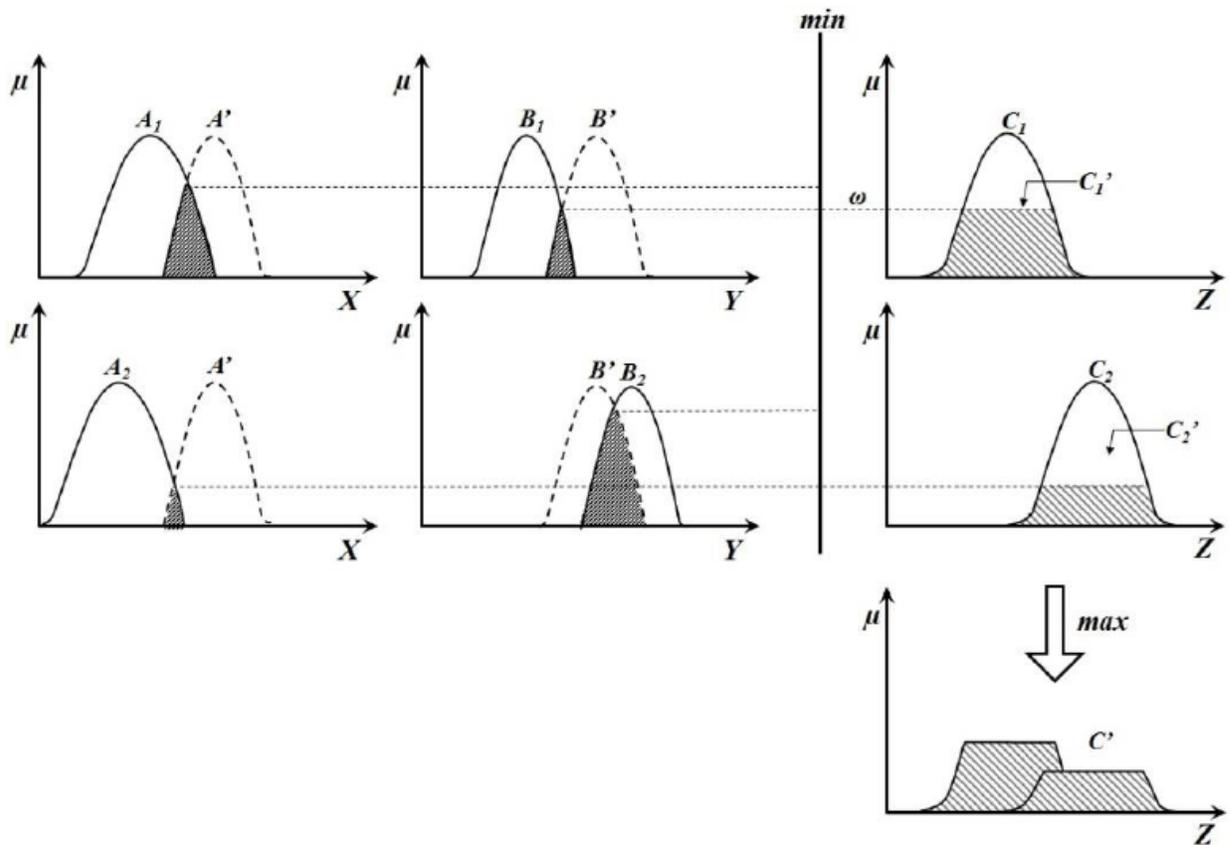


Fig. 104.- Razonamiento difuso para múltiples reglas con múltiples antecedentes.

Defusificación

El proceso de defusificación consiste en extraer un valor que representa a todo un conjunto difuso. Existen varios métodos de defusificación, en este caso se utilizará el método de centroide. La ecuación para el cálculo del centroide se muestra en la ecuación siguiente:

$$Centroide_z = \frac{\int \mu_A(z) z dz}{\int \mu_A(z) dz} \quad (6.19)$$

Donde μ_A es la función de pertenencia de salida. El método del centroide es el más utilizado, debido a su capacidad de calcular el valor representativo de una función de pertenencia.

A.5 Análisis de la eficiencia de conversión del hidrógeno en el sobredimensionamiento de las celdas de combustible

Para la estimación del sobredimensionamiento (SD) de las celdas de combustible, se realizó el cálculo correspondiente de su potencia, peso y eficiencia en conversión del combustible, así como la diferencia de éste respecto al inicial, y el porcentaje de variación de la misma. Cuyo resultado se resume en la Tabla 28 y considerando como valores iniciales los siguientes: potencia inicial de 6.7 kW, peso inicial de 38.9 kg y eficiencia inicial 31.9%.

Tabla 28.- Estimación de los parámetros de potencia, peso y eficiencia de la celda ante la variación del SD de la FC.

<i>% SD</i>	<i>Potencia de FC SD</i>	<i>Peso de FC SD</i>	<i>Eficiencia (η)</i>	<i>delta η</i>	<i>% de variación de η</i>
2	6859.14524	39.6570924	34.416396	2.48032526	100
4	6993.63829	40.3787426	35.4976175	3.6314594	31.6989401
6	7128.13133	41.0997874	36.3911207	4.45504997	18.486674
8	7262.62437	41.8195989	37.1175049	5.18143425	14.018981
10	7397.11742	42.5394104	37.7883132	5.85224253	11.4624143
12	7531.61046	43.2592218	38.3551501	6.41907943	8.8305013
14	7666.10351	43.978301	38.922714	7.05655592	9.03381905
16	7800.59655	44.6964005	39.4403248	7.50425409	5.96592497
18	7935.08959	45.4144999	39.9082298	7.97215908	5.86923802
20	8069.58264	46.1325994	40.3262698	8.46011171	5.76768539
22	8204.07568	46.8500807	40.7467262	8.81065546	3.97863425
24	8338.56873	47.5665823	41.1169201	9.18084939	4.03224051
26	8473.06177	48.2830839	41.4895361	9.55346543	3.90032332
28	8607.55481	48.9995855	41.8648462	9.92877553	3.78002402
30	8742.04786	49.7157783	42.1888958	10.2528251	3.16058796
32	8876.5409	50.4307851	42.5153098	10.5792391	3.08542071
34	9011.03395	51.1457919	42.8442751	10.9082044	3.01576001
36	9145.52699	51.8607988	43.1205014	11.1844307	2.4697399
38	9280.02003	52.5758056	43.3987509	11.4626802	2.42743829
40	9414.51308	53.2895694	43.6791451	11.7430744	2.38774069
42	9549.00612	54.0031748	43.9618108	12.0257401	2.35050545
44	9683.49917	54.7167803	44.2468807	12.31081	2.31560677
46	9817.99221	55.4303858	44.4767612	12.5406905	1.83307656
48	9952.48525	56.1434276	44.7083441	12.7722734	1.81316952
50	10086.9783	56.8557167	44.9417076	13.0056369	1.79432561