



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**  
**DE LINARES**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA**  
**ELÉCTRICA**

**TESIS DOCTORAL**

**COMPARACIÓN DE ESQUEMAS DE  
CONTROL APLICADOS A UN SISTEMA  
HÍBRIDO INTEGRANDO CONVERTIDORES  
CORRIENTE CONTINUA/CORRIENTE  
CONTINUA**

**PRESENTADA POR:  
JUAN PÉREZ TORREGLOSA**

**DIRIGIDA POR:  
DR. D. FRANCISCO JURADO MELGUIZO  
DR. D. LUIS M. FERNÁNDEZ RAMÍREZ**

**JAÉN, 10 DE DICIEMBRE DE 2012**

**ISBN 978-84-8439-724-3**

**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**TESIS DOCTORAL**

**Comparación de esquemas de control aplicados a un sistema  
híbrido integrando convertidores corriente continua/  
corriente continua**

**Juan Pérez Torreglosa**

**Directores: Dr. Francisco Jurado Melguizo**

**Dr. Luis M. Fernández Ramírez**

**Linares, diciembre 2012**



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**TESIS DOCTORAL**

**Comparación de esquemas de control aplicados a  
un sistema híbrido integrando convertidores  
corriente continua/ corriente continua**

**Juan Pérez Torreglosa**

**Los Directores de la Tesis**

**Fdo. Dr. Francisco Jurado Melguizo**  
*Catedrático de Universidad*

**Fdo. Dr. Luis M. Fernández Ramírez**  
*Profesor Titular de Universidad*



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**TESIS DOCTORAL**

**Comparación de esquemas de control aplicados a un sistema híbrido  
integrando convertidores corriente continua/ corriente continua**

**Juan Pérez Torreglosa**

El acto de defensa y lectura de Tesis se celebra el día de de 2012 en la Universidad de Jaén, ante el siguiente Tribunal evaluador quién decide otorgar la calificación de:

.....

**El Presidente**

**La Secretaria**

**El vocal**



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**TESIS DOCTORAL**

**Comparación de esquemas de control aplicados a un sistema  
híbrido integrando convertidores corriente continua/  
corriente continua**

**Juan Pérez Torreglosa**

**Directores de Tesis:**

**Francisco Jurado Melguizo**

Catedrático de Universidad (Universidad de Jaén)

**Luis M. Fernández Ramírez**

Profesor Titular de Universidad (Universidad de Cádiz)

**TRIBUNAL EVALUADOR**

**Presidente:**

**Secretaria:**

**Vocal:**

**Suplente:**

**Suplente:**

**Linares, diciembre 2012**





## ***Agradecimientos***

*Me gustaría comenzar dando las gracias a mis directores de Tesis, Francisco Jurado Melguizo y Luis Fernández Ramírez por sus consejos, dedicación y sabiduría compartida. Además me gustaría citar a mi compañero y amigo de investigaciones, Pablo García Triviño, al que considero tercer director de Tesis.*

*A parte quiero recordar en estas líneas a todos los compañeros de la sala de investigadores (para nosotros conocida como “Mordor”), tanto a los que ya se fueron como a los pocos que vamos quedando. Han sido muchos cafés compartidos, alguna noche de trabajo (con sustos incluidos) y algún que otro “broken-viernes”.*

*A mis amigos, en especial a los que pasaron tantas horas conmigo durante estos años. Gracias por hacerme más llevadero el camino.*

*Canija, gracias por los ánimos en el último tramo...*

*Finalmente quiero agradecer a mi familia el apoyo recibido. Son ellos los que han realmente han tenido que aguantar mis frustraciones y a los que quiero dedicar el éxito que para mi supone haber realizado esta Tesis.*

*Gracias a todos.*



## RESUMEN

La transición hacia fuentes de energía sostenibles es uno de los mayores retos a los que se enfrenta la humanidad en el siglo XXI. Año a año, la demanda de energía aumenta junto con las emisiones de gases efecto invernadero, la contaminación del aire en numerosas ciudades en todo el mundo y el agotamiento gradual de los combustibles fósiles. Las fuentes de energía futuras deben reducir los efectos del cambio climático, evitando emisiones dañinas y, al mismo tiempo, ayudando a muchos países a reducir su actual dependencia de combustibles fósiles.

Los sistemas híbridos – compuestos por pilas de combustible y otras fuentes de energía eléctrica- son necesarios para una transición hacia un transporte sostenible. La cuestión, sin embargo, es cómo se producirá el cambio a partir de la tecnología actual. Hoy en día, el transporte público es el sector del transporte más adecuado para introducir las pilas de combustible. Existen multitud de ventajas que resultarían de esto: el funcionamiento de este tipo de vehículos a baja carga da lugar a altos valores de rendimiento y bajos consumos de combustibles (en especial en tráfico lento o congestionado); el tamaño de los vehículos permite una fácil colocación de los tanques de hidrógeno; emisiones no contaminantes; y infraestructura requerida limitada (este tipo de transporte hace la misma ruta una y otra vez por lo que sólo se necesitarían un número específico de puntos de repostaje dependiendo de la longitud de las rutas).

El principal objetivo de esta tesis es evaluar la posibilidad de suministrar la energía demandada por un tranvía usando un sistema híbrido de propulsión basado en pila de combustible como fuente principal de energía y, como fuentes auxiliares y de almacenamiento, baterías y supercondensadores.

Para la operación en paralelo de las diferentes fuentes de energía del sistema híbrido propuesto, se necesita un convertidor de cc/cc para cada fuente de energía. Estos convertidores proporcionan capacidad de controlar la potencia de las fuentes y regulación de la tensión. En esta tesis, diferentes esquemas de control se han propuesto para generar las señales apropiadas de conmutación para los convertidores cc/cc.

El sistema híbrido propuesto permitirá al tranvía funcionar de manera autónoma, sin necesidad de tener que conectarse a la red mediante el uso de catenarias. Por tanto, se evita el uso de dichas líneas de potencia en centros históricos de ciudades y su impacto visual.



# ABSTRACT

The transition to a sustainable energy supply is one of the major challenges that humans will face during the twenty-first century. Year by year, the world energy demand increases together with the greenhouse gas emissions, the air pollution in several cities around the world and the gradual reduction of the fossil fuel reserves. Future energy sources should reduce the effects of the climatic change, not producing harmful emissions, and at the same time, helping several countries to reduce their current dependence on fossil fuels.

Hybrid systems- composed by fuel cells, hydrogen technology, batteries, and electric propulsion systems- are needed for a transition to sustainable road transport. The question, however, is how the change from the current technology will take place. Electricity and hydrogen as energy carriers for transportation will require a completely different supply and distribution infrastructure compared to oil. Due to that, nowadays public transport is the most suitable transportation sector to introduce fuel cell vehicles. Several advantages result from it: the operation of this kind of vehicles at low load results in high efficiency and low fuel consumption (particularly in congested or slower moving traffic); the size of the vehicles allows an easy placement of the hydrogen tanks; clean emissions; and the limited infrastructure required (this kind of transport ride the same route so that only a specific number of refueling points are needed depending on the route length).

The main objective of this thesis is to evaluate the possibility of supplying the energy demanded by a tramway using a hybrid system which is based on fuel cell (FC) as the primary energy source and batteries and supercapacitors (SC) as auxiliary energy sources and storage systems.

For the parallel operation of different power sources in the proposed hybrid system, a dc/dc converter for each source may be utilized. These dc/dc converters allow power tracking and voltage regulation. In this thesis, different control schemes are employed to generate appropriate switching signals to the dc/dc converters.

The proposed hybrid system will allow the tramway to work in an autonomous way, without having to be connected to the grid using catenaries. Thus, the use of air power lines in historic urban centers and the visual impact caused by them is eliminated.



**ÍNDICE:**

Lista de símbolos.....	v
Lista de figuras .....	xvii
Lista de tablas.....	xxiii
1. INTRODUCTION, OBJECTIVES AND STRUCTURE OF THE THESIS .....	1
<b>1.1. Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objectives of the thesis .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Thesis Structure .....</b>	<b>3</b>
2. ANTECEDENTES.....	7
<b>2.1. Introducción .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2. Las pilas de combustible en el transporte urbano .....</b>	<b>7</b>
<b>2.3. Topologías para vehículos propulsados por PEM-FC.....</b>	<b>16</b>
3. DESCRIPCIÓN DEL TRANVÍA Y DEL SISTEMA HÍBRIDO DE PROPULSIÓN .....	21
<b>3.1. Introducción. ....</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Descripción del tranvía objeto de estudio.....</b>	<b>22</b>
<b>3.3. Dimensionamiento del sistema híbrido .....</b>	<b>24</b>
<b>3.4. Configuración híbrida del tranvía.....</b>	<b>27</b>
4. FUENTES DE ENERGÍA DEL SISTEMA HÍBRIDO DEL TRANVÍA....	31
<b>4.1. Introducción .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2. Modelo de pila de combustible.....</b>	<b>32</b>
4.2.1. <i>Introducción .....</i>	32
4.2.2. <i>Tipos de pila de combustible y sus aplicaciones.....</i>	33
4.2.3. <i>Principales elementos de una PEM-FC .....</i>	36
4.2.4. <i>Estado del arte de los distintos modelos de PEM-FC.....</i>	37
4.2.5. <i>Modelo de pila de combustible.....</i>	39



4.2.5.1. Descripción del modelo utilizado.....	40
<b>4.3. Modelo de batería .....</b>	<b>52</b>
4.3.1. <i>Introducción</i> .....	52
4.3.2. <i>Tipos de baterías</i> .....	55
4.3.2.1. <b>Baterías de plomo ácido.....</b>	<b>55</b>
4.3.2.2. <b>Baterías basadas en níquel .....</b>	<b>56</b>
4.3.2.3. <b>Baterías basadas en litio .....</b>	<b>57</b>
4.3.3. <i>Elección del tipo de batería</i> .....	57
4.3.4. <i>Estado del arte de los modelos de batería</i> .....	59
4.3.4.1. <b>Modelo de batería .....</b>	<b>61</b>
<b>4.4. Modelo de supercondensador .....</b>	<b>67</b>
4.4.1. <i>Introducción</i> .....	67
4.4.2. <i>Características de los supercondensadores</i> .....	67
4.4.3. <i>Funcionamiento de un supercondensador</i> .....	70
4.4.4. <i>Estado del arte de los modelos de supercondensador</i> .....	74
4.4.5. <i>Modelo del supercondensador</i> .....	75
<b>5. OTROS COMPONENTES DEL SISTEMA HÍBRIDO .....</b>	<b>77</b>
<b>5.1. Introducción .....</b>	<b>77</b>
<b>5.2. Convertidores de tensión de CC/CC .....</b>	<b>78</b>
5.2.1. <i>Convertidor elevador de la pila de combustible</i> .....	84
5.2.1.1. <b>Introducción .....</b>	<b>84</b>
5.2.1.2. <b>Principio de funcionamiento .....</b>	<b>86</b>
5.2.1.3. <b>Funciones de transferencia del convertidor para CCM.....</b>	<b>89</b>
5.2.1.4. <b>Fundamentos para el diseño de componentes del convertidor ....</b>	<b>91</b>
5.2.1.5. <b>Dimensionamiento de los componentes del convertidor.....</b>	<b>95</b>
5.2.1.6. <b>Convertidores bidireccionales.....</b>	<b>97</b>
5.2.1.7. <b>Resumen de los valores .....</b>	<b>104</b>
<b>5.3. Sistema de tracción .....</b>	<b>104</b>
5.3.1. <i>Motor de CA</i> .....	105

---

5.3.2. <i>Inversor</i> .....	107
5.3.3. <i>Controlador de velocidad</i> .....	108
<b>5.4. Resistencia de frenado</b> .....	<b>109</b>
<b>5.5. Servicios auxiliares</b> .....	<b>110</b>
6. ESTRATEGIAS DE CONTROL. SISTEMAS DE GESTIÓN DE ENERGÍA .....	111
<b>6.1. Introducción</b> .....	<b>111</b>
<b>6.2. Sistemas de gestión de energía en vehículos híbridos</b> .....	<b>112</b>
<b>6.3. Estrategias de control desarrolladas</b> .....	<b>121</b>
6.3.1. <i>Control por modos de operación</i> .....	126
6.3.1.1. <b>Bloque de control CMO</b> .....	<b>127</b>
6.3.2. <i>Control en cascada</i> .....	130
6.3.3. <i>Control con lógica difusa</i> .....	131
6.3.4. <i>Control de Minimización de Consumo Equivalente</i> .....	137
6.3.5. <i>Control predictivo</i> .....	140
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	147
<b>7.1. Introducción.</b> .....	<b>147</b>
<b>7.2. Comparación de los controles</b> .....	<b>148</b>
7.2.1. <i>Resultados de las simulaciones</i> .....	148
7.2.1.1. <b>SOC inicial de la batería de 65%</b> .....	<b>149</b>
7.2.1.2. <b>SOC inicial de la batería de 55%</b> .....	<b>161</b>
7.2.1.3. <b>Elección del mejor control</b> .....	<b>168</b>
7.2.1.4. <b>Discusión</b> .....	<b>171</b>
8. Conclusions and future research .....	173
<b>8.1. Conclusions and contributions of the Thesis</b> .....	<b>173</b>
<b>8.2. Original contributions</b> .....	<b>176</b>
<b>8.3. Future research</b> .....	<b>176</b>
9. CURRÍCULUM VÍTAE .....	187
10. PUBLICACIONES GENERADAS POR LA TESIS .....	189
11. BIBLIOGRAFÍA .....	165

---



## Lista de símbolos

Símbolo	Parámetro	Unidad/Símbolo
$A$	Amplitud de la zona exponencial	V
$a$	Coefficiente de ajuste de la función de consumo frente a potencia de la FC	-
$A_{fc}$	Área efectiva de la FC	m <sup>2</sup>
$A_{sc}$	Superficie de cada electrodo del SC	m <sup>2</sup>
$B$	Constante inversa de tiempo de la zona exponencial ((Ah)-1)	-
$b$	Coefficiente de ajuste de la función de consumo frente a potencia de la FC	-
$C$	Consumo total de combustible del vehículo	kg
$c$	Coefficiente de ajuste de la función de consumo frente a potencia de la FC	-
$C_{bat}$	Consumo equivalente de H2 de la batería	kg
$C_{fc}$	Consumo de H2 de la FC	kg
$C_{FC,avg}$	Consumo medio de hidrógeno de la FC	kg
$C_{min}$	Capacidad mínima del condensador para un convertidor	F
$C_{sc}$	Capacidad del SC	F
$C_{sc}$	Consumo equivalente de H2 del SC	kg
$D_C$	Ciclo de trabajo de un convertidor CC/CC	p.u.
$D_{C1}$	Ciclo de trabajo del interruptor 1 del convertidor	p.u.
$D_{C2}$	Ciclo de trabajo del interruptor 2 del convertidor	p.u.
$DOH$	Grado de hibridación – “Degree of Hybridization”	p.u.
$D_{sc}$	Distancia entre electrodos	m

$E_{0\ cell}$	Tensión estándar reversible de la pila	V
$E_{0bat}$	Tensión constante de la batería (V)	V
$E_{B\_H2}$	Poder calorífico inferior del hidrógeno	MJ/Kg
$E_{bat}$	Tensión de la batería a circuito abierto (V)	V
$EC$	Energía de una batería	J
$E_{C,sc}$	Energía almacenada en el SC	J
$E_{cell}$	Tensión de una celda	V
$E_{u,sc}$	Energía disponible en el SC	J
$F$	Constante de Faraday	C/mol
$F$	Coefficiente del fricción viscosa del acoplamiento	Nm·s/rad
$f_s$	Frecuencia de conmutación en un convertidor	Hz
$I^*_{bat\_ref}$	Intensidad de referencia para la batería antes de pasar por la limitación en pendiente de la misma	A
$I_0$	Intensidad media a la salida de un convertidor	A
$\dot{i}_{bat}$	Intensidad de la batería	A
$I_{C,rms}$	Intensidad eficaz en el condensador de un convertidor	A
$I_{com}$	Intensidad absorbida por el compresor	A
$I_{C,pp}$	Intensidad pico a pico en el condensador de un convertidor	A
$I_{D,rms}$	Intensidad eficaz en el diodo de un convertidor	A
$\dot{i}_{dem}$	Densidad de corriente de la FC	A/cm <sup>2</sup>
$\dot{i}_{dem\_max}$	Densidad de corriente máxima de trabajo	1.12A/cm <sup>2</sup>
$I_{DM}$	Intensidad pico en el diodo de un convertidor	A

---

$I_{DMmax}$	Intensidad máxima en el diodo de un convertidor	A
$i_{dr}$	Intensidades del rotor según el eje d	A
$i_{ds}$	Intensidades del estator según el eje d	A
$I_{FC}$	Intensidad generada por la FC	A
$I_{fc\_back}$	Intensidad demandada al modelo de FC	A
$I_{fc\_neta}$	Intensidad neta de salida	A
$i_L$	Intensidad en la bobina de un convertidor	A
$I_L$	Intensidad media en la bobina de un convertidor	A
$i_{lim}$	Máxima densidad de corriente que puede generar la FC	A
$I_{Lsc}$	Intensidad de fuga del SC	A
$i_o$	Densidad de corriente intercambiada durante la reacción de la FC	A
$I_{OB}$	Intensidad de frontera a la salida de un convertidor	A
$I_{OBmax}$	Intensidad de frontera máxima a la salida de un convertidor	A
$i_{qr}$	Intensidades del rotor eje q	A
$i_{qs}$	Intensidades del estator eje q	A
$i_S$	Intensidad en el interruptor de un convertidor	A
$I_{S,rms}$	Intensidad eficaz en el interruptor de un convertidor	A
$i_{sc}$	Intensidad del SC	A
$I_{SM}$	Intensidad pico en el interruptor de un convertidor	A
$I_{SMmax}$	Intensidad máxima en el interruptor de un convertidor	A
$I_{tsc}$	Intensidad que sale o entra por los terminales del SC	A

---

$J_{cp}$	Momento de inercia del acoplamiento compresor-motor	kgm <sup>2</sup>
$K$	Constante de polarización o resistencia de polarización	V/Ah o $\Omega$
$k_1$	Coefficiente de penalización al consumo equivalente de la batería	-
$K_1$	Constante función de $k_1$ , $C_{FC,avg}$ y $P_{FC,avg}$	-
$k_2$	Coefficiente de penalización al consumo equivalente del SC	-
$k_e$	Constante del cambio de entropía en la ley de Faraday	V/K
$k_t$	Constante de motor de corriente continua	-
$k_v$	Constante de motor de corriente continua	-
$k_{valve}$	Constante de la válvula de hidrógeno aguas arriba	kg·s <sup>-1</sup> /cm <sup>2</sup>
$L_m$	Inductancia magnetizante	H
$L_{max}$	Inductancia máxima de la bobina de un convertidor	H
$L_r$	Inductancia del rotor	H
$L_s$	Inductancia del estator	H
$M$	Horizonte de control	uds.
$M_a$	Peso molar del aire seco	kg·mol <sup>-1</sup>
$M_{H2}$	Peso molar del hidrógeno	kg·mol <sup>-1</sup>
$M_{O2}$	Peso molar del oxígeno	kg·mol <sup>-1</sup>
$M_{I,DC}$	Función de transferencia de la intensidad de un convertidor	-
$M_{V,DC}$	Función de transferencia de la tensión en un convertidor	-
$N_{fc}$	Número de celdas de la FC	uds.
$N_t$	Número total de datos para el cálculo del MSE	uds.

---

$P$	Horizonte de muestreo	uds.
$P'_{bat}$	Potencia hipotética de la batería en la estrategia de cascada	W
$P'_{fc\_ref}$	Potencia inicial de referencia de la FC en la estrategia de cascada	W
$P_{agua\_an}$	Presión parcial del agua en el ánodo	bar/Pa
$P_{agua\_cat}$	Presiones parciales del agua en el cátodo	bar/Pa
$p_{atm}$	Presión atmosférica	bar/Pa
$P_{aux}$	Potencia demandada por los dispositivos auxiliares	W
$P_{bat}$	Potencia de la batería	W
$P_{bat\_chg\_max}$	Potencia máxima que puede absorber la batería	W
$P_{bat\_dch\_max}$	Potencia máxima que puede generar la batería	W
$P_{ESS}$	Potencia de las fuentes de energía secundarias – “Energy secondary sources power”	W
$P_{extra}$	Potencia extra a generar por la FC	W
$P_{fc}$	Potencia de la FC	W
$P_{FC,avg}$	Potencia media de la FC	W
$P_{fc,min}$	Potencia mínima de la FC	W
$P_{FCi}$	Potencia de salida de la pila	W
$P_{fcopt}$	Potencia a máximo rendimiento de la FC	W
$P_{fc}^{opt}$	Potencia óptima de la FC para minimizar el consumo	W
$P_{H2}$	Potencia asociada al consumo de hidrógeno	W
$P_{load}$	Potencia demandada por el vehículo	W
$P_{load,min}$	Potencia mínima demandada por la carga	W

---



$P_m$	Potencia eléctrica del motor	W
$P_{N2}$	Presión parcial del nitrógeno	bar/Pa
$P_{res}$	Potencia a disipar en la resistencia de frenado	W
$p_{sat}$	Presión de saturación del agua	bar/Pa
$P_{sc}$	Potencia del SC	W
$P_{sc\_chg\_max}$	Potencia máxima que puede absorber el SC	W
$P_{sc\_dch\_max}$	Potencia máxima que puede generar el SC	W
$P_{SCmax}$	Potencia máxima que puede absorber el supercondensador	W
$Q(i_{bat})$	Capacidad de la batería	Ah
$q_{back\ H2}$	Caudal de hidrógeno de vuelta (hidrógeno que no ha reaccionado)	kg/s
$Q_{bat}$	Capacidad de la batería	Ah
$Q_{exp}$	Capacidad de la batería al final de la zona exponencial	Ah
$q_{in\ H2}$	Caudal de hidrógeno que reacciona en el ánodo	kg/s
$q_{in\ O2}$	Caudal de oxígeno procedente del compresor	kg/s
$Q_{nom}$	Capacidad de la batería al final de la zona nominal	Ah
$q_{out\ H2}$	Caudal de salida del ánodo	kg/s
$q_{out\ O2}$	Caudal de salida de oxígeno	kg/s
$q_{out\ O2s}$	Caudal de oxígeno a la salida	kg/s
$q^r_{H2}$	Caudal de hidrógeno que reacciona	kg/s
$q_r\ O2$	Caudal de oxígeno reacciona en cátodo	kg/s
$Q_{sc}$	Carga acumulada del SC	C
$q_{valve\ H2}$	Caudal de hidrógeno proveniente del tanque	kg/s

---

$r$	Referencias del modelo de la planta (control predictivo)	-
$r'_C$	Rizado de la tensión de un condensador de un convertidor bidireccional	V
$r'_L$	Rizado de la intensidad de la bobina de un convertidor bidireccional	A
$R_{bat}$	Resistencia interna	$\Omega$
$R_{bat}$	Resistencia interna de la batería	$\Omega$
$r_c$	Resistencia interna del condensador de un convertidor	$\Omega$
$R_{cm}$	Constante de motor de corriente continua	W
$R_{fc}$	Resistencia de los electrolitos de la FC	$\Omega$
$R_{fc}$	Resistencia interna de la FC	$\Omega$
$R_g$	Constante de gases ideales	$J \cdot kg^{-1} K^{-1}$
$R_{H2}$	Constante de gas ideal para el hidrógeno	$J \cdot kg^{-1} K^{-1}$
$R_L$	Resistencia de carga de un convertidor	$\Omega$
$R_{Lmin}$	Resistencia de carga mínima de un convertidor	$\Omega$
$R_{Lmin}$	Resistencia de carga máxima de un convertidor	$\Omega$
$R_{Lsc}$	Resistencia de fuga dieléctrica	$\Omega$
$R_{O2}$	Constante de gas ideal para el oxígeno	$J \cdot kg^{-1} K^{-1}$
$R_{polarizacion}$	Resistencia de polarización	$\Omega$
$R_{Ssc}$	Resistencia en serie del SC	$\Omega$
$SOC_{bat}$	SOC de la batería	%
$SOC_{bat\_ref}$	SOC de referencia de la batería	%
$SOC_{bat0}$	Valor inicial del SOC de la batería	%

---

$SOC_L$	SOC mínimo permitido en la estrategia de minimización	%
$SOC_{sc\_ref}$	SOC de referencia del SC	%
$SOC_H$	SOC máximo permitido en la estrategia de minimización	%
$Sopen$	Sección de la válvula de hidrógeno aguas arriba	cm <sup>2</sup>
$T_0$	Temperatura ambiente	°C
$T_{atm}$	Temperatura atmosférica	°C
$T_{cm}$	Caudal de oxígeno a la salida	kg/s
$T_{cp}$	Par del compresor necesario para impulsar el aire	Nm
$T_e$	Par electromagnético	Nm
$T_{fc}$	Temperatura de trabajo de la FC	°C
$T_m$	Par mecánico solicitado por el tranvía a cada motor.	Nm
$T_{ON}$	Periodo de conmutación de un convertidor CC/CC	S
$T_S$	Periodo de conmutación en un convertidor	S
$u$	Entradas del modelo de la planta (control predictivo)	-
$U_{dr}$	Tensión del rotor según el eje d	V
$U_{ds}$	Tensión del estator según el eje d	V
$U_f$	Factor de utilización de la pila	V
$u_{min}, u_{max}$	Límites de las entradas del modelo de la planta	-
$U_{qr}$	Tensión del rotor según el eje q	V
$U_{qs}$	Tensión del estator según el eje q	V
$V(i_{bat}, SOC_{bat})$	Tensión en los terminales de la batería	V

---

$V_0$	Tensión a la salida de un convertidor	V
$V_A$	Tensión media a la salida de un convertidor CC/CC	V
$V_{act}$	Caída de tensión por activación	V
$V_{an}$	Volumen del ánodo	m <sup>3</sup>
$V_{bus\_max}$	Máxima tensión en el bus de CC	V
$V_{cat}$	Volumen del cátodo	m <sup>3</sup>
$v_{cm}$	Caudal de oxígeno a la salida	kg/s
$V_{conc}$	Caída de tensión por concentración	V
$V_{CPP}$	Valor pico a pico de la componente alterna de la tensión en el condensador de un convertidor	V
$V_{dc}$	Tensión del bus de CC	V
$V_{DM}$	Tensión pico en el diodo de un convertidor	V
$V_{exp}$	Tensión de la batería al final de la zona exponencial	V
$V_{fc}$	Tensión de salida de la FC	V
$V_{fc\_nom}$	Tensión de la pila a potencia nominal	V
$V_{full}$	Tensión de la batería cargada completamente	V
$V_I$	Tensión a la entrada de un convertidor	V
$V_{irrev}$	Tensión irreversible de una celda	V
$v_L$	Tensión en la bobina de un convertidor	V
$V_{nom}$	Tensión de la batería al final de la zona nominal	V
$V_{ohmic}$	Caída de tensión óhmica	V
$V_r$	Tensión de rizado a la salida de un convertidor	V

---

$V_{rC_{pp}}$	Tensión pico a pico en la resistencia interna del condensador de un convertidor	V
$v_S$	Tensión en el interruptor de un convertidor	V
$v_D$	Tensión en el diodo de un convertidor	V
$V_{sc}$	Tensión del SC	V
$V_{scb}$	Tensión mínima por debajo de la cual los SC dejan de dar energía	V
$V_{scR}$	Tensión nominal del SC	V
$V_{SM}$	Tensión pico en el interruptor de un convertidor	V
$V_{tsc}$	Tensión en los terminales del SC	V
$x_i$	Variables medidas	-
$x_{O_2}$	Fracción de oxígeno en el aire	-
$\hat{x}$	Valor de referencia	-
$y$	Salidas del modelo de la planta (control predictivo)	-
$y_{min}, y_{max}$	Límites de las salidas del modelo de la planta	-
$\alpha$	Coefficiente de traspaso de carga de la FC	-
$\alpha_a$	Ciclo de trabajo del interruptor “a” del inversor	p.u.
$\alpha_b$	Ciclo de trabajo del interruptor “b” del inversor	p.u.
$\alpha_c$	Ciclo de trabajo del interruptor “c” del inversor	p.u.
$\mu$	Constante para los procesos de carga/descarga en la estrategia de minimización	-
$\gamma$	Relación de calores específicos del aire	-
$\Delta i_L$	Valor de rizado de la intensidad de la bobina	A

---

$\Delta t$	Instante de muestreo	S
$\Delta\Phi$	Desplazamiento de fase	S
$\varepsilon_0$	Constante dieléctrica del espacio libre	-
$\varepsilon_r$	Constante dieléctrica del material aislante entre los electrodos	-
$\eta_{car,sc}$	Rendimiento de carga del SC	%
$\eta_{cp}$	Rendimiento del compresor	%
$\eta_{chg}$	Rendimiento de carga de la batería	%
$\eta_{DC}$	Rendimiento de un convertidor	%
$\eta_{desc,sc}$	Rendimiento de descarga del SC	%
$\eta_{dis}$	Rendimiento de descarga de la batería	%
$\eta_{HV}$	Rendimiento del vehículo híbrido	%
$\eta_{stack}$	Rendimiento de una celda de la FC	%
$\eta_{therm}$	Rendimiento termodinámico de la FC	%
$\lambda_{O_2}$	Exceso de oxígeno en el compresor	-
$\Psi_{dr}$	Flujo magnético del rotor según el eje d	$\Phi$
$\Psi_{ds}$	Flujo magnético del estator según el eje d	$\Phi$
$\Psi_{qr}$	Flujo magnético del rotor según el eje q	$\Phi$
$\Psi_{qs}$	Flujo magnético del estator según el eje q	$\Phi$
$\omega_{cp}$	Caudal de oxígeno a la salida	kg/s
$\omega_m$	Velocidad de giro del motor	rad/s

---

Las referencias a ecuaciones se indicarán mediante paréntesis () y las referencias a publicaciones y textos mediante corchetes [ ].

## Lista de figuras

Figura 2.1. Autobus Thunder Power con pila de combustible.....	8
Figura 2.2. Modelo de la locomotora diseñada por Vehicle Projects Inc. ....	15
Figura 2.3. Topología FC y fuente auxiliar conectadas directamente.....	17
Figura 2.4. FC con convertidor CC/CC y fuente auxiliar conectada directamente. ...	18
Figura 2.5. FC conectada directamente y fuente auxiliar con convertidor CC/CC....	18
Figura 2.6. FC y fuente auxiliar con convertidores CC/CC.....	18
Figura 3.1. Curva Potencia-Velocidad típica del tranvía del tramo de la línea 1 entre las paradas 21 y 25.....	23
Figura 3.2. Esquema del sistema híbrido. ....	28
Figura 4.1. FC con membrana de intercambio de protones. ....	33
Figura 4.2. Áreas potenciales de aplicación para diferentes tipos de FC.....	34
Figura 4.3. Sistema completo de Pila de Combustible (FCS).....	36
Figura 4.4. Configuración del modelo de FC utilizado.....	41
Figura 4.5. a) Modelo del ánodo y b) balance de masas en el ánodo. ....	42
Figura 4.6. Control de la válvula de entrada de hidrógeno. ....	43
Figura 4.7. Curva estática de la pila de hidrógeno.....	46
Figura 4.8. a) Curvas estáticas: datos reales y del modelo. b) potencia generada por la pila (según modelo). ....	47
Figura 4.9. Rendimiento del sistema pila de combustible. ....	51
Figura 4.10. Celda electroquímica típica de una batería.....	53
Figura 4.11. a) Tensión de corte típica de una batería. b) Características de descarga de una batería de plomo-ácido. ....	54



Figura 4.12. Diagrama de Rangone de diversas tecnologías de almacenamiento.....	58
Figura 4.13. Modelo de batería propuesto.....	62
Figura 4.14. Curva típica de descarga. ....	63
Figura 4.15. Comparación de las curvas de descarga del modelo de batería frente a las de la hoja de características del fabricante elegido.....	66
Figura 4.16. Esquemas de condensadores. a) Convencional. b) Supercondensador. .	69
Figura 4.17. Circuito equivalente de un supercondensador. ....	71
Figura 4.18. Curvas de descarga del supercondensador Maxwell BMOD0063-P125. ....	72
Figura 4.19. Rendimiento de descarga de un supercondensador Maxwell de 2600 F. ....	73
Figura 4.20. Curvas de descarga del supercondensador Maxwell BMOD0063-P125 frente a las obtenidas por el modelo propuesto. ....	75
Figura 5.1. Convertidor de doble puente completo bidireccional sin bobina.....	79
Figura 5.2. Implementación del control por desplazamiento de fase para el convertidor de puente completo. ....	79
Figura 5.3. Puente completo bidireccional con esquema unificado para conmutaciones suaves y capacidad de arranque desde tensión cero en modo elevador. .	80
Figura 5.4. Topología basada en dos convertidores de medio puente. ....	81
Figura 5.5. Idea básica de la modulación por ancho de pulso. ....	81
Figura 5.6. Esquema de la configuración de los convertidores del sistema híbrido. .	82
Figura 5.7. Topología clásica de convertidor elevador. ....	84
Figura 5.8. Circuitos equivalentes ideales para CCM del convertidor elevador. a) Cuando el interruptor está cerrado y el diodo abierto. b) Cuando el interruptor está abierto y el diodo cerrado.....	85
Figura 5.9. Formas ideales de las señales para el convertidor elevador en CCM. ....	86

---

Figura 5.10. Circuito equivalente del convertidor elevador usado para las simulaciones.....	90
Figura 5.11. Forma de la señal de la intensidad de una bobina de un convertidor elevador funcionando en la frontera entre los modos CCM y DCM.....	91
Figura 5.12. Intensidad de carga normalizada en la frontera de CCM/DCM en función del ciclo de trabajo del convertidor elevador.....	92
Figura 5.13. Resistencia de carga normalizada en la frontera de CCM/DCM en función del ciclo de trabajo del convertidor elevador.....	93
Figura 5.14. Circuito equivalente de la salida del convertidor elevador.....	94
Figura 5.15. Convertidor bidireccional con un medio puente.....	98
Figura 5.16. Selección de la inductancia mínima para el convertidor bidireccional del supercondensador.....	101
Figura 5.17. Selección de la inductancia mínima para el convertidor bidireccional de la batería.....	103
Figura 5.18. Circuito equivalente del motor según el eje q. ....	105
Figura 5.19. Circuito equivalente del motor según el eje d. ....	106
Figura 5.20. Modelo de inversor. ....	108
Figura 5.21. Controlador de velocidad.....	109
Figura 5.22. Modelo de resistencia de frenado. ....	110
Figura 6.1. Configuración simplificada del convertidor elevador. ....	123
Figura 6.2. Lazos de control para la generación del ciclo de trabajo.....	125
Figura 6.3. Diagrama de flujo del cálculo de la potencia a disipar en la resistencia de frenado. ....	126
Figura 6.4. Estrategia de gestión de energía por modos de funcionamiento. ....	127
Figura 6.5. Ciclos de histéresis para los niveles del SOC de la batería. ....	128
Figura 6.6. Modos de operación del CMO.....	129

---

Figura 6.7. Lazos de control internos del control en cascada.....	130
Figura 6.8. Esquema del control con lógica difusa. ....	132
Figura 6.9. Funciones de pertenencia de las variables de entrada: a) SOC de la batería, b) SOC del supercondensador, y c) Potencia demandada por el vehículo.....	133
Figura 6.10. Funciones de pertenencia de las variables de salida: a) Potencia a generar por la FC, y b) Variación de la potencia de la batería. ....	134
Figura 6.11. Potencia de la FC en función del SOC de la batería y del SC. ....	136
Figura 6.12. Variación de la potencia de la batería en función del SOC de la batería y del supercondensador. ....	136
Figura 6.13. Curvas de consumo de hidrógeno en función de la potencia de la FC.	138
Figura 6.14. Esquema de la estrategia de Minimización de Consumo Equivalente.	140
Figura 6.15. Planta con señales de entrada y salida.....	141
Figura 6.16. Funcionamiento de un hipotético controlador predictivo con una entrada y una salida.....	143
Figura 6.17. Esquema de control predictivo diseñado para el tranvía.....	144
Figura 7.1. Ciclo de trabajo del tranvía. a) Potencia. b) Velocidad.....	150
Figura 7.2. Potencias en las fuentes de energía. a) FC, b) Batería, y c) SC. ....	152
Figura 7.3. Respuesta dinámica de la pila. ....	152
Figura 7.4. a) Potencia generada, b) Potencia disipada en la resistencia de frenado, y c) Energía disipada en la resistencia de frenado. ....	153
Figura 7.5. Tensiones en las fuentes de energía y en el bus de continua. ....	155
Figura 7.6. Ciclos de trabajo de los convertidores. a) FC, b) Batería, y c) SC. ....	156
Figura 7.7. a) SOC de la Batería y el SC. b) Modos de funcionamiento. ....	156
Figura 7.8. a) Rendimiento de la FC, b) Rendimiento del HV, c) Consumo de H <sub>2</sub> de la FC, y d) Consumo equivalente total de H <sub>2</sub> . ....	158
Figura 7.9. Consumos equivalentes teniendo en cuenta coeficientes de penalización.	

---

a) Batería, y b) SC.....	161
Figura 7.10. Potencia de la FC. a) 8 ciclos de trabajo, b) Ciclo inicial, y c) Ciclo final.....	162
Figura 7.11. a) Potencia de la batería, y b) Potencia del SC.....	163
Figura 7.12. a) SOC de la batería y el SC, y b) Modos de operación.....	163
Figura 7.13. Tensiones de la FC, batería, SC y bus de CC.....	165
Figura 7.14. Resistencia de frenado. a) Potencia disipada, y b) Energía disipada...	166
Figura 7.15. a) Rendimiento FC, b) Rendimiento HV, c) Consumo de H2 en la FC, y d) Consumo equivalente de H2 total.....	166
Figura 7.16. Consumos equivalentes con coeficiente de penalización. a) Batería, y b) SC.....	167



## Lista de tablas

Tabla 3.1. Características del tramo de la línea 1 entre las paradas 21 y 25.....	24
Tabla 3.2. Características del tramo de la línea 1 entre las paradas 21 y 25.....	25
Tabla 3.3. Características comerciales de la batería y SC seleccionados. ....	27
Tabla 3.4. Datos configuración y cálculo del DOH del tranvía. ....	28
Tabla 4.1. Lista de las distintas FC y sus propiedades.....	34
Tabla 4.2. Especificaciones de la pila FCvelocity-HD6 de Ballard.....	39
Tabla 5.1. Valores iniciales para el cálculo de los componentes del convertidor elevador.....	95
Tabla 5.2. Parámetros de interés para el convertidor bidireccional. ....	99
Tabla 5.3. Valores iniciales para el diseño del convertidor bidireccional del supercondensador.....	101
Tabla 5.4. Valores tomados para el cálculo de la capacidad de los condensadores de filtrado.....	102
Tabla 5.5. Valores iniciales para el diseño del convertidor bidireccional de la batería. ....	102
Tabla 5.6. Valores tomados para el cálculo de la capacidad de los condensadores de filtrado.....	103
Tabla 5.7. Resumen de los valores tomados para los modelos de convertidores. ...	104
Tabla 6.1. Resumen de los parámetros considerados en las simulaciones.....	125
Tabla 6.2. Reglas del controlador por lógica difusa. ....	135
Tabla 6.3. Parámetros del controlador predictivo. ....	145
Tabla 7.1. Comparación con SOC <sub>bat</sub> inicial de 65%, comparación con SOC <sub>bat</sub> inicial de 55% y comparación total.....	169



---

## **CHAPTER 1:**

---

### **Introduction, objectives and structure of the Thesis**

#### **1.1. Introduction**

The transition to a sustainable energy supply is one of the major challenges that humans will face during the twenty-first century. Year by year, the world energy demand increases together with the greenhouse gas emissions, the air pollution in several cities around the world and the gradual reduction of the fossil fuel reserves. Future energy sources should reduce the effects of the climatic change, not producing harmful emissions, and at the same time, helping several countries to reduce their current dependence on fossil fuels.

The transition to a “green” energy supply has already begun: technologies for collecting and converting energy from the environment, new means of energy storage and increased energy efficiency have progressed greatly. Individual mobility and long-

---



distance travel have become vital elements of human existence. Most of this mobility is provided by the more than 900 million motor vehicles around the globe. The vast majority of these vehicles are fuelled by gasoline and diesel – road transport is more than 96% reliant on fossil petroleum. It is obvious that sooner or later alternatives will be required. But the question is not if this transition is possible, but how it we will be managed. The energy sector will increasingly produce electricity from renewable resources; in Europe, this is mainly from wind power for economic reasons. The electrification of the automobile is therefore seen by many as an answer to the question of sustainable transport with energy stored onboard vehicles in the form of electrolytic hydrogen or in lithium batteries. Battery electric vehicles have a high tank-to-wheel efficiency. Thus, battery electric vehicles may offer the simplest substitute for conventional cars. Although a hydrogen system at first glance might appear less efficient and more complex, it also offers great potential to store large amounts of energy, which can be filled during off-peak hours where generation capacity exceeds demand. Thus, hydrogen may be available for vehicles as a valuable “by-product” of the future energy sector. Hydrogen vehicles also profit from the high energy density that hydrogen offers which increases the vehicle autonomy. A vehicle-use profile similar to that enjoyed with today’s conventional cars will thus be possible with fuel cell cars.

Hybrid systems- composed by fuel cells, hydrogen technology, batteries, and electric propulsion systems- are needed for a transition to sustainable road transport. The question, however, is how the change from the current technology will take place. Electricity and hydrogen as energy carriers for transportation will require a completely different supply and distribution infrastructure compared to oil. Due to that, nowadays public transport [1], [2] is the most suitable transportation sector to introduce fuel cell vehicles. Several advantages result from it: the operation of this kind of vehicles at low load results in high efficiency and low fuel consumption (particularly in congested or slower moving traffic); the size of the vehicles allows an easy placement of the hydrogen tanks; clean emissions; and the limited infrastructure required (this kind of transport ride the same route so that only a specific number of refueling points are needed depending on the route length).

## **1.2. Objectives of the thesis**

The main objective of this thesis is to evaluate the possibility of supplying the energy demanded by a tramway using a hybrid system which is based on fuel cell (FC) as the

primary energy source and batteries and supercapacitors (SC) as auxiliary energy sources and storage systems.

For the parallel operation of different power sources in the proposed hybrid system, a dc/dc converter for each source may be utilized. These dc/dc converters allow power tracking and voltage regulation. In this thesis, different control schemes are employed to generate appropriate switching signals to the dc/dc converters.

The proposed hybrid system will allow the tramway to work in an autonomous way, without having to be connected to the grid using catenaries. Thus, the use of air power lines in historic urban centers and the visual impact caused by them is eliminated.

An accurate model of the hybrid system has to be designed to validate through simulations the possibility of hydrogen supply operation of a tramway. Different tasks have to be implemented. Below, these tasks are described:

- Development of the models of the different sources of the system. The parameters of these models have to fit with the commercial characteristics of the real components selected to integrate the hybrid system.
- Development of the hybrid system model in which different strategies of control will be tested. This model includes all the dc/dc converters which enable the exchange of energy between sources/load and different auxiliary systems.
- Development of different strategies to control the flow of energy between the different sources and the load. These strategies are commonly called energy management strategies.
- Comparison of the different energy management strategies in order to select the most suitable for the tramway under study according to the results obtained in the simulations.
- The mathematical and electrical models of the hybrid vehicular system are developed using MATLAB®, Simulink® and SimPowerSystems® environments.

### **1.3. Thesis Structure**

To meet the objectives proposed in the previous section, the current thesis is

---

composed of eight chapters whose structure is the following.

The first chapter is an introduction chapter. The objectives of the Thesis are summarized.

The second chapter is composed of a summary of the developed projects related to the use of fuel cells in public transport and a discussion about the different suitable architectures for these vehicles.

The third chapter is a description of the tramway under study in this thesis: the *Urbos 3* of Zaragoza. In the beginning, the current supply system of the tramway and its typical power-speed curve (driving cycle), recorded during a test route simulating the commercial service, are presented. According to this power-speed curve, the hybrid system structure, the sizing of its components and the election of commercial ones which could be suitable for the system are carried out.

In the fourth chapter the model of the different power sources of the system are described. The FC model is a specific FC model for vehicular applications whose parameters have been modified in order to fit with the real FC datasheet. In the case of the battery, it has been implemented using the battery model available in MATLAB SimPowerSystems® toolbox. Finally, the supercapacitor has been modeled as its equivalent electrical circuit. The battery and supercapacitor model parameters are modified according to the commercial characteristics of the real components chosen in the previous chapter as has been done with the FC.

The fifth chapter presents the rest of the components which compound the proposed supply system of the tramway such as: the boost unidirectional dc converter of the FC, the bidirectional dc converters of the battery and the supercapacitor, the auxiliary services and the braking resistor to dissipate energy.

In the sixth chapter the energy management strategies proposed for the hybrid system are presented. Five strategies are developed to meet a group of requirements related to supplying the demanded power to the load in each instant, keeping the state of charge of the auxiliary sources and maintaining the voltage of the dc bus.

The seventh chapter shows the results of the simulations for a simulation time of eight driving cycles which makes it possible to notice that their behavior remains or becomes steady during the whole simulation. In addition, other simulations in which the

initial conditions are unfavorable are presented to show that the strategies presented can face extreme conditions. Based on these results, the proposed strategies are compared to choose the two best options. Both will be compared again to obtain the best strategy.

In the eighth chapter, the conclusions of the work are collected, summarizing the original contributions, future work proposals and resulting publications of this thesis.

Finally, the bibliography is presented and a curriculum vitae in which the international publications related to this Thesis are shown.



---

## **CAPÍTULO 2**

---

### **Antecedentes**

#### **2.1. Introducción**

En este capítulo se recogen los proyectos que se han llevado a cabo hasta la fecha con el objetivo de introducir la pila de combustible en transporte urbano (tranvías, trenes, autobuses o cualquier transporte de gran potencia) con características similares al tranvía objeto de nuestro estudio. A parte, se desarrollan los tipos de configuraciones que se emplean en este tipo de vehículos para hacer posible el funcionamiento de la pila de combustible junto con otras fuentes auxiliares de energía. En dicha sección se comentarán las ventajas e inconvenientes relativas a cada una.

#### **2.2. Las pilas de combustible en el transporte urbano**

Los autobuses urbanos y tranvías constituyen un mercado prioritario para la introducción de pilas de combustible [3]. Además del hecho de que poseen tanto espacio interno como el techo para colocar las pilas de combustible y los cilindros de almacenamiento, dichos vehículos tienen otras características positivas para el uso de

pilas de combustible: normalmente circulan en rutas definidas y con horarios determinados, son mantenidos por técnicos cualificados y operan desde una estación por lo que sólo requerirían un único punto de repostaje de hidrógeno posiblemente colocado en dicha estación. Además, en el caso de los autobuses, los cuales frecuentemente se ven afectados por atascos, el hecho de que utilicen un sistema de propulsión eléctrico les beneficia en que ni emiten contaminantes y su rendimiento para tráfico lento (baja demanda de potencia) es muy bueno. Además, llamarían la atención de la comunidad y constituirían un excelente escaparate para los vehículos de propulsión eléctrica.

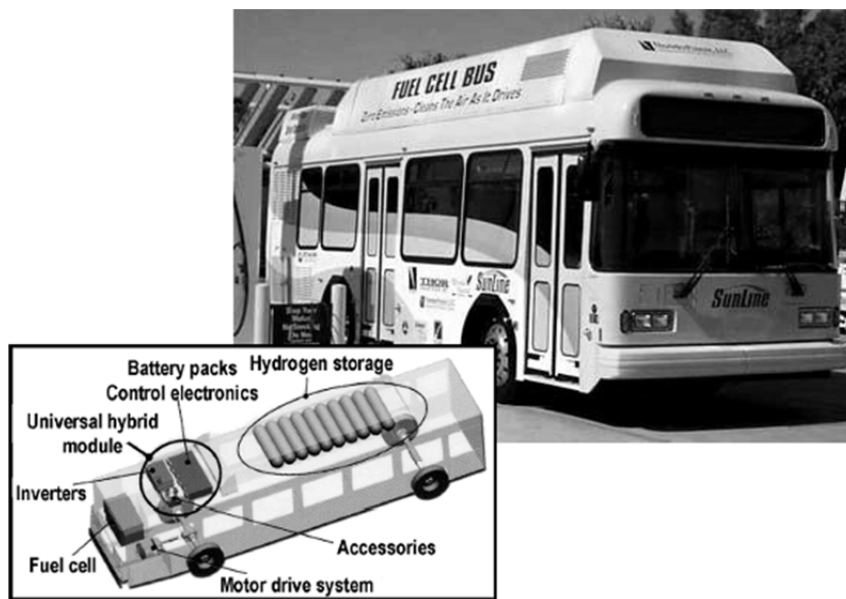


Figura 2.1. Autobus Thunder Power con pila de combustible.

En California entre los años 2002 y 2004 se llevó a cabo una notable investigación del funcionamiento de autobuses con pila de combustible. Se evaluó el funcionamiento en carretera de autobuses modelo *Thunder Power*, los cuales fueron desarrollados por ISE Corporation junto con Thor Industries [4]- ver figura 2.1. Los vehículos tenían un diseño híbrido y estaba en un principio alimentado por una pila de tipo PEM de 60kW fabricada por UTC Fuel Cells. Para economizar el uso de energía, dicho autobús fue equipado con un pack de 48 baterías de tipo plomo-ácido de 12V para suministrar potencia extra y almacenar la energía obtenida mediante el frenado regenerativo. La pila operaba con 25kg de hidrógeno comprimido que era almacenado en nueve cilindros montados sobre el techo y daban al autobús una autonomía de 300km. De los datos recolectados en dicha investigación demostraron que este tipo de autobuses híbridos casi doblaban la eficiencia del mismo modelo de autobuses tradicionales y, además, no producían óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y otras partículas nocivas. Actualmente existe un

autobús de este modelo circulando en servicio regular en Palm Springs (California).

Animados por el éxito citado anteriormente, AC Transit formó un consorcio para la modificación de un modelo de autobús más grande para incorporarle una pila de tipo PEM de 120kW fabricada por UTC Power y un sistema híbrido eléctrico desarrollado por ISE [5]. En este caso el vehículo podía almacenar hasta un máximo de 50kg de hidrógeno a 35MPa en 10 cilindros y ofrecía una autonomía de 400-480km. El autobús tenía tres módulos de batería tipo ZEBRA para proporcionar 95kW de potencia auxiliar y para absorber la energía regenerativa de las frenadas. Actualmente se encuentran funcionando varios de estos autobuses de manera continuada en varias ciudades de Bélgica y Holanda.

En Europa, un consorcio de nueve ciudades, respaldado por la UE, ha llevado a cabo una prueba a gran escala de autobuses con pila de combustible, junto con una evaluación de los horizontes que se plantean respecto a la producción, almacenaje, distribución y suministro de hidrógeno a alta presión. La iniciativa, conocida como el programa Clean Urban Transport for Europe (CUTE) [6], comenzó en 2001. Veintisiete autobuses han sido construidos e integrados en las flotas de transporte público de Ámsterdam, Barcelona, Hamburgo, Londres, Luxemburgo, Madrid, Oporto, Estocolmo y Esturgar. Cada ciudad recibió tres autobuses y éstos eran abastecidos mediante la construcción de una estación de suministro de hidrógeno en cada ciudad. Se adoptaron diferentes formas de producción de hidrógeno además de diferentes formas de compresión y de suministro. Algunos optaron por electrólisis de agua, usando electricidad de fuentes renovables, otros por reformado de gas natural a pequeña escala o por hidrógeno refinado. Todas las ciudades que usaron electrolizadores optaron por hidrógeno presurizado. Sólo una de las ciudades (Londres) eligió hidrógeno líquido, que era producido externamente y transportado en camiones cisterna. Las otras tenían instalaciones donde se almacenaban los tanques con hidrógeno comprimido. Cuando la presión de almacenamiento era menor que la del autobús (35MPa), una bomba elevadora de presión era necesaria para transferir el gas al vehículo. El repostaje normalmente llevaba de 10 a 30 minutos. En diseños futuros, para una mayor variedad de vehículos de hidrógeno, será necesario reducir este tiempo además de abastecer de tanques de almacenamiento de diferentes tamaños y presiones hasta los 70-80MPa.

Dichos autobuses fueron construidos por DaimlerChrysler [7] y estaban basados en el modelo de Mercedes-Benz Citaro con capacidad para 70 pasajeros. El primero de



éstos fue enviado a Madrid en Mayo de 2003. Una pila PEM de 250kW desarrollada por Ballard Power Systems proporciona una potencia de hasta 200kW al motor eléctrico para proporcionar un funcionamiento comparable al de motores diesel. El hidrógeno, almacenado en nueve tanques montados en el techo, proporciona una autonomía de 200km. Durante el transcurso del programa CUTE, se recopilaron datos para medir el funcionamiento, fiabilidad, economía, seguridad y aceptación de la opinión pública de los autobuses. Esta información fue intercambiada gratuitamente entre las ciudades participantes. Los motores de tracción y el resto de componentes auxiliares no tuvieron fallos críticos y las pilas ofrecieron vidas útiles de más de 3000 horas. Los conductores estaban satisfechos con los vehículos, los pasajeros disfrutaron de un nuevo tipo de transporte y los técnicos fueron entrenados para operar las estaciones de repostaje y realizar el mantenimiento de los autobuses sin mayores problemas.

Un proyecto que fue más allá fue llevado a cabo en Reikiavik (Islandia) entre 2001 y 2005 con el nombre de Ecological City Transport System (ECTOS) [8]. Este proyecto estaba estrechamente relacionado con el programa CUTE y fue fundado también por la UE, además implicaba a tres autobuses de tipo Citaro idénticos a los que operaban en las ciudades nombradas anteriormente. El interés especial de este proyecto radica en que está basado íntegramente en la aplicación de energías renovables para la producción de hidrógeno. Islandia se encuentra en una situación peculiar debida a que genera más energía renovable de la que es capaz de consumir. Por tanto, el hidrógeno de los autobuses fue obtenido electrolíticamente a través del uso del exceso de energía geotermal e hidroeléctrica. Para este propósito, se empleó un electrolizador instalado en una estación de repostaje de hidrógeno en colaboración con Shell. Esta estación, abierta al público, pretende ser una de las primeras estaciones de servicio de hidrógeno para coches y autobuses. A largo plazo, es concebible que Islandia, que no posee yacimientos de combustibles fósiles y, por eso, tiene como objetivo reducir sus importaciones, podría volverse energéticamente auto sostenible en el futuro.

En Septiembre de 2004, tres autobuses más del tipo Citaro fueron evaluados de manera similar como parte del sistema de transporte público de Perth, en el oeste de Australia en un proyecto de dos años llamado Sustainable Transport Energy Project (STEP) [9]. El hidrógeno necesario para esta prueba fue producido en una refinería en Kwinana. Otros tres Citaro fueron llevados a Beijing en Noviembre de 2005 para funcionar en una ruta de tráfico denso de 19 km entre el Palacio de Verano y la

ubicación de los Juegos Olímpicos de 2008.

Todos estos programas de autobuses tienen en común que, en la actualidad, no son viables económicamente sin subvenciones sustanciales de los gobiernos.

Los proyectos CUTE, ECTOS y STEP se evaluaron como altamente satisfactorios. En Octubre de 2005, 17 de los 33 autobuses en operación en Europa, Islandia y Australia habían excedido las 2000 horas de operación, 10 habían excedido las 2500 y uno había excedido las 3000. Entre todos ellos, habían transportado más de cuatro millones de pasajeros y cubierto al menos 1.1 millones de km. La fiabilidad de los autobuses es alta, con una tasa de disponibilidad de más del 90 %. Cerca de 9000 repostajes se llevaron a cabo de manera segura y se dispensaron un total de al menos 200 toneladas de hidrógeno, de las cuales la mitad provenían de energías renovables. Siete de las ciudades en las que operaban autobuses con pila de combustible de forma regular – Amsterdam, Barcelona, Hamburgo, Londres, Luxemburgo, Madrid y Reikiavik- decidieron continuar su funcionamiento durante un año más, empezando en Enero de 2006. La extensión, conocida como el proyecto HyFLEET:CUTE, fue subvencionada por la UE como parte de su Sexto Programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Las pruebas de autobuses continuaron en el mismo periodo en Perth y Beijing. En Marzo de 2007, Amsterdam anunció una extensión de sus pruebas con estos autobuses hasta Enero de 2008.

Por otro lado, Japón también ha sido muy activo en el desarrollo de autobuses con pila de combustible. Por ejemplo, Toyota e Hino Motors construyeron el *FCHV-BUS1* [10], que fue seguido del *FCHV-BUS2*. El último es un vehículo de 60 pasajeros alimentado por dos pilas tipo PEM de Toyota que tienen una potencia de salida de 90kW y funcionan con hidrógeno gaseoso almacenado a 35MPa. Una batería de níquel-metal hidruro almacena la energía generada durante las frenadas y, para un funcionamiento altamente eficiente, regula el suministro eléctrico al motor según lo determinado por el estado operativo del vehículo. Este autobús se puso en funcionamiento en una ruta regular en Tokio en Agosto de 2003. Su repostaje se llevaba a cabo mediante una estación construida por Showa Shell Sekiyu junto con Iwatani. Después de su operación se ha reivindicado que el *FCHV-BUS2* es tres veces más eficiente energéticamente que su homólogo convencional a diesel.

A diferencia de lo que ocurre con los autobuses híbridos, las FC todavía no se han integrado completamente en trenes o tranvía. Si bien los estudios de viabilidad son más

numerosos, los proyectos en los cuales se pretende utilizar las FC en este tipo de transporte son más bien escasos.

Haciendo un recorrido por el mundo por los distintos proyectos en los cuales se pretenden llevar a cabo la integración de las FC en sistemas de transporte para servicio público, nos encontramos que únicamente en países como Japón, Estados Unidos, Canadá y Dinamarca en Europa cuentan con proyectos de investigación en estado avanzado de desarrollo.

Japón es la nación líder en el desarrollo de sistemas de tracción avanzada para el transporte sobre raíles. En Japón se desarrollaron los trenes de levitación magnética y los trenes balas de alta velocidad. Japón es sin duda, el líder mundial en el desarrollo de alta tecnología para trenes. En la actualidad, dos empresas de este país están compitiendo por ser la primera compañía en desplegar un tren con servicio regular para los ciudadanos propulsado por FC. Las empresas son East Japan Railway Company (EJRC) y Japan's Railway Transportation Research Institute's Hydrail train (RTRI).

EJRC está desarrollando una cabeza motora sobre raíles cuya principal fuente de energía es la producida por las FC. Este nuevo sistema de propulsión será el primer tren híbrido de FC del mundo y sustituirá al actual tren cuya fuente principal de energía es el gasoil y que tiene por nombre NE train. Por lo tanto, este proyecto pretende sustituir los MCI por FC manteniendo la misma configuración que actualmente disponen los trenes. Las FC estarán conectadas al bus de continua mediante un convertidor elevador de tensión mientras que las baterías conectarán directamente con el bus. Con esta nueva fuente de energía se alcanza la misma velocidad máxima del tren, 100km/h y se es capaz de abastecer la potencia de tracción demandada en todo momento, teniendo picos de más de 200kW. En este caso se ha optado por dos FC de 65kW cada una y baterías de ión litio de 19kWh. Más información de este proyecto se encuentra en su página web [11].

Por otra parte, la otra compañía de Japón, RTRI, está investigando desde el 2001 en diferentes opciones para la sustitución paulatina de los actuales trenes propulsados con MCI por nuevos sistemas híbridos basados en FC. De esta forma, en Octubre del 2006 realizaron las primeras pruebas a escalas sobre un tren comercial pero incluyendo esta nueva fuente de energía. Según estos estudios se espera que las FC generen una potencia máxima de 600kW con una autonomía de unos 400km al día a una velocidad máxima de 120km/h. El consumo diario se espera que sea de unos 100kg de masa pura

de hidrógeno. En la web de este instituto de investigación y así como en los congresos que tienen por nombre World Congress on Railway Research (WCRR) existe más información sobre este tipo de trabajos [12], [13].

Cambiando de continente, en Norteamérica la empresa sin fines lucrativos Fuel Cell Propulsion Institute está trabajando en el desarrollo de FC para su aplicación en la industria pesada y en el transporte de vehículos. Esta empresa está desarrollando en EE.UU un sistema híbrido de locomotora basado en FC y en batería que sustituya a la actual locomotora híbrida con MCI y batería siendo utilizada para aplicaciones de la Fuerza Aérea de los EE.UU en Utah. La nueva locomotora dispondrá de una potencia neta de salida obtenida a partir de hidrógeno de 250kW a una tensión de 600V, generados por dos pilas de 125 kW cada una. El sistema de tracción se completará con batería de plomo, con lo que la potencia pico máxima será de hasta 1MW. La locomotora dispondrá en el techo de la misma de tanques de hasta 70 kg de hidrógeno de capacidad almacenados a una presión de 350 bares. Actualmente el proyecto está en su última fase de desarrollo, realizando a finales del 2008 una demostración en público de su funcionamiento. Además, esta misma empresa tiene pensado llevar a cabo un nuevo proyecto para un vehículo de transporte en carretera formado por cuatro en vez de dos FC, con lo que la potencia total obtenida a partir de estas será de 500kW. En este caso se optará por baterías de Ni-Mh como sistema secundario de generación de energía. Esta misma empresa, desarrolló en Canadá entre 1999 y 2002 la primera locomotora híbrida del mundo propulsada por FC. Su desarrollo fue para fines de minería, constituida por una FC de 17kW de potencia nominal y baterías de 7.1 kW. Toda la información de los distintos proyectos de esta empresa aparece en su página web [14].

También en Canadá, la sociedad Fraser Valley Heritage Rail Society (FVHRS) formada en el año 2001, está intentando recuperar como patrimonio nacional los vehículos sobre raíles de la parte más occidental del país. Las primeras pruebas se están llevando a cabo con FC de 300kW en trenes con una topología similar a la que antiguamente pasaba por esta zona del país. Una primera idea del futuro tren híbrido fue mostrada en los pasados Juegos Olímpicos de Invierno del 2010. Además de estos proyectos que se están llevando a cabo en Canadá, el Gobierno de Ontario, con capital en Toronto, está pensando en desarrollar junto con la empresa Bombardier Transportation una flota de trenes híbridos propulsados por FC para esta ciudad. El

gobierno tiene pensado que la producción del hidrógeno se realice en centrales nucleares próximas a la ciudad, con el objetivo de reducir costes y emisiones de CO<sub>2</sub>.

En Europa, un consorcio de empresas, The Hydrogen Train [15], están llevando a cabo el desarrollo de lo que sería el primer tren híbrido propulsado por hidrógeno de Europa. El nuevo tren híbrido, cuyo proyecto está siendo liderado por Hydrogen Innovation & Research Centre (HIRC), que tenía como fecha de puesta en marcha finales de 2010 y aún sin funcionar, en la zona central de Dinamarca. El tren, de unas 47 toneladas de peso, dispondrá de una potencia procedente de las FC de 150kW, estando la potencia máxima del sistema entre los 250 y 300kW. Además de este proyecto, las empresas Alstom y Axane están analizando la opción de la fabricación de un tranvía híbrido propulsado por FC. Se prevé que el nuevo tranvía sustituya al actual que circula por la ciudad de Grenoble, Francia, disponiendo de una FC de hasta 400kW.

A parte, en Alemania comenzó a funcionar en 2005 una variante con pila de combustible de un híbrido de autobús y tranvía llamado *AutoTram* [16], el cual presentaba la ventaja de ser casi tan barato como un autobús al no necesitar ni catenaria ni raíles. La versión basada en pila de combustible se deriva de una anterior que combinaba motor de combustión y eléctrico con baterías. El vehículo está compuesto por dos vagones y funciona con un sistema de pila de combustible tipo PEM de Ballard y tres motores eléctricos. El hidrógeno se suministra a la pila a través de tanques montados sobre el techo que son capaces de almacenar 10kg de hidrógeno a 200 bares. Como fuente auxiliar de energía el tranvía dispone de un volante de inercia de 325kW con una capacidad de almacenamiento de energía de 4kWh que se recarga a través del frenado regenerativo, la potencia de la pila o conectándose a estaciones de repostaje rápido.

En otros países del mundo como Taiwán y Corea donde existe una gran contaminación del aire de las ciudades debido a su gran dependencia a los combustibles fósiles se están llevando a cabo estudios de viabilidad para la introducción del hidrógeno como fuente alternativa de energía. Tal es el caso, que en Corea se pretende renovar en la medida de lo posible toda la flota de trenes y metros, incluyendo además nuevos medios de transporte para particulares como son las motocicletas y los vehículos híbridos basados en FC [17].

Más recientemente, este año, se ha planteado la construcción de cinco locomotoras que funcionarán con pila de combustible para funcionar en la mina de platino de

Dishaba en Sudáfrica, el modelo presentado se muestra en la figura 2.2. Dichas locomotoras presentarán un sistema de propulsión compuesto por la combinación de pilas de combustible tipo PEM y baterías Ión-Litio. Las pilas proporcionarán una potencia fija de 17kW y, en combinación con la potencia generada por las baterías el sistema, podrá generar una potencia máxima de 45kW durante aproximadamente 10 minutos, según la empresa desarrolladora del proyecto (Vehicle Projects Inc). El sistema completo de tracción, pilas de combustible, baterías, almacenamiento de hidruros (fuente del hidrógeno), sistemas de refrigeración y electrónica de potencia ocuparán un espacio de  $1\text{m}^3$ . Cada locomotora tendrá  $0.3\text{m}^3$  de almacenamiento de hidrógeno en forma de hidruros metálicos, los cuales proporcionan una forma de almacenaje compacta y segura para 3.5kg de hidrógeno, suficiente para producir 50kWh. Anteriormente la empresa Vehicle Projects en consorcio con BNSF produjeron en 2009 una locomotora basada en pila de combustible para realizar pruebas en EEUU y en 2002 desarrollaron la que se dice que fue la primera locomotora para minería basada en pila de combustible para la mina de Placer Dome en Canadá. En la página web de Vehicle Projects [18] se encuentra más información acerca de este proyecto.

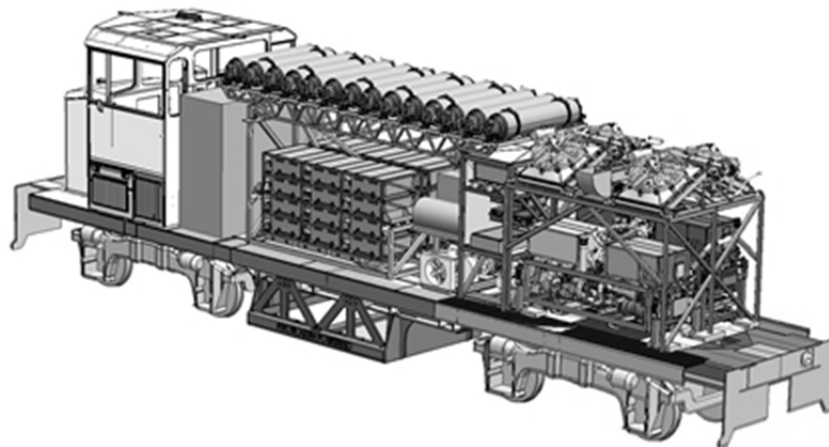


Figura 2.2. Modelo de la locomotora diseñada por Vehicle Projects Inc.

En España, un consorcio de empresas nacionales encabezado por CAF lanzó en 2008 el proyecto de investigación ECOTRANS, financiado por el CDTI a través del programa CENIT. Este consorcio trabaja en el desarrollo de una nueva generación de vehículos y sistemas de transporte urbano equipados con tecnologías sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Este proyecto pretende estudiar la posible sustitución de los tranvías, trenes y metros alimentados mediante catenarias por nuevos sistemas híbridos propulsados por FC-batería y/o super-condensador (SC). Los tranvías

de las ciudades de Sevilla o Zaragoza serán objeto de estudio en este proyecto. Por otra parte, uno de los participantes de este proyecto, Cidaut (Centro de Investigación y Desarrollo en Transporte y Energía) en colaboración con FEVE y con la Consejería de Educación y Ciencia inició ese año en Asturias un proyecto de investigación para el desarrollo de un sistema de tracción para tranvías basado en la pila de combustible. El prototipo a construir se prevé que circule por las vías en desuso de FEVE entre Llovio y Ribadesella (Asturias).

Es notable que en estos proyectos de autobuses y tranvías funcionando con pila de combustible, el hidrógeno se almacene como gas comprimido en tanques montados en el techo. Este tipo de almacenamiento ha sido elegido en virtud de su fácil disponibilidad y practicidad para repostaje rápido. El montaje en el techo tiene varias ventajas: los cilindros no ocupan un espacio valioso en el chasis, el techo de los autobuses raramente se daña en un accidente de tráfico, y en caso de éste el gas se disipa hacia arriba en vez de entrar en el vehículo.

### **2.3. Topologías para vehículos propulsados por PEM-FC**

Aunar la demanda de potencia del vehículo con la potencia generada por la pila de combustible (FC) y las unidades auxiliares de almacenamiento requieren una adecuada configuración de convertidores electrónicos de potencia y control de los mismos. La selección de una arquitectura para sistemas híbridos con FC se basa en algunos factores significativos como bajo coste, alta eficiencia, aislamiento eléctrico, ausencia de rizado y funcionamiento fiable.

Considerando los factores mencionados anteriormente así como los requisitos de potencia demandada varias topologías pueden ser usadas para el funcionamiento de sistemas híbridos de PEM FC. Una de las topologías más simples es el funcionamiento en paralelo de la PEM FC con el sistema auxiliar de potencia de forma directa como muestra la Fig. 2.3. Durante demandas pequeñas de potencia la FC genera su máxima potencia, y el exceso de energía entre la demanda del vehículo y la generada por la pila se usa para cargar la unidad auxiliar. En este periodo, el interruptor S1 está cerrado y el interruptor S2 está abierto. Además, durante periodos de alta demanda de potencia, tanto la FC como el sistema auxiliar suministran la potencia demandada. Esta topología es atractiva debido a que no requiere un convertidor CC/CC, por lo que la complejidad, coste, peso y volumen del sistema se reducen significativamente. Esta topología se

propuso por Honda [19] para un sistema combinado de PEM FC y supercondensador para vehículos. Uzunoglu y Alam [20], [21] utilizan esta topología para un sistema autónomo, mientras que Yalcinoy y Alam [22] la aplicaron a aplicaciones portátiles. El principal problema que plantea es que la tensión en el bus no está controlada, por lo que varía según el valor de las fuentes conectadas a ella. Además, las fuentes auxiliares al no tener convertidores no son controlables de forma directa.

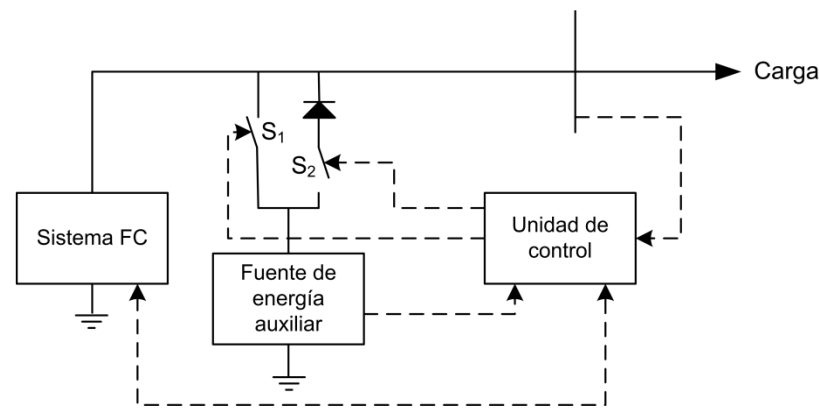


Figura 2.3. Topología FC y fuente auxiliar conectadas directamente.

Existen diferentes diseños de topologías con un solo convertidor como muestran las figuras 2.4 y 2.5. La topología de la figura 2.4 regula la potencia de salida del sistema de FC mientras que el resto de energía entre la carga y la potencia de salida de la FC es naturalmente suministrado por la unidad auxiliar. En el caso de la figura 2.5, la topología se basa en la regulación de la potencia de salida del sistema auxiliar. Hay muchos estudios en la literatura que usan estas dos topologías. La topología de la figura X2 se utiliza en la hibridación entre PEM FC y batería propuesta por Jiang et al. [23], en un autobús híbrido de PEM FC y batería propuesto por Xu et al., para un vehículo de aeropuerto alimentado por PEM FC propuesto por Sripakagorn y Limwuthigraijirat [24], entre otros ejemplos. Este tipo de topología permite controlar la potencia de una de las fuentes mientras que la otra suministra la diferencia de energía entre la controlada y la carga. Por otro lado, la tensión del bus de continua no está controlada y varía según la tensión de la fuente que esté conectada directamente a éste.



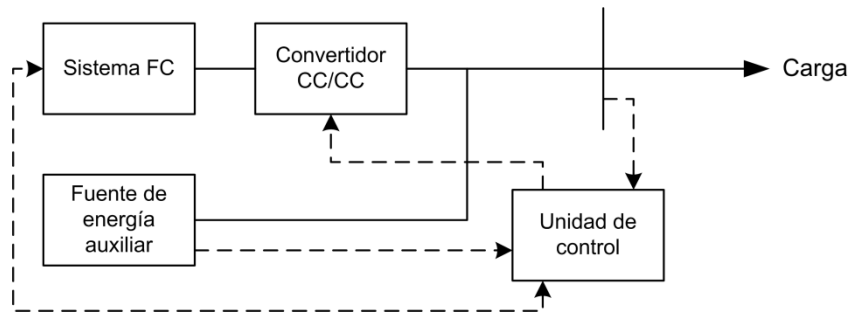


Figura 2.4. FC con convertidor CC/CC y fuente auxiliar conectada directamente.

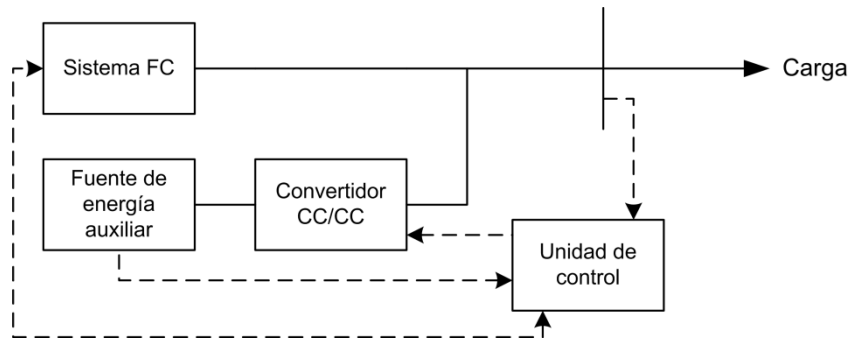


Figura 2.5. FC conectada directamente y fuente auxiliar con convertidor CC/CC.

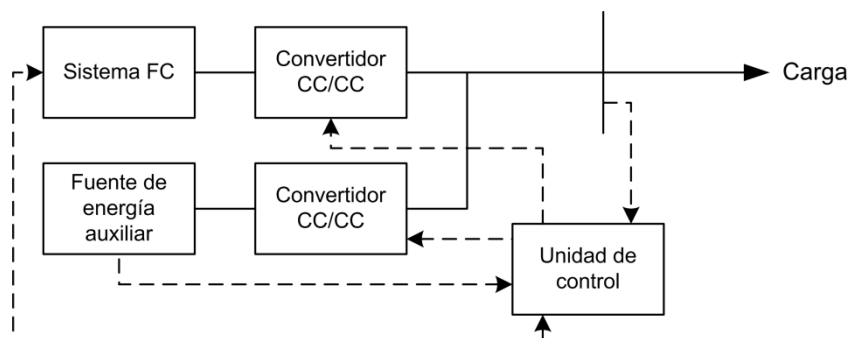


Figura 2.6. FC y fuente auxiliar con convertidores CC/CC.

La topología más común en la literatura de sistemas híbridos se compone de múltiples convertidores CC/CC como se ve en la figura 2.6. En este tipo de topología, el convertidor CC/CC de una de las fuentes auxiliares es el encargado de la regulación de la tensión del bus de continua, lo que se denomina “control orientado en tensión”, y el resto de los convertidores se controlan mediante seguimiento de la potencia mediante un método de “control orientado de la potencia o intensidad”. Por eso, la topología propuesta proporciona la capacidad de entregar la potencia deseada por las diferentes fuentes de energía mientras que mantiene la tensión del bus constante en el valor deseado. Los estudios de Zhang *et al.* [25], Erdinc *et al.* [26], [27], Thounthong *et al.* [28], [29] y Feroldi *et al.* [30] son algunos de los ejemplos de ésta topología de

múltiples convertidores aplicadas al sector de transporte.

Normalmente la fuente de energía auxiliar en los esquemas mostrados anteriormente es un módulo de baterías, un supercondensador o una combinación de ambos (31). Las baterías tienen una mayor energía específica que los supercondensadores y pueden, por tanto, proporcionar una potencia adicional durante periodos más largos de tiempo (32). Por otro lado, los supercondensadores generalmente tienen una potencia específica mayor que las baterías, son más eficientes y tienen una mayor vida útil en términos de número de ciclos de carga/descarga [32].

En el trabajo de Bauman [33] en 2008 se realiza una comparación entre tres configuraciones de vehículos con propulsión mediante sistemas híbridos basados en pila de combustible: pila de combustible-batería, pila de combustible-supercondensador y pila de combustible-batería-supercondensador. Para dicha comparación se dimensionaron de manera óptima los componentes y el control para cada caso y se realizaron simulaciones. De dichas simulaciones se obtienen varias conclusiones:

- La opción de pila de combustible-supercondensador es la menos deseable debido al alto coste del sistema de propulsión y al alto consumo de combustible derivado del peso del sistema: debido a la baja energía específica de los supercondensadores se requiere un gran número de ellos.
- Las opciones de pila de combustible junto a batería o a la combinación de batería y supercondensador son competidores cercanos. El sistema de pila de combustible-batería conlleva menor coste, mientras que el otro ofrece mayor ahorro de combustible y puede prolongar la vida de la batería debido a un menor estrés de ésta.



---

## CAPÍTULO 3

---

### Descripción del tranvía y del sistema híbrido de propulsión

#### 3.1. Introducción.

En este capítulo se describe el tranvía objeto de estudio de esta tesis: el *Urbos 3* de Zaragoza. Primero, se comenta el sistema de propulsión actual del tranvía y su curva típica de potencia-velocidad (conocida comúnmente como ciclo de trabajo), grabada durante su funcionamiento en pruebas simulando servicio comercial. Esta curva es el punto de partida para el dimensionamiento de los componentes del sistema.

Además se escogerá la topología adecuada para el nuevo sistema híbrido de propulsión propuesto en esta tesis y se elegirán los componentes comerciales que lo conformarán.

### **3.2. Descripción del tranvía objeto de estudio**

El tranvía objeto de estudio de este trabajo corresponde a una línea de tranvía que actualmente circula en la ciudad de Zaragoza. Su línea 1, Mago de Oz - Gran Vía, une el barrio de Valdespartera con el centro de la ciudad. La longitud total de esta línea es de 12,8km, que se recorren a una velocidad comercial de 21 km/h sobre una vía de 1435 mm de anchura. Éste es un tranvía cuya primera línea proyectada sigue un eje norte-sur entre Valdespartera y Parque Goya, atravesando el centro de la ciudad. Consta de 25 paradas (22 con andenes laterales y 3 con andén central), separadas entre sí aproximadamente 500m.

Actualmente se encuentra en construcción una segunda fase de la línea actual, que continuaría la línea desde Gran Vía hasta Parque Goya. El proyecto completo se compone de tres líneas, añadiendo a la actual las líneas 2 (Las Fuentes/San José-Delicias) y 3 (La Jota-Torrero). La segunda fase de la línea 1 inició sus obras el 3 de marzo de 2011 y finalizará en torno a 2013. Las otras dos líneas planeadas están previstas para el año 2015.

Los promotores del tranvía exigieron que el proyecto presentado no utilizara hilo aéreo en el centro histórico (concretamente en el tramo Plaza Paraíso-Murallas) para evitar el impacto estético que requiere este sistema. Debido a ello los tranvías cuentan con el sistema ACR (Acumulador de Carga Rápida), basado en supercondensadores que permiten llegar de una parada a la siguiente sin necesidad de catenaria. Un sistema de control electrónico controla la aplicación de corriente a los motores de tracción según las indicaciones del conductor. Durante la marcha del tranvía los motores consumen la corriente del acumulador. Al frenar, se utiliza un freno dinámico regenerativo. De esta manera los motores de tracción pasan de consumir corriente a generarla, corriente que se dedica a recargar el acumulador. Una vez completamente detenido en una parada el tranvía se conecta a la red eléctrica, generalmente a través de un pantógrafo sobre un hilo aéreo de contacto instalado exclusivamente en la parada, para completar la carga de la batería necesaria para llegar hasta la siguiente parada. La carga en la parada es de aproximadamente 30 segundos. Con este sistema el tranvía es capaz de recorrer 1000 metros, distancia que puede variar según las características de la vía.

El tranvía se compone de unidades bidireccionales con cinco cuerpos articulados descansando en tres “bogies”. Dos de estas unidades son motoras y la otra es un tráiler. Puede desarrollar 70km/h (12km/h de promedio) con una capacidad máxima de 275

plazas.

La curva típica de Potencia-Velocidad, grabada durante Febrero de 2011 para simular el servicio comercial, de la ruta entre las paradas 21 (Olvidados) y 25 (Mago de Oz) se muestra en la figura 3.1. Esta curva puede ser considerada el punto de partida para el diseño del sistema híbrido del tranvía.



Figura 3.1. Curva Potencia-Velocidad típica del tranvía del tramo de la línea 1 entre las paradas 21 y 25.

El ciclo de trabajo que se muestra en la figura anterior corresponde al viaje entre las paradas 21 y 25 de la línea 1. La duración del trayecto es de unos 6 minutos y medio, disponiendo de tres paradas de una duración de unos 20 segundos. La velocidad máxima que se alcanza es de 50km/h y la potencia de tracción máxima solicitada es de 400kW.

Por otra parte, la potencia mínima disponible durante un frenado es de hasta 420kW. En la actualidad, el tranvía dispone de un sistema eléctrico de frenado, con recuperación de energía. Es decir, devuelve energía a la red durante la fase de frenado. Con este sistema se pueden conseguir ahorros considerables de consumo (entre un 20 y un 30%).

Otras características importantes del tranvía se muestran en la tabla 3.1.

Longitud	1877m
Paradas	4
Longitud del tranvía	33m
Fabricante ferroviario	CAF
Alimentación ( $V_{cc}$ catenaria)	750V
Aceleración arranque	1.2m/s <sup>2</sup>
Plazas de pie	146
Plazas sentadas	54
Total plazas	200
Potencia total pico	8 x 50kW
Potencia de servicios auxiliares	57.47kW
Composición	Cinco cuerpos articulados descansando en tres bogies

Tabla 3.1. Características del tramo de la línea 1 entre las paradas 21 y 25.

### 3.3. Dimensionamiento del sistema híbrido

Para los sistemas híbridos eléctricos de propulsión, el grado de hibridación de éstos, en ingles, degree of hybridization (*DOH*) es la relación entre la potencia total máxima generada por el sistema de pila de combustible, FC y toda la potencia capaz de generar el sistema híbrido de propulsión, ver expresión (3.1). Un apropiado dimensionamiento de los elementos de propulsión del sistema híbrido permite generar en todo momento la potencia solicitada por el sistema de tracción manteniendo cada uno de los parámetros más importante de cada fuente de energía dentro de su rango óptimo de funcionamiento. Además, se consigue evitar el desperdicio de combustible, la optimización del volumen del sistema de propulsión (FC, batería/ supercondensador) y la reducción del coste del sistema del sistema híbrido de propulsión, ya sea para vehículo de pequeña potencia, (motocicletas, coches) o para sistemas de transporte público (tranvía, autobuses, trenes...).

$$DOH = \frac{P_{fc}}{P_{fc} + P_{ESS}} \quad (3.1)$$

De la expresión 3.1,  $P_{FC}$  es la potencia máxima del sistema de pila de combustible y  $P_{ESS}$  es la potencia en régimen nominal del sistema de almacenamiento de energía, en ingles energy storage system (ESS). Se comprueba cómo si el *DOH* es 1 es estamos en el caso de un vehículo de hidrógeno, y por tanto sin sistema de recuperación de energía y cómo cuando el *DOH* es 0 estamos en el caso de un vehículo eléctrico.

De acuerdo a estudio realizado por [34], el cálculo del *DOH* óptimo para cada sistema propulsión híbrido puede ser determinado dependiendo de la importancia del sistema secundario de energía, de la potencia pico del sistema, de la potencia máxima

en régimen permanente, de la variación de la potencia demanda a lo largo del ciclo de trabajo del sistema híbrido y de la potencia máxima disponible durante un frenado o desaceleración.

Existen dos opciones [35] a la hora de dimensionar los elementos del sistema híbrido: reducir o aumentar el *DOH*. Normalmente, para dimensionar la FC, se realiza un balance de energía entre la energía consumida por el ESS durante un ciclo de trabajo continuo del tranvía (incluyendo servicios auxiliares) y la energía generada por la fuente de energía auxiliar y el sistema de FC. La FC debería dimensionarse para ser capaz de suministrar un valor de potencia entre la potencia media y la máxima demandada por el vehículo.

En la primera opción (reducir el *DOH*), lleva a un incremento considerable de la capacidad de la batería y por tanto de su volumen. Por otra parte, el coste de la producción del vehículo híbrido sería bastante menor. De esta forma, tenemos que: una reducción del *DOH* implicaría un aumento en volumen del sistema de generación de energía, una reducción del consumo y por tanto un mayor aporte por parte de la batería, llegando incluso a considerarse el vehículo híbrido como sistema de batería con apoyo de FC.

Por otra parte, un aumento del *DOH* implica, un mayor consumo de combustible, menor volumen del sistema de almacenamiento de energía y mayor robustez del sistema ante continuas demandas de potencia por parte del vehículo.

Con el objetivo de un estudio del ciclo de trabajo del tranvía y de un dimensionamiento de los elementos del mismo se muestra la siguiente tabla 3.2.

Concepto	Valor	Observaciones
Media de potencia global	92.24kW	Potencia media de un ciclo de trabajo completo
Media positiva	151.76kW	Potencia media demandada
Media negativa	-289.13kW	Potencia media regenerativa
Máxima potencia a generar	469.39kW	
Máxima potencia a absorber	-402.74kW	
Máxima energía a generar	2.03kWh	Durante la aceleración mayor (del segundo 52 al 113)
Máxima energía a absorber	-1.26kWh	Durante la frenada regenerativa mayor (del segundo 71 al 88)

Tabla 3.2. Características del tramo de la línea 1 entre las paradas 21 y 25.

Teniendo en cuenta esos factores hay que definir la función de cada uno de los componentes del sistema.

En el presente trabajo, se pretenden diseñar estrategias de gestión de energía que se



adapten fielmente al ciclo de trabajo del tranvía. Para ello, las fuentes auxiliares deben ser capaces de absorber la energía generada durante las frenadas, puesto que no hacerlo (y por consiguiente, disiparla) supone un desperdicio de energía. Por tanto, se escoge la opción de diseñar un sistema de propulsión que tenga un bajo *DOH* en el que la batería sea capaz de absorber la potencia generada durante las frenadas regenerativas. La función de la FC será apoyar a ésta durante las aceleraciones y mantener su estado de carga en torno al valor de referencia. Por su parte, se agrega al sistema supercondensadores (SCs) para hacer frente a los picos de demanda.

Otra premisa seguida en el diseño del sistema híbrido es que el estado de carga de la batería y el SC deben funcionar dentro de unos límites en torno a un valor de referencia. En dichos elementos, la tensión varía dependiendo de este estado de carga, por lo que hay que evitar estados de carga bajos y altos por dos motivos: primero, porque pueden deteriorar dichos elementos, y segundo, están conectados a convertidores CC/CC que funcionan para un rango de tensiones determinado, fuera del cual trabajarían con ciclos de trabajo no admisibles para los mismos.

Con el objetivo de evitar los problemas de la respuesta dinámica para encendido/apagado del sistema de FC, se ha considerado ésta siempre conectada o encendida.

Así, teniendo en cuenta la disponibilidad comercial de pilas de combustible de hidrógeno para aplicaciones de transporte, se opta por la pila HD6 de Ballard con una potencia máxima de 160kW [36], 10kW de los cuales se considerará para el consumo del compresor, siendo por tanto la potencia total de neta de salida de la pila a considerar de 150kW. Dicha potencia se corresponde a lo que se comentaba anteriormente para un correcto dimensionamiento de la FC.

Por otra parte, la potencia máxima de la batería deberá ser al menos de 310kW (469.39-150 kW) puesto que, la función de la batería en las aceleraciones es suministrar la potencia necesaria al vehículo apoyada por la FC durante las aceleraciones. Además, durante las frenadas regenerativas la energía debe ser recuperada en los ESS por lo que habría que tener en cuenta que éstos deberían ser capaces de absorber dicha energía. En este caso, el valor pico considerado de esta potencia regenerativa es de (-402.74–15kW), que se corresponden a la suma de la potencia pico regenerativa ( $P_{load,min}$ ) y a la mínima que genera la FC ( $P_{fc,min}$ ), realmente podría darse el caso de un valor mayor debido a que puede coincidir la máxima potencia regenerativa y un valor de potencia de

la FC mayor al considerado (cosa que se va a intentar evitar con las estrategias de control propuestas). En definitiva, el conjunto de baterías ha de tener una potencia máxima de unos 420kW.

Por último, los SCs tienen como misión mantener la tensión en el bus de continua y apoyar a las baterías absorbiendo picos de potencia.

En la configuración considerada para el tranvía, mostrada en el siguiente apartado, se utilizarán las baterías LFP90AHA de Thundersky [37] de alta potencia Li-ion y para los SCs, módulos BMOD0063 de Maxwell [38], ambos especialmente diseñados para aplicaciones de transporte.

<b>Batería TS-LFP90AHA de Thundersky</b>	
Capacidad nominal	90Ah
Tensión nominal de la batería	4.25V
Intensidad máxima de la batería (constante)	270A
Intensidad máxima de la batería (impulso)	900A
Potencia máxima (constante)	1.15kW
Potencia máxima (impulso)	3.8kW
Peso de la batería	3.2kg

<b>Supercondensador BMOD0063 de Maxwell</b>	
Capacidad	63F
Tensión nominal	125V
Energía disponible	101Wh
ESR (resistencia en serie equivalente)	18mΩ
Intensidad máxima del SC (constante)	150A
Intensidad máxima del SC (pico de 1 segundo)	750A
Potencia máxima (constante)	18.75kW
Potencia máxima (pico de 1 segundo)	93.75kW

Tabla 3.3. Características comerciales de la batería y SC seleccionados.

### 3.4. Configuración híbrida del tranvía

Teniendo en cuenta las premisas comentadas anteriormente y los elementos comerciales seleccionados para el sistema híbrido se pasa a su dimensionamiento.

Como se comentó anteriormente la FC seleccionada es de 150kW.

La batería debe de aportar una potencia que varía entre los 310 y aproximadamente 420kW (máxima potencia entre descarga y de carga).

Dependiendo del número de baterías se seleccionara un número de SCs que sean capaces de apoyar a la batería cuando no sea capaz de absorber la potencia regenerativa.

El dimensionamiento del sistema de propulsión diseñado se recoge en la siguiente tabla. A partir de los datos recopilados en ella se estima el *DOH* del vehículo híbrido calculado a partir de las potencias nominales de cada elemento.

<b>Tranvía – Sistema híbrido de propulsión</b>	
Número de baterías en serie	340ud.
Módulos batería-serie en paralelo	1ud.
Potencia total baterías	391kW
Número de SC en serie	5ud.
Módulos SC-serie en paralelo	1ud.
Potencia total SC	93.75kW
Potencia de la FC	150kW
Número de FC	1ud.
Potencia total de FC	150kW
Degree of hybridation ( <i>DOH</i> )	23.63%

Tabla 3.4. Datos configuración y cálculo del DOH del tranvía.

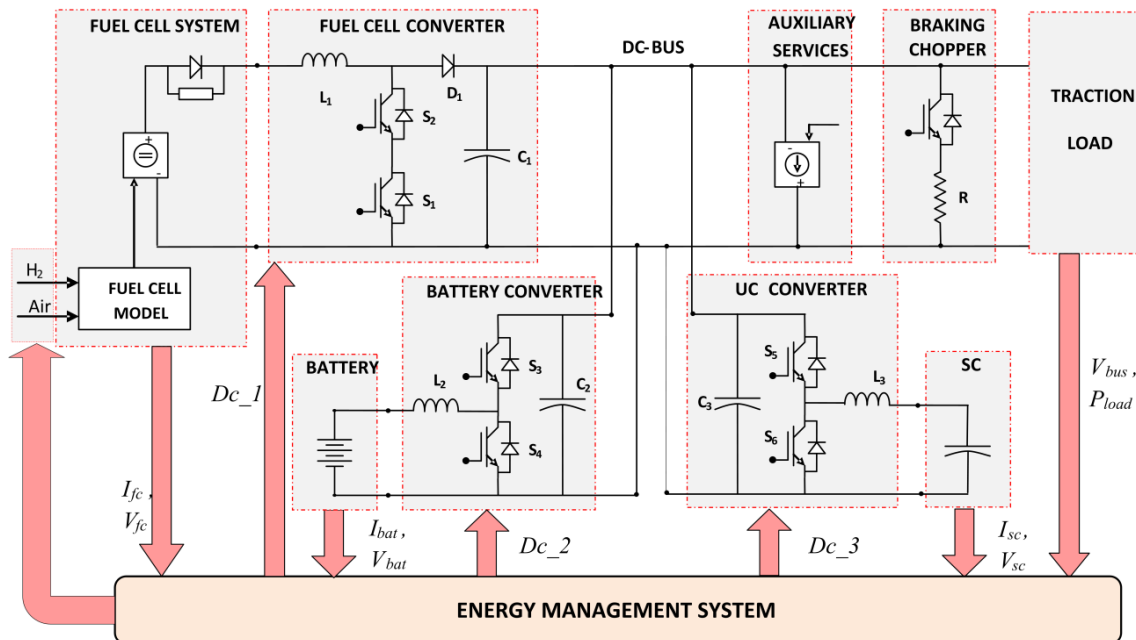


Figura 3.2. Esquema del sistema híbrido.

En la figura 3.2 se muestra la configuración seleccionada para el nuevo tranvía híbrido.

Atendiendo a esta figura, el tranvía está compuesto por:

- Un sistema principal de generación de energía eléctrica formado por un sistema de FC de 150kW a una tensión máxima de 750V. La pila está conectada a un convertidor elevador de corriente continua unidireccional, el cual se encarga de controlar su potencia de salida. El convertidor además adapta la tensión de generación de las pilas a una tensión más alta en CC en la cual trabaja

actualmente el bus de continua de tranvía.

- Un sistema secundario de generación y almacenamiento de energía formado por 340 baterías en serie de 90Ah y una potencia nominal de 391kW. La batería está conectada al bus de continua mediante un convertidor reductor de corriente continua bidireccional.
- Otro sistema secundario de generación y almacenamiento de energía formado por 5 SCs en serie de 63F cada uno (12.6F en conjunto) y una potencia nominal de 93.75kW. El SC está conectado al bus de continua mediante un convertidor elevador de corriente continua bidireccional.
- Una resistencia de frenado, para la disipación de energía en el caso de que haya una frenada o una fuerte desaceleración y la potencia máxima disponible sea mayor que la máxima que puedan absorber los sistemas de almacenamiento.
- La potencia demandada por los servicios auxiliares. 57.47kW a lo largo de todo el trayecto.
- El sistema de tracción del tranvía. Este sistema formado por inversor y motor de CA de jaula es el encargado de transmitir el movimiento a las ruedas de cada boguie. Para esta configuración, al igual que en la de dos convertidores, se ha utilizado cuatro de inversores de tensión 750CC/650CA con un motor de jaula de 120kW conectado a la salida de cada inversor.
- Un sistema de control de velocidad de los motores de CA.
- Un sistema de gestión de energía. El sistema intercambia datos de control con los distintos elementos del tranvía para así conseguir una correcta distribución de la energía según la estrategia de control que disponga. Según se verá en el capítulo 7, para cada estrategia de control, el sistema de gestión de energía generará el ciclo de trabajo del interruptor del convertidor correspondiente.



---

## CAPÍTULO 4

---

# Fuentes de energía del sistema híbrido del tranvía

### 4.1. Introducción

Como se ha comentado en capítulos anteriores, la configuración escogida para el sistema híbrido de tranvía dispone de tres fuentes de energía eléctrica: una pila de combustible (FC) de hidrógeno, un módulo de baterías y otro módulo de supercondensadores (SCs). En resumen, la pila de combustible actuará como fuente de energía primaria y las baterías y SCs como fuentes de energía secundarias (ESS) y sistemas de almacenamiento (que permitan la recuperación de energía).

En el presente capítulo se desarrolla el modelo de pila de combustible con membrana de intercambio de protones, batería y supercondensador que se han utilizado para las simulaciones de las distintas estrategias de control propuestas.

El apartado 4.2 se denomina “Modelo de pila de combustible” y en él, además de justificar la elección de pilas de tipo PEM para aplicaciones de transporte, se desarrolla el modelo a utilizar en las simulaciones presentadas posteriormente.

En el apartado 4.3, llamado “Modelo de batería”, se justifica la elección del tipo de batería a utilizar y se desarrolla el modelo de batería. Además se compararán los datos comerciales de la batería con los obtenidos mediante simulación para justificar su elección.

Por último, el apartado 4.4, “Modelo de supercondensador”, se presenta el modelo de supercondensador utilizado, se justifica su elección y se comparan datos comerciales del dispositivo elegido con los del modelo.

## 4.2. Modelo de pila de combustible

### 4.2.1. Introducción

El principio de operación de una FC es relativamente simple. El principio de funcionamiento de éstas fue descubierto en 1839 por William R. Grove, un físico británico. En términos simples puede ser descrito como la reacción inversa a la que ocurre en la electrólisis.

Como se puede observar en la figura 4.1, una FC consiste en una membrana de intercambio de protones (o electrolito) emparedada entre dos electrodos (el ánodo y el cátodo). Dicha membrana tiene una propiedad especial que permite pasar iones positivos (protones) mientras que bloquea electrones. El gas hidrógeno pasa a través de un electrodo, llamado ánodo, y con la ayuda de un catalizador, se separa entre electrones y protones de hidrógeno, siendo la reacción que se produce:



Los protones fluyen al otro electrodo, llamado cátodo, a través del electrolito mientras que los electrones fluyen a través de un circuito externo creando una corriente eléctrica. Los protones de hidrógeno y los electrones se combinan con el flujo de oxígeno a través del cátodo y producen agua, siendo la reacción que se produce:



La reacción global de la FC, por tanto, es:



La tensión producida por una célula se encuentra entre 0 y 1 V [39] dependiendo de las condiciones de operación de la FC y del tamaño de la carga conectada a la misma. Para obtener mayores tensiones, múltiples células se combinan en serie. La tensión total

del conjunto es el número de células multiplicado por la tensión de cada una de ellas.

En realidad, no toda la energía química disponible en el hidrógeno se convierte en energía eléctrica. Parte de la energía se pierde en forma de calor.

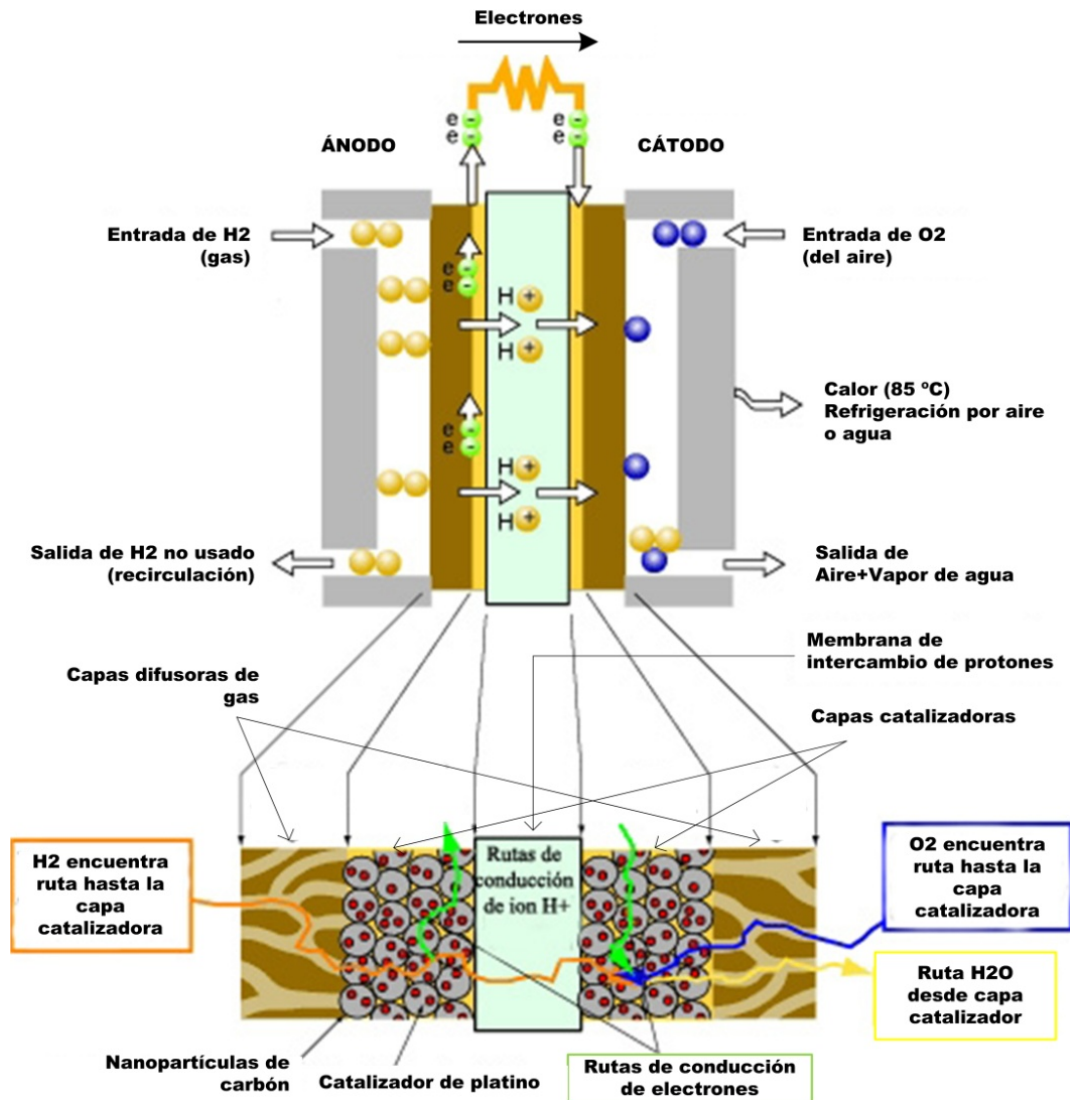


Figura 4.1. FC con membrana de intercambio de protones.

#### 4.2.2. Tipos de pila de combustible y sus aplicaciones

Varios tipos de FC están disponibles hoy día. En la tabla 4.1 [40]-[42] se listan los cinco tipos de FC más comunes. Como se explicó durante la sección previo el principio de funcionamiento de una FC es transportar iones de un lado del electrolito al otro. Los iones móviles se muestran en la segunda columna de la tabla.



Tipo de FC	Ión móvil	Tª de operación	Densidad de potencia	Rendimiento
Alcalinas (AFC)	OH <sup>-</sup>	50-200°C	N/A	N/A
Membrana de intercambio de protones (PEM)	H <sup>+</sup>	50-100°C	0.22-0.3kW/kg	35-40%
Ácido fosfórico (PAFC)	H <sup>+</sup>	≈220°C	≈0.091kW/kg	35-40%
Carbonato fundido (MCFC)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	≈650°C	≈0.037kW/kg	50-55%
Óxido sólido (SOFC)	O <sup>2-</sup>	500-1000°C	≈0.056kW/kg	45-50%

Tabla 4.1. Lista de las distintas FC y sus propiedades.

En la figura 4.2 [40] se muestran los mercados potenciales de los tipos de FC.

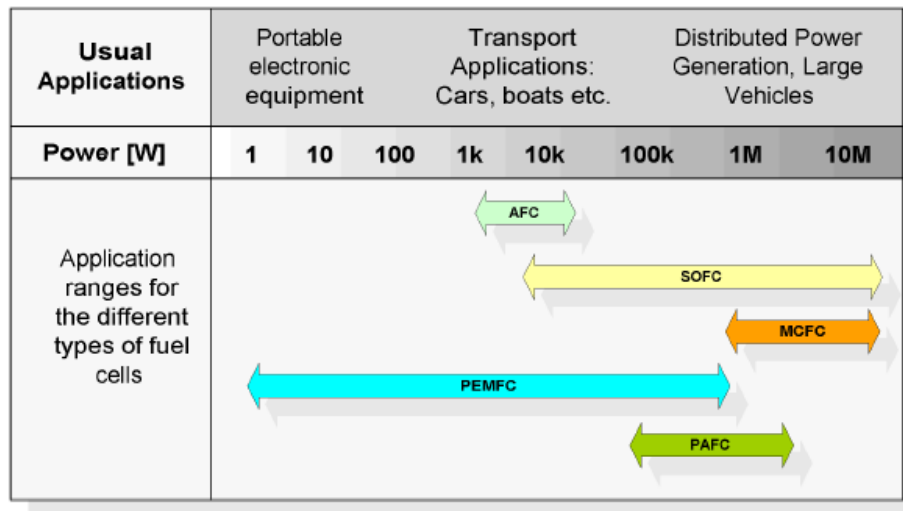


Figura 4.2. Áreas potenciales de aplicación para diferentes tipos de FC.

La FC alcalina (AFC) fue el primer tipo en ser desarrollada y, principalmente, ha sido utilizada en vehículos espaciales. A pesar de esto, no se cree que tenga ninguna oportunidad de competir con el resto de tipos debido a que su electrolito es muy sensitivo tanto al CO como al CO<sub>2</sub> y porque el hecho de que esté construida con metales preciosos la hace muy cara.

La FC de membrana de intercambio de protones (PEM) es, referida a la tabla 4.1,

muy atractiva para aplicaciones móviles y de transporte, principalmente debido a la alta densidad de potencia y, además, a la baja temperatura de operación. De hecho, existe literatura que sugiere que tiene una densidad de potencia aún mayor.

La FC de ácido fosfórico (PA) usa ácido fosfórico líquido como electrolito y conduce protones como la PEM. Este tipo de FC tiene una densidad de potencia menor que la de la PEM y más o menos el mismo rendimiento, pero la membrana no necesita ser humidificada como en la PEM, lo que simplifica su operación.

La FC de óxido sólido (SOFC) usa un electrolito cerámico sólido el cual reduce la corrosión y elimina los problemas de manejo asociados con los electrolitos líquidos. Para conseguir una adecuada conductividad iónica en un material cerámico el sistema debe operar en torno a 850-1000°C, lo que por otra parte reduce la necesidad de catalizadores caros. A esa temperatura, el reformado interno de combustibles derivados del carbón podría ser posible y el calor disipado por la FC podría ser fácilmente utilizado por plantas térmicas convencionales de generación de electricidad ofreciendo un excelente rendimiento. Sin embargo se producen problemas derivados de la operación a esa temperatura como la corrosión de los componentes de acero del dispositivo. Los trabajos de investigación que se están desarrollando van en la dirección de evitar esa corrosión reduciendo la temperatura operacional a 650°C.

Las FC de carbonato fundido (MC) evolucionaron a partir de trabajos en los años 60 enfocados a desarrollar una FC que pudiera operar directamente con carbón. Hoy este tipo de FC puede operar con gases derivados del carbón (H<sub>2</sub> y CO) o gas natural.

En la figura 4.2 las áreas potenciales de mercado para los distintos tipos de FC se muestran. Debido a que el área de interés de éste trabajo son aplicaciones de transporte una FC de tipo PEM es la elección más adecuada. Esto se debe principalmente a la alta densidad de potencia, lo que la hace relativamente barata y compacta.

La pila tipo PEM normalmente se alimenta de hidrógeno y aire dando lugar a un proceso limpio con agua como único producto secundario. Cuando se usa en conjunto con un motor eléctrico proporcionan una forma de transporte limpia y virtualmente libre de ruido.

### 4.2.3. Principales elementos de una PEM-FC

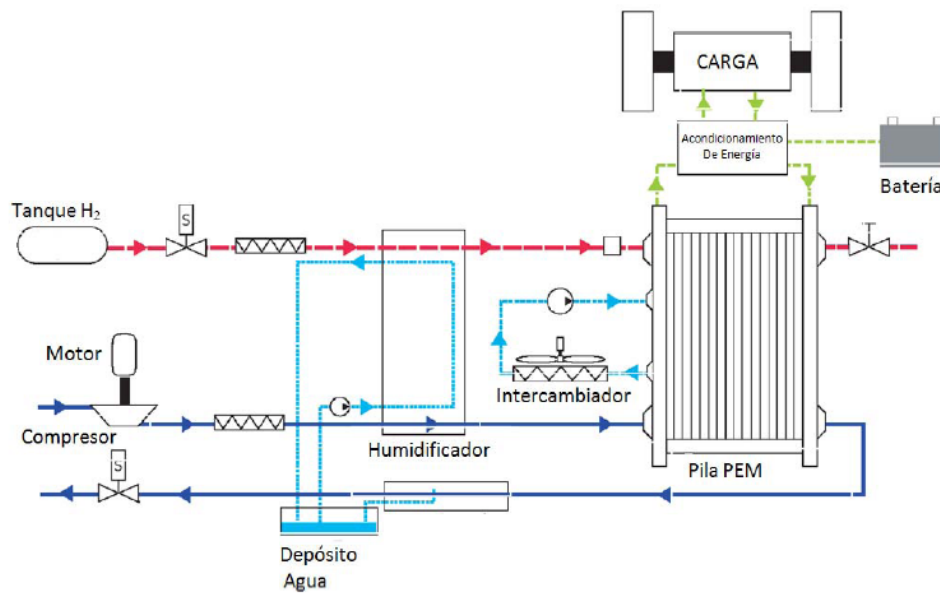


Figura 4.3. Sistema completo de Pila de Combustible (FCS).

Una FC necesita estar integrada por varios componentes auxiliares para formar el sistema completo. El diagrama de la figura 4.3 muestra los componentes mínimos requeridos para el sistema. La FC necesita cuatro sistemas auxiliares:

- Sistema de suministro de hidrógeno al ánodo: el hidrógeno es suministrado a través de un tanque de hidrógeno a alta presión. Una válvula se usa para controlar el flujo de hidrógeno.
- Sistema de suministro de aire al cátodo: un compresor y un motor eléctrico son necesarios no sólo para conseguir el flujo de aire deseado sino que además comprimen el aire hasta la presión deseada. La operación a altas presiones mejora significativamente la reacción y, por tanto, el rendimiento de la FC y su densidad de potencia [43].
- Intercambiador de calor: debido a que la temperatura de la pila debe ser mantenida por debajo de 100°C para que la membrana sea humidificada correctamente, el exceso de calor producido en la reacción debe ser disipado mediante un intercambiador de calor. Como se puede ver en la figura, el agua que actúa de refrigerante al dejar la pila pasa por el intercambiador de calor (radiador) para disipar calor del sistema.
- Humidificador: suministrando agua el humidificador añade agua al flujo de aire

y de hidrógeno. El objetivo de esto es evitar la deshidratación de la membrana.

#### 4.2.4. Estado del arte de los distintos modelos de PEM-FC

En este apartado se comentan los distintos modelos de FC que han sido utilizados para su aplicación en sistemas híbridos de propulsión y en generación distribuida y que a partir de los cuales se han surgido nuevos modelos de FC como el que se desarrolla en esta tesis para su integración en el sistema híbrido de tranvía.

Dado que estos modelos de FC forman parte de un estudio más en profundidad de algún tipo en concreto de aplicación de las FC, ninguno de estos modelos tienen en cuenta fenómenos tan concretos como la acumulación de hidrógeno e impurezas en el ánodo, la degradación de la vida de la pila o la obturación de los poros de la membrana.

Varios modelos pilas de combustible de hidrógeno se han desarrollado en la literatura científica hasta la fecha. Algunos de ellos bastante completo y con una gran aceptación a nivel global. Uno de estos casos, aparece en el libro escrito por Pukrushpan [39], considerado por muchos autores la referencia a partir de la cual se realizan sus modelos. El libro incluye un modelo detallado de pila con membrana de intercambio de protones y de los principales componentes auxiliares comentados anteriormente. El modelo de la pila, incluye un balance masas de cada uno de los gases que intervienen en el proceso, colectores de gases a la entrada y a la salida de los electrodos y un cálculo de la caída de tensión en la pila bastante completo. Respecto a los elementos auxiliares, cabe destacar el modelo del compresor, siendo éste otra de las novedades del libro.

En el año 2005 varios autores desarrollaron en sus trabajos modelos reducidos de PEM-FC a partir del modelo de Pukrushpan. De esta forma, Caux *et al.* [44] desarrollan un modelo reducido de pila considerando en él los principales elementos auxiliares. El modelo es aplicado al sector del transporte de vehículos, realizando en él simplificaciones en el compresor, modelando además tres válvulas en su sistema de FC, una para controlar el hidrógeno entrante en el ánodo, otra para controlar la presión del cátodo y una tercera que realiza una purga de agua en el ánodo. Ese mismo año, Miotti *et al.* [45] realizan un modelo de FC, en el cual se vuelve a realizar una simplificación del compresor mediante una función de transferencia con parámetros obtenidos experimentalmente. Además, eliminan los colectores y mediante un controlador PI realizan un control orientado a vehículos. También ese año, Wang *et al.* [46] publican en la revista de la IEEE Transactions on Energy Conversion, un modelo sólo para el

cálculo de la tensión de salida de la pila, sin los elementos auxiliares, en él, se desarrolla el comportamiento dinámico de la pila mediante circuitos eléctricos, realizando las simulaciones en Pspice y en Simulink de Matlab.

En el año 2006, Uzunoglu y Alam [20] realizan un modelo de pila sencillo en el que no se considera el compresor. La aplicación que se le da es principalmente para trenes, obteniendo resultados bastante aceptables en sus simulaciones. Este modelo de FC fue presentado un año antes por los estos mismos autores un año después [21] aplicando el modelo al sector de la generación distribuida. En este caso el compresor no es modelado y es sustituido por una función de transferencia que calcula el hidrógeno necesario a partir de metanol.

El mismo autor de los dos artículos anteriores, Alam publica junto con Yalcinoz [22] en el año 2008 un modelo de pila basado en funciones de transferencia, en él, respecto a los artículos anteriores, se realiza un cálculo más detallado de la presiones parciales y de las caídas de tensión que suceden en la pila. Este mismo año se publica un trabajo en el que se usa identificación de modelos para modelar una FC del tipo PEM en [47].

A principios de 2009, El-Sharkh *et al.* [48] realizan un modelo de pila basado en funciones de transferencia de Laplace. El modelo no lleva elementos auxiliares ya que realizan su aplicación a dispositivos portátiles de bajo consumo de potencia.

En 2010, Hou *et al.* publicaron un modelo dinámico de la tensión en una pila PEM [49]. Dicho modelo tiene como objetivo investigar los efectos que tiene una variación de la demanda de intensidad de la FC en la tensión de ésta. Es, sencillamente, una función de la tensión de la FC en función de la intensidad que refleja las fluctuaciones de la tensión. La utilidad de éste se encuentra en que podría ser útil para el control en tiempo real de sistemas de FC.

En 2011, en la revista Fuel cells [50] se presenta un procedimiento de caracterización de pilas de combustible mediante modelos numéricos. Para ello se recogen datos de experimentos realizados con dos FC tipo PEM diseñadas para diferentes aplicaciones. Una es para suministrar energía eléctrica, alimentada por hidrógeno puro, para transporte o para ser usada en lugares con demanda ininterrumpida de energía eléctrica. La otra, alimentada con un gas reformado, es para suministrar calor y electricidad en aplicaciones residenciales. Utilizando la metodología explicada en el artículo sacan una serie de parámetros para construir un modelo de cada FC que calcula la tensión de la FC

a partir de la demanda de intensidad. Está basado en la ecuación de Nerst para obtener la tensión de la FC y a ésta se le aplican las pérdidas óhmicas y las de activación. Dichas pérdidas son modeladas con los datos obtenidos de forma experimental. Ese mismo año, siguiendo la senda de trabajos vinculados con la identificación de modelos se publica en [51] un modelo no lineal de una pila Nuvera de 150kW para aplicaciones de vehículos híbridos.

#### 4.2.5. Modelo de pila de combustible

En los siguientes sub-apartados se desarrolla el modelo de PEM-FC utilizado para las simulaciones. Respecto al modelo utilizado hay que decir que es una simplificación del modelo presentado por Pukrushpan en su libro [39]. Dicho modelo simplificado se corresponde con el presentado en la revista Fuel Cells por García et al. [52] denominado “Modelo Reducido 1” (MR1). La elección de este modelo frente a otros citados en el anterior apartado se debe a que el modelo incluye el modelo de FC junto a los sistemas auxiliares de suministro de hidrógeno, suministro de aire (con compresor) y humidificador. Además su comportamiento es similar al modelo completo propuesto en [39], reduciendo considerablemente el tiempo de simulación debido a su sencillez.

Otros modelos más recientes citados en el estado del arte se han descartado debido a que, entre otras cosas, no consideran el compresor (hay que tener en cuenta que en una pila de una potencia de 150 kW la potencia consumida por éste puede llegar a los 10 kW y, por tanto, no sería preciso despreciarlo) o simplemente sólo calculan la tensión a partir de la intensidad demandada.

La pila comercial a modelar se corresponde con la pila FCvelocity-HD6 de Ballard, y es capaz de desarrollar una potencia neta de 150kW a una tensión de 616V. Ésta y otras características de la pila aparecen en [36], y son mencionadas en la siguiente tabla.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Potencia de la pila	150kW
Tensión de servicio	800-550V
Intensidad máxima	300A
Combustible	Hidrógeno gaseoso
Oxidante	Aire
Presión del hidrógeno (mínima)	12bar
Presión del aire	1.2bar
Temperatura nominal	63°C

Tabla 4.2. Especificaciones de la pila FCvelocity-HD6 de Ballard.

#### **4.2.5.1. Descripción del modelo utilizado**

Este modelo está formado por:

- Un compresor con un motor de corriente continua, el cual controla el caudal de aire (oxígeno) que debe entrar al cátodo. El compresor es modelado como un sistema de primer orden con el fin de aproximar su respuesta dinámica.
- Una válvula para controlar el caudal de entrada de hidrógeno al ánodo.
- Los bloques de ánodo y cátodo que realizan el balance de masas únicamente del hidrógeno y del oxígeno respectivamente con objeto de calcular sus presiones parciales.
- El bloque del cálculo de la tensión de salida de la pila.

Las simplificaciones que se han tenido en cuenta para este modelo respecto al completo son:

- Los gases que intervienen en el proceso son considerados ideales.
- La pila es alimentada con hidrógeno y oxígeno por lo que únicamente se realiza el balance de masas a estos gases.
- Considerando el reducido tamaño de los canales de los electrodos, la caída de presión en ellos puede considerarse cero.
- La relación de presión existente entre la entrada y la salida del canal del electrodo es suficientemente grande como para asumir el estrangulamiento del caudal.
- Asumiendo que el oxígeno y el hidrógeno procedentes respectivamente de un compresor y de un tanque presentan un caudal másico estable, los colectores de entrada al cátodo y al ánodo han sido eliminados.
- Los colectores de salida han sido eliminados considerando que el caudal de salida de cualquier gas es proporcional a su presión parcial dentro del electrodo.
- El humidificador y el intercambiador de calor, son considerados ideales, por lo que se considera que la pila trabaja a una temperatura óptima (80°C) con una humedad relativa constante.
- El compresor es modelado como un sistema de primer orden con el fin de

aproximar su respuesta dinámica.

La figura 4.4 muestra la configuración propuesta para el modelo de PEM-FC. En los siguientes subpartados se profundizará en cada uno de los bloques que forman el modelo global del sistema de FC.

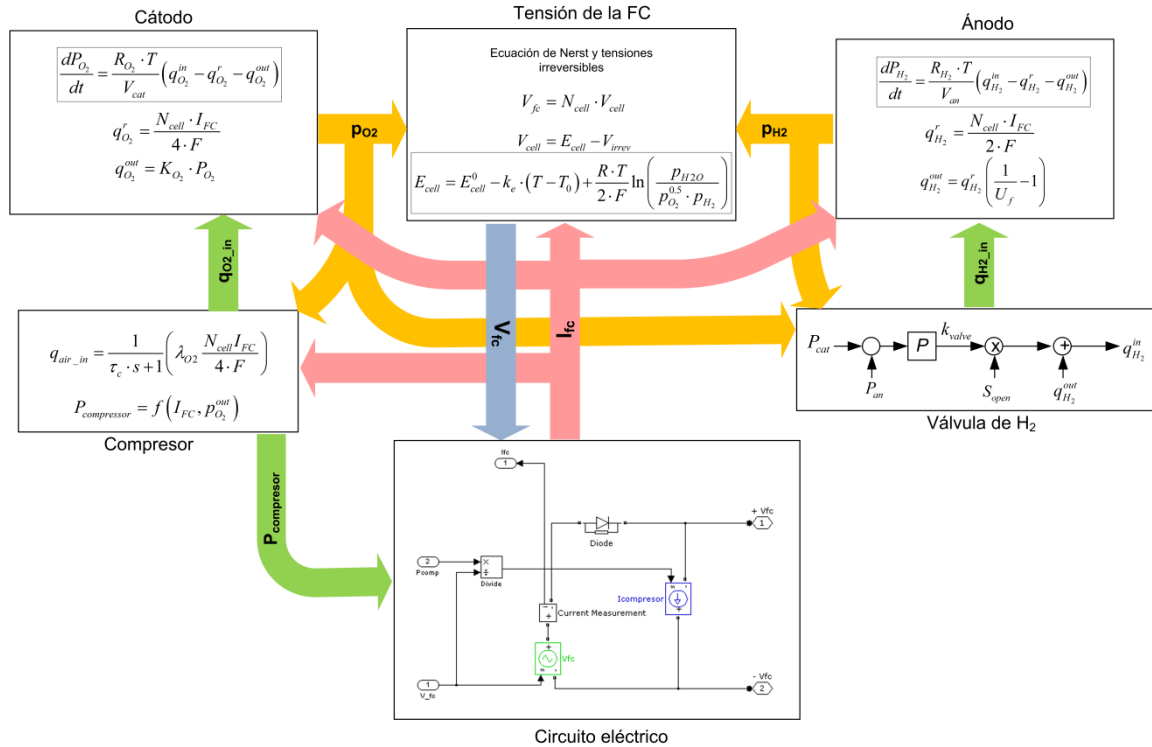


Figura 4.4. Configuración del modelo de FC utilizado.

#### 4.2.5.1.1. Modelado del ánodo

En el ánodo ocurre la reacción de oxidación del hidrógeno, suministrado por el tanque, mediante la liberación de electrones, los cuales pasan al otro electrodo mediante la carga externa conectada.

Considerando como volumen de control el ánodo de la pila (Figura 4.5b) y teniendo en cuenta únicamente el caudal de hidrógeno, la presión parcial de éste en el ánodo es calculada mediante la ley de conservación de masas y la ley de gases ideales. Así, la presión parcial del hidrógeno es obtenida mediante las siguientes ecuaciones.

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{R_{H_2} \cdot T_{fc}}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^r - q_{H_2}^{out}) \quad (4.4)$$

Donde  $R_{H_2}$  es la constante de gas ideal para el hidrógeno,  $T_{fc}$  es la temperatura de trabajo en el ánodo,  $V_{an}$  es el volumen del ánodo,  $q_{r H_2}$  es el caudal de hidrógeno que



reacciona en el ánodo, el cual es obtenido de la Ley de Faraday,  $q_{in\ H_2}$  es el caudal de hidrógeno entrante en el ánodo, y  $q_{out\ H_2}$  es el caudal de salida del ánodo.

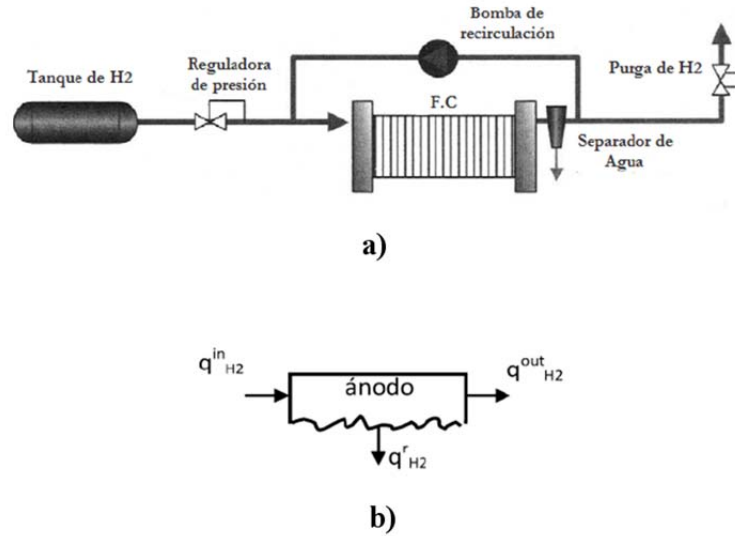


Figura 4.5. a) Modelo del ánodo y b) balance de masas en el ánodo.

El cálculo del caudal de hidrógeno que reacciona es conocido mediante la Ley de Faraday:

$$q_{H_2}^r = \frac{N_{fc} \cdot I_{FC}}{2 \cdot F} \quad (4.5)$$

Donde  $N_{fc}$  es el número de celdas necesarias para conseguir la tensión de salida de la pila,  $I_{FC}$  es la actual intensidad generada por la pila, y  $F$  es la constante de Faraday.

El caudal de salida corresponde al hidrógeno que no ha sido utilizado en el ánodo, el cual es calculado imponiendo el factor de utilización de la pila. Este factor,  $U_f$ , ha sido seleccionado a partir de las características técnicas de la pila comercial utilizada en el este trabajo [36] donde un valor próximo a 1/3 es recomendado.

$$q_{H_2}^{out} = q_{H_2}^r \left( \frac{1}{U_f} - 1 \right) \quad (4.6)$$

Donde

$$U_f = \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2}^{in}} \quad (4.7)$$

El caudal de hidrógeno de entrada,  $q_{in H_2}$ , es calculado como la suma del caudal de hidrógeno proveniente del tanque mediante la válvula de entrada  $q_{valve H_2}$  y el caudal de hidrógeno de vuelta (hidrógeno que no ha reaccionado)  $q_{back H_2}$ .

$$q_{H_2}^{in} = q_{H_2}^{valve} + q_{H_2}^{back} \quad (4.9)$$

Por su parte, el caudal que suministra esta válvula situada aguas arribas del ánodo, es calculada con el objetivo de minimizar la diferencia de presiones entre el ánodo y cátodo [39], [53], [54]. La figura 4.6 muestra el control realizado para esta válvula, donde el caudal de hidrógeno que pasa por ella puede ser expresado en función de la máxima sección de apertura de la válvula y una constante que varía dependiendo de la diferencias de presiones entre en ánodo y el cátodo [44].

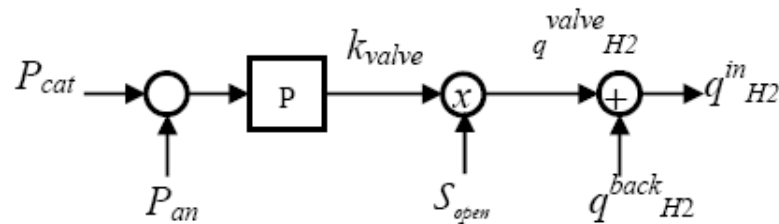


Figura 4.6. Control de la válvula de entrada de hidrógeno.

$$q_{H_2}^{valve} = S_{open} \cdot k_{valve} \quad (4.10)$$

Finalmente, el factor de utilización global es definido como la relación entre el caudal de hidrógeno que reacciona y el que suministra la válvula.

$$U_{fg} = \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2}^{valve}} \quad (4.11)$$

#### 4.2.5.1.2. Modelado del cátodo

En el cátodo, ocurre la reacción de reducción del oxígeno procedente de aire mediante la captación de electrones. Similarmente al ánodo, tomando en este caso el

cátodo como volumen de control, la presión parcial del oxígeno puede ser obtenido de las siguientes ecuaciones.

$$\frac{dP_{O_2}}{dt} = \frac{R_{O_2} \cdot T}{V_{cat}} (q_{O_2}^{in} - q_{O_2}^r - q_{O_2}^{out}) \quad (4.12)$$

$$q_{O_2}^r = \frac{N \cdot I_{FC}}{4 \cdot F} \quad (4.13)$$

Donde  $R_{O_2}$  es la constante de gas ideal para el oxígeno,  $V_{cat}$  es el volumen del cátodo,  $q_{in O_2}$ , es el caudal de oxígeno procedente del compresor y  $q_{out O_2}$  y  $q_r O_2$  son los caudales de salida y que reacciona en cátodo respectivamente.

El caudal de oxígeno de salida,  $q_{out O_2}$ , es calculado a partir de la relación existente entre el flujo molar del oxígeno y su presión parcial dentro del cátodo [21], [48], [54].

$$\frac{q_{O_2}}{P_{O_2}} = \frac{K_{cat}}{\sqrt{M_{O_2}}} = K_{O_2} \quad (4.12)$$

$$q_{O_2}^{out} = K_{O_2} \cdot P_{O_2} \quad (4.13)$$

Las presiones totales en el ánodo y en el cátodo son calculadas a partir de las siguientes expresiones.

$$P_{an} = P_{H_2} + P_{agua\_an} \quad (4.14)$$

$$P_{cat} = P_{O_2} + P_{N_2} + P_{agua\_cat} = P_{O_2} + P_{O_2} \cdot K_{te} + P_{agua\_cat} \quad (4.15)$$

Donde  $P_{agua\_an}$  y  $P_{agua\_cat}$  son las presiones parciales del agua en el ánodo y en el cátodo; habiéndose consideradas como constante para la realización de la aproximación y  $P_{N_2}$  es la presión parcial del nitrógeno la cual ha sido considerada proporcional a la presión parcial de oxígeno.

#### 4.2.5.1.3. Modelado de la tensión de la pila

La tensión de salida de la pila,  $V_{fc}$  es calculada a partir del producto entre el número de celdas por las que esté formada la pila y la tensión de una celda. Por su parte, la

tensión de una celda es expresada a partir de la tensión instantánea de Nernst,  $E_{cell}$  y la tensión irreversible o caída de tensión.  $V_{irrev}$  [46].

$$V_{fc} = N \cdot V_{cell} \quad (4.16)$$

$$V_{cell} = E_{cell} - V_{irrev} \quad (4.17)$$

$$E_{cell} = E_{cell}^0 - k_e \cdot (T - T_0) + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \ln \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{O_2}^{0.5} \cdot P_{H_2}} \right) \quad (4.18)$$

Donde  $E_{cell}^0$  es la tensión estándar reversible de la pila,  $k_e$  es una constante que depende del cambio de entropía en el proceso y de la constante de Faraday,  $T$  es la temperatura de la pila, y  $R_g$  es la constante de gases ideales.

La tensión irreversible  $V_{irrev}$ , representa la caída de tensión debido a múltiples mecanismo irreversible del proceso, los cuales hacen que la tensión teórica de la pila ( $E_{cell}$ ) disminuya su valor. Estas tensiones irreversibles son calculadas como la suma de la caída de tensión por activación  $V_{act}$ , caída de tensión por concentración  $V_{conc}$  y caída de tensión óhmicas  $V_{ohmic}$ .

La caída de tensión por activación es causada por la pereza de la reacción en la superficie del electrodo. Una forma sencilla de calcularla es mediante el uso de la ecuación de Tafel [46].

$$V_{act} = \frac{R_g T}{2 F \alpha} \lg \left( \frac{i_{den}}{i_0} \right) \quad (4.20)$$

Donde  $i_{den}$  es la densidad de corriente (relación entre la actual intensidad generada por la pila y el área efectiva de ella),  $i_0$  es la densidad de corriente intercambiada durante la reacción y  $\alpha$  es el coeficiente de traspaso de carga de la reacción total que se produce en la pila.

La caída de tensión por concentración  $V_{conc}$  es causada por la bajada de concentración de los reactivos cuando son consumidos por la ecuación electroquímica. Es calculada mediante la siguiente ecuación.

$$V_{conc} = \frac{R_g T}{2F} \lg \left( 1 - \frac{i_{den}}{i_{lim}} \right) \quad (4.21)$$

Donde  $i_{lim}$  es la máxima densidad de corriente que puede generar la pila.

Las caídas de tensión óhmicas,  $V_{ohmic}$ , son debidas de la resistencia interna intrínseca de los electrolitos. Pueden ser expresadas como:

$$V_{ohmic} = R_{fc} \cdot i_{dem} \quad (4.22)$$

Dónde  $R_{fc}$  representa la resistencia de los electrolitos en ohmios por  $cm^2$ .

En la figura 4.7 aparece representada las distintas caídas de tensión comentadas anteriormente y la caída de tensión total en función de la densidad de corriente de la pila.

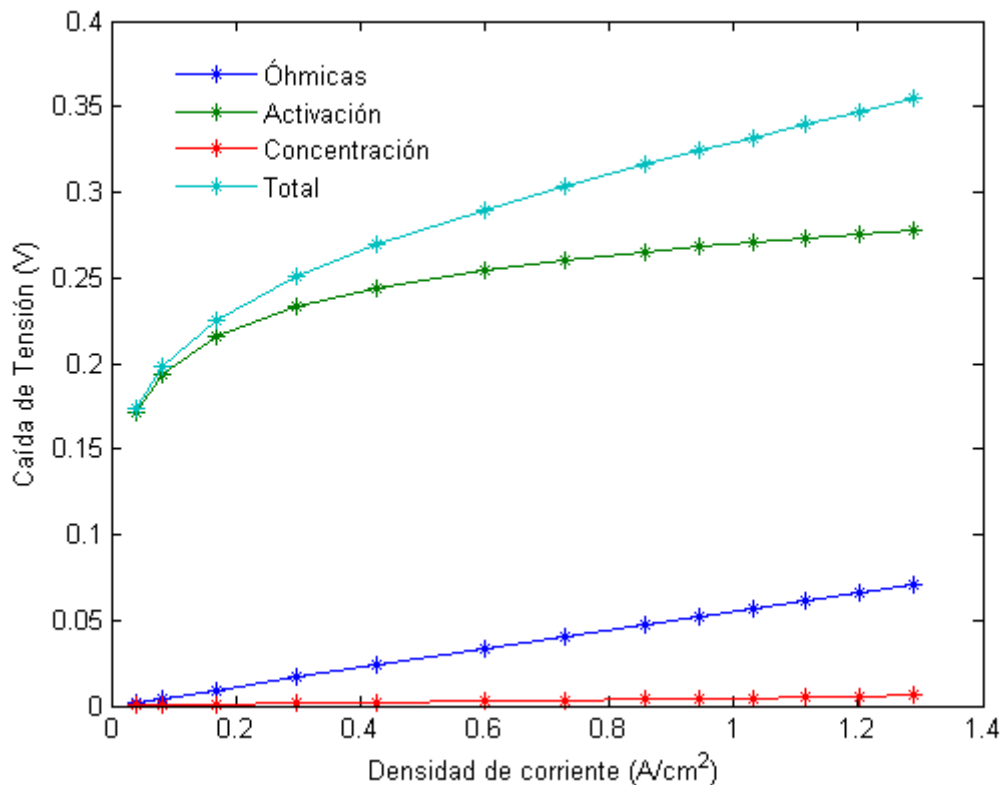


Figura 4.7. Curva estática de la pila de hidrógeno.

La figura 4.8a muestra la curva de polarización del modelo de pila propuesto junto con los datos de la curva real de la pila comercial facilitados por Ballard a Hynergreen. Podemos observar cómo la curva de polarización obtenida por el modelo se ajusta

fielmente a la real para valores de densidad de corriente entre 0.1 y 1.1 A/cm<sup>2</sup>. Para muy pequeñas densidades de corriente (0 a 0.1 A/cm<sup>2</sup>) se puede ver que es donde el modelo no refleja bien el comportamiento real de la pila. Pese a ello, se puede considerar el modelo válido debido a que en las simulaciones con las estrategias de control la pila nunca va a llegar a desconectarse, puesto que va a funcionar como mínimo a 15 kW que coincide aproximadamente con 0.1 A/cm<sup>2</sup> de densidad de corriente. Por tanto, el modelo de pila no funcionará en la zona de la curva de polarización en la que no refleja la realidad.

La figura 4.8b muestra la potencia que es capaz de generar la pila en función de la densidad de corriente actual. En este caso, se observa como la potencia máxima neta de la pila es de unos 150 kW con una densidad de corriente de 1 A/cm<sup>2</sup>.

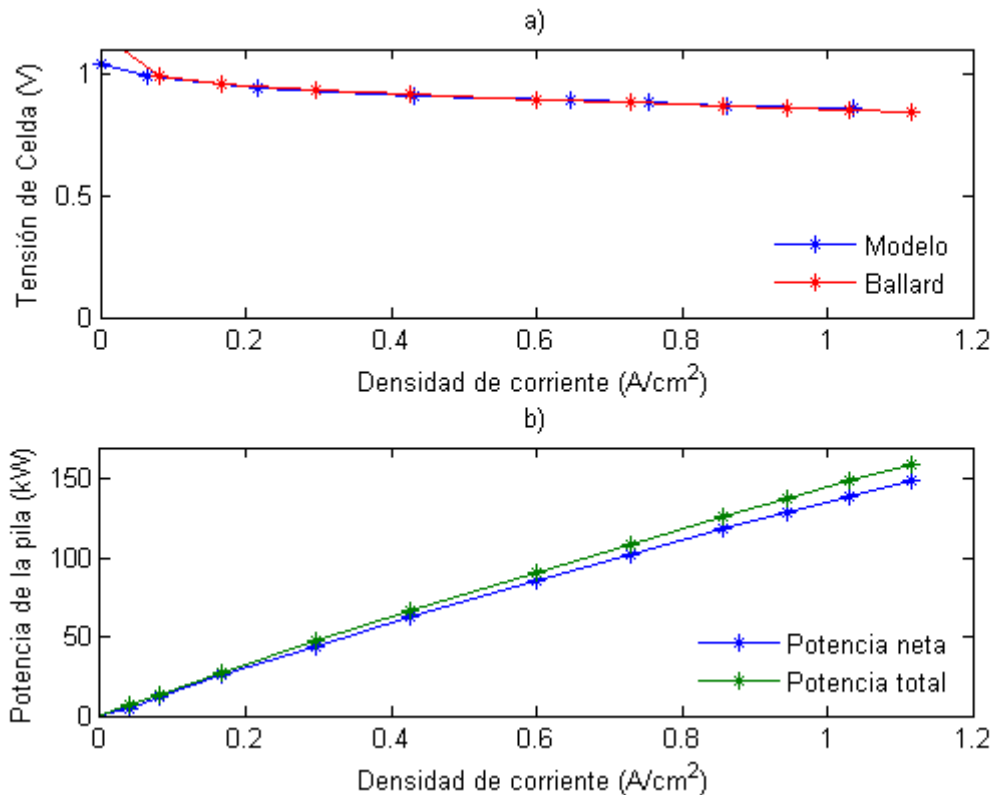


Figura 4.8. a) Curvas estáticas: datos reales y del modelo. b) potencia generada por la pila (según modelo).

#### 4.2.5.1.4. Modelado del compresor

El principal propósito del modelo del compresor es el suministrar el caudal aire al cátodo manteniendo un exceso de oxígeno  $\lambda_{O_2}$  igual a 2,5. Este exceso de oxígeno es definido como la relación entre el oxígeno suministrado y que el reacciona en el cátodo.

$$\lambda_{O_2} = \frac{q_{O_2}^{in}}{q_{O_2}^r} \quad (4.23)$$

El exceso de oxígeno está relacionado con el caudal de aire entrante a través de la siguiente expresión.

$$q_{aire\_in}^* = \left( 1 + \frac{M_v \cdot p_{sat}(T_{atm})}{M_a \cdot p_{atm} - p_{sat}(T_{atm})} \right) \cdot \frac{1}{x_{O_2}} \cdot \lambda_{O_2} \cdot M_{O_2} \frac{N \cdot I_{FC}}{4 \cdot F} \quad (4.24)$$

Donde el modelo del compresor realizado en [39], es simplificado y sustituido por un modelo de primer orden que modela el retraso en el tiempo que es el debido al compresor.

$$q_{aire\_in} = \frac{q_{aire\_in}^*}{\tau_c \cdot s + 1} \quad (4.25)$$

Donde  $x_{O_2}$  es la fracción de oxígeno en el aire,  $M_a$  es el peso molar del aire seco,  $T_{atm}$  es la actual temperatura atmosférica (constante para el modelo),  $p_{sat}$  es la presión de saturación del agua, la cual es función de la temperatura atmosférica,  $p_{atm}$  es la presión atmosférica,  $F$  es la constante de Faraday y  $N$  el número de celda del modelo de la pila.

En el caso del modelo completo, el flujo de aire entrante en el cátodo es determinado a través de las gráficas caudal frente a presión de salida y mediante un método de curvas no lineales que modela las características del compresor.

Finalmente, el modelado del compresor es completado con el cálculo de la potencia requerida para generar el par solicitado, el cálculo del par motor del motor de corriente continua y el cálculo de la velocidad de giro del compresor mediante la ecuación de equilibrio de pares o 2ª Ley de Newton, tal y como aparece en [39].

$$T_{cp} = \frac{C_P \cdot T_{atm}}{\omega_{cp} \eta_{cp}} \left[ \left( \frac{P_{cat}}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \cdot q_{aire\_in} \quad (4.26)$$

$$T_{cm} = \eta_{cm} \frac{k_t}{R_{cm}} (v_{cm} - k_v \omega_{cp}) \quad (4.27)$$

$$J_{cp} = \frac{d\omega_{cp}}{dt} = (T_{cm} - T_{cp}) \quad (4.28)$$

Donde  $T_{cp}$  es el par del compresor necesario para impulsar el aire,  $\eta_{cp}$  es el rendimiento del compresor,  $\gamma$  es la relación de calores específicos del aire,  $k_t$ ,  $R_{cm}$  y  $k_v$ , son constantes de motor de corriente continua,  $v_{cm}$  es la tensión de alimentación al motor,  $\eta_{cm}$  es el rendimiento mecánico del motor.  $T_{cm}$  es el par motor,  $\omega_{cp}$  es la velocidad de giro del motor y  $J_{cp}$  es la inercia del sistema motor-compresor.

#### 4.2.5.1.5. Consumo de H<sub>2</sub> y rendimiento de la pila

El rendimiento de una pila de combustible puede ser cálculo en función de la tensión unitaria de salida de la pila [55]. De esta forma el rendimiento se puede calcular como:

$$\eta_{stack} = \frac{V_{cell}}{E_{cell}^0} \quad (4.29)$$

Donde  $E_0$  cell tiene un valor constante de 1.184 voltios.

Por otra parte, el rendimiento total del sistema de pila de combustible, considerando los elementos auxiliares se calcula mediante la siguiente expresión.

$$\eta_{FCS} = \frac{\int_{cycle} P_{FCi}}{\int_{cycle} P_{H_2}} \quad (4.30)$$

Donde  $P_{FCi}$  sería la potencia de salida de la pila, (potencia generada por la pila menos la potencia consumida por el compresor) y  $P_{H_2}$  es la potencia asociada al consumo de hidrógeno.

El cálculo de  $P_{fc}$  y  $P_{H_2}$  se desarrollan a continuación.

$$P_{FCi} = V_{fc} \cdot I_{fc\_neta} = V_{fc} \cdot (I_{fc\_back} - I_{com}) = P_{FCTi} - P_{com} \quad (4.31)$$

$$P_{H_2} = \frac{P_{FCTi}}{\eta_{therm} \cdot U_{fg} \cdot \eta_{stack}} \quad (4.32)$$

Donde  $P_{FCTi}$  es la potencia es la potencia total generada por un sistema de FC.



Además, se observa que, atendiendo a la figura 4.4, la intensidad neta de salida ( $I_{fc\_neta}$ ) es la intensidad que está generando la pila y que realimenta al modelo ( $I_{fc\_back}$ ) menos la intensidad absorbida por el compresor ( $I_{com}$ ); o expresado en términos de potencia, la potencia neta generada por el sistema de pila de combustible es la potencia total generada por la pila menos la absorbida por el compresor. Por otra parte, en la ecuación (4.30) aparece el término  $\eta_{therm}$  que representa el rendimiento termodinámico de la pila, el cual puede ser definido como la relación entre la variación de la energía libre de Gibbs y la variación de la entalpía de la pila durante la reacción; este valor es tomado normalmente como 0.98 para pilas que trabajen a bajas temperaturas tal y como es el caso que se está estudiando.

Finalmente, el consumo de hidrógeno por parte del sistema completo de FC se puede calcular de acuerdo a la siguiente expresión.

$$Q_{H_2} = \frac{1}{E_{B\_H_2}} \int P_{H_2} \cdot dt \quad (4.33)$$

Donde  $E_{B\_H_2}$  es el poder calorífico inferior del hidrógeno; 120 MJ/Kg. Otra forma de calcular el consumo de hidrógeno es mediante la integración en el tiempo del caudal de hidrógeno suministrado por la válvula situada aguas arriba del ánodo.

En la figura 4.9 se muestra el rendimiento del sistema de pila de combustible utilizado para las simulaciones. En la figura aparece el rango potencia en el cual se hará funcionar a cada FC durante las distintas simulaciones, de forma que se evite en todo momento que esta tenga que hacer un arranque desde cero y que trabaje en una región de bajo rendimiento. Autores como [56], [57] tienen en cuenta estas consideraciones en sus trabajos con sistemas híbridos basados en FC. Además, se observa cómo el rendimiento máximo sucede con una densidad de corriente alrededor de  $0.3A/cm^2$ , que corresponde con una potencia total de unos 47kW atendiendo a la figura 4.8b. Este hecho también será considerado más adelante en las distintas simulaciones, especialmente en el control por estados y en el control por lógica difusa, donde se pretende que la pila trabaje en un rango de potencias próximo a este valor.

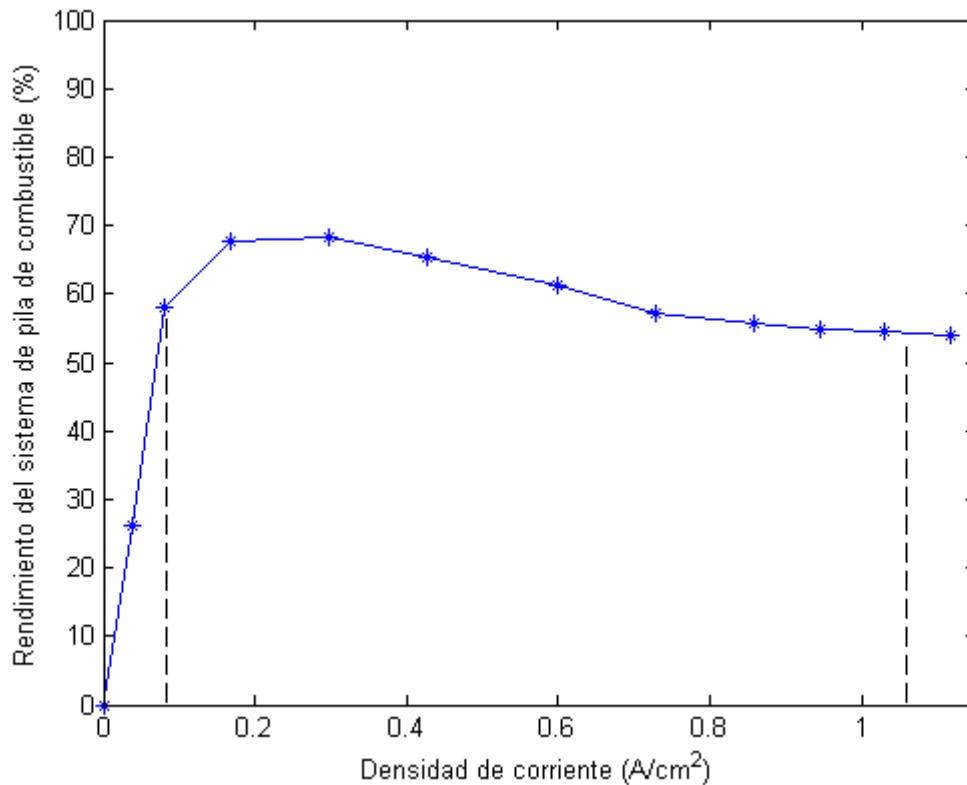


Figura 4.9. Rendimiento del sistema pila de combustible.

#### 4.2.5.1.6. Dimensionamiento del modelo de pila

Para poder implementar el modelo de la pila de combustible, es necesario conocer el número de celdas que se vaya utilizar, así como el área efectiva de trabajo de la pila y la resistencia interna de la misma. Para esto, y teniendo como referencia el modelo de pila de combustible que aparece en [39], estos valores han sido obtenidos a partir de los parámetros que en toda pila de combustible de hidrógeno se mantienen constantes. Estos parámetros iniciales y necesarios para el dimensionado de la pila son:

- Tensión unitaria de celda a potencia nominal:  $V_{cell}$  (Voltios). Se toma el valor de 0.84V siguiendo las características técnicas de la pila de la cual se hará el estudio [36].
- Densidad de corriente máxima de trabajo:  $i_{dem\_max}$  (A/cm<sup>2</sup>). Se toma máximo de 1.12 A/cm<sup>2</sup> según la curva de polarización facilitada por Hynergreen.
- Tensión de la pila a potencia nominal:  $V_{fc\_nom}$  (Voltios). Se toma el valor de la pila FCvelocity-HD6 de Ballard; 626V.
- Potencia neta nominal ( $P_{fc}$  en kW) y potencia total nominal de la pila ( $P_{fc\_total}$

kW).

Según el dimensionamiento del sistema híbrido de tranvía a estudiar y considerando las potencias de las pilas comerciales que actualmente existen para aplicaciones de transporte, se considera una potencia neta máxima a generar por la pila de 160kW y una potencia total nominal de 150kW. Según estos datos podemos calcular los siguientes valores que caracterizan a la pila de hidrógeno utilizada en las simulaciones.

- Número de celdas necesarias: (N) El número de celdas de la pila comercial utilizar es un dato que aparece en las características técnicas de la misma. Aun así, el número de celdas necesarias se podría calcular sencillamente mediante:

$$N = V_{fc} / V_{cell} \quad (4.34)$$

- Área efectiva: ( $A_{fc}$ )

$$I_{fc\_max} = \frac{P_{fc\_total}}{V_{fc\_nom}} \quad (4.35)$$

$$A_{fc} = \frac{I_{fc\_max}}{i_{dem\_max}} \quad (4.36)$$

- Resistencia Interna: ( $R_{fc}$ ). Atendiendo a curva polarización de la pila Ballard. La resistencia interna de la pila puede ser aproximada a la pendiente de la curva entre tramo lineal de la misma obteniéndose  $0.3\Omega$ . Es decir,

$$R_{fc} = \frac{i_{dem\_2} - i_{dem\_1}}{V_{cell\_2} - V_{cell\_1}} \quad (4.37)$$

### 4.3. Modelo de batería

#### 4.3.1. Introducción

Las baterías electroquímicas, denominadas simplemente como baterías, son dispositivos electroquímicos que convierten energía eléctrica en química durante las cargas, y convierten energía química en eléctrica durante las descargas. Una batería se compone de diversas celdas apiladas juntas. Una celda es una unidad independiente y

completa que posee todas las propiedades electroquímicas. Básicamente, una celda consiste en tres elementos primarios: dos electrodos (positivo y negativo) inmersos en un electrolito como muestra la figura 4.10.

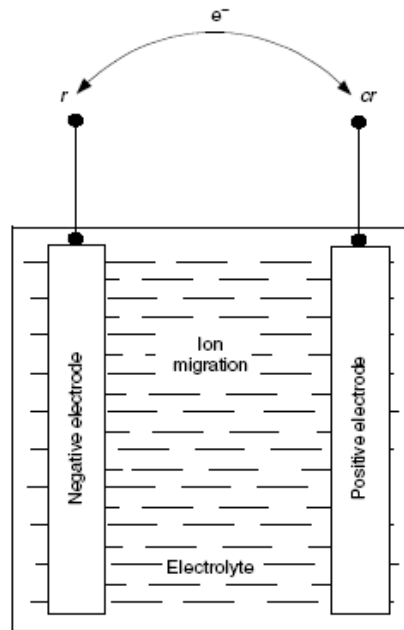


Figura 4.10. Celda electroquímica típica de una batería.

Los fabricantes de baterías normalmente designan las baterías con su capacidad coulométrica (en amperios-hora, Ah), que se define como el número de amperios hora alcanzados durante la descarga de la batería desde un estado de carga completa hasta que la tensión del terminal alcanza su tensión de corte (“cut-off voltaje”), como se muestra en la figura 4.11a. Se debe explicar que la misma batería normalmente tiene diferente número de amperios-hora a diferentes velocidades de descarga. Generalmente, la capacidad se hará más pequeña con velocidades de descarga mayores, como se muestra en la figura 4.11b. Los fabricantes normalmente especifican una batería con un número de amperios hora junto con una velocidad de descarga. Por ejemplo, una batería etiquetada con 100 Ah a una velocidad de C5 tiene una capacidad de 100 amperios hora durante 5 horas (y la corriente de descarga sería  $100\text{Ah}/5\text{h}=20\text{ A}$ ).

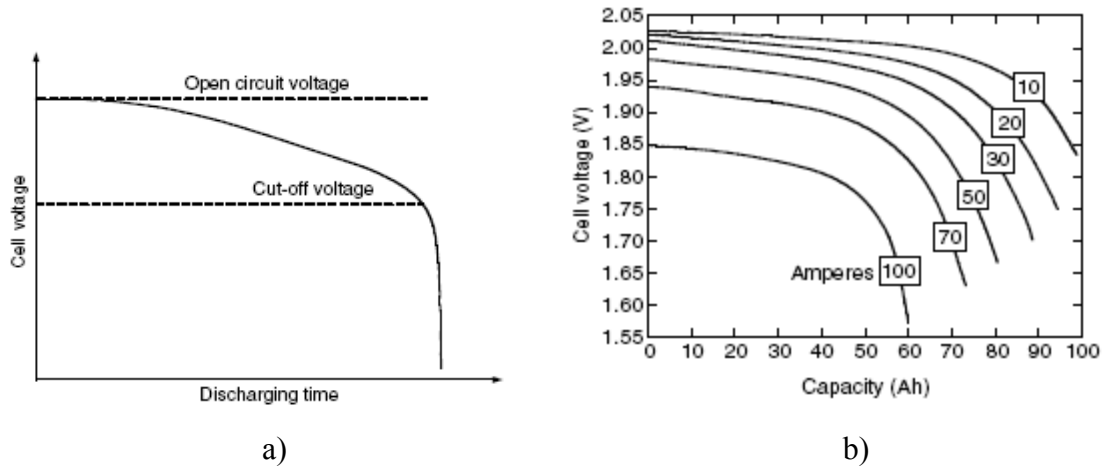


Figura 4.11. a) Tensión de corte típica de una batería. b) Características de descarga de una batería de plomo-ácido.

Otro parámetro importante de una batería es el estado de carga (State Of Charge, SOC). El SOC se define como el tanto por ciento de capacidad restante de la batería. Con esta definición, una batería totalmente cargada tiene un SOC de 100% y una totalmente descargada tiene un SOC de 0%. Sin embargo, el término “totalmente descargada” algunas veces causa confusión debido a la diferente capacidad y tensión de corte a diferentes velocidades de descarga. El cambio del SOC en un intervalo de tiempo,  $dt$ , con la intensidad de carga o descarga  $i_{bat}$  puede ser expresado como:

$$\Delta SOC = \frac{i_{bat} \cdot dt}{Q(i_{bat})} \quad (4.38)$$

donde  $Q(i_{bat})$  es la capacidad en amperios hora de la batería a una intensidad de descarga  $i_{bat}$ . Para descargas,  $i_{bat}$  es positiva, y por carga,  $i_{bat}$  es negativa. Por tanto, el SOC de la batería puede ser expresado como:

$$SOC_{bat} = SOC_{bat0} - \int \frac{i_{bat} \cdot dt}{Q(i_{bat})} \quad (4.38)$$

donde  $SOC_{bat0}$  es el valor inicial del SOC.

Para vehículos eléctricos e híbridos, la capacidad energética se considera más importante que la capacidad coulométrica (Ah), porque está directamente asociada con la operación del vehículo. La energía proporcionada por la batería se puede expresar como:

$$EC = \int_0^t V(i_{bat}, SOC_{bat}) \cdot i_{bat}(t) dt \quad (4.39)$$

donde  $V(i, SOC)$  es la tensión en los terminales de la batería, que es función de la intensidad de ésta y del SOC.

A parte de éstos parámetros también tienen importancia la tensión termodinámica, la energía específica y la potencia específica. La tensión específica de una celda está fuertemente asociada con la energía liberada y el número de electrones transferidos en la reacción. La energía específica se define como la capacidad de energía por unidad de masa de la batería (Wh/kg). La potencia específica se define como la máxima potencia que la batería puede producir en un periodo corto de tiempo por unidad de masa de la batería.

#### 4.3.2. Tipos de baterías

Las baterías viables para aplicaciones en vehículos eléctricos e híbridos [58] son: las de plomo-ácido, las basadas en níquel como níquel-cadmio, y níquel-metal hidruro, y las basadas en litio como ión litio.

##### 4.3.2.1. Baterías de plomo ácido

Las baterías de plomo ácido han sido un producto exitoso durante unos cien años y aún son ampliamente utilizadas como dispositivo de almacenamiento en el campo de la automoción y otras aplicaciones. Sus ventajas son su bajo coste, su madurez tecnológica, relativa alta potencia específica y buen ciclo de vida. Estas ventajas son atractivas para su aplicación en vehículos híbridos donde la alta potencia es la primera consideración. A parte de eso, los materiales involucrados (plomo, óxido de plomo y ácido sulfúrico) son bastante bajos en precio. Estas baterías también tienen bastantes inconvenientes. La energía específica de éstas es baja, debido principalmente al alto peso molecular del plomo. Sus características se ven perjudicadas por la temperatura. Por debajo de 10°C, su potencia específica y su energía específica se reducen drásticamente. Este aspecto limita seriamente su uso en vehículos que operan en climas fríos.

Por otro lado, cuando son utilizadas en vehículos se ha de tener en cuenta que la presencia de ácido sulfúrico altamente corrosivo supone una amenaza potencial para los ocupantes del vehículo. Además, el hidrógeno liberado por las reacciones de auto

descarga es otro peligro potencial, ya que este gas es extremadamente inflamable aún en pequeñas concentraciones. Por tanto, para proporcionar un buen nivel de protección contra derrames de ácido, es necesario sellar la batería atrapando así los gases parasitarios en la carcasa. Como resultado, la presión puede aumentar en la batería de forma que cause deformaciones en la carcasa y el sellado. Por último, hay que decir que el plomo de los electrodos es un problema medioambiental debido a su toxicidad.

#### **4.3.2.2. Baterías basadas en níquel**

El níquel es un metal más ligero que el plomo y tiene muy buenas propiedades electroquímicas deseables para aplicaciones de baterías. Hay cuatro tecnologías de batería basadas en níquel: níquel-hierro, níquel-zinc, níquel-cadmio, y níquel-metal hidruro. Nos centraremos en las dos últimas que son las que tienen interés en la actualidad para aplicaciones de automoción.

En las baterías de níquel cadmio (Ni-Cd) se han visto enormes mejoras técnicas debido a las ventajas de su alta potencia específica (por encima de 220W/kg), largo ciclo de vida (hasta 2000 ciclos), una alta tolerancia a grandes exigencias mecánicas y eléctricas, una pequeña caída de tensión frente a un amplio rango de intensidades de descarga, capacidad de carga rápida, amplias temperaturas de operación (de -40°C a 85°C), bajo índice de autodescarga (<0.5% por día), excelente almacenamiento a largo término debido a la corrosión despreciable, y disponibilidad en una gran variedad de tamaños. Sin embargo, presentan algunos inconvenientes, incluyendo altos costes iniciales, relativamente baja tensión, y la amenaza cancerígena y medioambiental que supone el cadmio.

Las baterías de níquel-metal hidruro (Ni-MH) llevan en el mercado desde 1992. Sus características son similares a las de Ni-Cd. La principal diferencia entre ellas es el uso de hidrógeno, absorbido en un metal para producir el material que forma el electrodo negativo en vez de cadmio. Debido a su mayor energía específica comparada con la de Ni-Cd y su ausencia de toxicidad y cancerigenidad, las baterías de Ni-MH están sustituyendo a las de Ni-Cd. Las ventajas de esta tecnología se resumen como sigue: tiene la mayor energía específica (de 70 a 95Wh/kg) y la mayor potencia específica (de 200 a 300 W/kg) de las baterías basadas en níquel, respeta al medio ambiente (libres de cadmio), curva de descarga plana (pequeña caída de tensión), y capacidad de recarga rápida. Sin embargo, puede tener efecto memoria y disipar mucho calor durante la

carga.

#### **4.3.2.3. Baterías basadas en litio**

El litio es el más ligero de todos los metales y posee características muy interesantes desde el punto de vista electroquímico. Por tanto, permite una tensión termodinámica alta, lo que resulta en unas altas energía y potencia específicas. Hay dos tecnologías basadas en litio: polímero-litio e ión litio (Ión-Li). En este caso nos centraremos en las de ión-litio que son las que más se adecuan a las aplicaciones automotrices.

Desde su primera aparición en 1991, las baterías Ión-Li han sufrido un crecimiento sin precedentes por lo que ahora son consideradas las baterías recargables más prometedoras del futuro. Sus principales ventajas se resumen en: elevada energía específica, poco peso (a igualdad de carga almacenada, son menos pesadas y ocupan menos volumen que las de tipo Ni-MH y mucho menos que las de Ni-Cd y plomo-ácido), alta tensión (unas tres veces la de baterías de Ni-MH y Ni-Cd), carecen de efecto memoria, descarga lineal (facilita saber su estado de carga) y muy baja tasa de autodescarga. Sin embargo, presentan algunos inconvenientes en la actualidad como su vida útil relativamente corta y que son costosas.

#### *4.3.3. Elección del tipo de batería*

En esta sección se comparan los dos tipos de batería más adecuados para aplicaciones de vehículos eléctricos o híbridos: Ni-MH y Ión-Li. Éstas y otras tecnologías se comparan en la figura 4.12 usando diagramas de Rangone. Un diagrama de Rangone representa la relación entre densidad de potencia y densidad de energía para cada tipo de batería. La potencia específica (W/kg) se representa en el eje horizontal en escala logarítmica. La energía específica (Wh/kg) se representa en el eje vertical para una velocidad de descarga determinada, como C/1 (descarga completa en 1 hora).



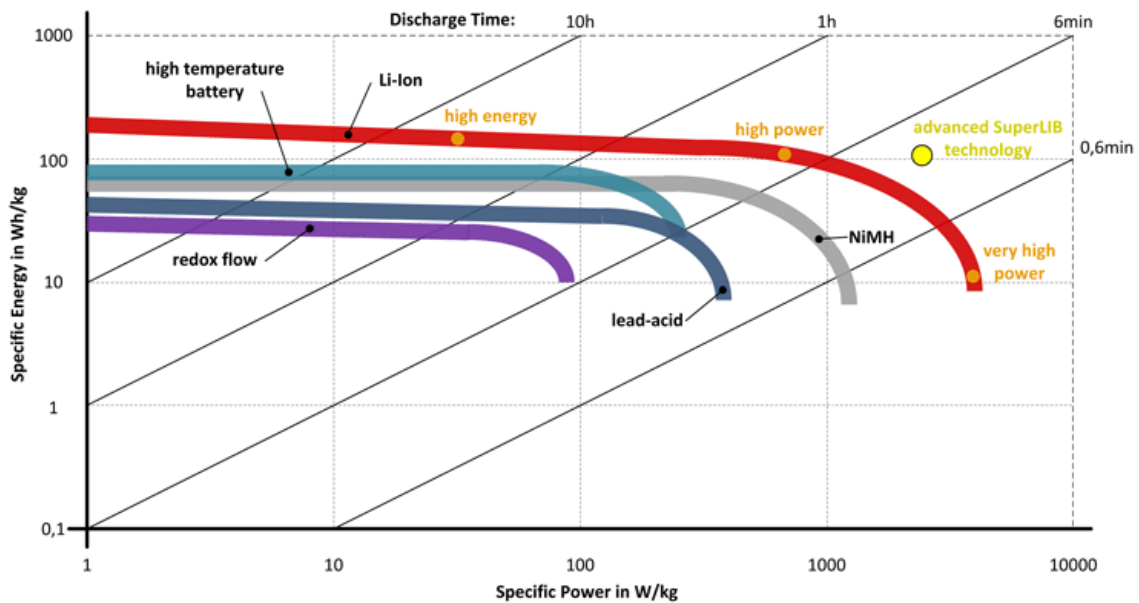


Figura 4.12. Diagrama de Rangone de diversas tecnologías de almacenamiento.

Los requisitos de las baterías dependen de la aplicación a la que se vayan a destinar. Por ejemplo, las baterías de vehículos eléctricos necesitan: (1) una energía específica alta para proporcionar un adecuado rango de operación al vehículo; (2) alta potencia específica para proporcionar aceleración; (3) ciclo de vida largo con poco mantenimiento; y (4) bajo coste. Por otra parte, las baterías para vehículos eléctricos requieren; (1) energía y potencia específicas altas para proporcionar aceleración; (2) capacidad de aceptar cargas repetitivas de alta potencia de las frenadas regenerativas; (3) ciclo de vida largo con poco mantenimiento; y (4) coste moderado.

El diagrama de Rangone muestra que las baterías que más encajan en estos requisitos son las de Ni-MH y Ión-Li. Por tanto, nos vamos a centrar en esta sección en estudiar cuál de las dos es más apta para el sistema propuesto en este trabajo.

Las baterías de Ni-MH son en la actualidad las más usadas por los vehículos híbridos usados en EEUU. Las principales ventajas de este tipo de batería es su probada longevidad y su probado historial de seguridad [59]. Sin embargo, sus principales desventajas son sus limitaciones en densidad de energía y potencia, y bajas perspectivas de futuras reducciones de coste [60]. Respecto a sus limitaciones en energía y potencia específicas, los investigadores de baterías informan que debido a que la tecnología de las baterías Ni-MH está llegando a su madurez productiva, es improbable que se produzcan mejoras en las mismas [59]-[60]. Por otra parte, el precio de estas baterías no se espera que caiga mucho más con el incremento de su producción [59].

Por el contrario, la tecnología Ión-Li tiene el potencial para suplir los requisitos de una amplia variedad de vehículos híbridos. El litio será muy atractivo para baterías de alta energía debido a su naturaleza ligera y su potencial para suministrar tensiones altas, lo que hace que las baterías de Ion-Li tengan mayor densidad de potencia y energía que las baterías Ni-MH [61]. Además de presentar mayores valores de densidad de potencia y energía, ésta tecnología aún tiene espacio para el desarrollo. Por tanto, se predice que su precio caerá en el futuro [59].

Aunque las baterías de Ión-Li prometen mucho en el campo de energía y potencia específicas, y quizás en precio, Kalhammer *et al.* [59] describen potenciales desventajas en longevidad y seguridad. La alta reactividad química supone una mayor amenaza para su vida útil y seguridad en general al compararlas con las baterías Ni-MH. Es decir, someterlas a sobrecargas, cortocircuitos y a tensiones altas durante largos períodos, pueden producir problemas de aumento de su temperatura sin control que pueden llegar a dañar el disolvente del electrolito. Por tanto, las baterías Ión-Li requieren un grado mayor de control de la tensión y temperatura de la batería que otros tipos de batería. En la actualidad se están llevando a cabo avances tecnológicos con el objetivo de solventar estos problemas de longevidad.

En resumen, las baterías de Ión-Li son las más capaces de cumplir con los requisitos demandados por los vehículos híbridos. En particular, este tipo de baterías parecen ser las únicas que actualmente encajan para los diseños de vehículos híbridos más exigentes. Las baterías Ni-MH podrían jugar un rol provisional para diseños menos exigentes, pero el probable descenso de los precios de las baterías de Ión-Li podría acabar con este rol. Por estas razones, para aplicaciones de vehículos híbridos la mayor atención está puesta en las baterías de Ion-Li.

#### 4.3.4. Estado del arte de los modelos de batería

A lo largo de los años, multitud de tipos de modelos de batería han sido desarrollados para diferentes áreas de aplicación [62]. Diferentes enfoques han sido empleados para modelar las propiedades de las baterías, variando desde modelos electroquímicos muy detallados hasta llegar a otros basados en identificación de sistemas mediante redes neuronales. Además, nos encontramos con modelos analíticos en los que se describen las principales propiedades de la batería basándose en sólo unas cuantas ecuaciones, lo que hace estos modelos muy fáciles de utilizar.

Los modelos electroquímicos están basados en los procesos químicos que tienen lugar en las baterías. Algunos ejemplos pueden encontrarse en [63], [64]. Estos modelos describen los procesos de las baterías en gran detalle. Ésto los hace los modelos más exactos de batería. Sin embargo, su descripción tan detallada hace los modelos complejos y difíciles de configurar. Siendo el objetivo del modelo de batería ser integrado en un sistema de propulsión de un tranvía híbrido se descarta este tipo de modelos debido a que su objetivo es mostrar los procesos internos de las baterías en detalle, cosa que no es de interés en el presente trabajo.

En cambio, varios modelos no-lineales de batería basados en procesos de identificación de sistemas de caja negra (con redes neuronales, por ejemplo) han sido empleados recientemente para aplicaciones de vehículos eléctricos de forma satisfactoria [65]-[67]. El problema que plantean es que necesitan de multitud de datos tomados durante ensayos para poder identificar el modelo.

En los modelos analíticos comentados anteriormente, la batería se modela como una fuente de tensión en serie con una resistencia interna. La tensión de dicha fuente varía según unas ecuaciones para carga y descarga que la calculan dependiendo de la demanda de intensidad. En este tipo de modelos se necesita al menos 3 conjuntos de datos de descarga a intensidad constante para ajustar sus parámetros (estos datos son los que comúnmente aparecen en las características comerciales de las baterías). Este tipo de modelo refleja muy bien el perfil de descarga de las baterías, su comportamiento dinámico y, además, su coste computacional es bajo.

Uno de estos modelos es publicado por Gao *et al.* [57] en el año 2002 donde se realiza un novedoso circuito para el modelado dinámico de las baterías de litio. El circuito esencialmente consta de una fuente de tensión variable, una resistencia y un condensador real en serie. Los resultados obtenidos durante las simulaciones son bastante buenos, pero se desconoce la respuesta y la forma de funcionar de este modelo para su aplicación en vehículos híbridos.

Ese mismo año, Xiaoling y Hodgson [68] comparan el modelo batería de Litio que les ofrece un fabricante con datos obtenidos empíricamente y con un modelo sencillo de batería (fuente de tensión variable y resistencia interna en serie), los resultados que obtuvieron muestra como la mayor similitud aparece entre los datos empíricos y el modelo reducido. Por tanto, se entiende que un modelo basado en una fuente de tensión variable y una resistencia en serie puede ser perfectamente válido para las baterías de

litio.

El modelo presentado en 2009 por Tremblay *et al.* [69] reproduce fielmente el comportamiento real de la batería basándose sólo en 3 puntos extraídos de la curva de descarga del fabricante. En dicho artículo se demuestra que, aunque los puntos son extraídos de una curva de descarga a intensidad constante, el comportamiento dinámico en simulación es cercano al comportamiento experimental. Además, en el artículo se integra el modelo de batería propuesto en una simulación de un vehículo híbrido de FC y batería lo que lo hace muy adecuado para nuestro trabajo.

Como conclusión, habiendo realizado un análisis de los distintos tipos de modelos de batería existentes se puede llegar a la conclusión de que los modelos analíticos son los más adecuados para simulaciones de sistemas de gestión de energía en sistemas híbridos. Existen multitud de modelos propuestos, pero no tantos para baterías ión-litio para aplicación en vehículos híbridos. Entre éstos se ha escogido el modelo de [69] debido a la facilidad con la que se obtienen sus parámetros a partir de datos del fabricante y por su probada validez en aplicaciones de vehículos eléctricos.

#### **4.3.4.1. Modelo de batería**

El modelo de batería propuesto, como se puede ver en la figura 4.13, consiste en una fuente de tensión variable cuyo valor de tensión depende de la intensidad demandada a la batería. Dependiendo de esta intensidad (de que sea mayor o menor que 0) las ecuaciones que proporcionan la tensión de la batería son distintas por lo que podríamos hablar de un modelo de descarga y otro de carga.

Para la elaboración de este modelo se han tomado las siguientes asunciones:

- La resistencia interna de la batería se supone constante durante los ciclos de carga y descarga y no varía con la amplitud de la intensidad.
- Los parámetros del modelo son deducidos de las características de descarga y se asume que son iguales para la carga.
- La capacidad de la batería no varía con la amplitud de la corriente (no se tiene en cuenta el efecto Peukert).
- La temperatura no afecta al comportamiento del modelo.
- El proceso de auto-descarga de la batería no está modelado.

- La batería no tiene efecto memoria.

Una vez citadas las asunciones tenidas en cuenta, se pasa a enumerar las limitaciones propias del modelo:

- La tensión mínima y máxima de la batería sin carga son 0V y  $2 \cdot E_0$ , respectivamente.
- La capacidad mínima y máxima de la batería son 0Ah y  $Q$ . Por eso, el SOC máximo no puede ser mayor que 100% si la batería se sobrecarga.

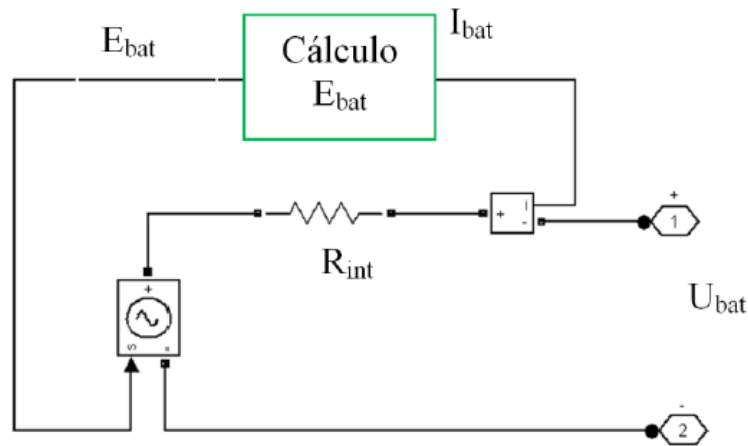


Figura 4.13. Modelo de batería propuesto.

#### 4.3.4.1.1. Modelo de descarga

La figura 4.14 muestra la curva típica de descarga de una batería. El modelo de descarga elegido es una modificación del presentado en [70] pero ha sido modificado para que represente precisamente las variaciones dinámicas de la tensión cuando la intensidad varía y tiene en cuenta la tensión a circuito abierto (*Open Circuit Voltage*, OCV) como función del SOC. Además, se le añade un término para mejorar la representación del comportamiento a circuito abierto y se modifica ligeramente el término correspondiente a la resistencia de polarización. La tensión obtenida es dada por:

$$E_{bat} = E_{0bat} - K \underbrace{\frac{Q_{bat}}{Q_{bat} - i_{bat}t} \cdot i_{bat}t}_{\text{tensión polarización}} - K \underbrace{\frac{Q_{bat}}{Q_{bat} - i_{bat}t} \cdot i^*}_{\text{resistencia polarización}} + A \exp(-B \cdot i_{bat}t) \quad (4.3 \quad 8)$$

donde  $E_{bat}$  es la tensión de la batería a circuito abierto (V),  $E_{0bat}$  es la tensión constante de la batería (V),  $K$  es la constante de polarización (V/Ah) o resistencia de polarización ( $\Omega$ ),  $Q_{bat}$  es la capacidad de la batería (Ah),  $A$  es la amplitud de la zona exponencial (V),  $B$  es la constante inversa de tiempo de la zona exponencial ((Ah)<sup>-1</sup>),  $R$  es la resistencia interna ( $\Omega$ ),  $i_{bat}$  es la intensidad de la batería (A) e  $i^*$  es la intensidad filtrada (A).

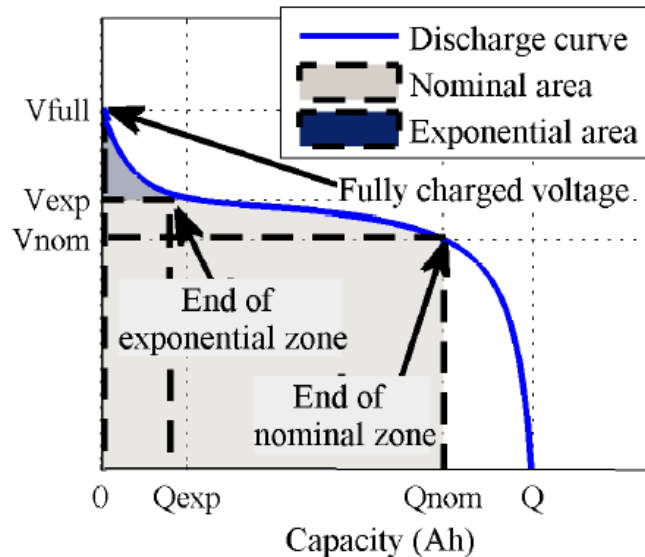


Figura 4.14. Curva típica de descarga.

La particularidad de este modelo es el uso de una intensidad filtrada ( $i^*$ ) circulando a través de una resistencia de polarización. De hecho, los resultados experimentales muestran un comportamiento dinámico lento de la tensión para una respuesta de escalón de intensidad. Esta intensidad filtrada soluciona además posibles problemas debidos a bucles algebraicos en Simulink. El término de la exponencial modela la zona exponencial de la curva de polarización. Por último, la tensión a circuito abierto varía de forma no lineal con el SOC. Este fenómeno se modela mediante el término de la tensión de polarización.

#### 4.3.4.1.2. Modelo de carga

El comportamiento de carga, específicamente en la zona cercana a la carga máxima, depende del tipo de batería. Como las baterías que vamos a usar en nuestras simulaciones son de Ion-Li nos centraremos en éstas. En este tipo de baterías la tensión aumenta rápidamente cuando la batería se acerca a la zona de carga completa. Este fenómeno es modelado mediante el término de resistencia de frenado. En el modo de carga, la resistencia de polarización aumenta hasta que la batería está ya completamente

cargada ( $i_{bat}=0$ ). Por encima de este punto, la resistencia de polarización aumenta abruptamente.

La modificación de la resistencia de polarización en la ecuación (4.38) nos permitirá crear el modelo de carga. La resistencia de polarización ha sido modificada tal y como se muestra en la ecuación (4.39). Teóricamente, cuando  $i_{bat}=0$  (completamente cargada), la resistencia de polarización es infinita.

$$R_{polarización} = K \frac{Q_{bat}}{i_{bat}t} \quad (4.39)$$

Este no es exactamente lo que ocurre en la práctica. En realidad, los resultados experimentales han mostrado que la contribución de la resistencia de polarización es desplazada en torno a un 10% por la capacidad de la batería, por lo que la expresión de la resistencia de polarización durante la carga pasaría a ser:

$$R_{polarización} = K \frac{Q_{bat}}{i_{bat}t - 0.1 \cdot Q_{bat}} \quad (4.40)$$

Por tanto la expresión de la tensión de la batería durante la carga sería:

$$E_{bat} = E_0 - K \underbrace{\frac{Q_{bat}}{Q_{bat} - i_{bat}t} \cdot i_{bat}t}_{\substack{\text{tensión} \\ \text{polarización}}} - K \underbrace{\frac{Q_{bat}}{i_{bat}t - 0.1Q_{bat}} \cdot i^*}_{\substack{\text{resistencia} \\ \text{polarización}}} + A \exp(-B \cdot i_{bat}t) \quad (4.41)$$

#### 4.3.4.1.3. Identificación de los parámetros del modelo de batería

Una característica importante del modelo propuesto es la simplicidad con la que los parámetros del modelo se extraen. De hecho, no es necesario tomar medidas experimentales de la batería para extraer los parámetros. Sólo se requieren tres puntos de la curva de descarga del fabricante para obtener los parámetros. Los fabricantes proporcionan hojas de características que incluyen curvas de “características típicas de descarga” (como la figura 4.11) donde es posible extraer la tensión de la batería cargada completamente ( $V_{full}$ ), el final de la zona exponencial ( $Q_{exp}$ ,  $V_{exp}$ ), el final de la zona nominal ( $Q_{nom}$ ,  $V_{nom}$ ) a partir del cual la tensión cae abruptamente y la capacidad máxima ( $Q_{bat}$ ). Además, la resistencia interna ( $R_{bat}$ ) es dada normalmente.

Con estos tres puntos, es posible deducir, basándonos en la ecuación (4.38), los

parámetros que definen nuestro modelo. Normalmente la curva del fabricante se obtiene a intensidad constante (generalmente igual a  $0.2C$ ).

Para la tensión a carga completa, la carga extraída es 0 ( $i_{bat}=0$ ) y la intensidad de filtrado ( $i^*$ ) es 0 porque la demanda de intensidad acaba de empezar:

$$V_{full} = E_{0bat} - R_{bat} \cdot i_{bat} + A \quad (4.42)$$

Para el final de la zona exponencial, el factor  $B$  puede ser aproximado como  $3/Q_{exp}$  ya que la energía del término exponencial es casi 0 (5%) después de 3 constantes de tiempo. La corriente filtrada ( $i^*$ ) es igual a “ $i_{bat}$ ” porque dicha intensidad es en estado estacionario:

$$V_{exp} = E_{0bat} - R_{bat} \cdot i_{bat} - K \frac{Q_{bat}}{Q_{bat} - Q_{exp}} \cdot (Q_{exp} + i_{bat}) + A \exp\left(\frac{-3}{Q_{exp}} Q_{exp}\right) \quad (4.43)$$

Evidentemente de la ecuación (4.42) se obtiene el parámetro  $A$  y de la ecuación (4.43) se obtiene el parámetro  $K$ . De la tensión nominal se obtendría el parámetro  $B$ :

$$V_{nom} = E_{0bat} - R_{bat} \cdot i_{bat} - K \frac{Q_{bat}}{Q_{bat} - Q_{nom}} \cdot (Q_{nom} + i_{bat}) + A \exp(-B \cdot Q_{nom}) \quad (4.44)$$

Por último, la constante de tiempo para la intensidad filtrada ( $i^*$ ) no es dada por la hija de características del fabricante. Sólo test experimentales pueden darnos esta información. Sin embargo, datos experimentales han demostrado que esa constante de tiempo es aproximadamente de 30 segundos para cualquier tipo de batería.

#### 4.3.4.1.4. Validación del modelo

El modelo propuesto se ha validado en estado estacionario para reproducir la curva típica de descarga facilitada por su fabricante [37]. Entre los datos del fabricante no aparecen datos acerca de su comportamiento dinámico, pero consideraremos éste validado debido a los experimentos mostrados en [69].

Un modelo de la pila de Ión-Li Thunder Sky LFP90AHA de 90Ah, 4.25V es obtenido usando su hoja de características:

- Resistencia interna:  $0.003\Omega$ .



- Corrientes de descarga: 90A, 45A, 27A.
- Capacidad máxima: 90Ah.
- Tensión a carga completa: 4.5V.
- Fin de la zona exponencial para la descarga de 90A: 12Ah, 3.3V.
- Zona nominal para la descarga de 90A: 80Ah, 3.1V

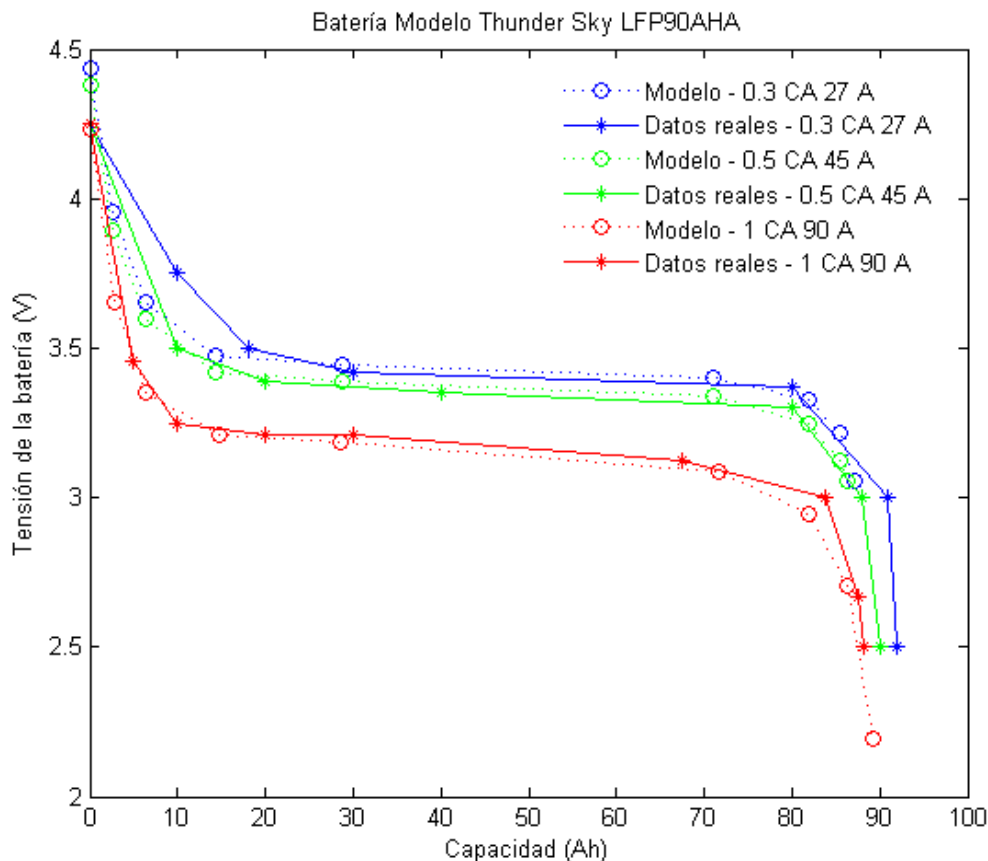


Figura 4.15. Comparación de las curvas de descarga del modelo de batería frente a las de la hoja de características del fabricante elegido.

En la figura 4.15 se muestran los datos de simulación obtenidos por los modelos frente a los de la hoja de características. Se han realizado simulaciones para las tres curvas de descarga que aparecen en la hoja de características correspondientes a velocidades de descarga de 1 CA, 0.5 CA y 0.3 CA. Se puede observar que las curvas simuladas encajan muy bien con las reales. Se puede comprobar que el modelo refleja con bastante precisión el comportamiento de la batería funcionando en la zona nominal. En la zona de carga máxima (la que se encuentra más a la izquierda) podemos observar

mayores diferencias. De todas formas, el objetivo de las estrategias de control presentadas en los siguientes capítulos es mantener la batería funcionando en torno a un valor determinado que se encuentra en la zona nominal. Dichas estrategias van a evitar que la batería funcione en las zonas de carga máxima y de descarga. Por tanto, puesto que las baterías funcionarán dentro de la zona nominal, la validez del modelo propuesto queda demostrada.

## **4.4. Modelo de supercondensador**

### *4.4.1. Introducción*

Debido a la operación con frecuentes paradas y arranques de los vehículos eléctricos e híbridos, los perfiles de carga y descarga a los que se someten los sistemas de almacenamiento de energía son muy variados. La potencia media requerida por los sistemas de almacenamiento es mucho menor que la potencia pico requerida durante las aceleraciones y ascenso de rampas. La proporción entre la potencia pico y la media puede ser mayor de 10:1. De hecho, la energía involucrada en los transitorios de aceleración y deceleración es dos tercios de la energía total requerida por un vehículo durante trayectos urbanos. En el diseño de vehículos híbridos, la máxima potencia pico de los sistemas de almacenamiento de energía es más importante que su capacidad energética, y normalmente es la que sirve para dimensionarlos. Basándonos en las tecnologías de baterías actuales, el diseño de baterías tiene como objetivo lograr el equilibrio entre energía específica, potencia específica y vida útil. La dificultad de obtener simultáneamente valores altos de éstos ha conducido a algunas sugerencias que apuntan a que el sistema de almacenamiento de energía de vehículos híbridos debe ser una hibridación de una fuente de energía y otra de potencia. La fuente de energía, principalmente baterías y pilas de combustible, tiene una energía específica alta mientras que la fuente de potencia tiene una potencia específica alta. Las fuentes de potencia pueden ser recargadas mediante las de energía durante los intervalos de menor demanda del vehículo o durante las frenadas regenerativas. La fuente de potencia que ha recibido mayor atención es el supercondensador.

### *4.4.2. Características de los supercondensadores*

El supercondensador se caracteriza por una gran potencia específica, pero baja energía específica comparado con baterías químicas. Su energía específica está en el rango de unos cuantos vatios-hora por kilogramo. Sin embargo, su potencia específica

---

puede alcanzar los 3kW/kg, mucho mayor que cualquier tipo de batería. Debido a su menor energía específica y la dependencia de la tensión en el SOC, es difícil usar los supercondensadores como sistema de almacenamiento de energía independiente de vehículos híbridos. Sin embargo, existen múltiples ventajas de usarlo como fuente de energía auxiliar. Una aplicación prometedora es usar un sistema de almacenamiento de energía híbrido de supercondensador y batería para vehículos híbridos o eléctricos [71]-[72]. Los requisitos de energía y potencia específicas pueden ser disociados resultando en que el diseño de la batería se centre en optimizar su energía específica y vida útil sin tener tan en cuenta su potencia específica. El uso de la combinación de batería y supercondensador permite que se minimicen las altas intensidades de carga y descarga de la batería por lo que la energía disponible y vida útil de la misma aumentan significativamente.

Para explicar el funcionamiento de un supercondensador primero introduciremos el principio de funcionamiento de un condensador convencional. Un condensador convencional consiste en dos electrodos conductores separados por un material dieléctrico aislante. Cuando una tensión se aplica a un condensador, cargas opuestas se acumulan en la superficie de cada electrodo. Las cargas se mantienen separadas por el dieléctrico produciendo un campo eléctrico que permite al condensador almacenar energía. Esto se ilustra en la figura 4.16a.

La capacidad  $C_{sc}$  se define como la relación entre la carga acumulada  $Q_{sc}$  y la tensión aplicada  $V_{sc}$ :

$$C_{sc} = \frac{Q_{sc}}{V_{sc}} \quad (4.45)$$

Para un condensador convencional,  $C_{sc}$  es directamente proporcional a la superficie  $A_{sc}$  de cada electrodo e inversamente proporcional a la distancia  $D_{sc}$  entre electrodos:

$$C_{sc} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A_{sc}}{D_{sc}} \quad (4.46)$$

El producto de los dos primeros factores de la parte derecha de la ecuación es una constante de proporcionalidad donde  $\epsilon_0$  es la constante dieléctrica del espacio libre y  $\epsilon_r$  es la constante dieléctrica del material aislante entre los electrodos.

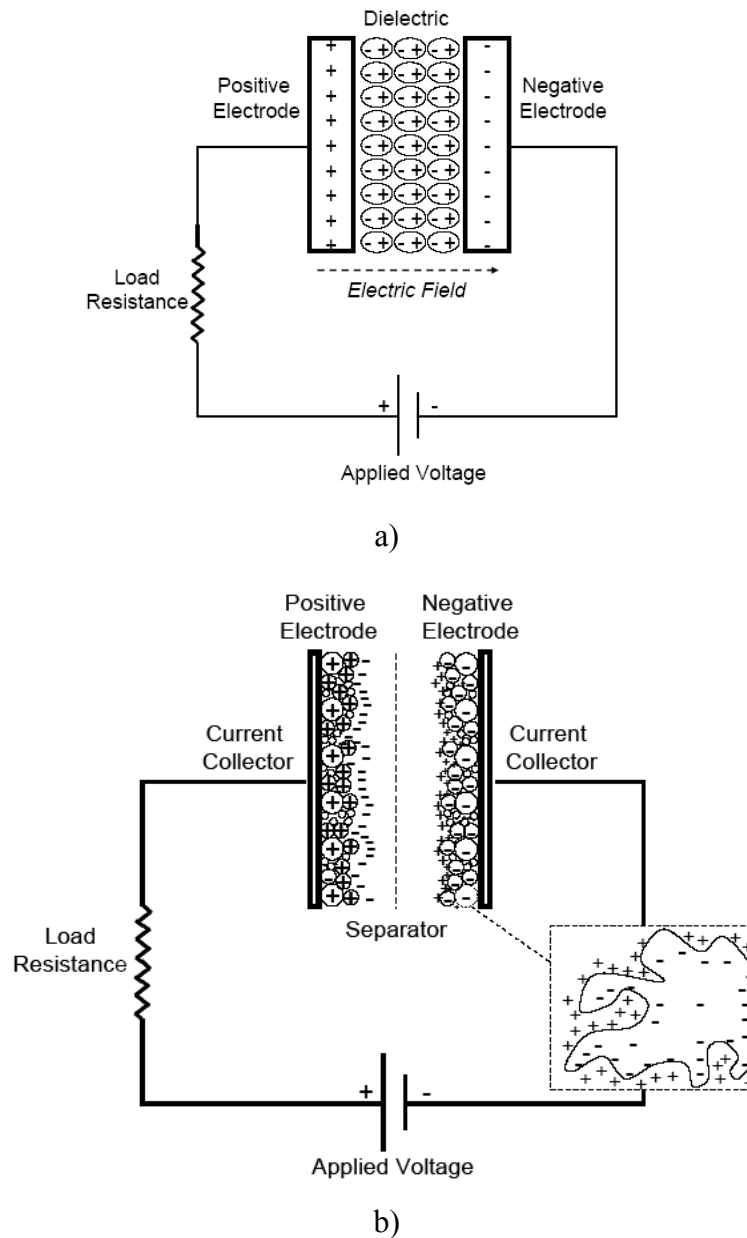


Figura 4.16. Esquemas de condensadores. a) Convencional. b) Supercapacitor.

La energía almacenada en un condensador es directamente proporcional a su capacidad:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \tag{4.47}$$

Los supercondensadores funcionan basados en los mismos principios básicos que los condensadores convencionales. Sin embargo, incorporan electrodos con superficies  $A_{sc}$  mucho mayores y dieléctricos mucho más delgados que disminuyen la distancia  $D_{sc}$  entre electrodos. Por tanto, según las ecuaciones (4.46) y (4.47) se producen en éstos un

aumento de la capacidad y de la energía.

Existen varios tipos de supercondensadores, cada uno de los cuales presenta diferentes mecanismos de almacenamiento de carga: de doble capa, pseudocondensadores e híbridos. En nuestro caso nos vamos a centrar en explicar los de doble capa puesto que en esa tecnología están basados los supercondensadores para aplicaciones de automoción de la actualidad.

Los condensadores de doble capa se componen de dos electrodos basados en carbono, un electrolito y un separador. En la figura 4.16b se muestra un esquema de un condensador de este tipo. Como los condensadores convencionales, los de doble capa almacenan carga electrostáticamente y no hay transferencia de carga entre el electrodo y el electrolito. Cuando una tensión se le aplica, se acumula carga en las superficies de los electrodos. Siguiendo el principio de atracción de cargas opuestas, los iones en la solución del electrolito penetran a través de los poros del separador hacia el electrodo de carga opuesta. Sin embargo, los electrodos están diseñados para evitar la recombinación de los iones. Por tanto, una doble capa de carga se produce en cada electrodo. Estas doble capas, junto a un incremento de la superficie de los electrodos y una reducción de la distancia entre éstos, permite a los condensadores de doble capa conseguir mayores densidades de potencia que los condensadores convencionales [73]-[75].

Debido a que no hay transferencia de carga entre el electrolito y los electrodos, no hay cambios en su composición química. Por esta razón, el almacenamiento de carga en este tipo de condensadores es altamente reversible, lo que les permite operar con un comportamiento estable durante muchos ciclos de carga y descarga.

#### 4.4.3. *Funcionamiento de un supercondensador*

El funcionamiento de un supercondensador puede ser representado por las diferentes tensiones de sus terminales durante la carga y descarga a diferentes intensidades de descarga. Hay tres parámetros en un condensador: capacidad, la resistencia en serie  $R_{Ssc}$ , y la resistencia de fuga dieléctrica,  $R_{Lsc}$ , como se muestra en la figura 4.17. La tensión en los terminales durante la descarga puede ser expresada como

$$V_{tsc} = V_{Csc} - i_{sc} \cdot R_{Ssc} \quad (4.48)$$

El potencial eléctrico del condensador puede ser expresado por

$$\frac{dV_{C_{sc}}}{dt} = - \left( \frac{i_{sc} + i_{L_{sc}}}{C_{sc}} \right) \quad (4.49)$$

donde  $C_{sc}$  es la capacidad del supercondensador. Por otro lado, la intensidad de fuga  $i_{L_{sc}}$  puede expresarse como

$$i_{L_{sc}} = \frac{V_{C_{sc}}}{R_{L_{sc}}} \quad (4.50)$$

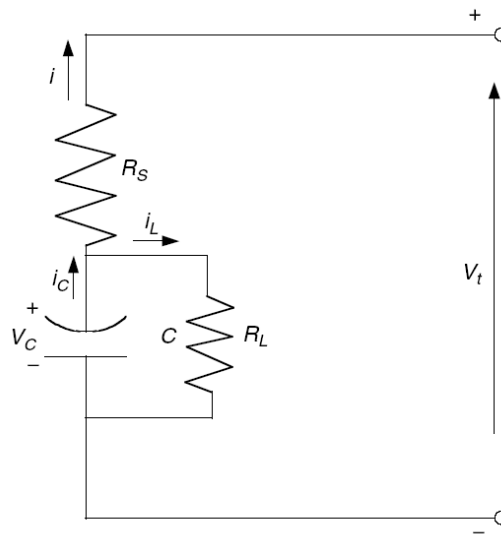


Figura 4.17. Circuito equivalente de un supercondensador.

Sustituyendo (4.47) en (4.49) podemos obtener:

$$\frac{dV_{C_{sc}}}{dt} = \frac{V_{C_{sc}}}{C_{sc} \cdot R_{L_{sc}}} - \frac{i_{sc}}{C_{sc}} \quad (4.51)$$

La solución analítica de (4.51) es

$$V_{C_{sc}} = \left[ V_{C_{sc}0} \int_0^t \frac{i_{sc}}{C_{sc}} e^{t/C_{sc}R_{L_{sc}}} dt \right] e^{t/C_{sc}R_{L_{sc}}} \quad (4.52)$$

donde  $i_{sc}$  es la intensidad de descarga, que es función del tiempo en funcionamiento real. A diferentes intensidades de descarga, la tensión disminuye linealmente con el tiempo de descarga. Para intensidades de descarga mayores, la tensión decrece mucho más rápido que para intensidades más pequeñas. Este hecho se ve claramente en las curvas de descarga presentadas en la figura 4.18.

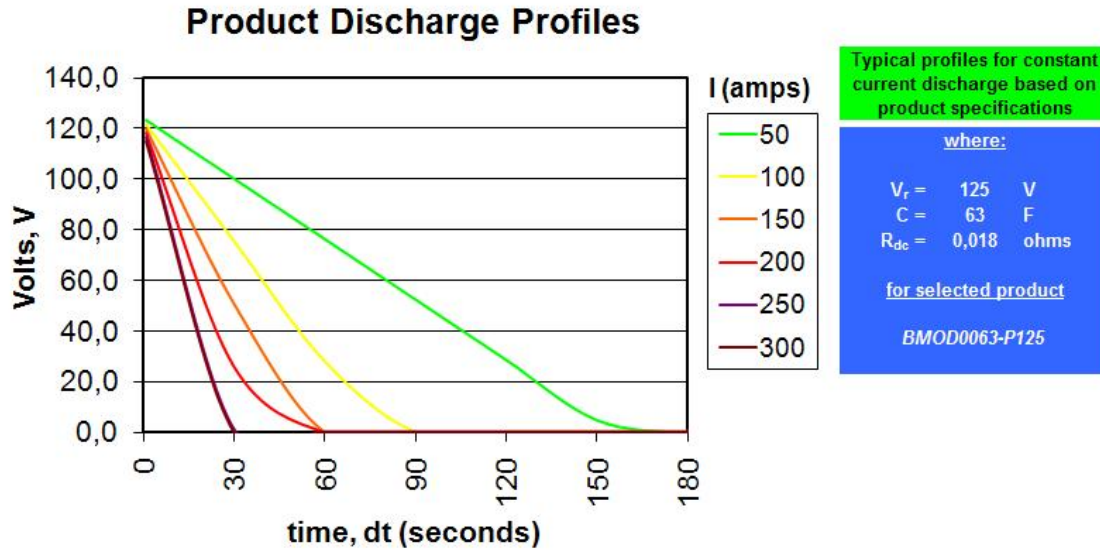


Figura 4.18. Curvas de descarga del supercondensador Maxwell BMOD0063-P125.

El rendimiento de operación durante las cargas y las descargas puede expresarse como:

$$\eta_{desc,sc} = \frac{V_t I_t}{V_C I_C} \Big|_{sc} = \frac{(V_C - I_t R_S) I_t}{V_C (I_t + I_L)} \Big|_{sc} \quad (4.53)$$

$$\eta_{car,sc} = \frac{V_C I_C}{V_t I_t} \Big|_{sc} = \frac{V_C (I_t - I_L)}{(V_C + I_t R_S) I_t} \Big|_{sc} \quad (4.54)$$

donde  $\eta_{desc,sc}$  es el rendimiento durante la descarga,  $\eta_{car,sc}$  es el rendimiento durante la carga,  $V_{tsc}$  es la tensión en los terminales y  $I_{tsc}$  es la intensidad que sale o entra por los terminales. En la realidad, la corriente de fuga  $I_{Lsc}$  es normalmente muy pequeña (unos cuantos mA) y puede ser ignorada. Por tanto, las ecuaciones (4.53) y (4.54) pueden ser escritas como:

$$\eta_{desc} = \frac{V_C - I_t R_S}{V_C} \Big|_{sc} = \frac{V_t}{V_C} \Big|_{sc} \quad (4.55)$$

$$\eta_{car} = \frac{V_C}{V_C + I_t R_S} \Big|_{sc} = \frac{V_C}{V_t} \Big|_{sc} \quad (4.56)$$

Estas ecuaciones indican que las pérdidas de energía en un supercondensador se deben a la resistencia en serie. El rendimiento disminuye a altos valores de intensidad y

bajos valores de tensión, como muestra la figura 4.19. Por tanto, durante su funcionamiento el estado de carga del supercondensador se ha de mantener en su región de alta tensión, es decir, con un estado de carga superior al 60%.

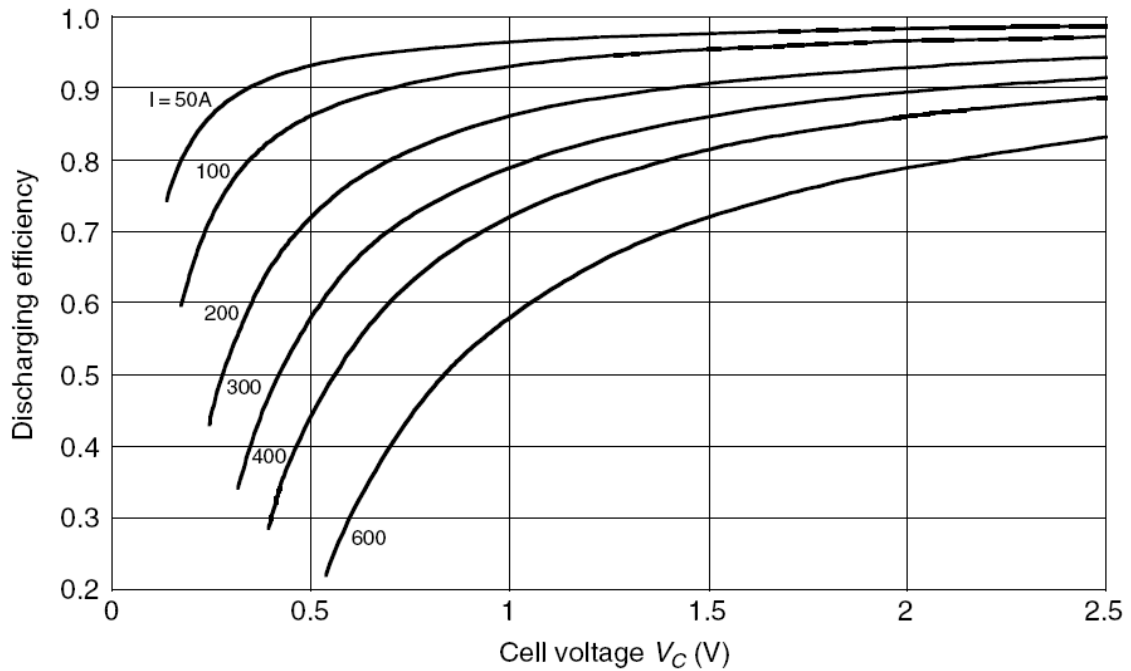


Figura 4.19. Rendimiento de descarga de un supercondensador Maxwell de 2600 F.

La energía almacenada en un supercondensador puede ser obtenida mediante la energía necesaria para cargarlo hasta cierto nivel de tensión, o lo que es lo mismo:

$$E_{C_{sc}} = \int_0^t V_{sc} I_{sc} dt = \int_0^v C_{sc} V_{sc} dV_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc} V_{sc}^2 \quad (4.57)$$

Donde  $V_{sc}$  es la tensión del supercondensador en voltios. A su tensión nominal, la energía almacenada en el supercondensador alcanza su máxima. La ecuación (4.57) indica que incrementar la tensión nominal puede incrementar significativamente la energía almacenada ya que la energía incrementa con el cuadrado de la tensión. En la realidad, es imposible usar toda la energía almacenada ya que los supercondensadores tienen una tensión mínima,  $V_{scb}$  por debajo de la cual dejan de proporcionar energía. Como consecuencia, la energía disponible o útil de éstos es menor que la energía total almacenada a carga completa. Esta energía disponible,  $E_{u,sc}$ , puede expresarse como

$$E_{u,sc} = \frac{1}{2} C_{sc} (V_{scR}^2 - V_{scb}^2) \quad (4.58)$$



donde  $V_{scR}$  es la tensión nominal del supercondensador.

#### 4.4.4. Estado del arte de los modelos de supercondensador

En los últimos años debido a que el uso de supercondensadores se ha vuelto muy común, multitud de diferentes modelos han sido propuestos en la literatura.

Existen tres enfoques de modelado: modelado matemático [76]-[77], modelado basado en circuitos eléctricos [78]-[79], y otros modelados no basados en circuitos eléctricos (como por ejemplo el modelado basado en redes neuronales [80]). Cada enfoque tiene sus propias ventajas e inconvenientes. El modelo matemático incluye complicados cálculos y requiere demasiados parámetros que deben ser identificados experimentalmente. Adicionalmente, el modelo matemático no suele tener un significado físico explícito y no puede ser incorporado directamente en un circuito. Los circuitos no eléctricos tienen el mismo problema.

Puesto que el objetivo es integrar el modelo de supercondensador en el modelo eléctrico del sistema híbrido nos centraremos en los modelos basados en circuitos eléctricos.

Según [79] en el que se comparan los distintos modelos basados en circuitos eléctricos, la ventaja de usar un modelo de supercondensador basado en un simple circuito RC es la simplicidad del modelo. Además es fácil incorporarlo a un circuito y el proceso de simulación es computacionalmente sencillo. Su principal inconveniente es que este modelo no es capaz de capturar el aumento y disminución no lineal de la tensión del supercondensador después de las cargas y descargas. En éste trabajo se proponen otros modelos como: el de ramas RC en paralelo, el de línea de transmisión RC [81], y el de rama RC serie y paralelo [82]. Además se establece cómo pasar los parámetros de cada uno de éstos al resto. El principal problema de estos modelos radica en que para determinar los parámetros de cualquiera de ellos hay que recurrir a ensayos y a partir de ellos calcular los parámetros siguiendo las metodologías recogidas en otros trabajos.

Por tanto, debido a la facilidad para obtener sus parámetros y a que se puede incorporar sin problema al sistema modelado se escoge el circuito equivalente RC como modelo de supercondensador.

#### 4.4.5. Modelo del supercondensador

Como se ha comentado anteriormente, los supercondensadores se utilizan en vehículos híbridos para suministrar los picos de potencia en combinación con otras fuentes de energía. En este caso para lograr ese objetivo se ha elegido el módulo de supercondensadores Maxwell BMOD0063-P125 [38] de 125V y una capacidad de 63F. Este módulo está diseñado específicamente para aplicaciones de transporte pesado como autobuses, trenes eléctricos, tranvías, grúas, entre otros.

Como se ha comentado en el subapartado anterior, se ha escogido un modelo eléctrico, concretamente el modelo clásico formado por una resistencia R (la cual modela las pérdidas óhmicas del supercondensador) llamada habitualmente resistencia serie equivalente (ESR, del inglés “Equivalent Series Resistor”) y un condensador C, el cual simula la capacidad del supercondensador durante los procesos de carga y descarga. Comparando resultados de simulación de este modelo y experimentales [83], puede comprobarse que el modelo clásico tiene múltiples ventajas. La primera ventaja es la simplicidad del modelo. Es fácil incorporarlo a un circuito, el proceso de simulación es computacionalmente sencillo y sus dos parámetros (R y C) son fácilmente identificables en catálogos comerciales.

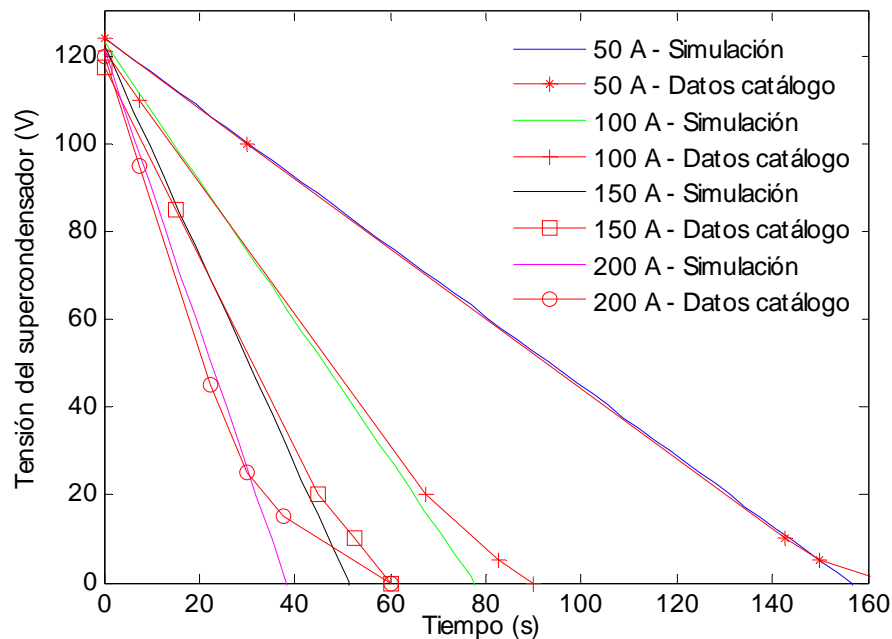


Figura 4.20. Curvas de descarga del supercondensador Maxwell BMOD0063-P125 frente a las obtenidas por el modelo propuesto.

En la figura 4.20 se muestra la comparación entre los datos reales de descarga del módulo comercial seleccionado y los del modelo para diferentes cargas. Se puede

observar cómo el modelo se adapta suficientemente bien a las curvas de descarga (mejor en el caso de bajas demandas) pero no refleja el comportamiento no lineal al final de cada curva. La estrategia de control se ha diseñado para que en ningún caso los supercondensadores lleguen a la descarga total por lo que, debido a que ese tramo nunca se va a utilizar, se considera el modelo válido.

---

## **CAPÍTULO 5**

---

### **Otros componentes del sistema híbrido**

#### **5.1. Introducción**

Una vez presentadas tanto la configuración propuesta del sistema híbrido como las fuentes de energía que lo componen, en éste capítulo se describen el resto de componentes del sistema.

Entre dichos componentes se encuentran los convertidores de tensión CC/CC utilizados entre los que tenemos un unidireccional para la FC y bidireccionales para la batería y supercondensador, los modelos correspondientes al sistema de tracción del tranvía (inversores y motores de inducción) y el modelo de resistencia de frenado y servicios auxiliares del sistema.

## 5.2. Convertidores de tensión de CC/CC

Respecto a los convertidores de tensión utilizados hay que comentar que para la realización de las simulaciones se han escogido convertidores CC/CC sencillos basados en parejas de transistores para facilitar la simulación. Aunque, debido a las potencias consideradas en el trabajo, los convertidores más adecuados estarían basados en topologías que presentan aislamiento galvánico, como serían el convertidor de medio puente y el de puente completo. A continuación se exponen los problemas derivados de utilizar estas topologías en simulación.

El convertidor de doble puente completo bidireccional sin bobina fue propuesto por Kheraluwala *et al.* [84] y se muestra en la figura 5.1. Fundamentalmente, éste autor propone construir un convertidor bidireccional utilizando dos puentes completos y un transformador. La característica principal de éste convertidor es que no tiene bobina, en este caso, la única impedancia inductiva que aparece en el convertidor a parte de la inductancia magnetizante del transformador, es la inductancia de dispersión con la que cuenta el propio transformador. El flujo de energía se controla con esta inductancia de dispersión, y la manera de hacerlo es implementando un control por desplazamiento de fase entre el puente primario y el puente secundario y también variando la frecuencia. Para generar este desplazamiento de fase se requeriría transformar el ciclo de trabajo generado en los PI en un desplazamiento de fase  $\Delta\Phi$  según la expresión (5.1) [85].

$$D_c = \frac{1}{2} - \frac{\Delta\phi}{2\pi} \quad (5.1.)$$

Suponiendo que el convertidor de la imagen suministra energía de izquierda a derecha, los interruptores de la izquierda serían los controlados mediante desplazamiento de fase y los de la derecha, al realizar sólo la función de rectificación, simplemente pueden dejarse abiertos para que sus diodos funcionen como un puente de diodos. En la figura 5.2 se puede observar cómo se implementaría el control por desplazamiento de fase. El hecho que haya que realizar desplazamiento de fase requiere que se integren en la simulación bloques de retardo de tiempo variable, el buffer de los cuales consume memoria del ordenador que realiza la simulación provocando errores por falta de memoria en simulaciones largas (como son en este caso). A parte de eso, al estar hablando de frecuencias del orden de kHz se necesitaría un tiempo de muestreo en las simulaciones muy pequeño, lo que también limita la posibilidad de simular el recorrido completo del tranvía.

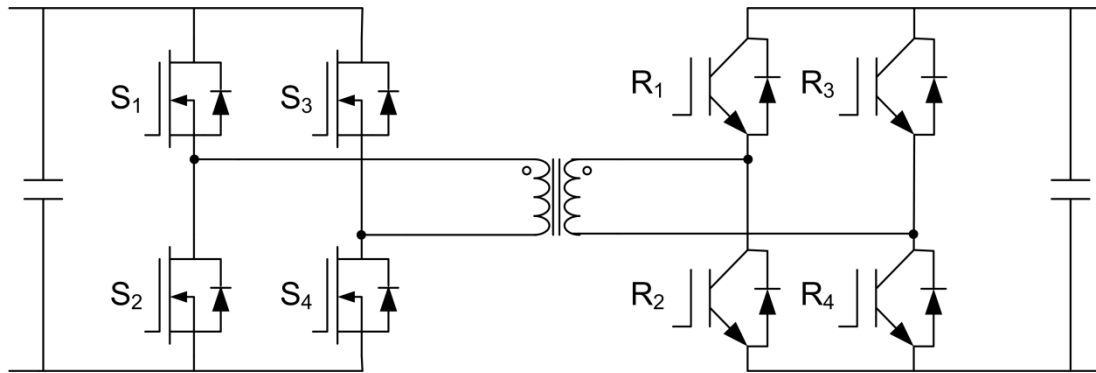


Figura 5.1. Convertidor de doble puente completo bidireccional sin bobina.

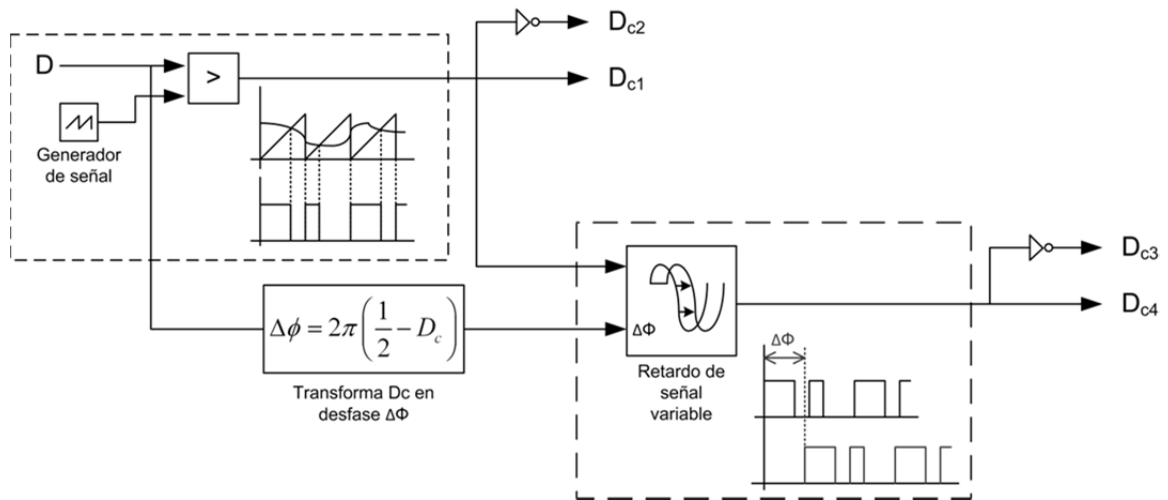


Figura 5.2. Implementación del control por desplazamiento de fase para el convertidor de puente completo.

Existen variantes de éste como la de puente completo bidireccional con esquema unificado para conmutaciones suaves y capacidad de arranque desde tensión cero en modo elevador. Dicha variante está propuesta por Kunrong Wang *et al.* [86], [87]. Esta topología tiene la capacidad de arrancar desde la tensión cero en modo elevador a través de un devanado auxiliar colocado en la bobina del convertidor. Ésta característica, hace que esta topología sea idónea para aplicaciones de vehículos híbridos en los que se tenga un bus de alta tensión con un banco de condensadores. El principal problema a la hora de simular con dicha topología está en la complejidad del control que requiere un controlador PWM para el modo reductor y dos más para conseguir el funcionamiento en modo elevador. En la figura 5.3 se muestra el esquema de dicha topología.

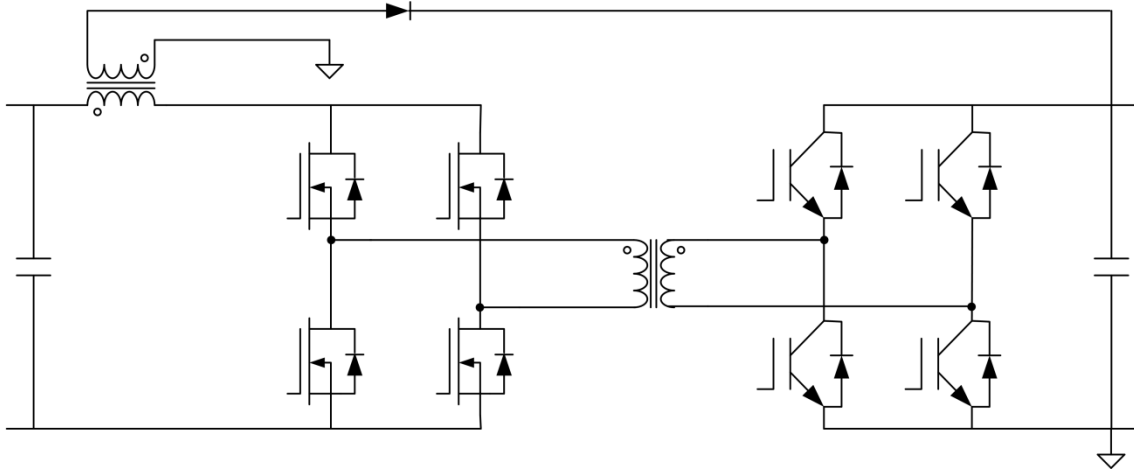


Figura 5.3. Puentes completo bidireccional con esquema unificado para conmutaciones suaves y capacidad de arranque desde tensión cero en modo elevador.

Por otra parte, existe la topología basada en la utilización de dos convertidores de medio puente propuesta por Hiu Lu *et al.* [88]-[90]. En esta topología, el autor pretende minimizar al máximo los elementos que se utilizan en un convertidor bidireccional con dos puentes completos. Esta topología comparada con las topologías de puente completo tiene una potencia mayor ya que, entregando ambos convertidores la misma potencia, el basado en medio puente tiene la mitad de componentes. El principio de funcionamiento de este convertidor, al igual que el convertidor puente completo, consiste en controlar simétricamente los interruptores del primario y del secundario con ciclos de trabajo del 50%. Al hacer esto, la entrada del convertidor funciona como un convertidor elevador con ciclo de trabajo del 50% imponiendo la tensión de entrada en cada uno de los condensadores del primario. Después se utiliza control por desplazamiento de fase y variación de la frecuencia entre ambos medios puentes del convertidor para conseguir variar la tensión de salida. Como comentábamos antes, este tipo de control lo hace difícil de integrar en la simulación debido al consumo de memoria requerido. En la Figura 5.4 se muestra la topología del convertidor bidireccional basado en dos medios puentes.

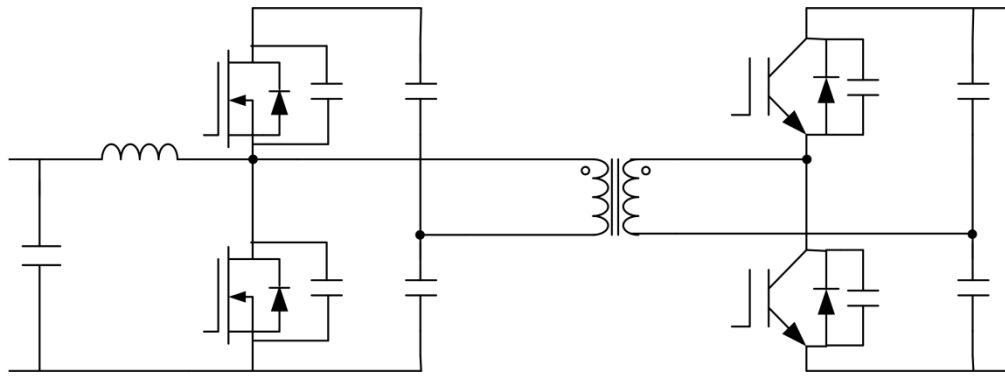


Figura 5.4. Topología basada en dos convertidores de medio puente.

Esta tesis usa los modelos de convertidores básicos controlados por modulación por ancho de pulso (Pulse Width Modulation, PWM) para simplificar el modelado y evitar el profundo tema de comparar los distintos métodos de conmutación y convertidores basados en eficiencia, complejidad, facilidad de control, masa y coste.

La idea básica de la modulación por ancho de pulso se representa en la figura 5.5 mediante un sencillo circuito reductor de la tensión. La tensión media a la salida,  $V_A$ , depende del tiempo que esté conectado el interruptor S,  $T_{ON}$ , durante cada periodo de conmutación:

$$V_A = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} v_A \cdot dt = \frac{T_{ON}}{T_S} V_i = D_c \cdot V_i \quad (5.2)$$

Siendo  $D_c$  el ciclo de trabajo que es la relación entre el tiempo que está conectado el interruptor S y el periodo de conmutación.

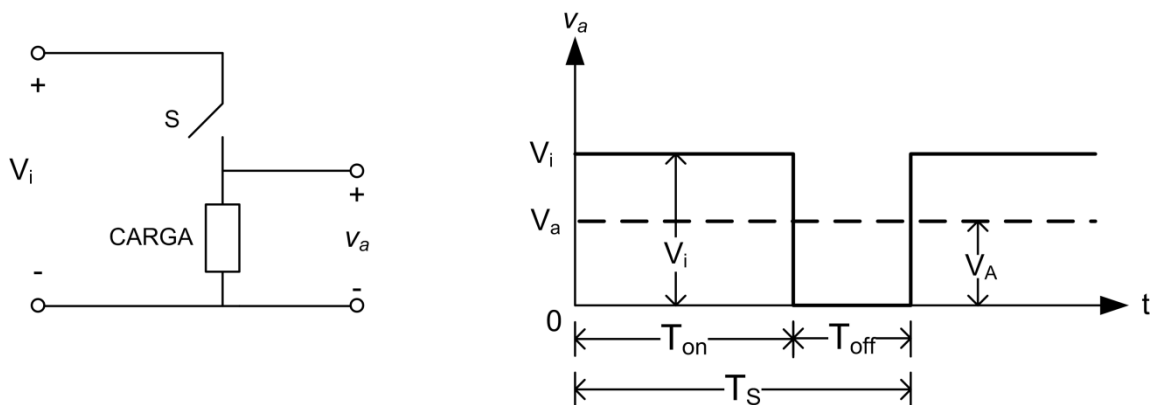


Figura 5.5. Idea básica de la modulación por ancho de pulso.

Usando filtros con elementos pasivos en combinación con los dispositivos de conmutación, se construyen convertidores sencillos que permiten obtener el valor medio



de  $v_A$  a la salida.

Como las tensiones de los dispositivos del sistema híbrido son variables, se necesitan convertidores cc/cc para adaptarlas a la tensión del bus de continua. Cada convertidor cc/cc se construye usando una pareja de transistores. Como se puede ver en la figura 5.6, esta topología es esencialmente un conjunto de convertidores compartiendo un condensador común a la salida.

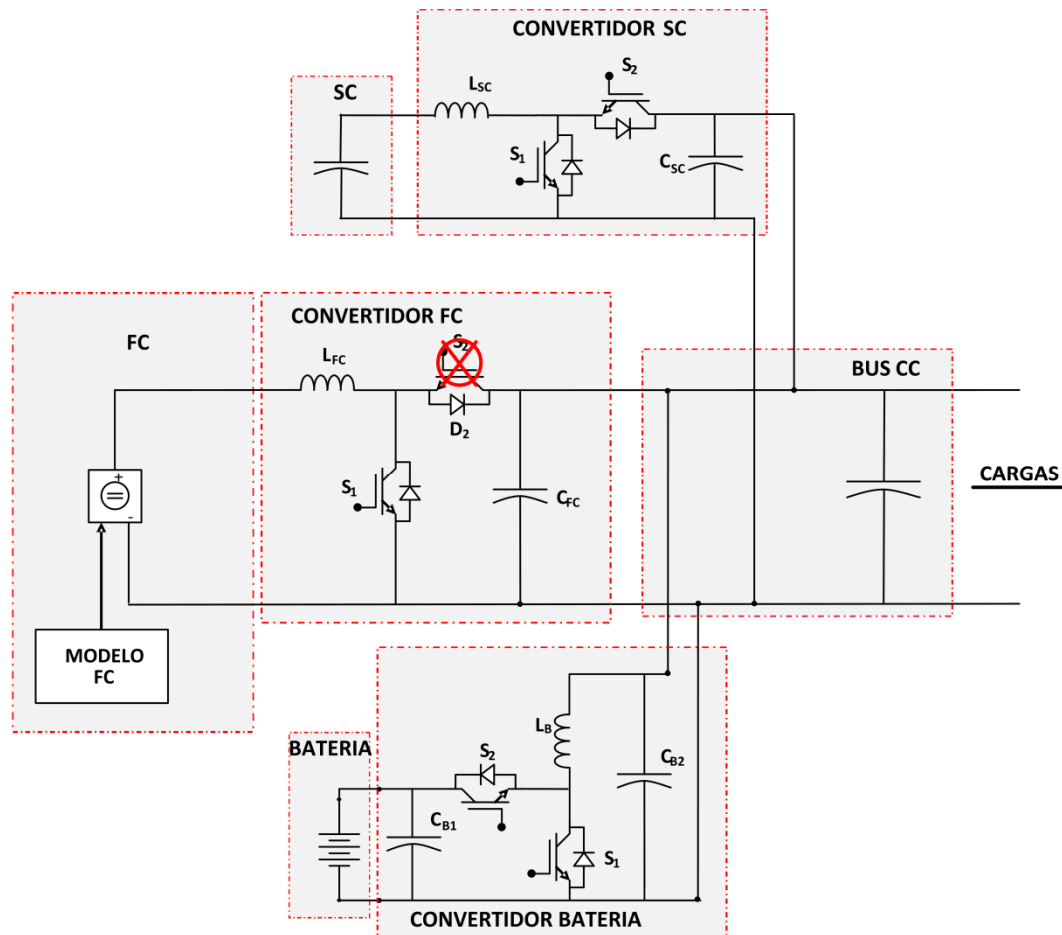


Figura 5.6. Esquema de la configuración de los convertidores del sistema híbrido.

En el caso de la FC y el supercondensador son necesarios convertidores elevadores para conectar las fuentes al bus común de corriente continua, estos convertidores ya han sido utilizados por varios autores en sus trabajos con sistemas híbridos de propulsión basados en estudios de estrategias de control y simulación de otros componentes del sistema híbrido [44], [91]-[94]. Además, el del supercondensador debe tener un modo de operación reductor que permita recargar el mismo, lo que implica que sea bidireccional en corriente. El empleado en la batería está basado en un convertidor reductor propuesto en [95], el cual adapta la tensión de la batería a la del bus (la cual es

menor que la anterior). Este convertidor también es bidireccional en intensidad, lo que permite la carga y descarga de la batería.

En el caso del unidireccional de la FC, uno de los transistores se sustituye por un diodo debido a que sólo va a funcionar en un sentido.

En los convertidores elevadores, el transistor de la parte inferior ( $S_1$ ), junto con el diodo de la superior, realizan la acción del convertidor elevador, mientras que el diodo de la parte inferior y el transistor superior ( $S_2$ ) realizan la acción del convertidor reductor. Para el convertidor de la FC, la acción de reducción no se produce porque esta fuente no es capaz de absorber energía del bus de continua. En principio, el funcionamiento en modo elevador puede ser realizado abriendo los interruptores de la parte superior ( $S_2$ ) y aplicando modulación por ancho de pulso (PWM) solo en los interruptores de la inferior ( $S_1$ ). A la inversa, para el funcionamiento en modo reductor, los interruptores del lado de baja tensión se pueden mantener abiertos y la señal PWM se aplica a los del lado de alta tensión. Sin embargo, lo que se hace es aplicar pulsos complementarios a los transistores. Este procedimiento tiene dos ventajas: garantiza que los convertidores operen siempre en el modo de conducción continuo y permite una transición continua entre el funcionamiento en modo elevador y reductor.

El convertidor reductor bidireccional de la batería funciona de manera inversa a los explicados anteriormente. El transistor de la parte inferior ( $S_1$ ), junto con el diodo de la superior, realizan la acción del convertidor elevador, mientras que el diodo de la parte inferior y el transistor superior ( $S_2$ ) realizan la acción del convertidor reductor. Sin embargo, debido a la variación de la posición de los transistores, en modo reductor se produce la descarga de energía de la batería (flujo de energía de la batería al bus de continua) y en modo elevador su carga (flujo del bus a la batería). Al igual que en el caso anterior, se aplican pulsos complementarios a los convertidores.

El condensador del bus de continua conectado a la salida de los convertidores minimiza la circulación de componentes de alta frecuencia a través de las fuentes.

## 5.2.1. Convertidor elevador de la pila de combustible

### 5.2.1.1. Introducción

Debido a que la pila de combustible genera corriente continua a una tensión variable menor que la del bus de corriente continua es necesario utilizar un convertidor cc/cc de tipo elevador para aumentar la tensión que ésta genera. El convertidor clásico de la figura 5.7 se ha seleccionado para realizar esta función.

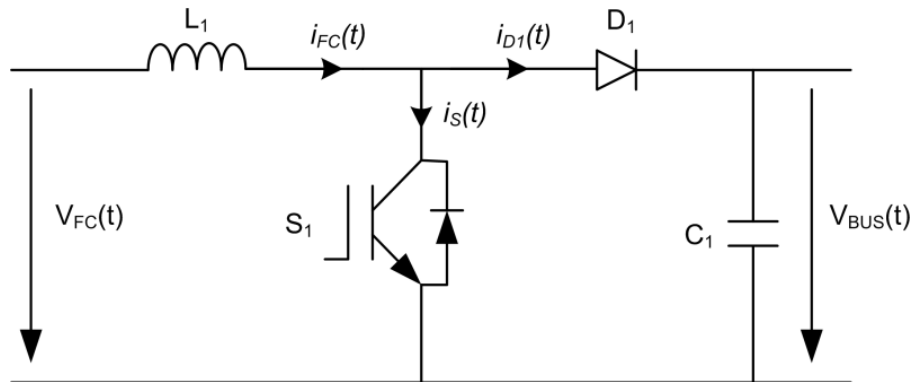


Figura 5.7. Topología clásica de convertidor elevador.

En el circuito de la figura 5.7 la tensión de salida,  $V_{BUS}$ , es siempre mayor que la de entrada,  $V_{FC}$ , funcionando en estado estacionario. El convertidor consiste en una bobina  $L$ , un transistor IGBT  $S_1$ , un diodo  $D_1$  y un condensador de filtrado  $C_1$ . El interruptor  $S_1$  se cierra y abre a la frecuencia de conmutación  $f_s=1/T_s$  con un ciclo de trabajo  $D_c=T_{ON}/T_s$ , donde  $T_{ON}$  es el intervalo de tiempo en el que el interruptor  $S_1$  está cerrado.

El convertidor elevador puede operar en dos modos de conducción dependiendo de la forma de la intensidad de la bobina, el modo de conducción continua (Continuous Conduction Mode, CCM) o discontinua (Discontinuous Conduction Mode). El convertidor en modo elevador en DCM no puede operar para cargas de demanda nula (resistencia infinita) porque el condensador de filtrado no tiene dónde descargarse. Por tanto, se diseñarán los elementos del convertidor para evitar su funcionamiento en DCM. La figura 5.8a y b muestra los circuitos equivalentes del convertidor elevador para CCM cuando el interruptor  $S_1$  está cerrado y el diodo está abierto, y cuando el interruptor está abierto y el diodo cerrado, respectivamente. Las formas idealizadas de las intensidades y las tensiones que explican el principio de funcionamiento del convertidor se representan en la figura 5.9. Para el intervalo de tiempo  $0 < t \leq DT_s$ , el interruptor está cerrado. Por eso, la tensión a través del diodo es  $v_D = -V_0$ , provocando que el diodo esté polarizado inversamente. La tensión a través del inductor es  $v_L = V_I$ .

Como resultado, la intensidad de la bobina aumenta linealmente con una pendiente de  $V_I/L$ . Como consecuencia, la energía magnética acumulada en ésta aumenta. La intensidad del interruptor es la misma que la del inductor. En  $t=DT_S$ , el interruptor se apaga debido a la ausencia de señal de tensión en su puerta. La bobina actúa como una fuente de intensidad y el diodo se cierra. La tensión a través de la bobina es  $v_L=V_I-V_0<0$ . Por lo tanto, la intensidad de la bobina disminuye con una pendiente de  $(V_I-V_0)/L$ . La intensidad del diodo es la misma que la de la bobina. Durante este intervalo de tiempo, la energía se transfiere de la bobina  $L_I$  al condensador  $C_I$  y a la carga. En el instante  $t=T$ , el interruptor se abre de nuevo terminando el ciclo.

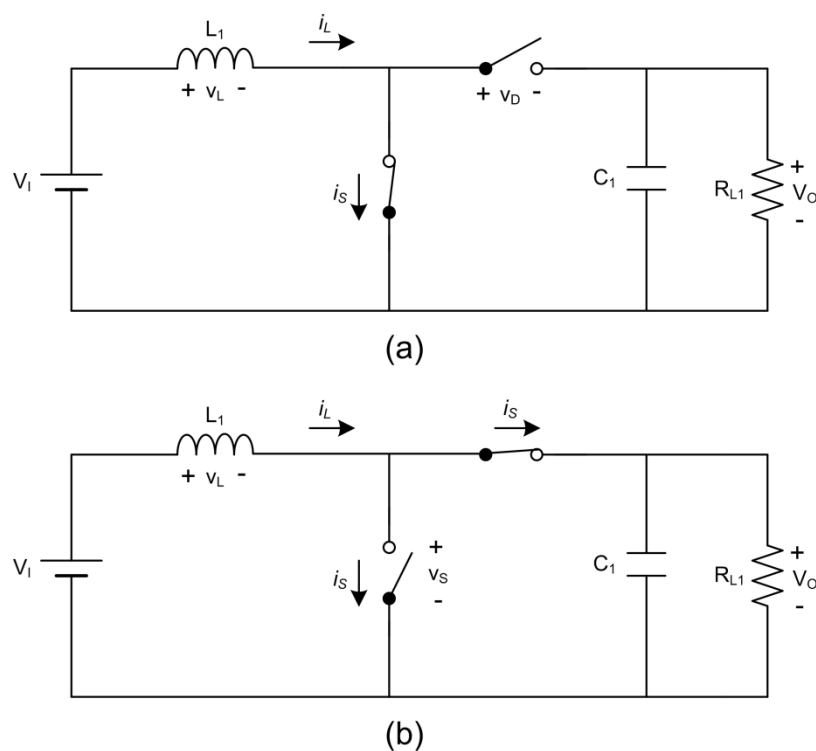


Figura 5.8. Circuitos equivalentes ideales para CCM del convertidor elevador. a) Cuando el interruptor está cerrado y el diodo abierto. b) Cuando el interruptor está abierto y el diodo cerrado.

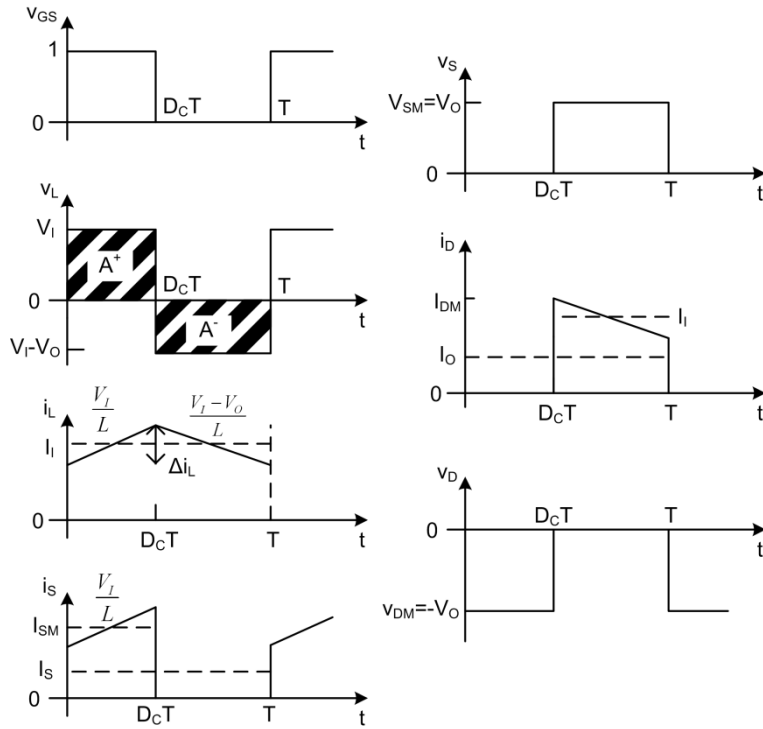


Figura 5.9. Formas ideales de las señales para el convertidor elevador en CCM.

### 5.2.1.2. Principio de funcionamiento

#### 5.2.1.2.1. Intervalo de tiempo $0 < t \leq D_C T_S$

El interruptor  $S_1$  está cerrado y el diodo está abierto durante este intervalo de tiempo. En la figura 5.8a se muestra un circuito equivalente ideal para este intervalo de tiempo. Cuando el interruptor se cierra, la tensión a través del diodo  $v_D$  es aproximadamente igual a  $-V_O$  y, por eso, el diodo está inversamente polarizado. La tensión a través del interruptor  $v_S$  y la intensidad del diodo son cero. La tensión a través de la bobina  $L_I$  es

$$v_L = V_I = L \frac{di_L}{dt} \quad (5.3)$$

Y la intensidad de la bobina  $i_L$  y la del interruptor  $i_S$  son

$$i_S = i_L = \frac{1}{L} \int_0^t v_L dt + i_L(0) = \frac{1}{L} \int_0^t V_I dt + i_L(0) = \frac{V_I}{L} t + i_L(0) \quad (5.4)$$

Donde  $i_L(0)$  es la intensidad inicial de la bobina en el instante  $t=0$ . De (5.4), la intensidad pico de la bobina es dada por

$$i_L(D_C T_S) = \frac{V_I D_C T_S}{L} + i_L(0) \quad (5.5)$$

Se puede observar rápidamente que la función de transferencia de la tensión es

$$M_{V,DC} = \frac{V_o}{V_I} = \frac{I_I}{I_o} = \frac{1}{(1-D_C)} \quad (5.6)$$

Por eso, el valor pico a pico del rizado de la intensidad de la bobina es expresado como

$$\Delta i_L = i_L(D_C T_S) - i_L(0) = \frac{V_I D_C T_S}{L} = \frac{V_I D_C}{f_s L} = \frac{V_o D_C}{M_{V,DC} f_s L} = \frac{V_o D_C (1-D_C)}{f_s L} \quad (5.7)$$

Para valores fijos de  $V_o, f_s$  y  $L$ ,

$$\frac{d\Delta i_L}{dD_C} = \frac{V_o}{f_s L} (1-2D_C) \quad (5.8)$$

Igualando esta derivada a cero, se puede demostrar que el valor máximo de  $\Delta i_L$  sucede para  $D_C=0.5$  y es dado por

$$\Delta i_{L,max} = \frac{V_o}{4f_s L} \quad (5.9)$$

Como el ciclo de trabajo  $D_C$  crece de 0 a 1, el valor pico del rizado de la intensidad  $\Delta i_L$  crece desde cero, alcanza su valor máximo en  $D_C=0.5$  y, entonces, decrece hasta cero.

La tensión del diodo es

$$v_D = -V_o \quad (5.10)$$

El valor medio de la intensidad de la bobina  $I_L$  es igual a la intensidad de entrada  $I_I$ . Por tanto, el valor pico de la intensidad del interruptor es

$$I_{SM} = I_I + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_o}{1-D_C} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (5.11)$$

Este intervalo de tiempo acaba en  $t=D_C T_S$  cuando el interruptor se abre mediante anulando la tensión en la puerta del IGBT. La intensidad de la bobina  $i_L$  fluye continuamente para el CCM. Ya que  $i_L(D_C T_S)$  es distinta de cero cuando el interruptor se abre, ésta actúa casi como una fuente de intensidad y hace que el diodo conduzca.

5.2.1.2.2. Intervalo de tiempo  $0 < t \leq D_C T_S$

Durante el intervalo de tiempo  $D_C T_S < t \leq T_S$ , el interruptor está abierto y el diodo cerrado. En la figura 5.8b se muestra el circuito equivalente del convertidor ideal para este intervalo de tiempo. La intensidad del interruptor  $i_S$  y la tensión del diodo  $v_D$  son cero. La bobina se descarga durante este intervalo de tiempo. La tensión a través del inductor  $L$  es

$$v_L = V_I - V_O = L \frac{di_L}{dt} < 0 \quad (5.12)$$

La cual indica que  $V_O > V_I$ . La intensidad a través de la bobina y del diodo puede deducirse de la siguiente manera

$$i_D = i_L = \frac{1}{L} \int_0^t v_L dt + i_L(D_C T_S) = \frac{1}{L} \int_0^t (V_I - V_O) dt + i_L(D_C T_S) = \frac{V_I - V_O}{L} (t - D_C T_S) + i_L(D_C T_S) \quad (5.13)$$

Donde  $i_L(D_C T_S)$  es la intensidad inicial de la bobina  $i_L$  en el instante  $t = D_C T_S$ . El valor pico a pico del rizado de la intensidad es

$$\Delta i_L = i_L(D_C T_S) - i_L(T_S) = \frac{(V_O - V_I)(1 - D_C)T_S}{L} = \frac{V_O D_C (1 - D_C)}{f_S L} \quad (5.14)$$

Donde  $V_I = V_O(1 - D_C)$ .

La tensión a través del interruptor S es dada por

$$v_S = V_O = V_{SM} \quad (5.15)$$

La intensidad pico del diodo y del interruptor son dadas por

$$I_{DM} = I_{SM} = I_I + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_O}{1 - D_C} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (5.16)$$

Para el peor caso, esta expresión se vuelve

$$I_{DM, \max} = I_{SM, \max} = I_{I, \max} + \frac{\Delta i_{L, \max}}{2} = \frac{I_{O, \max}}{1 - D_{C, \max}} + \frac{\Delta i_{L, \max}}{2} \quad (5.17)$$

Este intervalo de tiempo acaba en  $t = T_S$  cuando el interruptor se cierra mediante una tensión en la puerta del IGBT.

### 5.2.1.3. Funciones de transferencia del convertidor para CCM

La tensión y la intensidad a través de una bobina lineal están relacionadas por la ley de Faraday en su forma diferencial,

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (5.18)$$

Para funcionamiento en estado estacionario, se satisface la siguiente condición de frontera

$$i_L(0) = i_L(T_S) \quad (5.19)$$

Reordenando (5.18),

$$\frac{1}{L} v_L dt = di_L \quad (5.20)$$

e integrando en los dos lados queda

$$\frac{1}{L} \int_0^T v_L dt = \int_0^T di_L = i_L(T_S) - i_L(0) = 0 \quad (5.21)$$

La forma integral de la ley de Faraday para una bobina bajo condiciones de funcionamiento estacionarias es

$$\int_0^T v_L dt = 0 \quad (5.21)$$

El valor medio de la tensión a través de una bobina en estado estacionario es cero. Por eso,

$$V_{L(AV)} = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} v_L dt = 0 \quad (5.22)$$

Esta ecuación es llamada también *balance voltios-segundo* de una bobina, lo que significa que los voltios-segundo almacenados son iguales a los voltios-segundo liberados.

Para convertidores PWM trabajando en CCM,

$$\int_0^{D_c T_S} v_L dt + \int_{D_c T_S}^{T_S} v_L dt = 0 \quad (5.23)$$



Lo que significa que el área encerrada por la parte positiva de la tensión de la bobina  $A^+$  es igual al área encerrada por la parte negativa de la tensión de la bobina  $A^-$ , es decir:

$$A^+ = A^- \quad (5.24)$$

Por tanto, según la figura 5.9 donde se representan ambas se puede deducir

$$V_I D_C T_S = (V_O - V_I)(1 - D_C) T_S \quad (5.25)$$

De lo que se obtiene

$$V_O = \frac{V_I}{1 - D_C} \quad (5.26)$$

Y resulta en la función de transferencia para un convertidor ideal,

$$M_{V,DC} \equiv \frac{V_O}{V_I} = \frac{I_I}{I_O} = \frac{1}{1 - D_C} \quad (5.27)$$

Por otra parte, la función de transferencia de la intensidad es

$$M_{I,DC} \equiv \frac{I_O}{I_I} = 1 - D_C \quad (5.28)$$

A partir de estas funciones de transferencia se puede construir el modelo de convertidor utilizado para las simulaciones. El interruptor IGBT ha sido implementado mediante dos fuentes dependientes, una fuente de tensión en el lado de la FC y una fuente de intensidad en el lado del bus de continua. Ambas fuentes dependientes están en función del ciclo de trabajo  $D_C$  mediante las relaciones desarrolladas.

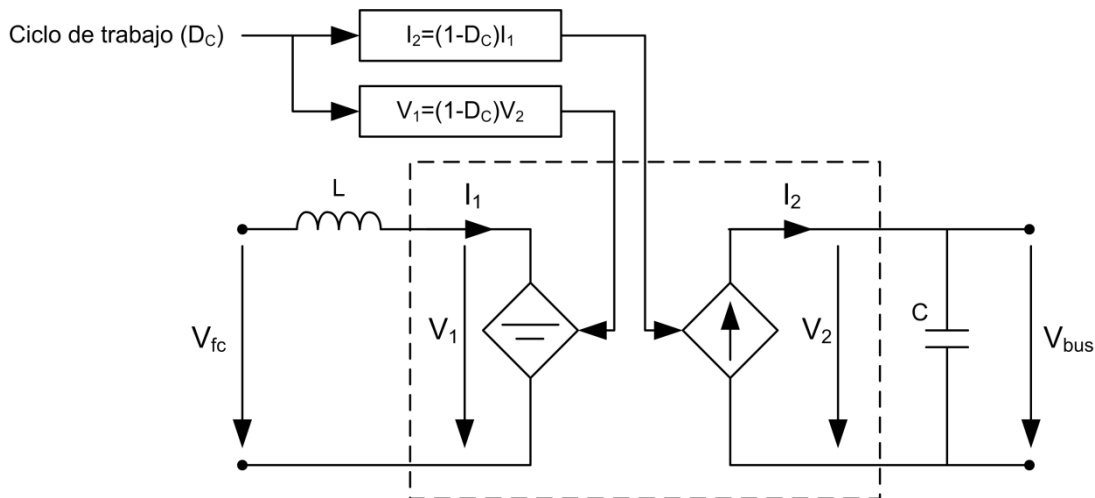


Figura 5.10. Circuito equivalente del convertidor elevador usado para las simulaciones.

### 5.2.1.4. Fundamentos para el diseño de componentes del convertidor

El diseño de los componentes pasivos del convertidor se hará con el objetivo de que el convertidor funcione todo el tiempo en modo CCM y evitar su funcionamiento en DCM, es decir, que para el valor de potencia mínimo de la FC asegurar que el convertidor trabaje en modo CCM. Por tanto, se analiza a continuación el estado de frontera entre ambos modos de funcionamiento.

En la figura 5.11 se muestra la forma de la intensidad de una bobina trabajando en la frontera entre el modo CCM y DCM. Si esta intensidad se hiciese nula antes de  $t=T_S$  el convertidor estaría funcionando en modo DCM.

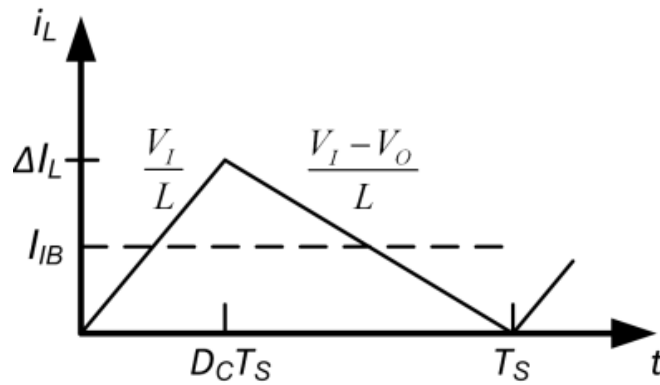


Figura 5.11. Forma de la señal de la intensidad de una bobina de un convertidor elevador funcionando en la frontera entre los modos CCM y DCM.

La forma de onda mostrada viene dada por

$$i_L = \frac{V_I}{L} t \quad \text{para } 0 < t \leq D_C T_S \quad (5.29)$$

De la cual

$$\Delta i_L = i_L(D_C T_S) = \frac{V_I D_C T_S}{L} = \frac{V_O D_C}{f_S L M_{V,DC}} = \frac{V_O D_C (1 - D_C)}{f_S L} \quad (5.30)$$

La componente continua de la intensidad de entrada en la frontera entre el CCM/DCM es

$$I_{IB} = \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_O D_C (1 - D_C)}{2 f_S L} \quad (5.31)$$

cuyo máximo valor sucede para  $D_C=0.5$ . De (5.27) y (5.31), se obtiene la intensidad de salida en la frontera entre el CCM y DCM es

$$I_{OB} = I_{IB} (1 - D_C) = \frac{V_O D_C (1 - D_C)^2}{2 f_s L} = \frac{V_O (M_{V,DC} - 1)}{2 f_s L M_{V,DC}^2} \quad (5.32)$$

y la resistencia de carga en la frontera es

$$R_{LB} = \frac{V_O}{I_{OB}} = \frac{2 f_s L}{D_C (1 - D_C)^2} = \frac{2 f_s L M_{V,DC}^3}{M_{V,DC} - 1} \quad (5.33)$$

La figuras 5.12 y 5.13 muestran la representación de  $I_{OB}/(V_O/2f_sL)=D_C(1-D_C)^2$  y  $R_{LB}/(2f_sL)=1/[D_C(1-D_C)^2]$  como funciones de  $D_C$ . Para encontrar el máximo valor de  $I_{OB}$ , basta con derivar respecto a  $D_C$  e igualar a cero.

$$\frac{dI_{OB}}{dD_C} = \frac{V_O}{2 f_s L} (1 - 4D_C + 3D_C^2) = 0 \quad (5.34)$$

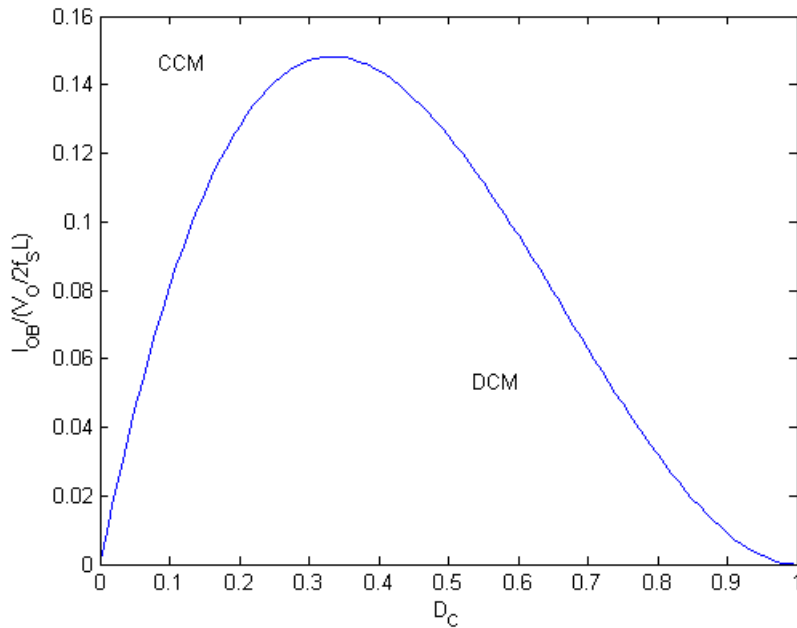


Figura 5.12. Intensidad de carga normalizada en la frontera de CCM/DCM en función del ciclo de trabajo del convertidor elevador.

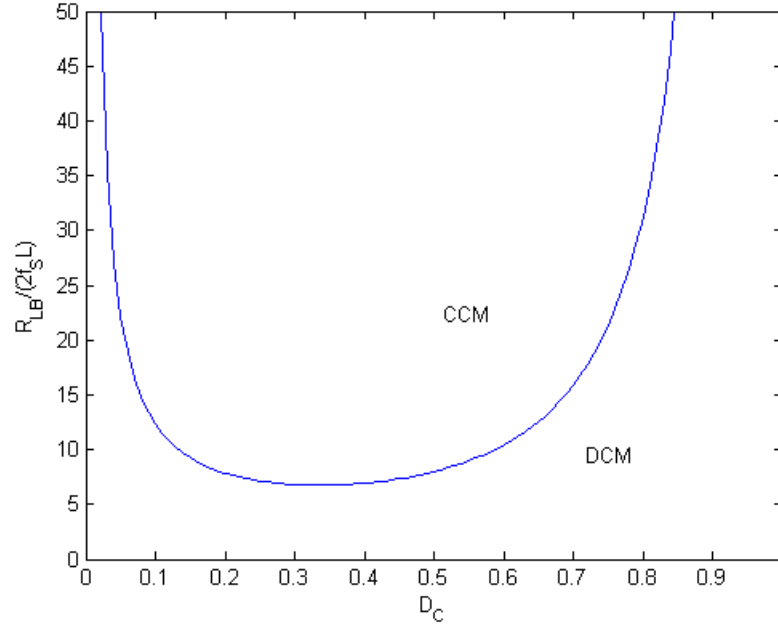


Figura 5.13. Resistencia de carga normalizada en la frontera de CCM/DCM en función del ciclo de trabajo del convertidor elevador.

El valor máximo de  $I_{OB}$  se produce para  $D_C=1/3$ , el cual corresponde a  $M_{V,DC}=1.5$ . Sustituyendo el valor del ciclo de trabajo en la expresión (5.32) se obtiene el máximo valor de la intensidad de carga del convertidor funcionando en la frontera

$$I_{OB\max} = \frac{2}{27} \frac{V_o}{f_s L} \quad (5.35)$$

Al que le corresponde un valor mínimo de la resistencia de carga en del convertidor funcionando en la frontera,

$$R_{LB\min} = \frac{V_o}{I_{OB\max}} = 13.5 f_s L_{\min} \quad (5.36)$$

Por tanto, usando  $I_{OB\max}=I_{Omin}=V_o/R_{Lmax}$ , se obtiene el valor mínimo de la inductancia de la bobina L que asegura la operación del convertidor en CCM para cualquier valor de  $D_C$ :

$$L_{\min} = \frac{2}{27} \frac{V_o}{f_s I_{OB\max}} = \frac{2}{27} \frac{R_{L\max}}{f_s} \quad (5.37)$$

Por otra parte, para el cálculo de la capacidad del condensador C de filtrado nos fijamos en el rizado de la tensión de salida. Considerando la resistencia interna del condensador tendríamos el siguiente circuito a la salida del convertidor.

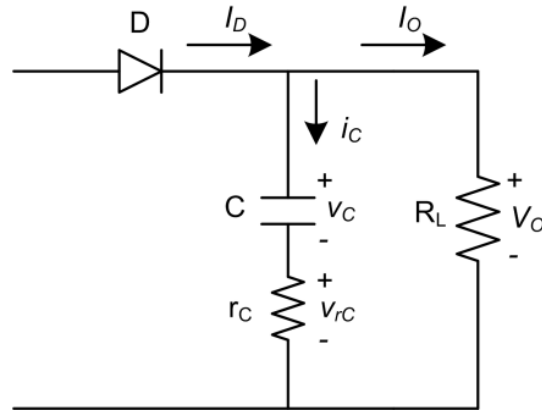


Figura 5.14. Circuito equivalente de la salida del convertidor elevador.

La componente continua de la intensidad del diodo circula a través de la resistencia de carga  $R_L$ . La componente alterna de la intensidad del diodo se divide en la rama del condensador entre éste y su resistencia interna. En la práctica, el condensador de filtrado se diseña de manera que la impedancia de la rama del condensador sea mucho menor que la resistencia de carga  $R_L$ . Como consecuencia, la intensidad a través del condensador es aproximadamente igual a la componente alterna de la intensidad del diodo (filtra esa intensidad).

El máximo valor pico a pico de la intensidad del condensador es

$$I_{C_{pp}} = I_{DM \max} \approx I_{Imax} = \frac{I_{O \max}}{1 - D_{C \max}} \quad (5.38)$$

De aquí se deduce que el valor pico a pico a través de la resistencia interna del condensador  $r_C$  es

$$V_{rC_{pp}} = r_C I_{C_{pp}} = r_C I_{DM \max} \approx \frac{r_C I_{O \max}}{1 - D_{C \max}} \quad (5.39)$$

El valor pico a pico del rizado de la tensión de salida,  $V_r$ , es una condición de diseño y, por tanto, es conocido. Por tanto, el valor máximo pico a pico de la componente alterna de la tensión a través del condensador será

$$V_{C_{pp}} \approx V_r - V_{rC_{pp}} \quad (5.40)$$

Por otra parte, esta tensión es aproximadamente [85]:

$$V_{C_{pp}} = \frac{\Delta Q_{\max}}{C_{\min}} = \frac{I_{O\max} D_{C\max} T}{C_{\min}} = \frac{V_O D_{C\max}}{f_S R_{L\min} C_{\min}} \quad (5.41)$$

Donde  $\Delta Q_{\max}$  es el descenso de carga del condensador durante el intervalo de cero a  $D_C T_S$ . Reagrupando de (5.41) se obtiene la capacidad mínima del condensador de filtrado:

$$C_{\min} = \frac{I_{O\max} D_{C\max}}{f_S V_{C_{pp}}} = \frac{D_{C\max} V_O}{f_S R_{L\min} V_{C_{pp}}} \quad (5.42)$$

A parte, los estreses en tensión e intensidad del IGBT y del diodo son:

$$I_{SM\max} = I_{DM\max} = \frac{I_{O\max}}{1 - D_{C\max}} + \frac{V_O D_{C\max} (1 - D_{C\max})}{2 f_S L} \quad (5.43)$$

$$V_{SM} = V_{DM} = V_O \quad (5.44)$$

### 5.2.1.5. Dimensionamiento de los componentes del convertidor

Después de desarrollar cómo obtener el valor de inductancia mínimo de la bobina que hace que el convertidor trabaje en modo CCM y el valor mínimo de la capacidad del condensador de filtrado de la salida, se van a calcular dichos valores para el convertidor elevador correspondiente a la FC. Los datos que sirven como punto de partida se recogen en la tabla 5.1 que se muestra a continuación.

Dato	Valor
$V_{L\min}$	627V
$V_{L\max}$	721V
$P_{I\min}$	15kW
$P_{I\max}$	145kW
$V_O$	750V
$f_S$	25kHz
$V_r/V_O$	<1%

Tabla 5.1. Valores iniciales para el cálculo de los componentes del convertidor elevador.

Los valores mínimo y máximo de la tensión de entrada al convertidor se corresponden con los límites máximo y mínimo entre los que va a funcionar la FC

(627V se corresponde con la tensión en su punto de máxima potencia y 721V con la tensión a la potencia mínima que le permiten trabajar las estrategias de control). La frecuencia de conmutación se ha elegido de 25kHz. Se ha elegido una relación entre la tensión de rizado pico a pico y la tensión de salida menor de un 1% para diseñar el condensador de filtrado.

Las resistencias de carga mínima y máxima, considerando el convertidor ideal, serían:

$$R_{L\min} = \frac{V_o}{I_{O\max}} = \frac{V_o^2}{P_{O\max}} = 3.88\Omega \quad (5.45)$$

$$R_{L\max} = \frac{V_o}{I_{O\min}} = \frac{V_o^2}{P_{O\min}} = 37.5\Omega \quad (5.46)$$

El valor mínimo y máximo de la función de transferencia de la tensión son

$$M_{V,DC\min} = \frac{V_o}{V_{I\max}} = 1.04 \quad (5.47)$$

$$M_{V,DC\max} = \frac{V_o}{V_{I\min}} = 1.20 \quad (5.48)$$

Asumiendo una eficiencia,  $\eta_{DC}$ , del convertidor del 90% el valor mínimo y máximo del ciclo de trabajo serían:

$$D_{C\min} = 1 - \frac{\eta_{DC}}{M_{V,DC\min}} = 0.1346 \quad (5.49)$$

$$D_{C\max} = 1 - \frac{\eta_{DC}}{M_{V,DC\max}} = 0.25 \quad (5.50)$$

Por tanto, el valor mínimo de la bobina que asegura el funcionamiento del convertidor en modo CCM será:

$$L_{\min} = \frac{2}{27} \frac{R_{L\max}}{f_s} = 0.111mH \quad (5.51)$$

Este valor es un tanto conservador, según [85], si  $D_{C\max} < 1/3$  o  $D_{C\min} > 1/3$ , un enfoque menos conservador se puede tomar. De la expresión (5.32) se puede escribir:

$$I_{OB\max} = \frac{V_o D_{C\max} (1 - D_{C\max})^2}{2f_s L_{\min}}, \quad \text{para } D < 1/3 \quad (5.52)$$

Y, por tanto,

$$L_{\min} = \frac{R_{L\max} D_{C\max} (1 - D_{C\max})^2}{2f_s} = 0.105\text{mH}, \quad \text{para } D < 1/3 \quad (5.53)$$

Con lo que el valor definitivo de la inductancia de la bobina sería 0.105 mH.

Para el cálculo de la capacidad del condensador de filtrado asumamos que el rizado de la tensión de salida se reparte equitativamente entre el condensador y su propia resistencia interna, por tanto siendo  $V_r$  de 7.5 V (un 1% de la tensión de salida):

$$V_{rC_{pp}} = V_{C_{pp}} = \frac{V_r}{2} = 3.75V \quad (5.54)$$

Por tanto la capacidad mínima del condensador de filtrado será

$$C_{\min} = \frac{D_{C\max} V_o}{f_s R_{L\min} V_{C_{pp}}} = 0.257\text{mF} \quad (5.55)$$

Dicho condensador deberá tener una capacidad superior a la calculada y una tensión nominal de 750 V.

### 5.2.1.6. Convertidores bidireccionales

El convertidor de la figura 5.15 es un convertidor que utiliza un medio puente y opera como (i) convertidor elevador cuando la potencia se transmite desde el supercondensador al bus de continua (S1 y D1 están activos y, S2 y D2 inactivos), y como (ii) convertidor reductor cuando la potencia se transmite del bus de continua al supercondensador (S2 y D2 están activos, y S1 y D1 están inactivos). En este circuito, ambos interruptores están compuestos de un transistor IGBT y un diodo antiparalelo. Este tipo de circuito puede conducir intensidad en ambas direcciones, pero sólo puede mantener la tensión en una dirección. En otras palabras, los interruptores son bidireccionales para la intensidad y unidireccionales para la tensión. Por tanto, se denominan convertidores de dos cuadrantes, ya que permiten el flujo de energía en ambas direcciones, de izquierda a derecha y viceversa.

Si una fuente de tensión se conecta en paralelo con el condensador  $C_1$  y en paralelo



con el condensador  $C_2$  se conecta una carga, se obtiene un convertidor bidireccional reductor. El interruptor  $S_2$  se usa como interruptor controlable y su diodo antiparalelo  $D_1$  está permanentemente abierto, mientras que el diodo  $D_2$  se usa como interruptor pasivo (conmutado de manera natural). El otro interruptor  $S_1$  puede mantenerse permanentemente abierto o puede cerrarse excitando su puerta cuando el diodo  $D_2$  conduce.

En contraste, si una fuente de tensión se conecta en paralelo con el condensador  $C_2$  y una carga se conecta en paralelo con el condensador  $C_1$ , se consigue un convertidor bidireccional elevador. En éste, la energía fluye de derecha a izquierda. La puerta del interruptor  $S_1$  se usa como interruptor controlable y su diodo antiparalelo  $D_2$  está siempre abierto, mientras que el diodo  $D_1$  se usa como interruptor pasivo. El interruptor  $S_2$  puede mantenerse apagado durante el ciclo completo (no excitando su puerta), o puede activarse cuando el diodo  $D_1$  está conduciendo.

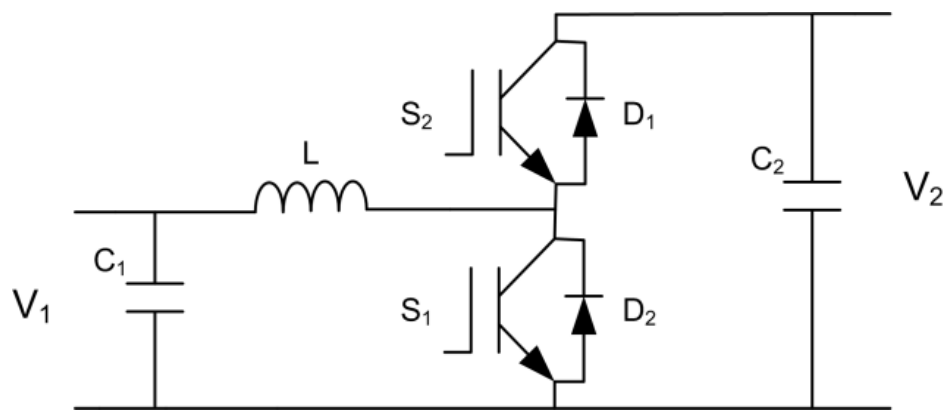


Figura 5.15. Convertidor bidireccional con un medio puente.

A continuación se hace un análisis de los estreses en intensidad y tensión a los que se someten los distintos componentes pasivos y activos de la topología considerada mediante ecuaciones en función de la relación de tensiones  $V_O/V_I$ , la máxima intensidad de carga  $I_O$ , el ciclo de trabajo  $D_C$ , y el rizado de la intensidad de la bobina  $r_L$ .

Los parámetros de interés son los valores eficaces de intensidad de interruptores y diodos,  $I_{S,rms}$  y  $I_{D,rms}$ , y los valores pico de intensidad de ambos  $I_{SM}$  y  $I_{DM}$ . Los valores eficaces determinan las pérdidas por conducción (es decir,  $R_{on} \times I_{S,rms}^2$ ) y los valores pico determinan las intensidades máximas que van a circular por los componentes activos.

Para dimensionar la bobina, un factor importante es la intensidad media de la bobina  $I_{L,DC}$  ya que determina el tamaño del cable y está relacionada con la máxima intensidad

de carga  $I_O$ . Otro factor importante es el rizado de la intensidad  $\Delta I_L$  ya que es el responsable de las pérdidas en el núcleo y determina la intensidad pico de la bobina:

$$I_{LM} = I_{L,DC} + \Delta I_L \quad (5.56)$$

Este valor se utiliza para determinar la energía que es capaz de almacenar la bobina (es decir,  $1/2 \cdot L \cdot I_{LM}^2$ ) y la intensidad máxima a la que se someterán los componentes activos del convertidor.

Para dimensionar los condensadores, un parámetro importante es la intensidad eficaz en éstos  $I_{C,rms}$  que determina las pérdidas del condensador ( $R_C \cdot I_{C,rms}^2$ ). Otro parámetro importante es la intensidad pico a pico del condensador  $I_{C,pp}$ . Dos parámetros útiles de diseño utilizados en el diseño de los componentes de los convertidores bidireccionales son el coeficiente de rizado de la intensidad de la bobina  $r'_L$ , y el coeficiente de rizado de la tensión del condensador  $r'_C$ , dados por la relación entre la componente alterna con respecto a la continua:

$$r'_L = \frac{\Delta I_L}{I_{L,DC}} \quad (5.57)$$

$$r'_C = \frac{\Delta V_C}{V_{C,avg}} \quad (5.58)$$

El convertidor ha sido diseñado para operar en CCM. El dimensionamiento de los componentes pasivos, basado en  $r'_L$  y  $r'_C$  como parámetros iniciales de diseño se ha hecho como sigue. Hay que comentar que el rizado de la intensidad seleccionado para la bobina es de 0.3 p.u. y el de la tensión del condensador es de 0.05 p.u.

En la tabla 5.2 [96] se recogen las expresiones para el cálculo de las variables que, como comentábamos anteriormente, tienen una influencia importante en el diseño del convertidor.

	Modo elevador	Modo reductor
Ciclo de trabajo. $D_{C1}$ (elevador) y $D_{C2}$ (reductor)	$1 - \frac{1}{V_{O2}/V_{I1}}$	$\frac{V_{O1}}{V_{I2}}$
Rizado de la intensidad de la bobina, $\Delta I_L$	$\frac{V_{O2}}{f_S L} D_{C1} (1 - D_{C1})$	$\frac{V_{O1}}{f_S L} D_{C2} (1 - D_{C2})$

Tabla 5.2. Parámetros de interés para el convertidor bidireccional.

Las expresiones propuestas a continuación dimensionan los elementos pasivos del convertidor propuesto. En primer lugar, el cálculo de la inductancia de la bobina se calcularía como:

$$L_{\min} = \max \left( \frac{V_O}{\Delta I_{Lpu} f_S I_O} D_{C1} (1 - D_{C1})^2; \frac{V_I}{\Delta I_{Lpu} f_S I_I} D_{C2}^2 (1 - D_{C2}) \right) \quad (5.59)$$

Donde,  $0 \leq D_{C1} \leq 1/2$ ,  $1/2 \leq D_{C2} \leq 1$ , los subíndices “O” significan “a la salida” (corresponden con el lado del condensador  $C_2$ ), los subíndices “I” significan “a la entrada” (corresponden con el lado del condensador  $C_1$ ) y  $\Delta I_{Lpu}$  es el valor pico a pico del rizado de la intensidad en la bobina expresado en valor por unidad. Respecto a la figura 5.15, se considera que la entrada del convertidor está en el lado del condensador  $C_1$  y la salida en el opuesto.

Los condensadores de filtrado de la entrada y la salida del condensador se calculan mediante las expresiones:

$$C_{1\min} = \frac{(1 - D_{C2})}{8L\Delta V_{1pu} f_S^2} \quad (5.60)$$

$$C_{2\min} = \frac{I_2 D_{C1}}{\Delta V_{2pu} f_S} \quad (5.61)$$

#### 5.2.1.6.1. Convertidor bidireccional del supercondensador

El convertidor del supercondensador es una variante del convertidor unidireccional comentado anteriormente en la que se sustituye el diodo por otro IGBT lo que permite la transmisión de intensidad en ambos sentidos. Basándonos en la figura 5.15, el conjunto de supercondensadores se encontraría en el lado del condensador  $C_1$  y el bus de continua en el opuesto. El convertidor transmite energía del supercondensador al bus cuando opera como convertidor elevador y en el sentido opuesto cuando funciona como reductor.

En la tabla 5.3 se recogen los valores considerados para su diseño. El límite de la potencia máxima a transmitir en ambos sentidos lo determinan las estrategias de control. En el caso de los supercondensadores se ha establecido 175 kW. Se han considerado dos situaciones, el supercondensador completamente cargado (se corresponde con una tensión de 625V, al que le corresponde una intensidad de 430.77 A según la restricción

de potencia impuesta) y con un estado de carga mínimo de 65% (que se corresponde con una tensión de 406.25 V y 280 A de intensidad).

Modo elevador		Modo reductor	
$V_O$	750V	$V_I$	[406.25,625]V
$\Delta I_{L_{pu}}$	0.3 p.u.	$\Delta I_{L_{pu}}$	0.3 p.u.
$f_S$	25kHz	$f_S$	25kHz
$I_O$	233.33A	$I_I$	[280,430.77]A

Tabla 5.3. Valores iniciales para el diseño del convertidor bidireccional del supercondensador.

La expresión (5.59) propone que la inductancia seleccionada sea el valor máximo entre las dos expresiones propuestas. La de la izquierda está referida al funcionamiento del convertidor en modo elevador y la de la derecha al funcionamiento en modo reductor. En la figura 5.16 se representa dicha expresión y se marca el valor máximo de inductancia obtenido.

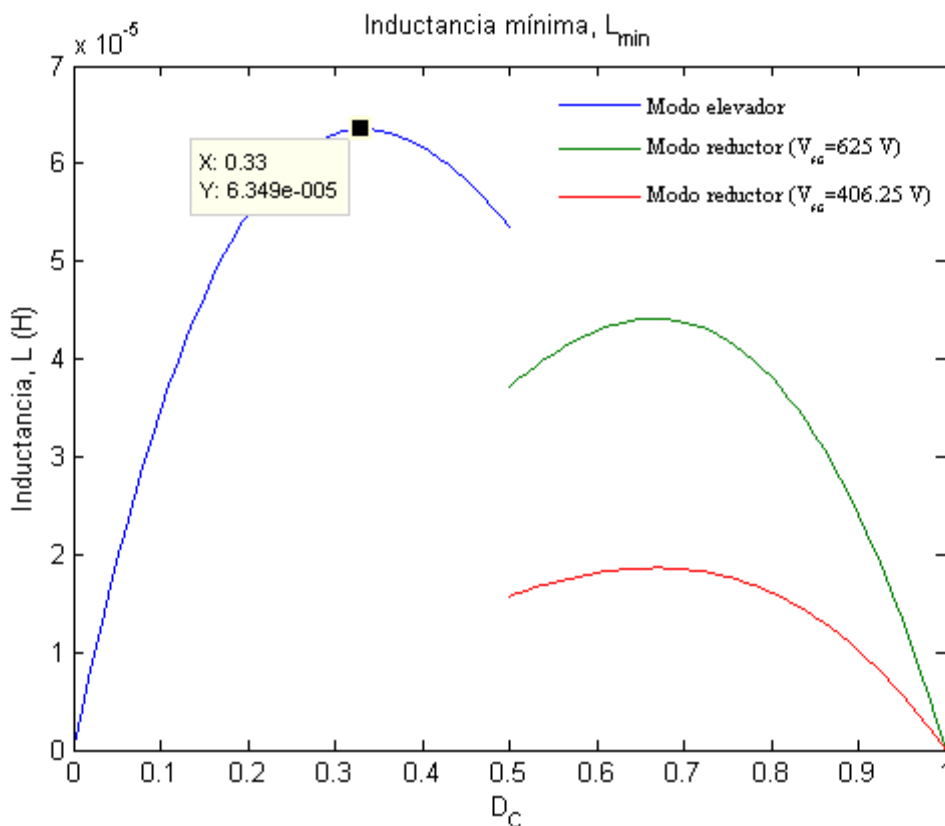


Figura 5.16. Selección de la inductancia mínima para el convertidor bidireccional del supercondensador.

Por tanto, una inductancia mayor a  $63.49 \mu\text{H}$  debe ser seleccionada para el convertidor. En el caso de los condensadores de filtrado de ambos lados del convertidor, las expresiones (5.60) y (5.61) se utilizan sobre los datos recogidos en la tabla 5.4 obteniéndose unos valores de  $31.50 \mu\text{F}$  y  $93.3 \text{ mF}$  para la  $C_1$  y  $C_2$ , respectivamente. Como se ha comentado anteriormente, los valores de  $D_{C1}$  van desde 0 a  $\frac{1}{2}$  y los de  $D_{C2}$  de  $\frac{1}{2}$  a 1, por lo que en las expresiones anteriores para que en ambos casos la capacidad mínima sea lo máxima posible se usa el valor  $\frac{1}{2}$  para ambos.

Condensador a la entrada, $C_1$		Condensador a la salida, $C_2$	
$D_{C2}$	0.5	$D_{C1}$	0.5
$\Delta V_{1pu}$	0.05 p.u.	$\Delta V_{2pu}$	0.05 p.u.

Tabla 5.4. Valores tomados para el cálculo de la capacidad de los condensadores de filtrado.

#### 5.2.1.6.2. Convertidor bidireccional de la batería

El convertidor de la batería es similar al del supercondensador, con la diferencia de que las baterías se encuentran en el lado de mayor tensión y el bus de continua estaría en el lado de menor tensión. Basándonos en la figura 5.15, el conjunto de baterías se encontraría en el lado del condensador  $C_2$  y el bus de continua en el opuesto ( $C_1$ ). El convertidor transmite energía de la batería al bus cuando opera como convertidor reductor y en el sentido opuesto cuando funciona como elevador.

En la tabla 5.5 se recogen los valores considerados para su diseño. El límite de la potencia máxima a transmitir en ambos sentidos lo determinan las estrategias de control. En el caso de las baterías se han establecido  $400\text{kW}$ . En este caso se han considerado dos situaciones, la batería completamente cargada (se corresponde con una tensión de  $1445\text{V}$ , al que le corresponde una intensidad de  $276.82\text{A}$  según la restricción de potencia impuesta) y con un estado de carga mínimo del 55% (que se corresponde con una tensión de  $1088\text{V}$  y  $367.65\text{A}$  de intensidad).

Modo elevador		Modo reductor	
$V_2$	$[1088,1445]\text{V}$	$V_1$	$750\text{V}$
$\Delta I_{Lpu}$	0.3 p.u.	$\Delta I_{Lpu}$	0.3 p.u.
$f_S$	$25\text{kHz}$	$f_S$	$25\text{kHz}$
$I_2$	$[276.82,367.65]\text{A}$	$I_1$	$533.33\text{A}$

Tabla 5.5. Valores iniciales para el diseño del convertidor bidireccional de la batería.

La expresión (5.59) propone que la inductancia seleccionada sea el valor máximo entre las dos expresiones propuestas. La de la izquierda está referida al funcionamiento del convertidor en modo elevador y la de la derecha al funcionamiento en modo reductor. En la figura 5.17 se representa dicha expresión y se marca el valor máximo de inductancia obtenido.

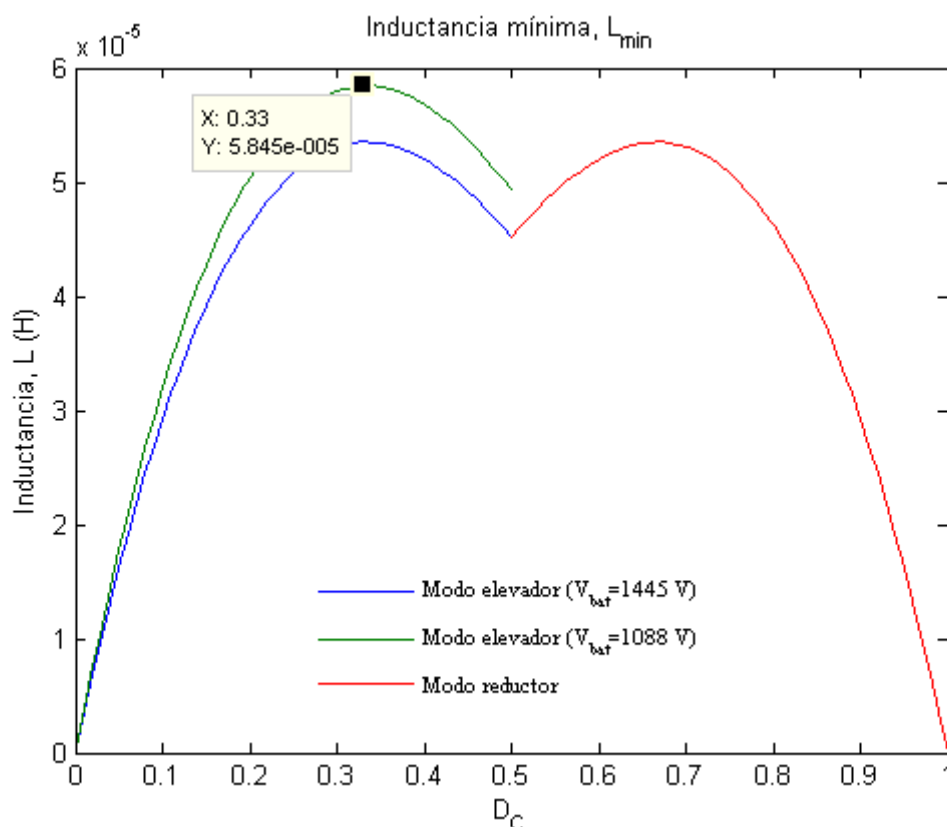


Figura 5.17. Selección de la inductancia mínima para el convertidor bidireccional de la batería.

Por tanto, una inductancia mayor a  $58.45\mu\text{H}$  debe ser seleccionada para el convertidor. En el caso de los condensadores de filtrado de ambos lados del convertidor, las expresiones (5.60) y (5.61) se utilizan sobre los datos recogidos en la tabla 5.4 obteniéndose unos valores de  $34.22\mu\text{F}$  y  $147.1\text{mF}$  para  $C_1$  y  $C_2$ , respectivamente. Como se ha comentado anteriormente, los valores de  $D_{C1}$  van desde 0 a  $\frac{1}{2}$  y los de  $D_{C2}$  de  $\frac{1}{2}$  a 1, por lo que en las expresiones anteriores para que en ambos casos la capacidad mínima sea lo máxima posible se usa el valor  $\frac{1}{2}$  para ambos.

Condensador a la entrada, $C_1$		Condensador a la salida, $C_2$	
$D_{C2}$	0.5	$D_{C1}$	0.5
$\Delta V_{1\text{pu}}$	0.05 p.u.	$\Delta V_{2\text{pu}}$	0.05 p.u.

Tabla 5.6. Valores tomados para el cálculo de la capacidad de los condensadores de filtrado.

### 5.2.1.7. Resumen de los valores

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los distintos valores mínimos de las bobinas y condensadores de cada convertidor; así como de los estreses en tensión e intensidad de los componentes activos.

	Bobina			Condensador C <sub>1</sub>			
CONVERTIDOR	L <sub>min</sub> (mH)	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)	C (μF)	V <sub>max</sub> (V)	I <sub>max</sub> (A)	
FC	0.111	53.57	721	-	-	-	
SC	0.063	399.7	625	31.50	625	264.44	
Batería	0.058	802.78	1445	34.22	750	129.23	
	Condensador C <sub>2</sub>			Diodo <sub>2</sub> /IGBT <sub>1</sub>		Diodo <sub>1</sub> /IGBT <sub>2</sub>	
CONVERTIDOR	C (mF)	V <sub>max</sub> (V)	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)	I <sub>max</sub> (A)
FC	0.257	750	257.77	750	53.57	-	-
SC	93.3	750	129.23	750	536.66	750	435.39
Batería	147.1	1445	535.9	1445	845.60	1445	1226.7

Tabla 5.7. Resumen de los valores tomados para los modelos de convertidores.

### 5.3. Sistema de tracción

Según la configuración del actual tranvía de Zaragoza, el sistema de tracción del mismo está formado por cuatro cofres dobles de tracción, disponiendo cada cofre en su interior de un sistema doble formado por inversor de tensión DC/AC, resistencia de frenado y motor asíncrono con rotor cortocircuitado en jaula de 61kW. Por lo tanto, para esta configuración, se dispone de un total de ocho motores de 61kW, ocho inversores y ocho resistencias de frenado.

Para esta tesis, durante las simulaciones, se ha considerado un sistema equivalente de tracción, estando formado por cuatro cofres de tracción disponiendo cada uno de un inversor y un único motor de 125kW. Por su parte, la resistencia de frenado se ha considerado como una única resistencia equivalente a las ocho de la configuración inicial de tranvía, siendo esta la encargada de la disipación de toda la energía en el caso de que esta sea necesaria.

### 5.3.1. Motor de CA

Según la configuración del actual tranvía del centro de Sevilla, el sistema de tracción del mismo está formado por cuatro cofres dobles de tracción, disponiendo cada cofre en su interior de un sistema doble formado por inversor de tensión DC/AC, resistencia de frenado y motor asíncrono con rotor cortocircuitado en jaula de 61kW. Por lo tanto, para esta configuración, se dispone de un total de ocho motores de 61kW, ocho inversores y ocho resistencias de frenado.

Para esta tesis, durante las simulaciones, se ha considerado un sistema equivalente de tracción, estando formado por cuatro cofres de tracción disponiendo cada uno de un inversor y un único motor de 125kW. Por su parte, la resistencia de frenado se ha considerado como una única resistencia equivalente a las ocho de la configuración inicial de tranvía, siendo esta la encargada de la disipación de toda la energía en el caso de que esta sea necesaria.

Los circuitos equivalentes del motor de inducción que se ha utilizado en la presente tesis, aparece representado en las figuras 5.18 y 5.19.

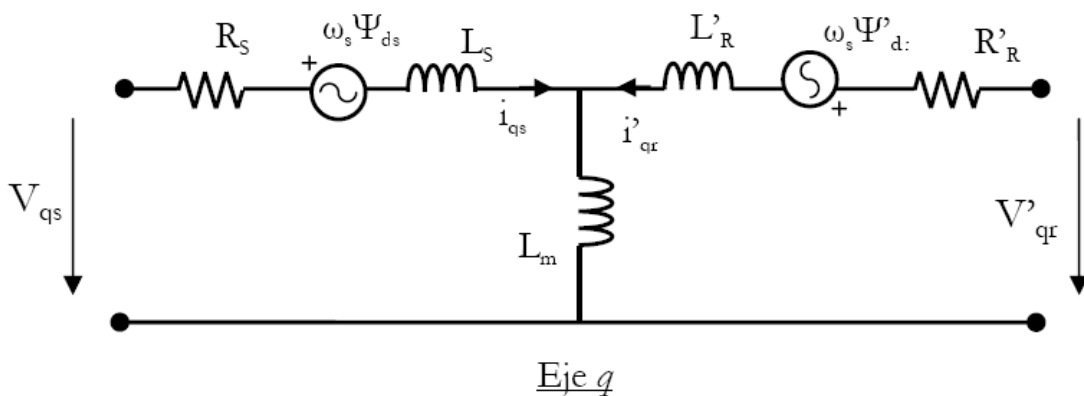


Figura 5.18. Circuito equivalente del motor según el eje q.



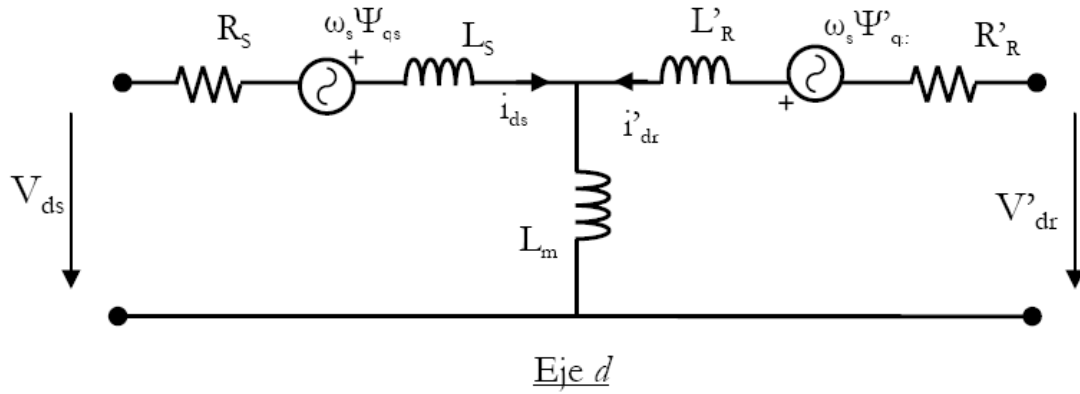


Figura 5.19. Circuito equivalente del motor según el eje d.

Se observa cómo el modelo del motor se ha implementado según el sistema de referencia general dq, estando los ejes desplazados entre sí  $90^\circ$  y girando ambos a la velocidad de sincronismo del motor. Las distintas variables eléctricas y parámetros que aparecen en las figuras anteriores están referidas al lado del rotor. De esta forma, las ecuaciones que gobiernan al sistema completo de motor de inducción se muestran a continuación.

$$\begin{aligned}
 U_{ds} &= -R_s \cdot i_{ds} - \omega_s \cdot \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\
 U_{qs} &= -R_s \cdot i_{qs} - \omega_s \cdot \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \\
 U_{dr} &= -R'_r \cdot i_{dr} - \omega_s \cdot \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \\
 U_{qr} &= -R'_r \cdot i_{qr} - \omega_s \cdot \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt}
 \end{aligned} \tag{5.61}$$

Donde las relación de  $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$ ,  $i_{dr}$ ,  $i_{qr}$  son las intensidades del estator y del rotor según el eje d y q,  $\Psi_{ds}$ ,  $\Psi_{qs}$ ,  $\Psi_{dr}$ ,  $\Psi_{qr}$  son los distintos flujos magnéticos que intervienen en circuito y  $U_{ds}$ ,  $U_{dr}$ ,  $U_{qs}$  y  $U_{qr}$  son las tensiones en el estator y en el rotor. Las tensiones en estator son variables de entradas al sistema procedentes del inversor y las tensiones del rotor son cero al ser el motor de jauda de ardilla.

Por último, la relación electromagnética que existen entre las intensidades y el flujo magnético se muestra en el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\begin{aligned}
 \psi_{ds} &= -L_s \cdot i_{ds} - L_m \cdot i_{dr} \\
 \psi_{qs} &= -L_s \cdot i_{qs} - L_m \cdot i_{qr} \\
 \psi_{dr} &= -L_s \cdot i_{dr} - L_m \cdot i_{ds} \\
 \psi_{ds} &= -L_r \cdot i_{qr} - L_m \cdot i_{qs}
 \end{aligned} \tag{5.62}$$

Siendo  $L_m$  la inductancia magnetizante y  $L_s$  y  $L_r$  la inductancia del estator y del rotor.

El modelo se completa con la segunda ley de Newton para el cálculo de la velocidad de giro de del motor, donde además del par electromagnético y del par de motor, se considera el par debido a la fricción mecánica del motor.

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{2H} (T_e - F\omega_m - T_m) \tag{5.63}$$

Donde  $T_e$  es el par electromagnético calculado mediante la siguiente expresión

$$T_e = 1.5p (\psi_{ds} i_{ds} - \psi_{qs} i_{rs}) \tag{5.64}$$

De la expresión 5.55,  $\omega_m$  es la velocidad de giro del motor,  $H$  la constante de inercia del sistema,  $F$  el coeficiente de fricción viscosa del acoplamiento, y  $T_m$  el par mecánico solicitado por el tranvía a cada motor.

### 5.3.2. Inversor

Un sencillo modelo de inversor ha sido utilizado durante las simulaciones del sistema híbrido de tranvía. El inversor genera el valor medio de la tensión en alterna a la salida del mismo. El inversor está formado por una fuente de corriente dependiente en el lado de corriente continua y tres fuentes de tensión dependiente en el lado de alterna. Un esquema del modelo implementado en la figura 5.20.

Atendiendo a la figura 5.20, las ecuaciones que gobiernan el sistema son.

$$I_1 = \alpha_a I_a + \alpha_b I_b + \alpha_c I_c \tag{5.65}$$

$$\begin{aligned}
 V_a &= \alpha_a V_{in} \\
 V_b &= \alpha_b V_{in} \\
 V_c &= \alpha_c V_{in}
 \end{aligned} \tag{5.66}$$

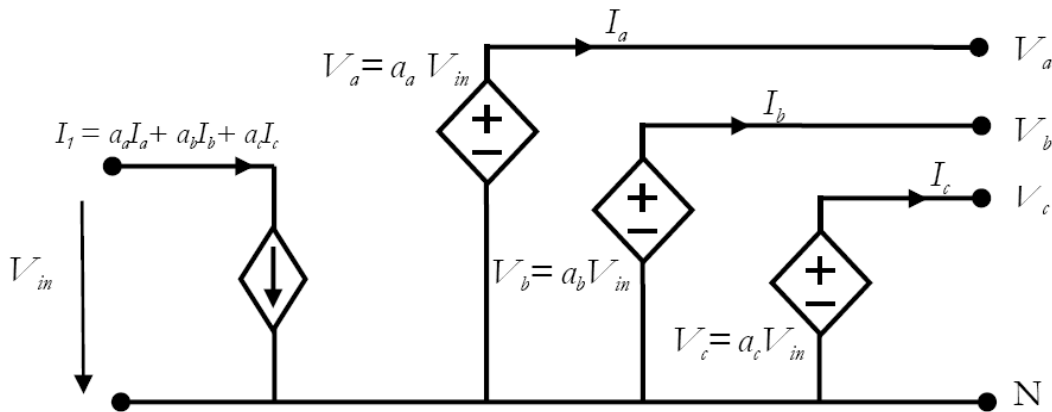


Figura 5.20. Modelo de inversor.

Donde  $V_{in}$  sería la tensión del bus de continua, la cual tiene un valor que varía a medida que se carga o descarga la batería según la configuración de un convertidor y un valor constante correspondiente a 750V según la configuración del tranvía híbrido compuesto de dos convertidores.

Por su parte,  $\alpha_a$ ,  $\alpha_b$  y  $\alpha_c$  sería los ciclos de trabajo de los supuestos interruptores del inversor en su modelo más completo y que son generados mediante un modulador de vectores espaciales por una modulación de ancho de pulso (PWM).

### 5.3.3. Controlador de velocidad

Junto con el inversor, el controlador de velocidad es el encargado de conseguir que los motores de inducción del sistema híbrido giren a la velocidad de referencia según las solicitudes del tranvía. De esta forma un simple controlador PI en disposición en paralelo es el cargado de generar la frecuencia y tensión a la que se debe alimentar a los motores.

Un esquema de funcionamiento del presente control se muestra en la siguiente figura.

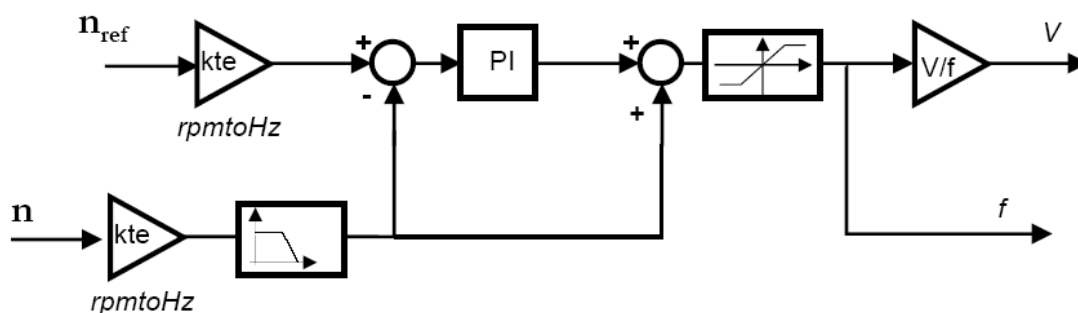


Figura 5.21. Controlador de velocidad.

Según se aprecia en la figura anterior, la velocidad de giro actual de los motores es transformada en frecuencia mediante la constante  $p/60$ ; una vez realizado esto, antes de ser comparada con la de referencia obtenida según el ciclo de trabajo del tranvía, se le aplica un filtro de modo que elimine las altas frecuencias de la medida. Un controlador PI es el encargado de generar la compensación en frecuencia, que sumada con el último valor de la frecuencia medida se obtenga la frecuencia a ser generada por el inversor. Por último, mediante la constante  $V/f$  del motor se calcula la tensión a la cual debe ser alimentado los motores de CA.

#### 5.4. Resistencia de frenado

Durante un frenado regenerativo, parte de la energía cinética del tranvía es convertida en energía eléctrica y almacenada en la batería con el fin de ser usada durante la próxima aceleración o en cualquier otro caso en la que sea necesaria. Sin embargo parte de esta energía regenerativa de frenado debe ser disipada en la resistencia de frenado cuando la batería no pueda absorber toda la energía debido a sus limitaciones.

Para este trabajo, la resistencia de frenado ha sido modelado mediante una fuente de corriente en paralelo con el bus de continua. De esta forma, cada sistema de control determina la resistencia efectiva de frenado necesaria para el exceso de potencia. Siendo calculada la intensidad de la fuente de corriente a partir de la tensión del bus de continua y de la resistencia efectiva comentada anteriormente.

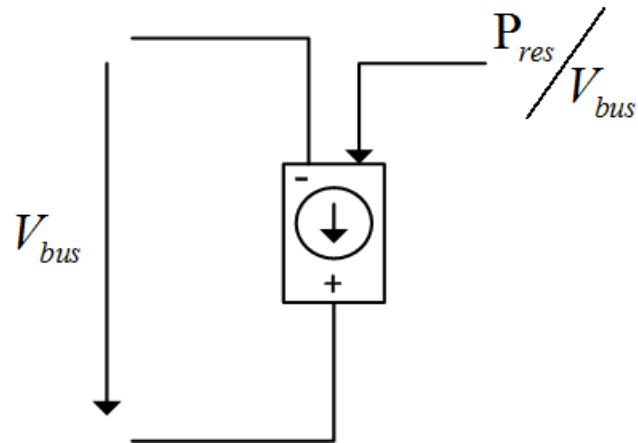


Figura 5.22. Modelo de resistencia de frenado.

### 5.5. Servicios auxiliares

Según las características del tranvía *Urbos 3* de 400kW objeto de estudio de esta tesis, la potencia en corriente continua demandada por los servicios auxiliares es de 57.47kW, manteniendo este valor constante a lo largo de todo el trayecto. Así, al igual que en la resistencia de frenado, esta carga ha sido modelada cómo una fuente de intensidad cuyo valor es el cociente entre la potencia demandada y tensión en el bus de continua.

---

## CAPÍTULO 6

---

# Estrategias de control. Sistemas de gestión de energía

### 6.1. Introducción

Una vez desarrollados los distintos elementos que forman el sistema híbrido de propulsión del tranvía, en el presente capítulo se explican las distintas estrategias de control aplicadas para la gestión de la energía del sistema. La gestión de energía se refiere a determinar la potencia que debe absorber o generar cada elemento del sistema para satisfacer la demanda del vehículo.

Evidentemente existen varias estrategias de control que pueden ser aplicadas a los vehículos híbridos basados en FC, batería y SC. En este capítulo se expondrán las diferentes estrategias implementadas para el tranvía objeto de estudio en esta tesis.

Como en capítulos anteriores, antes de explicar las estrategias seleccionadas en el

apartado 6.2 se hará una recopilación de estrategias más relevantes aplicadas a vehículos híbridos organizadas según las topologías de éstos. Se podrá observar cómo muchas estrategias que anteriormente sólo habían sido aplicadas a determinada topología pueden extrapolarse a la topología seleccionada en la presente tesis. Pese a que los vehículos que combinan motores de combustión interna con otras fuentes de energía se consideran vehículos híbridos, de aquí en adelante cuando se hable de éstos será refiriéndonos a los que tienen como fuente primaria de energía una FC.

En el apartado 6.3 se desarrollaran las cinco estrategias utilizadas para el tranvía híbrido.

## **6.2. Sistemas de gestión de energía en vehículos híbridos**

En la literatura reciente existen multitud de estrategias de control aplicables a vehículos híbridos con PEM-FC, ya sean para el caso de turismos o autobuses. En cambio, dada la magnitud de la potencia demandada y la baja existencia de FCs diseñadas para estas aplicaciones, son pocas las referencias y, por tanto, las estrategias que se han probado en tranvías o trenes híbridos formados por FC, batería y SC. De esta forma, el presente apartado presenta una visión global bastante completa del estado actual de los sistemas de control para todo tipo de vehículos híbridos, siendo algunas de las referencias que se irán comentado claves para el desarrollo de las estrategias de control que se desarrollaran en apartados posteriores.

Dentro de las estrategias existentes en la literatura existen varios tipos diferenciados. Primero se encuentran las estrategias que se basan en reglas lógicas básicas, que son las que han sido utilizadas desde los inicios de los vehículos híbridos y que todavía son perfectamente válidas. Un caso algo más complejo sería sustituir estas reglas lógicas por lógica difusa el cual supone una mejora debido a que pasamos de una serie de reglas lógicas que dan un resultado u otro dependiendo del intervalo en que se encuentren las variables de ensayo a una transición más suave y continua. A parte, tenemos métodos de optimización de alguna de las variables del sistema, como es el caso de la minimización del consumo de hidrógeno para la cual se introduce el concepto de consumo equivalente que permite comparar el consumo de la FC con el de las fuentes auxiliares de energía. Por último, cabe destacar otras estrategias que hacen uso de novedosas aplicaciones como las redes neuronales o de otras ramas de la ciencia como la descomposición de señales pasando por ramas del control como el control adaptativo o el predictivo.

Evidentemente, en muchos casos la combinación de varias de estas estrategias comentadas permite superar las limitaciones propias de algunas de ellas y mejorar su comportamiento.

Como se comentó anteriormente existen multitud de trabajos en los que se presentan estrategias de control para vehículos híbridos. Para presentarlas de una manera organizada, se presentarán agrupadas según la topología del vehículo para el que han sido diseñadas, es decir, dependiendo de las fuentes de energía que utilicen y el número de convertidores empleados.

- FC con convertidor + batería

La primera topología a comentar es la que utiliza como sistema de propulsión una FC junto con batería como sistema auxiliar y dispone sólo de un convertidor que conecta la pila con el bus de continua.

Jiang, Gao, y Dougal, en el año 2005 [91], realizan un control multi-objetivo sobre una configuración de un único convertidor elevador dispuesto a la salida del sistema de FC. El control hace que según el instante en el que se encuentre el vehículo se controle la tensión a la salida del convertidor o que la pila genere su potencia nominal cambiando de un modelo de funcionamiento a otro. Las distintas variables objetivos son controladas mediante un único controlador PI actuando sobre el ciclo de trabajo del convertidor, por lo que el principal inconveniente de esta estrategia es el cambio de un objetivo de control a otro; ya que, ocurre que el ciclo de trabajo para conseguir mantener la tensión del bus a un nivel considerado, es muy diferente del requerido cuando se pretende que la pila genere su potencia nominal. En [55] la potencia de la FC se controla imponiendo un valor de tensión de referencia constante a la salida del convertidor de la misma que es superior al de la tensión inicial de la batería para hacer que el flujo de energía de la FC se dirija siempre hacia la carga y/o la batería. El valor de potencia de la FC se fija en dos valores constantes por lo que el funcionamiento con seguimiento de carga no se puede realizar. En [97], Corbo *et al.* presentan una estrategia de control en la que la potencia demandada a la FC depende de la potencia requerida por la carga, mientras que la batería puede ser cargada por la FC y el motor durante las frenadas regenerativas y descargada cuando la energía demandada por el motor es mayor que la proporcionada por la FC. En éste caso el convertidor es regulado en intensidad. En 2006 también el mismo autor publicó un trabajo [98] en el que presenta



una estrategia de control algo más compleja, compuesta de 7 “pasos” en los que según la demanda de potencia del vehículo y el estado de carga de la batería se selecciona un valor de referencia de la tensión de salida del convertidor según el objetivo, el cual puede ser cargar la batería y suministrar energía a la carga simultáneamente, cargar sólo la batería, etc. Estos tres trabajos comentados presentan estrategias de control para vehículos de potencia menor a 3.7kW y pequeñas FC, menores a 2.5kW y dichas estrategias se prueban con ciclos de conducción con los que se ensayan vehículos comerciales. Por último, este año se publica [99] en el que se plantea una estrategia de gestión de energía óptima basada en modelos estocásticos que pueden predecir el comportamiento de los componentes del sistema para optimizar su rendimiento.

En el 2007 [23], los autores citados anteriormente, Jiang, Gao, y Dougal, mejoran el control presentado 2 años antes haciendo que las variables de referencias en vez de ser constantes, varíen a lo largo de la simulación, imponiendo limitaciones según exigencias del modelo y de los propios componentes del vehículo. Con esto consiguen que la pila trabaje en un rango de funcionamiento más amplio y que la batería mantenga un SOC a un nivel adecuado durante más tiempo; en cambio los problemas durante los cambios de objetivo de control no se mejoran. Ese mismo año, en [100] se implementa una estrategia de control nuevamente bastante similar a la utilizada por Jiang, Gao, y Dougal en sus artículos de los años 2005 y 2007. En este caso, estos autores utilizan una única variable a controlar, la intensidad a generar por parte de la pila, la cual cambiará de valor a medida que algunos de otros parámetros alcancen sus límites de funcionamiento. Utilizan una configuración con un único convertidor reductor de tensión para la realización del control.

En el 2008, algunos de estos mismos autores [101], mejoran el control mediante el uso de una gráfica en la cual dependiendo del estado de carga de la batería y de la potencia demandada se crea distintas zonas de funcionamiento en las cuales debe trabajar el sistema híbrido y por tanto la pila. Nuevamente es mediante el uso de simples reglas lógicas con lo que se consigue el cambio de una zona de funcionamiento a otra.

Un año más tarde, en 2009, se combina una estrategia de control por estados con lógica difusa para aplicarla a un autobús híbrido [102]. Mediante lógica difusa se obtiene el valor de la potencia de referencia de la FC en función del SOC de la batería y la potencia demandada por la carga. A parte, una estrategia por estados modifica los límites máximos y mínimos de potencia de la FC dependiendo del SOC de la batería

para que ésta trabaje al máximo rendimiento posible. Ese mismo año Xu *et al.* publican [103], en la que se desarrolla una estrategia basada en consumo equivalente mínimo de hidrógeno que incorpora una estrategia de recuperación de energía de frenado para el mismo vehículo. El mismo autor, Xu, publica meses más tarde [104] una estrategia de control adaptativo para un autobús basada en consumo equivalente mínimo de hidrógeno, la estimación de la potencia auxiliar del vehículo, un lazo para mantener el SOC de la batería dentro del intervalo de valores deseado y un innovador algoritmo que representa el deterioro del funcionamiento de la pila debido a su uso.

El siguiente año se publica [105] en la que se compara una estrategia de cascada con una basada en lógica difusa aplicada a un tranvía. En la estrategia de cascada, la señal de la referencia de la pila de combustible se obtiene mediante un lazo de control cuyo objetivo es mantener el SOC de la batería en un valor deseado. Las entradas del controlador difuso son la demanda de potencia del vehículo y el estado de carga de la batería. El controlador genera la potencia a generar por la FC.

Recientemente, en 2011, Fernández *et al.* [106] plantean una estrategia de control por estados basada en 8 estados de funcionamiento para la FC cuyo objetivo es mantener el SOC de las baterías cerca de un valor de referencia manteniendo la FC trabajando lo más cerca posible de su punto de máximo rendimiento. Este mismo año, los mismos autores publican una estrategia para la misma topología basada en minimización de consumo equivalente [107].

Este año se han publicado los resultados de aplicar un test estándar de vehículos a un vehículo híbrido ligero en [108].

- FC + batería con convertidor

Esta topología no es muy común. En el año 2004, Cho *et al.* [56] realizan un control bastante simple de implementar pero muy efectivo. El control mediante un diagrama de flujos en el que se va haciendo preguntas al sistema acerca de los parámetros del mismo para obtener el modo de funcionamiento en el cual debe trabajar el vehículo. El control es realizado sobre varias configuraciones de vehículos híbridos propulsados por FC de hidrógeno, donde se compara una configuración sin elemento de almacenamiento de energía con dos configuraciones que utilizan batería y convertidor bidireccional conectado a su salida.

Un ejemplo más reciente de esta topología es [109]. En éste la FC funciona con

---

seguimiento de la potencia demandada mediante un control robusto que controla los flujos de hidrógeno y oxígeno en la misma y, a parte, un convertidor bidireccional permite que las baterías se carguen o descarguen dependiendo de diferencia de potencias entre la FC y la carga. El ciclo de trabajo del vehículo y los componentes seleccionados son simplemente modelos, no se corresponden a dispositivos comerciales.

En el año 2006, Ouyang *et al.* [110] realizan un estudio comparativo de las dos topologías comentadas hasta ahora. Con cada configuración implementan una estrategia de control distinta, teniendo en cada una de ellas los condicionantes de hacer funcionar a la FC en su rango de trabajo óptimo, intentar evitar la continua variación de la potencia a generar por la pila, minimizar el consumo y mantener la SOC en unos niveles de carga óptimos. La potencia de referencia en la FC y la batería es calculada mediante simples reglas lógicas, haciendo trabajar a cada elemento del vehículo híbrido a potencia constante o a potencia variable. Los resultados muestran como con la configuración compuesta por un convertidor elevador en la FC se obtiene un menor consumo de hidrógeno y una menor variación en la potencia generada por la pila de combustible, hecho bastante importante en el caso de las PEM-FC.

- FC y batería, ambos con convertidor

Esta topología consiste en un sistema de propulsión que combina FC y batería conectadas ambas al bus de continua mediante convertidores. De esta topología, a diferencia de las dos anteriores existen menos publicaciones. Se debe al coste adicional que supone agregar otro convertidor a la topología.

En 2006 el trabajo realizado por Amirabadi y Farhangi [111] utilizan un controlador difuso para generar el ciclo de trabajo de los convertidores de la pila y de la batería. Como entradas al sistema utilizan la tensión en el bus de continua, la variación de éste a lo largo del tiempo y la variación de la intensidad intercambiada por la batería. Las simulaciones realizadas muestran como el control implementado es perfectamente válido con una correcta gestión de la energía eléctrica.

En 2009 aparece una publicación en la que se propone el control predictivo para este tipo de topología [112]. El control propuesto en ésta genera las potencias de referencia de la FC y la batería a partir de la potencia demandada y del SOC de la batería sujetas a algunas restricciones.

La siguiente publicación [113], de 2010, compara una estrategia de control en

---

cascada con una de estados. La estrategia de control de cascada es una modificación de la aplicada en [114] para un sistema de generación distribuida adaptándolo al vehículo híbrido. La estrategia de control por estados es una variante de la ya citada anteriormente [106] adaptada a una topología con dos convertidores.

Recientemente se publica otra estrategia [115] basada en añadir un control adicional a un predictivo parecido al propuesto en [112]. En este control se combina un controlador predictivo con un controlador de seguimiento de potencia para controlar el flujo de potencia entre la FC, la batería y el motor eléctrico actuando en los convertidores de las dos fuentes de potencia.

- FC con convertidor + SC

Aunque en publicaciones como la de Bauman y Kazerani en 2008 [33] plantean la combinación de FC con supercondensador como la peor elección comparada con FC y batería o FC, batería y supercondensador, existen multitud de publicaciones que plantean su uso tanto con un solo convertidor como con dos.

Vural *et al.* en 2010 [116] plantean el uso combinado de FC con supercondensadores como sistema de propulsión de un vehículo de menos de 10 kW de potencia. La importancia del artículo quizás no sea la topología propuesta sino el segundo método de gestión de la energía propuesto basado en lógica difusa y un algoritmo de descomposición de señales, el cual se compara con un sistema basado sólo en lógica difusa.

- FC + SC, ambos con convertidores

En 2005, Rodatz *et al.* [117] proponen por primera vez el concepto de consumo equivalente de hidrógeno aplicado a un vehículo híbrido de FC. El “consumo equivalente” fue propuesto inicialmente en [118] que implementan una estrategia de minimización de consumo en vehículos híbridos con MCI, específicamente sobre el tren de potencia de un camión, obteniendo resultados bastante buenos mediante simulación, con una reducción del consumo cercano al 10% respecto al anterior control que llevaba el camión. Volviendo al trabajo de Rodatz *et al.*, se plantea un algoritmo que evalúa continuamente, a partir de la demanda de potencia de vehículo, la combinación de potencia de ambas fuentes que proporcione un consumo equivalente total de hidrógeno mínimo (minimización de consumo equivalente). En el mismo año, en [44] se propone una estrategia de distribución de energía proporcional, es decir, cada fuente proporciona

un porcentaje de la potencia demandada por el vehículo y, en las frenadas regenerativas es el supercondensador el que absorbe toda la energía generada. En este caso, la FC está conectada al bus de tensión continua mediante un convertidor elevador regulado en modo tensión y el supercondensador mediante un convertidor bidireccional regulado en modo intensidad. Se consigue así regular la tensión del bus de continua y proporcionar la demanda de energía. El principal problema que plantea al examinarlo es que no ofrece datos acerca de la evolución del SOC de los supercondensadores. Al ser tan simple la estrategia de gestión éstos podrían sufrir una sobrecarga durante las frenadas. De todas formas, en el artículo se especifica que el objetivo es más ver el control de los dos convertidores, el cual se desarrolla en profundidad, que presentar un sistema de gestión de energía.

Años más tarde, en 2009, se propone una estrategia basada en un mapa de eficiencia para un vehículo, cuya potencia demandada máxima es de 40kW, en [119]. Dicho mapa bidimensional está formado por distintas regiones que corresponden a la potencia de referencia de la FC. La posición en el mapa depende del SOC del supercondensador y de la potencia demandada por el vehículo, la variación de éstos hace que se pase de una región a otra y con ello varía la potencia de referencia de la FC.

Dos publicaciones relacionadas con este tipo de topología aparecen en 2010. En la primera de ellas [120] se propone una estrategia de control adaptativo combinada con redes neuronales como estrategia de gestión de energía para un vehículo cuya potencia durante el trayecto simulado varía entre -50 y 50kW. En la segunda [121] se combina la descomposición de señales con redes neuronales aplicadas a un vehículo ligero sometido a un ensayo estándar de conducción en ciudad. El convertidor del supercondensador tiene como objetivo regular la tensión en el bus. Para generar la potencia de referencia de la pila se utiliza una de las señales obtenidas mediante descomposición de señales (la de menor frecuencia) y se modifica mediante redes neuronales entrenadas para variar la potencia de la FC dependiendo del SOC del supercondensador.

- FC + batería + supercondensador (con 2 convertidores)

Esta topología se propone en [122] aplicada a un autobús. El sistema de propulsión consta de una FC con convertidor unidireccional, supercondensador con convertidor bidireccional y batería directamente conectada al bus de continua. A partir de la

potencia demandada por el vehículo, del SOC de la batería y del supercondensador mediante lógica difusa se generan las potencias de referencia de la FC y del supercondensador, a partir de las cuales se genera el ciclo de trabajo de ambos convertidores.

Dos años más tarde, Gao *et al.* [123] realizan un estudio sobre la implementación de la lógica difusa a un autobús híbrido formado por FC de hidrógeno, SC con convertidor bidireccional y batería como fuentes de energía. El objetivo del control es el de minimizar el consumo de hidrógeno, por lo que hacen trabajar a la pila en la zona a la que llaman de alto rendimiento; con lo que la pila en ningún momento es desconectada, evitando con esto la lentitud del sistema de pila de combustible durante su arranque. Como entradas y salidas al sistema, el control utiliza las mismas variables que el control desarrollado para el sistema híbrido de tranvía objeto de estudio en esta tesis. El artículo puede ser considerado como uno de los primeros estudios en el que se aplica la lógica difusa a un vehículo híbrido de gran tamaño basado en FC.

- FC + batería + supercondensador (con 3 convertidores)

Este tipo de topología se ha desarrollado recientemente. En el 2008 varios artículos interesantes son publicados, enfocados la mayoría de ellos al control de sistemas híbridos de propulsión basados en FC y en sistemas de almacenamiento de energía. De esta forma, Ferreira *et al.* [92] utilizan la lógica difusa a un pequeño vehículo híbrido con batería y SC además de FC como fuente de energía, llevando la salida del SC y de la batería convertidores bidireccionales. En este caso, las entradas al control difuso son la tensión del SC y de la batería y la intensidad de total que está generando el sistema, las salidas son la intensidad a generar por la pila y la variación total de intensidad que debe efectuar el sistema híbrido de generación. Nuevamente, al igual que ocurre en otros controles, es un controlador PI el que, mediante la comparación entre la variable de referencia y la que esté generando el control difuso, es el encargado de generar la señal adecuada a los interruptores y obtener así el ciclo de trabajo de cada uno. Por su parte, la tensión del bus de continua se controla directamente mediante un sistema en cascada de control formado por dos PI.

Un ensayo experimental en laboratorio a pequeña escala (pila PEM de 500W, motor de tracción de 2kW) presentado en 2009 [29] corrobora el excelente comportamiento de la estrategia de control en cascada aplicada. En ésta, se proponen tres lazos de control

en los que se generan las intensidades de referencia para generar el ciclo de trabajo de los distintos convertidores controlados en modo intensidad: la intensidad de referencia de la FC se genera mediante el lazo de control del SOC de la batería, la de la batería mediante el lazo de control del SOC del supercondensador y la de éste último mediante un lazo de control de la tensión del bus de continua. El mismo año, en el siguiente número de la revista *Journal of Power Sources* [26] se publica una estrategia basada en una combinación de descomposición de señales y lógica difusa aplicado a un turismo sometido a un ensayo estándar de conducción en ciudad. Mediante un algoritmo basado en teoría de la señal se descompone ésta en tres componentes con distintas frecuencias, la más baja se corresponde con la potencia de referencia de la FC y la de media frecuencia con la potencia de la batería. Después, se introducen éstos valores de referencia junto con los valores de SOC de batería y supercondensador en un controlador difuso y se modifican los valores de referencia según unas reglas lógicas obteniendo los valores de referencia definitivos. Los valores de referencia definitivos se transforman a intensidad y mediante controladores PI se genera el ciclo de trabajo de los convertidores, haciendo que se obtenga la potencia de referencia suministrada por el control difuso. El problema de ésta última es que hay que tener el perfil de la demanda de potencia del vehículo para hacer la descomposición en frecuencia, lo que no permite variaciones de la demanda de potencia en tiempo real.

Años más tarde, en 2011, en el número 196 de la misma revista se publican dos artículos que desarrollan nuevas estrategias para dicha topología. En el primero de ellos [124], se desarrolla un algoritmo de aprendizaje que construye una base de conocimiento que contiene las combinaciones óptimas (mediante minimización de las pérdidas de potencia instantáneas) para varios requisitos de potencia del vehículo. Dicho algoritmo se valida mediante la comparación de simulaciones realizadas y resultados obtenidos con software específico. En el segundo [125], a parte de una nueva estrategia de gestión de energía se desarrolla un breve método de dimensionamiento de componentes del sistema. Respecto a la estrategia de gestión de energía se basa en un algoritmo de optimización en el que se desea minimizar una función de coste de la energía total consumida. De dicha función hay dos parámetros que han de variarse para conseguir la minimización y son los que el algoritmo genera durante unos intervalos de tiempo variables (intervalos cortos para tramos con muchos transitorios y largos para tramos estables).

En el presente año se ha publicado una estrategia basada en minimización de consumo equivalente [126] que se desarrollará más adelante en esta tesis.

- Otras topologías

La topología presentada en [127] muestra una topología basada en FC, batería y supercondensador. Dicha topología es novedosa por la manera en la que se conectan las fuentes auxiliares, la batería y el supercondensador, al bus de tensión continua. Ambos dispositivos están conectados en paralelo y, a su vez mediante un convertidor bidireccional al bus. A la vez, la FC también se conecta al bus mediante un convertidor unidireccional. La novedad del sistema de gestión de energía propuesto es que tiene como objetivo mitigar el rizado de la intensidad del inversor. Para ello se proponen dos estrategias basadas en generar la intensidad de referencia del convertidor bidireccional, una de ellas bastante simple con un controlador de histéresis y la otra mediante lógica difusa.

Otra estrategia que propone una topología novedosa es [115] en 2009. La topología propuesta consta de dos FC conectadas en paralelo a un bus de CC al que se conecta un motor mediante inversor y SC mediante un convertidor CC/CC. En esta se diseñan diferentes parejas de modelos de planta y sus controladores para diferentes puntos de linealización. Un algoritmo elige qué pareja de planta-controlador se aplica dependiendo de los datos de entrada: la potencia demandada y el SOC de los SC.

Por último, comentar unas referencias que aunque su control no sea destinado a vehículo híbrido, sino a sistemas híbridos de generación distribuida, han sido de gran utilidad para el desarrollo de un nuevo control viable para el tranvía híbrido que se presenta en esta tesis. Los trabajos son realizados por Thounthong [114], [128]. En ellos, el control de la potencia a generar se realiza mediante una serie de controles en cascada, con el principal objetivo de mantener el estado de carga de los sistemas de almacenamiento de energía y abastecer a la potencia demanda en todo instante.

### **6.3. Estrategias de control desarrolladas**

Tal y como se ha comentado anteriormente, son cinco las estrategias desarrolladas para la utilización en el tranvía. En este caso las estrategias desarrolladas son: un control basado en modos de funcionamiento, un control en cascada formado por tres lazos de control, un control basado en lógica difusa, un control de minimización de consumo y



un control predictivo.

El control basado en cascada es una adaptación de la estrategia presentada en [29]. Siguiendo la misma filosofía que en el citado artículo se modifican las referencias de los lazos de control para obtener resultados similares.

El control basado en modos de funcionamiento se basa en la filosofía de las publicaciones que proponían el uso de reglas lógicas básicas para pasar de un modo/estado de funcionamiento a otro. Algunas de estas estrategias serían las que se realizan en [23], [56], [91], [98]. La diferencia entre la presentada en esta tesis con las citadas es que, en el caso de [91] y [23] la variable de referencia a controlar varía según el estado de funcionamiento y en la presentada aquí las variables de referencia son variables pero siempre las mismas. En el caso de [98] los valores de referencia son constantes y no permiten un seguimiento de la potencia demandada. Se puede decir que la propuesta en [56] es más parecida a la que se presenta en esta tesis debido a que entre sus estados combina funcionamiento con seguimiento de potencia y funcionamiento a valores constantes. Evidentemente, este control requiere de la experiencia del diseñador y de pruebas empíricas a la hora de diseñar y mejorar las reglas lógicas.

En el caso del control basado en lógica difusa se trabaja de forma parecida al control por estados pero las transiciones se dan de una forma más continua. Por tanto, la experiencia adquirida en el diseño del anterior resulta muy útil a la hora de diseñar éste. El diseño de los modos de operación depende del conocimiento del diseñador acerca de las limitaciones de las fuentes de energía y del dispositivo de tracción, de aspectos intuitivos y prácticos que tienen que ver con el comportamiento dinámico del sistema de propulsión, y de sucesivos experimentos para asegurar la robustez y fiabilidad del proceso.

La estrategia de minimización de consumo se basa en el concepto de consumo de hidrógeno equivalente. Esto quiere decir que la energía suministrada por cada fuente se puede convertir en un consumo equivalente en hidrógeno. Solucionando un problema de minimización se puede calcular la potencia óptima a generar para que el consumo equivalente total sea mínimo.

El control predictivo se basa en aplicar dicho concepto al sistema total del tranvía. Primero, el modelo completo del tranvía se linealiza. Una vez linealizado se diseña el controlador, para lo cual es muy importante establecer las restricciones de cada variable

tanto en valores máximo y mínimo como en pendiente. Otro aspecto que requiere especial interés es establecer correctamente el peso de las penalizaciones correspondientes a alejarse del valor de referencia especificado.

En todos los controles implementados se hace trabajar al sistema de FC dentro de un rango de funcionamiento óptimo, creando así una potencia mínima y máxima a generar por cada pila. Unas consideraciones parecidas son realizadas por Cho *et al.* [56] y Gao *et al.* [122] en sus estudios.

Hasta ahora, se ha comentado mayoritariamente la forma de generar la potencia de referencia a ser generada por el sistema de FC, pero no se ha comentado nada cómo el sistema de FC genera esa potencia de referencia, algo común en la mayoría de las referencias comentadas anteriormente y en los controles utilizados para el tranvía. De esta forma, en la siguiente figura se muestra la configuración del convertidor elevador, donde  $Dc$  es el ciclo de trabajo del interruptor del convertidor.

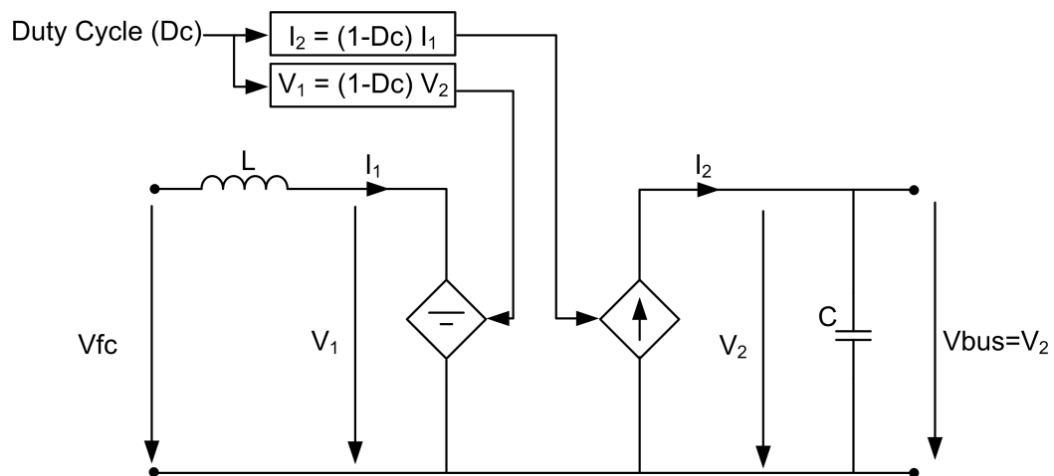


Figura 6.1. Configuración simplificada del convertidor elevador.

Atendiendo a la figura anterior, la potencia generada por la pila es:

$$P_{fc} = V_1 \cdot I_1 = V_{fc} \cdot I_{fc} \quad (6.1)$$

Donde la tensión de salida de la pila, se puede poner en función de la intensidad suministrada por ella según lo visto en el capítulo 4.

$$P_{fc} = f(I_{fc}) \cdot I_{fc} \quad (6.2)$$

Por último, la intensidad de la pila, se puede poner en función del ciclo de trabajo del

convertidor y de la intensidad de salida del mismo, pudiéndose poner esta intensidad a su vez en función de la potencia que esté dando de salida el convertidor. Al considerarse el convertidor ideal, la potencia de salida es la misma potencia que esté generando el sistema de pila de combustible. La expresión queda de la siguiente forma:

$$I_{fc} = f(D_c, I_{dc}) = \frac{P_{dc}/V_{dc}}{1-D_c} \quad (6.3)$$

Donde  $V_{dc}$  es la tensión del bus de continua.

Por último, hay que comentar que el objetivo de las distintas estrategias de gestión de energía propuestas es generar la potencia demandada por el tranvía, manteniendo el estado de carga de la batería y el SC cerca de su valor de referencia y manteniendo la tensión del bus constante. Para ello, las estrategias generan las potencias de referencia de la FC y de la batería. Una vez generadas, a éstas se les aplican las limitaciones dinámicas y en valor máximo correspondientes y se pasan a valor de intensidad mediante el valor de tensión medido en simulación. Una vez que tenemos este valor de intensidad de referencia, éste se compara mediante un controlador PI que genera el ciclo de trabajo del convertidor correspondiente. En el caso del SC, al igual que se propone en [29], éste es controlado para que mantenga la tensión del bus de CC constante a 750V. En la figura 6.2 se muestra un esquema de cómo se generan los ciclos de trabajo de los convertidores.

Estos lazos de control son comunes para todas las estrategias propuestas. A parte de esto, el cálculo de la potencia a disipar en la resistencia de frenado también es común para todas las estrategias. Se ha optado por hacer que actúe la resistencia cuando la potencia que deba absorber la batería y/o el supercondensador sea mayor que la máxima potencia de carga de éstos según características técnicas. Esto implementado en Simulink quedaría de la forma en que se indica en el siguiente diagrama de flujo, donde  $P_{res}$  es la potencia a disipar en la resistencia de frenado,  $P_{SCmax}$  es la potencia máxima que puede absorber el supercondensador,  $P_{batcharmax}$  es la potencia máxima que puede absorber la batería y  $P_{load}$  es la potencia demandada por el vehículo.

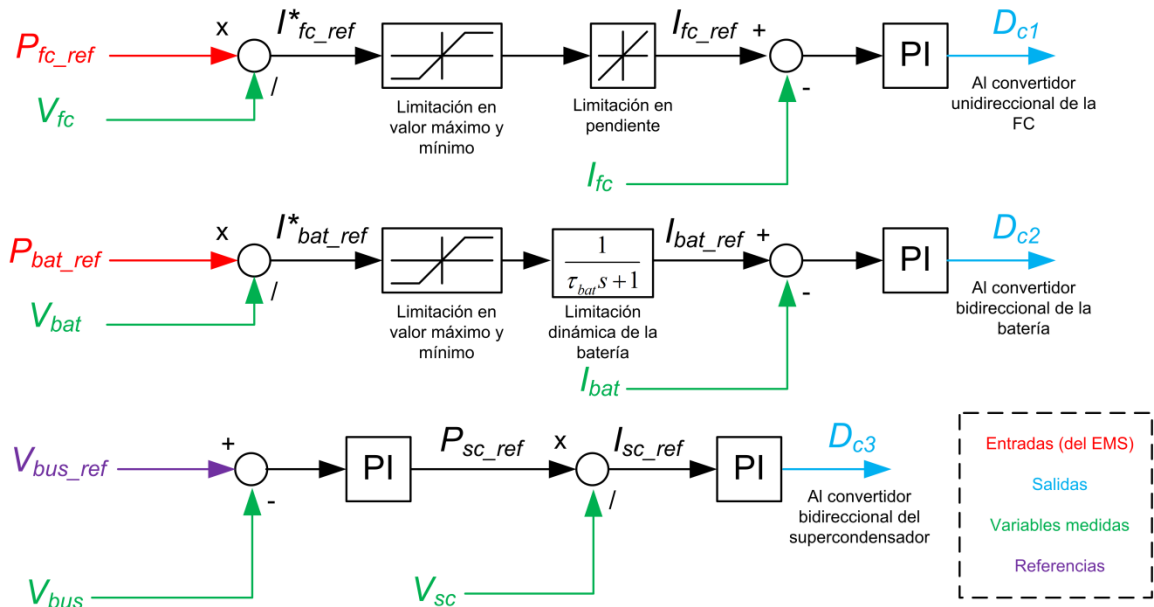


Figura 6.2. Lazos de control para la generación del ciclo de trabajo.

La tabla 6.1 recoge los valores considerados para las distintas simulaciones. Los subíndices “fc” se refieren a la FC, “bat” a la batería, “sc” al SC, “ref” son valores de referencia (objetivos del control), “opt” es el punto óptimo de funcionamiento (máximo rendimiento), “chg” es carga y “dch” descarga.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
$P_{fc_{max}}$	150kW	$P_{bat_{chg_{max}}}$	-400kW	$P_{sc_{chg_{max}}}$	-175kW
$P_{fc_{min}}$	15kW	$P_{bat_{dch_{max}}}$	400kW	$P_{sc_{dch_{max}}}$	175kW
$P_{fc_{opt}}$	47kW	$SOC_{bat_{ref}}$	65%	$SOC_{sc_{ref}}$	75%

Tabla 6.1. Resumen de los parámetros considerados en las simulaciones.

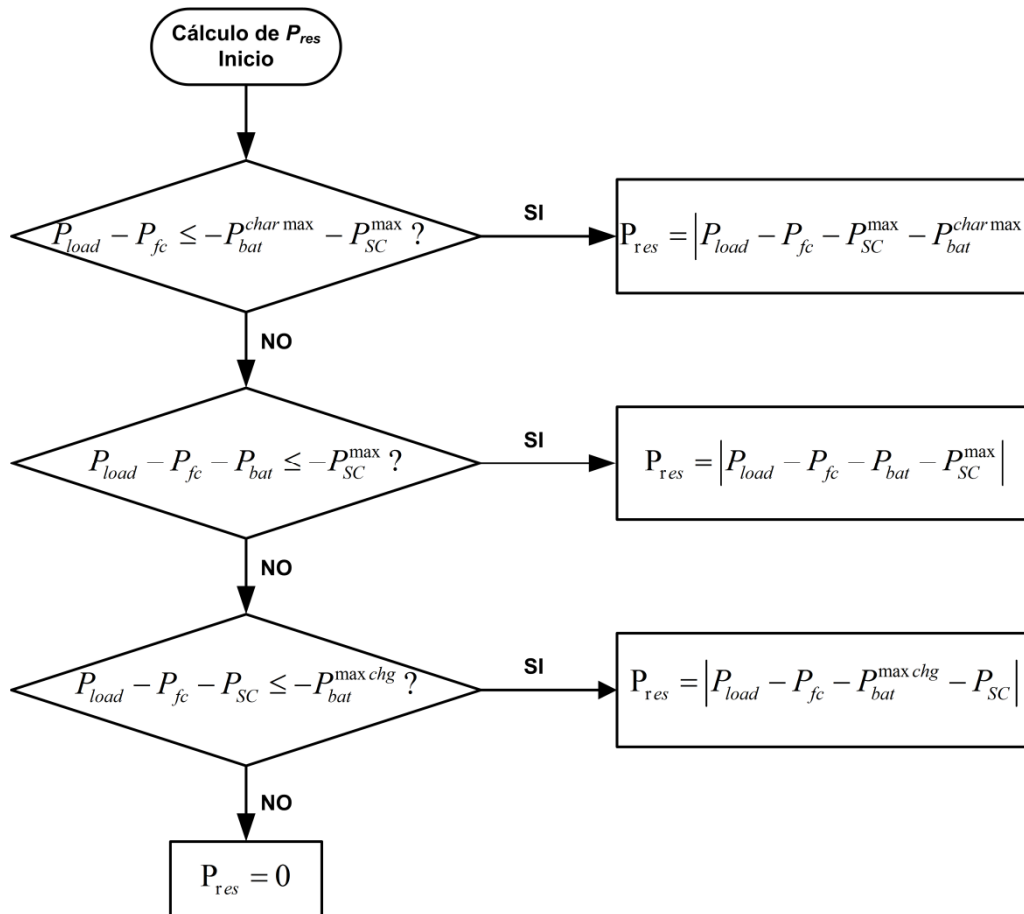


Figura 6.3. Diagrama de flujo del cálculo de la potencia a disipar en la resistencia de frenado.

### 6.3.1. Control por modos de operación

Una de las principales características y a las vez inconvenientes de las FC de membrana de intercambio de protones es su lenta respuesta dinámica ante cambios transitorios de la potencia demandada en comparación con los MCI [111]. Debido a esto, la batería es necesaria para suministrar la potencia que la pila no pueda generar en estos cambios transitorios de la energía demandada y durante los picos de potencia. Además, la resistencia de frenado deberá actuar cuando la batería no pueda absorber toda la potencia debido a sus propias limitaciones.

Esta estrategia de gestión de energía funciona como se explica a continuación. El bloque de control por modos de operación (CMO) genera la potencia de referencia de la FC. La diferencia entre la potencia demandada y la de referencia de la FC es la potencia ideal de referencia de la batería. Esta potencia de referencia de la batería es ligeramente modificada considerando la potencia generada por un lazo de control dependiente del SOC del supercondensador,  $P_{SC\_soc\ control}$ .

Aparte de eso, la tensión del bus de continua, como se comentaba anteriormente, se

mantiene a 750V mediante el uso de un controlador PI, el cual determina la potencia de referencia del supercondensador.

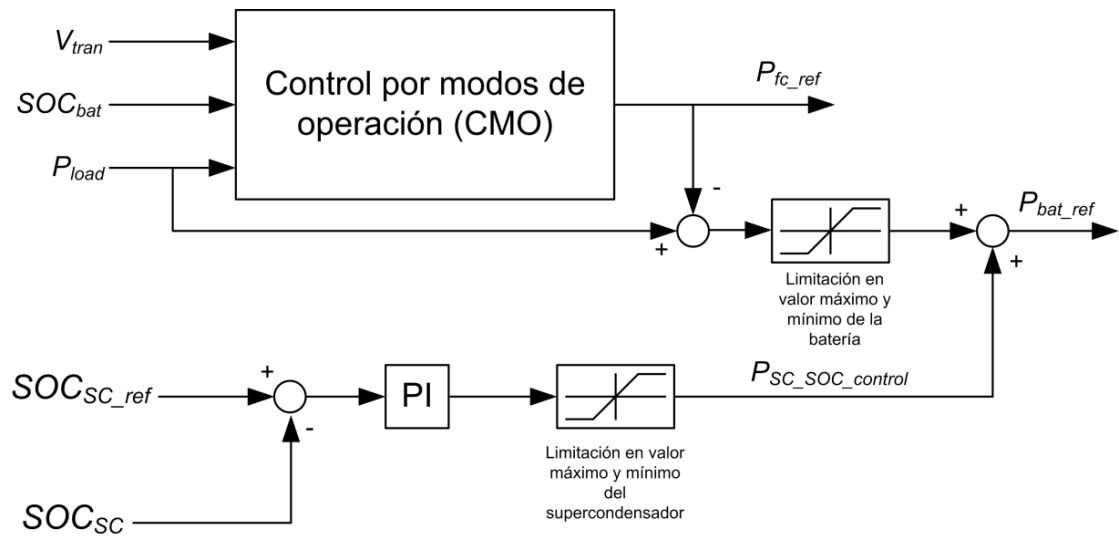


Figura 6.4. Estrategia de gestión de energía por modos de funcionamiento.

En esta estrategia los siguientes valores son tenidos en cuenta:

- Los valores máximo y mínimo que la FC puede generar ( $P_{fcmax}$ ,  $P_{fcmin}$ ), y la potencia óptima de la FC,  $P_{fcopt}$ , el cual corresponde con el punto de máxima eficiencia de la FC.
- El valor de la potencia demandada por los dispositivos auxiliares,  $P_{aux}$ , y una potencia extra,  $P_{extra}$ , a generar por la FC en el modo de carga rápido comentado en la siguiente sección. Los valores de éstas corresponden a 57.47kW y 40kW respectivamente.

### 6.3.1.1. Bloque de control CMO

El CMO determina el modo de operación, dependiendo de la potencia demandada por el vehículo, de la velocidad del tranvía, y del SOC de la batería (variables de entrada). Una vez que se ha seleccionado un modo de operación, el CMO genera la potencia de referencia de la FC (variable de salida). El diseño de los modos de operación, como se ha comentado anteriormente, depende del conocimiento del diseñador acerca de las limitaciones de las fuentes de energía y del dispositivo de tracción, de aspectos intuitivos y prácticos que tienen que ver con el comportamiento dinámico del sistema de propulsión, y de sucesivos experimentos para asegurar la robustez y fiabilidad del proceso.

Se consideran tres modos de operación que están relacionados con el SOC de la batería: modo de descarga (SOC alto), modo de carga (SOC normal) y modo de carga rápido (SOC bajo). Los cambios entre estos niveles se realizan a través de dos ciclos de histéresis mostrados en la figura 6.5.

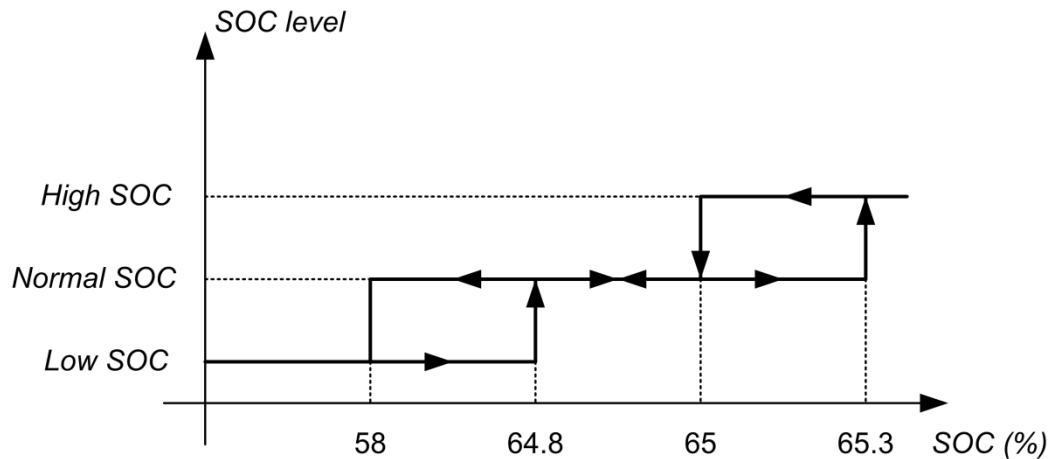


Figura 6.5. Ciclos de histéresis para los niveles del SOC de la batería.

El funcionamiento de los tres modos de operación propuestos se describe a continuación. Los tres modos de operación se resumen en la figura 6.6 y se describen a continuación.

- Modo de descarga: En este modo, la FC adapta su potencia a la potencia demandada por el vehículo (estrategia de seguimiento de potencia) entre un límite inferior,  $P_{fmin}$ , y dos límites superiores,  $P_{aux}$  o  $P_{fcopt}$ , dependiendo de la velocidad del tranvía. La FC proporciona la potencia de los servicios auxiliares,  $P_{aux}$ , cuando el tranvía está parado. Cuando la potencia demandada por el tranvía es mayor que  $P_{fcopt}$ , la batería proporciona la diferencia entre ésta y la generada por la FC, por lo que el SOC de la batería disminuye.
- Modo de carga: En este caso, la FC adopta una estrategia de seguimiento de la potencia entre  $P_{fcopt}$  y  $P_{fmax}$ . La FC opera a  $P_{fcopt}$  mientras que la potencia demandada por el tranvía sea menor que  $P_{fcopt}$ , lo que da lugar a que la batería se cargue. En el caso de que la potencia demandada por el tranvía es mayor que  $P_{fmax}$ , la batería suministra la diferencia entre ésta y la potencia máxima de la FC, el SOC de la batería disminuye.

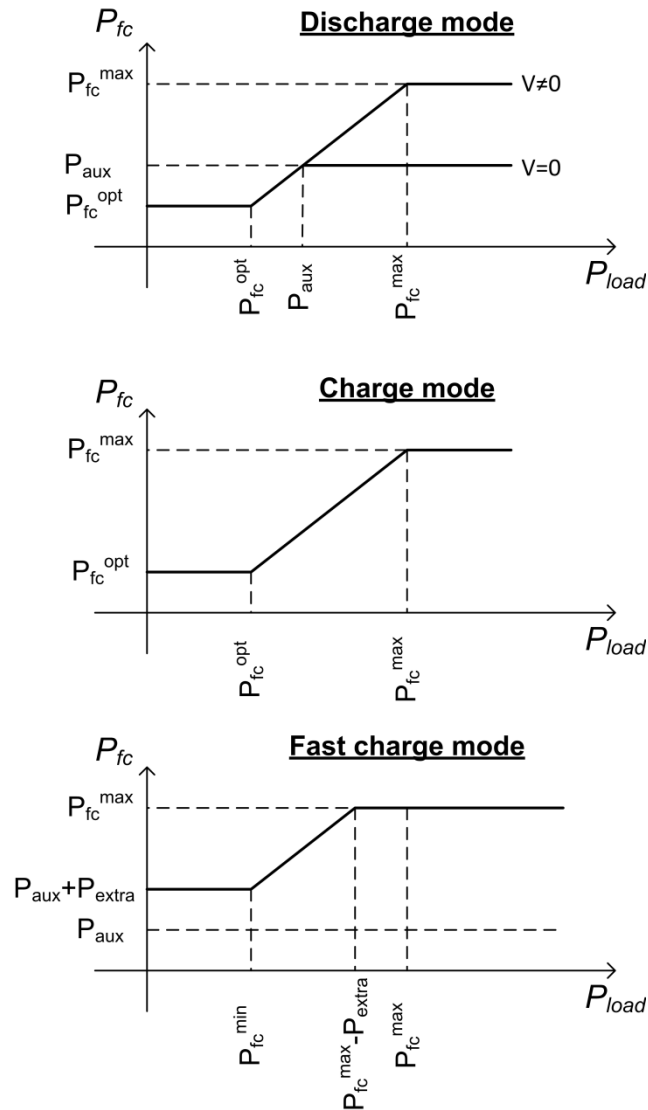


Figura 6.6. Modos de operación del CMO.

- Modo de carga rápido: Este modo de operación se adopta cuando el tranvía tiene que comenzar un nuevo viaje con un SOC de la batería bajo. Cuando la potencia demandada por el vehículo es menor que  $P_{fcmin}$ , la FC suministra la potencia de los sistemas auxiliares más una potencia extra  $P_{extra}$  para cargar la batería. Si la potencia demandada está entre  $P_{fcmin}$  y  $P_{fcmax} - P_{extra}$ , la FC genera la potencia demandada más esta potencia extra para incrementar el SOC de la batería.

La potencia de referencia de las baterías es la diferencia entre la demandada por el vehículo y la generada por la FC sujeta a limitaciones de valor máximo de carga y descarga.

Por otro lado, los supercondensadores generan/consumen la potencia pico que ni la batería ni la FC pueden generar/almacenar debido a sus limitaciones dinámicas.



Como en el resto de estrategias, cuando la diferencia entre la potencia demandada y la de la FC no puede ser absorbida por la batería/SC esa potencia se disipa en la resistencia de frenado.

### 6.3.2. Control en cascada

Esta estrategia de control, al igual que la anterior, guarda cierta similitud con el control que realizan [29] en su trabajo, donde aplica un control en cascada formado por tres lazos de control para sistemas híbridos de generación aislada de energía eléctrica.

Los dos lazos de control internos se muestran en la figura 6.7. El otro lazo de control es el que se aparece en la parte inferior de la figura 6.2.

Como se puede observar en la figura 6.7 en los dos lazos internos se genera la intensidad de referencia de la FC y de la batería. El primer lazo genera una intensidad de referencia de la FC a partir del SOC de la batería, es decir, el objetivo de la FC es mantener el SOC de la batería en su valor de referencia. En el segundo lazo se genera la intensidad de referencia de la batería a partir del SOC del SC con el objetivo de que la batería mantenga el SOC de éste en su valor de referencia.

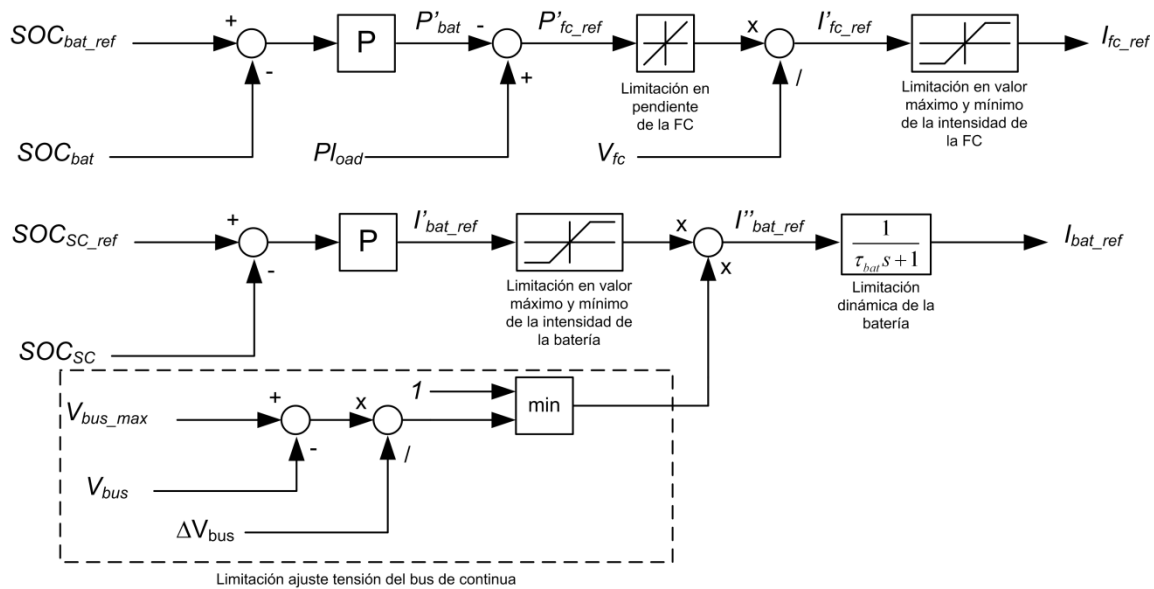


Figura 6.7. Lazos de control internos del control en cascada.

Respecto a su funcionamiento, en el primer lazo primero se compara el valor actual del SOC de la batería con el de referencia a través de un controlador proporcional P y como resultado se obtiene una potencia hipotética de la batería,  $P'_{bat}$ , para que su SOC

sea el deseado. La diferencia de esta potencia y la demandada por el vehículo nos da una primera potencia de referencia de la FC,  $P'_{fc\_ref}$ , a la que aún hay que aplicarle limitaciones. Dichas limitaciones son en pendiente, que se le aplica directamente a la potencia y en valor máximo y mínimo de intensidad una vez que la potencia se ha pasado a intensidad mediante la tensión medida en la FC.

El segundo lazo inicialmente compara el SOC actual del SC con el de referencia mediante un controlador P que genera una intensidad de referencia de la batería a la que hay que aplicarle una serie de limitaciones propias de las características comerciales de ésta [37]. La primera de éstas es una limitación de intensidad máxima y mínima que la batería puede generar y absorber. La segunda es una limitación en pendiente es utilizada para evitar los cambios bruscos en el bus de continua y una sobretensión del mismo [94]. La limitación sería la siguiente:

$$I''_{bat\_ref} = I'_{bat\_ref} \cdot \min \left( \left| \frac{V_{bus\_max} - V_{bus}}{\Delta V_{bus\_max}} \right|, 1 \right) \quad (6.4)$$

Donde  $I^*_{bat\_ref}$  es la intensidad de referencia para la batería antes de pasar por la limitación en pendiente de la misma,  $V_{bus\_max}$  es la máxima tensión que se quiere que aparezca en el bus de continua y viene ligeramente condicionado según el inversor CC/AC que lleve el tranvía; por su parte, la variación de tensión máxima se ha considerado como un 15% de la tensión en vacío de la batería.

### 6.3.3. Control con lógica difusa

Las estrategias de control mediante lógica difusa han sido aplicadas en numerosos campos, desde el control de señales, procesado de las mismas, comunicaciones, fabricación de circuitos integrados, hasta incluso en el sector de la medicina, etc. Sin embargo, la aplicación más significativa se ha concentrado en la resolución de problemas de control. La lógica difusa relaciona la entradas con las salidas usando una lista de sentencias lógicas “si... entonces...” llamadas reglas. La parte del “si” se refiere al adjetivo que describe la región de trabajo de la variable de entrada, así, una entrada en particular a un sistema pertenece a esta región en un determinado grado, representado este grado por una determinada función de pertenencia elegida por el programador. La parte de “entonces” se refiere al valor de la variable de salida. Para obtener la salida del controlador, al grado de pertenencia de la parte del “si” de todas las reglas se le toma el

valor medio y es pesada cada variable en importancia por el grado de pertenencia. La lógica difusa es especialmente útil para modelos no lineales, además, al contrario de lo que ocurre en la lógica booleana en la que una variable toma un valor de 0 o 1, en la lógica difusa esta variable puede obtener cualquier valor que entre comprendido entre el 0 y el 1, haciendo de esta forma unos cambios de estado del sistema más suaves.

Respecto a los vehículos híbridos, numerosas técnicas de distribución y control de energía han sido estudiados y desarrollados por varios autores, como por ejemplo [123], [129]. De entre todas ellas, es el control basado en la lógica difusa el que mejor se ha posicionado para su aplicación en los vehículos híbridos, debido a su independencia de un planteamiento completo matemático. Así, este tipo de control es utilizado por Erdinc *et al.* en [26], [27] donde se utilizan una configuración compuesta por un SC y una batería además del sistema completo de FC de hidrógeno. En estos artículos al igual que se ha implementado en este trabajo se ha tenido como principal objetivo la eficiencia total del sistema.

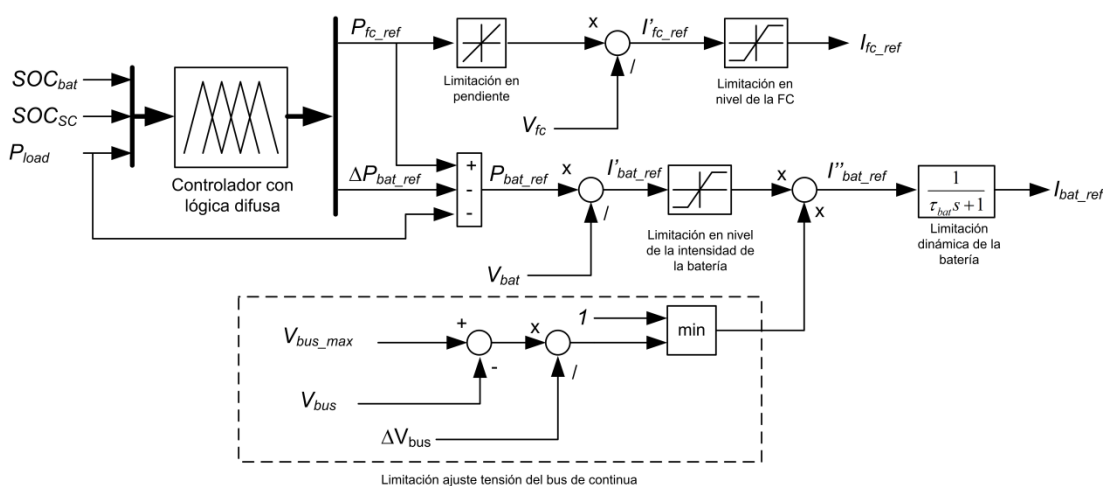


Figura 6.8. Esquema del control con lógica difusa.

El esquema del control completo realizado se muestra en la figura 6.8. En la parte superior izquierda de dicha figura se observa el controlador difuso en el que se basa esta estrategia, que consta de tres entradas y dos salidas. Las entradas son el estado de carga de la batería, del SC y la potencia total demandada por el sistema, siendo la salida del control la potencia de referencia neta a generar por el sistema de FC y una variación de la potencia de la batería que se aplica sobre la potencia de referencia de ésta, calculada como la diferencia entre la potencia demandada por el vehículo y la de la FC. Dicha variación de potencia es similar a la variación que se efectúa en la estrategia de control

por modos de operación, en la que a la  $P_{bat}$  calculada inicialmente como la diferencia entre la potencia demandada y la de la FC se le quita un valor dependiente del SOC del SC. A dichas salidas se le aplican las correspondientes limitaciones al igual que en estrategias ya citadas.

La clave del buen funcionamiento de este sistema de distribución de energía de la lógica difusa está basada en el número y el tipo de funciones de pertenencia de cada variable que participa en el control difuso. Así, la experiencia del autor del control y el conocimiento que se tenga sobre el propio sistema de controlar son primordiales para conseguir el objetivo de mejorar el rendimiento del sistema.

La función de pertenencia de cada variable de entrada y salida al sistema son mostradas en la figuras 6.9 y 6.10. Se observa como se ha utilizado funciones de pertenencia trapezoidales y triangulares para los distintos intervalos que aparecen en las variables.

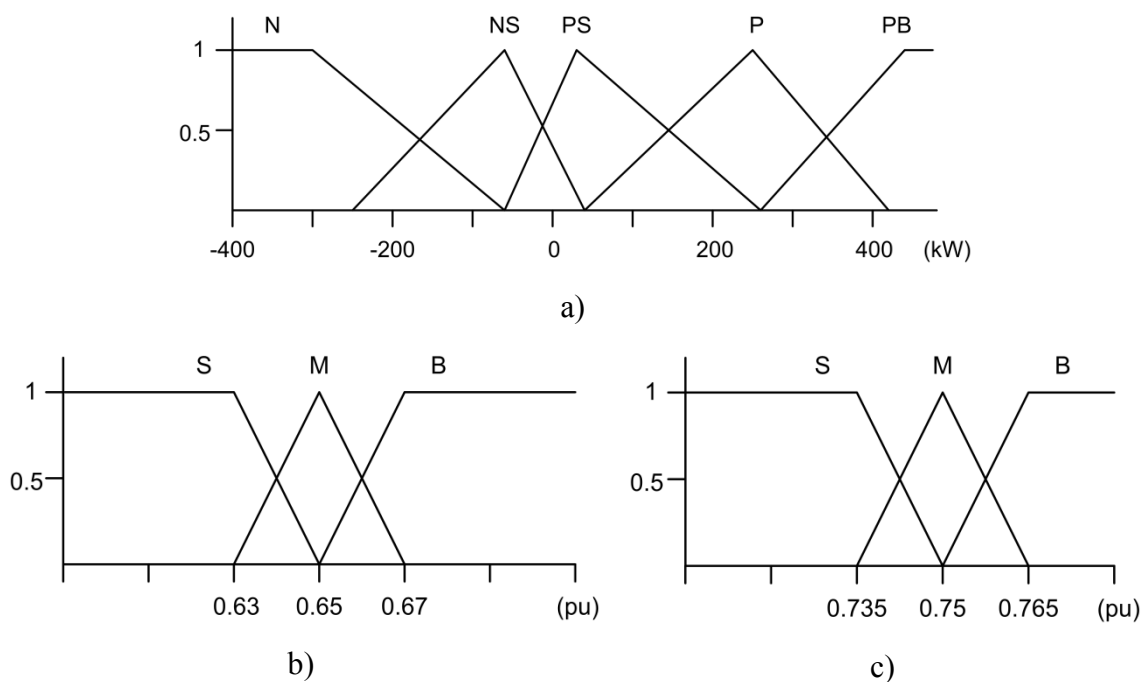


Figura 6.9. Funciones de pertenencia de las variables de entrada: a) SOC de la batería, b) SOC del supercondensador, y c) Potencia demandada por el vehículo.

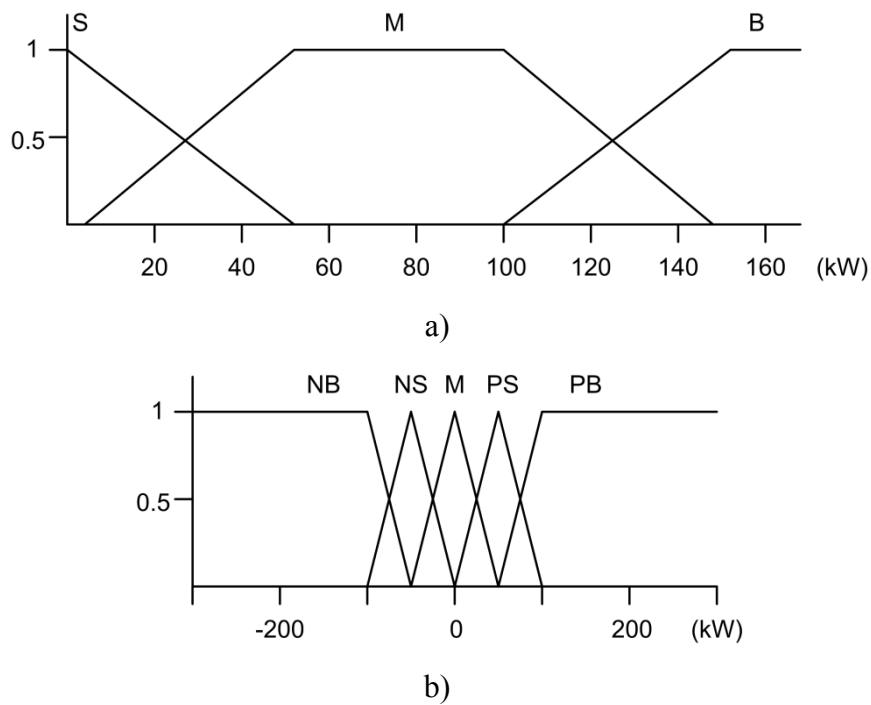


Figura 6.10. Funciones de pertenencia de las variables de salida: a) Potencia a generar por la FC, y b) Variación de la potencia de la batería.

El rango de actuación de cada función de pertenencia así como el tipo de cada una, dependen en gran medida, tal y como se ha comentado antes del conocimiento del diseñador del sistema del tranvía a lo largo distintas simulaciones dinámicas del tranvía y de los principales elementos que los forman [92]. Teniendo en cuenta esto, las reglas básicas del control son mostradas en la tabla 6.2.

Respecto a la nomenclatura de funciones de pertenencia de las variables de entrada, en el caso del estado de carga de la batería se han considerado tres funciones de pertenencia; pequeño (S de *Small*), normal (N de *Normal*) y grande (B de *Big*). Por su parte, el SOC del supercondensador tendría una nomenclatura similar al de la batería. Para la potencia demandada por el vehículo, N sería negativa (N de *Negative*), NS negativa pequeña (NS de *Negative Small*), PS sería positiva pequeña (PS de *Positive Small*), P positiva (P de *Positive*), y PB positiva grande (PB de *Positive Big*).

Respecto a las variables de salida, se usa la nomenclatura que se explica a continuación. Para la variable de salida “Potencia de la FC” se ha usado pequeño (S de *Small*), normal (N de *Normal*) y grande (B de *Big*). Para la variación de la potencia de la batería se ha usado: negativa (N de *Negative*), negativa pequeña (NS de *Negative Small*), positiva pequeña (PS de *Positive Small*), positiva (P de *Positive*), y positiva grande (PB de *Positive Big*).

Pload=N		SOC_uc					
		S		M		B	
		Pfc	ΔPbat	Pfc	ΔPbat	Pfc	ΔPbat
SOC_bat	S	B	PB	M	NS	S	NS
	M	S	NS	S	NS	S	NS
	B	S	NS	S	NS	S	NS

Pload=NS		SOC_uc					
		S		M		B	
		Pfc	ΔPbat	Pfc	ΔPbat	Pfc	ΔPbat
SOC_bat	S	B	PB	N	NS	S	NS
	M	S	M	S	NS	S	NS
	B	S	M	S	M	S	NS

Pload=PS		SOC_uc					
		S		M		B	
		Pfc	ΔPbat	Pfc	ΔPbat	Pfc	ΔPbat
SOC_bat	S	B	PS	M	NS	M	NS
	M	B	PB	M	M	S	M
	B	B	PB	S	PS	S	M

Pload=P		SOC_uc					
		S		M		B	
		Pfc	ΔPbat	Pfc	ΔPbat	Pfc	ΔPbat
SOC_bat	S	B	PS	B	NS	M	NS
	M	M	PS	B	M	M	M
	B	M	PS	S	PS	S	PS

Pload=PB		SOC_uc					
		S		M		B	
		Pfc	ΔPbat	Pfc	ΔPbat	Pfc	ΔPbat
SOC_bat	S	B	PS	B	M	M	M
	M	B	PS	B	M	M	M
	B	M	PS	S	PB	S	PS

Tabla 6.2. Reglas del controlador por lógica difusa.

Por ejemplo; si el SOC de la batería es bajo, el del SC es bajo también y la potencia demandada por el vehículo es positiva la potencia de la FC es grande y la variación de la potencia de la batería es positiva pequeña.

Por último, en estas últimas figuras se muestran dos de las superficies generadas a partir de dos variables de entrada y una de salida.

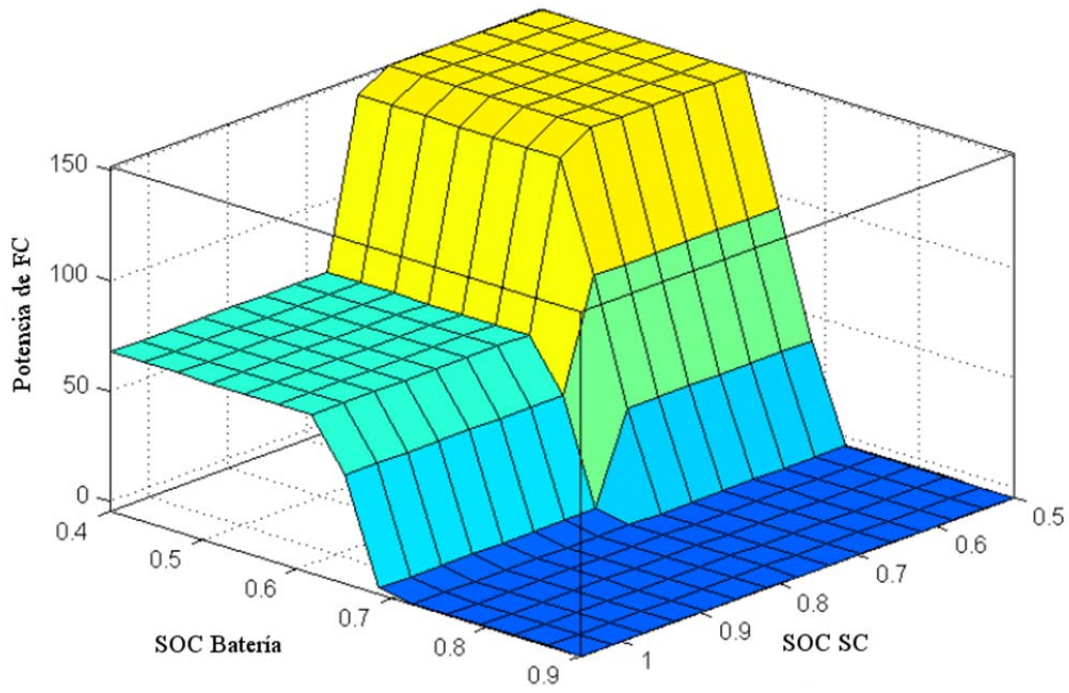


Figura 6.11. Potencia de la FC en función del SOC de la batería y del SC.

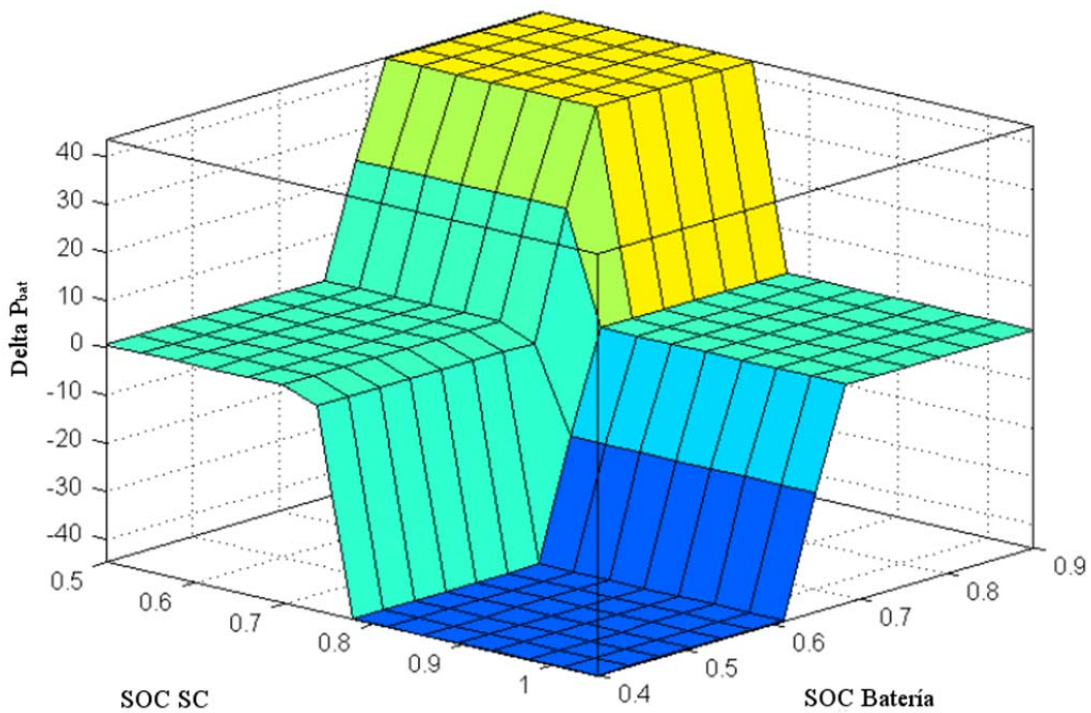


Figura 6.12. Variación de la potencia de la batería en función del SOC de la batería y del supercondensador.

#### 6.3.4. Control de Minimización de Consumo Equivalente

Esta estrategia de control está basada en el concepto de consumo equivalente de combustible propuesto por Paganelli *et al.* en [130]. En un vehículo híbrido se combina el uso de energía proveniente del hidrógeno en la FC y energía eléctrica de las fuentes auxiliares (batería y SC). Para hacer comparables los distintos dispositivos, hay que hacer uso de una transformación de la energía eléctrica consumida por las fuentes secundarias en energía equivalente en hidrógeno, como se realizó en [126], [130]-[131].

Este control se centra en calcular la potencia óptima de la FC que minimiza el consumo equivalente de hidrógeno del sistema de tracción híbrido,  $C$ , el cual es calculado a partir del consumo de hidrógeno de la FC, y el equivalente de la batería y supercondensador,  $C_{bat}$  y  $C_{sc}$  [126].

El problema matemático planteado para minimizar el consumo de combustible se expresa como sigue:

$$P_{fc} = \min(C_{fc} + k_1 \cdot C_{bat} + k_2 \cdot C_{sc}) \quad \forall t \quad (6.4)$$

Donde  $P_{fc}$  es la potencia de salida de la FC; y  $k_1$  y  $k_2$  son coeficientes de penalización, que modifican el consumo equivalente de la batería y el SC aumentándolo o disminuyéndolo dependiendo de la diferencia del SOC de éstos con respecto al SOC de referencia de cada uno [132].

Ya que el objetivo del SC es generar los picos demandados por el vehículo durante las aceleraciones o frenadas, los cuales no pueden ser absorbidos/generados por la FC y batería, su contribución será mínima, y por eso,  $C_{sc}$  puede ser despreciado comparado con  $C_{fc}$  o  $C_{bat}$ . Por esta razón, la expresión (6.4) puede ser rescrita como sigue:

$$P_{fc} = \min(C_{fc} + k_1 \cdot C_{bat}) \quad \forall t \quad (6.5)$$

Donde  $C_{fc}$  y  $P_{fc}$  dependen de la curva estática de la FC. En general, esta relación puede ser aproximada por la siguiente expresión:

$$C_{fc} = c \cdot P_{fc}^2 + b \cdot P_{fc} + a \quad (6.6)$$

donde  $a$ ,  $b$ , y  $c$  son coeficientes de ajuste que deben ser calculados a partir de la FC elegida para el vehículo. En la figura 6.13 se muestra el consumo de hidrógeno en



función de la potencia de la FC obtenidos para el modelo y para el polinomio de grado 2 del que se obtienen éstos parámetros de ajuste.

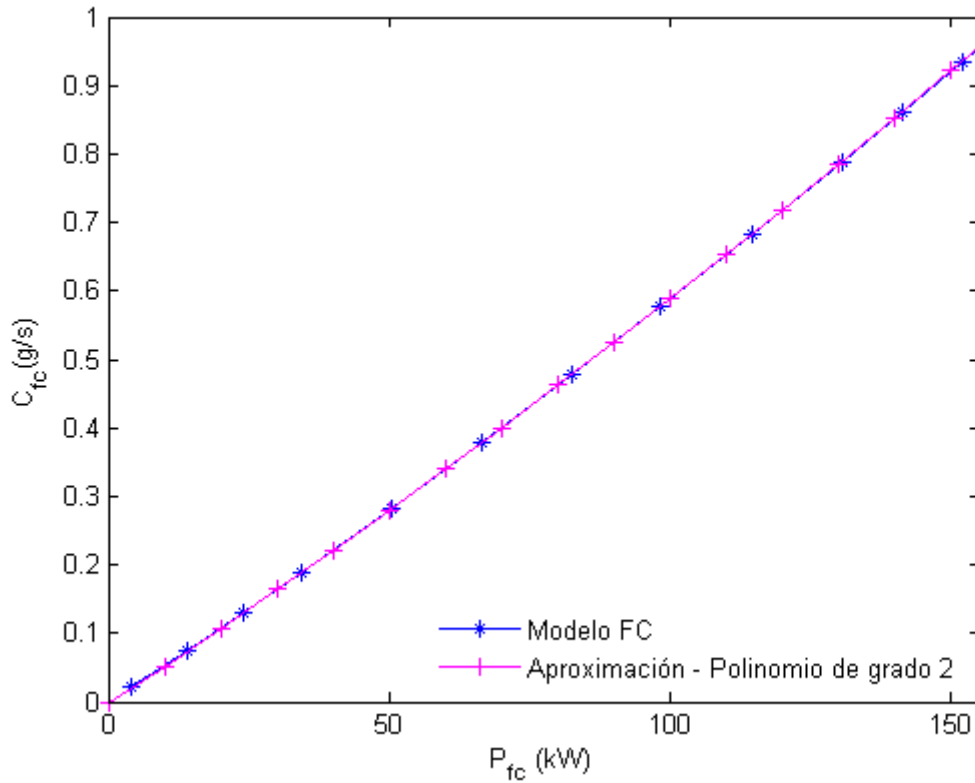


Figura 6.13. Curvas de consumo de hidrógeno en función de la potencia de la FC.

El consumo equivalente de hidrógeno de la batería,  $C_{bat}$ , puede ser calculado a partir de la potencia de la batería y del SOC de la batería [104], [126], [131]. Para obtener este consumo equivalente de hidrógeno, se usan valores medios, ya que los puntos de operación de la FC y de la batería son desconocidos.

El consumo equivalente de hidrógeno de la batería puede ser expresado como:

$$C_{bat} = P_{bat} \cdot \sigma \cdot \frac{C_{FC,avg}}{P_{FC,avg}} \quad (6.7)$$

con:

$$\sigma = \begin{cases} \frac{1}{\eta_{chg,avg} \cdot \eta_{dis}} & P_{bat} \geq 0 \\ \eta_{chg} \cdot \eta_{dis,avg} & P_{bat} < 0 \end{cases} \quad (6.8)$$

donde  $C_{FC,avg}$  es el consumo medio de hidrógeno de la FC;  $P_{FC,avg}$  es la potencia

media de la FC;  $\eta_{chg}$  y  $\eta_{dis}$  son los rendimientos medios de carga y descarga de la batería.

Como se considera en [107], el coeficiente de penalización se expresa como:

$$k_1 = 1 - 2\mu \frac{(SOC - 0.5(SOC_H + SOC_L))}{SOC_H + SOC_L} \quad (6.9)$$

donde la constante  $\mu$  debe ser ajustada para reproducir correctamente los procesos de carga y descarga [107], el cual se elige para equilibrar el SOC de la batería durante el ciclo de trabajo;  $SOC_L$  es el límite inferior del SOC; y  $SOC_H$  es su límite superior.

Debido a que  $C_{SC}$  es despreciable comparado con  $C_{fc}$  o  $C_{bat}$ , la potencia de la FC usada en la ecuación (6.5) puede ser calculada como

$$P_{fc} = P_{load} - P_{bat} \quad (6.10)$$

Donde la potencia total demandada por el sistema híbrido,  $P_{load}$ , se calcula como la suma de la potencia demandada por los motores eléctricos y la demandada por los servicios auxiliares.

Si las ecuaciones (6.7), (6.8) y (6.10) son tenidas en cuenta, el problema de minimización puede ser expresado como sigue:

$$P_{bat}^{id} = \min \left( c(P_{load} - P_{bat})^2 + b(P_{load} - P_{bat}) + a + k_1 P_{bat} \sigma \frac{C_{FC,avg}}{P_{FC,avg}} \right) \quad (6.11)$$

Desarrollando esta ecuación y considerando que  $P_{load}$  y  $a$  pueden ser considerados constantes en el problema de minimización, la solución óptima obtenida de derivar la ecuación anterior e igualar a cero da como resultado:

$$P_{bat}^{id} = \frac{b - K_1}{2c} + P_{load} \quad (6.12)$$

donde  $K_1$  es una nueva constante definida como:

$$K_1 = k_1 \cdot \sigma \cdot \frac{C_{FC,avg}}{P_{FC,avg}} \quad (6.13)$$

Finalmente, desarrollando  $P_{load}$  como la suma de la potencia demandada por el motor y los servicios auxiliares, la potencia óptima de la FC  $P_{fc}^{opt}$  puede ser calculada como:

$$P_{fc}^{opt} = \max\left(\min\left(\pm P_m + P_{aux} - P_{bat}^{id}, P_{fc}^{max}\right), P_{fc}^{min}\right) \quad (6.14)$$

Donde  $P_{fcmax}$  es la potencia máxima de la FC,  $P_{fcmin}$  es la potencia mínima de la FC, y  $P_m$  es la potencia eléctrica del motor, la cual es positiva cuando funciona como motor y negativa cuando lo hace como generador.

Por otro lado, debido a que el consumo equivalente del SC,  $C_{sc}$ , es considerado nulo comparado con los otros consumos equivalentes de las otras fuentes de energía, se añade a este esquema de control un lazo de control para mantener el SOC del SC similar al empleado en la estrategia de modos de operación. Este lazo de control está compuesto por un controlador PI que genera la potencia de referencia del SC a partir de la diferencia entre su SOC de referencia y su valor actual. Esta potencia de referencia del SC es limitada en nivel con respecto a las limitaciones físicas del SC y sumada después a la potencia óptima de referencia de la batería generada por el control de minimización de consumo equivalente, modificando ligeramente su potencia y generado la potencia de referencia final a ser generada por la batería, una vez limitada en nivel. El esquema de control de esta estrategia se muestra en la figura 6.14.

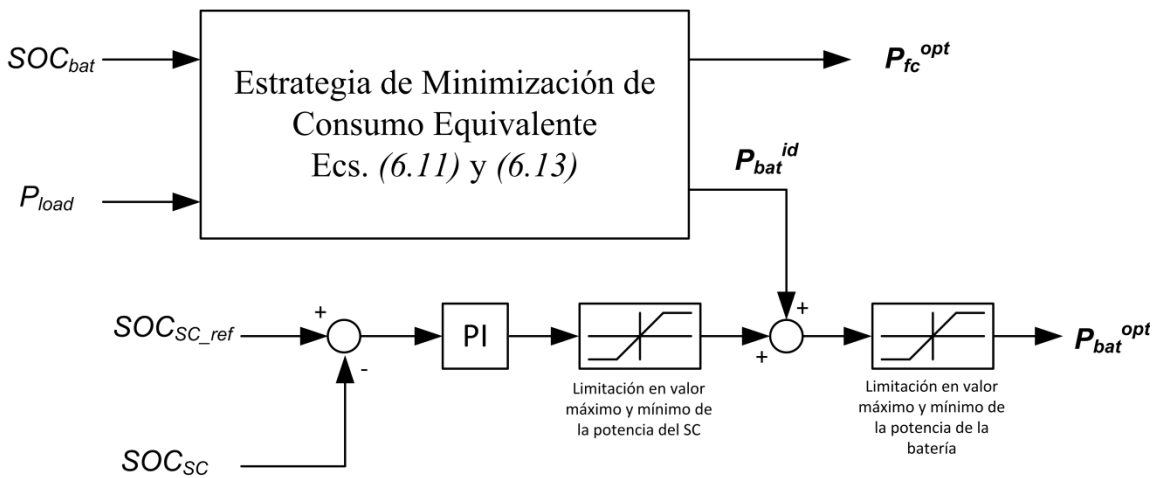


Figura 6.14. Esquema de la estrategia de Minimización de Consumo Equivalente.

### 6.3.5. Control predictivo

Este tipo de control, como se ha comentado anteriormente, ha sido propuesto recientemente para aplicaciones de vehículos híbridos [112], [115], [133].

Para diseñar el convertidor en este trabajo se ha usado la toolbox de Control Predictivo de Matlab. Ésta requiere un modelo de planta, el cual define las relaciones matemáticas entre las entradas y salidas del sistema. El controlador predictivo se diseña

para predecir el comportamiento de la planta.

La toolbox necesita que el modelo de planta sea lineal e invariante en el tiempo. Existen múltiples formas de obtener el modelo de la planta en Matlab, al estar hecho el modelo en Simulink la forma más fácil de linealizarlo es usar la toolbox de “Control Design”. Para linealizar, el primer paso es designar las entradas y salidas del sistema en el modelo. Una vez que se han designado éstas hay que especificar un punto de funcionamiento, que también puede ser un intervalo de funcionamiento si las entradas del sistema se especifican como intervalos. Finalmente, la toolbox genera un modelo lineal e invariable en el tiempo de la planta.

El siguiente paso sería el diseño del controlador predictivo. Pero como paso previo es necesario introducir las siguientes definiciones relacionadas con las entradas y salidas de la planta a controlar.

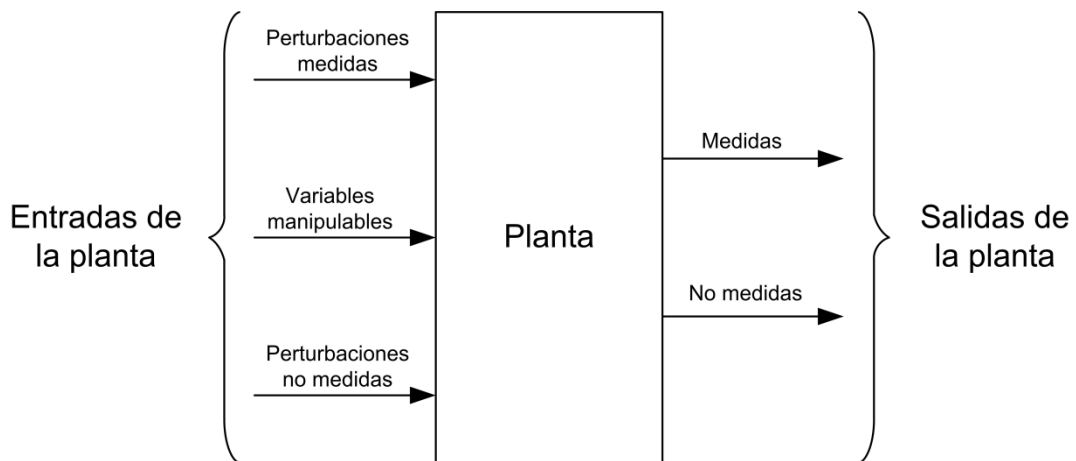


Figura 6.15. Planta con señales de entrada y salida.

Las entradas de la planta son variables independientes que afectan a la planta. Como se muestra en la figura 6.15, hay tres tipos:

- Perturbaciones medidas: El controlador no puede ajustarlas, pero las usa para compensación anticipada (“feedforward”).
- Variables manipuladas: El controlador las ajusta para conseguir sus objetivos.
- Perturbaciones no medidas: Éstas son entradas independientes de las que el controlador no tiene un conocimiento directo, y por las cuales debe ser compensado.

Las salidas de la planta son variables dependientes que quieres controlar. Como se

muestra en la figura 6.15, hay dos tipos:

- Salidas medidas: El controlador las usa para estimar cantidades no medidas y como realimentación para comprobar el éxito de sus ajustes.
- Salidas no medidas: El controlador las estima basándose en medidas disponibles y en el modelo de la planta. El controlador puede además mantener estas salidas no medidas en torno a un valor de referencia o dentro de unos límites.

En nuestro caso particular la planta a controlar tendría como entradas del sistema intensidades de referencia de la FC, de la batería y del SC. Dichas entradas son del tipo variables manipuladas, ya que van a ser generadas por el controlador.

Sus salidas serían los valores de la potencia demandada por el vehículo, el SOC de la batería y el SOC del supercondensador. Dichas salidas son salidas medidas puesto que el controlador las va a usar como realimentación para compararlas con el valor de referencia y comprobar el éxito de sus ajustes.

Un controlador predictivo es un controlador de tiempo discreto, es decir, que adopta medidas en instantes de tiempo discretos regularmente espaciados unos de otros. Los instantes de muestreo son las veces que el controlador actúa. El intervalo que separa sucesivos instantes de muestreo se denomina periodo de muestreo,  $\Delta t$  (también llamado intervalo de control). A continuación se describe qué ocurre en cada instante de muestreo en el controlador.

En la figura 6.16, se muestra el estado de un hipotético controlador predictivo en el  $k$ -ésimo instante de muestreo. Este sistema ha estado funcionando durante múltiples instantes de muestreo. La última salida medida,  $y_k$ , y medidas anteriores,  $y_{k-1}$ ,  $y_{k-2}$ , ..., son conocidas y son los círculos rellenos en la figura. En la parte inferior de la figura, se muestran los movimientos previos del controlador,  $u_{k-4}$ , ...,  $u_{k-1}$ , con círculos rellenos. Como se puede observar, cada acción del controlador en el instante de muestreo correspondiente se mantiene durante todo el periodo de muestreo dando lugar a variaciones de tipo escalón en la señal generada por éste. Para el cálculo del siguiente movimiento,  $u_k$ , el controlador opera en dos fases:

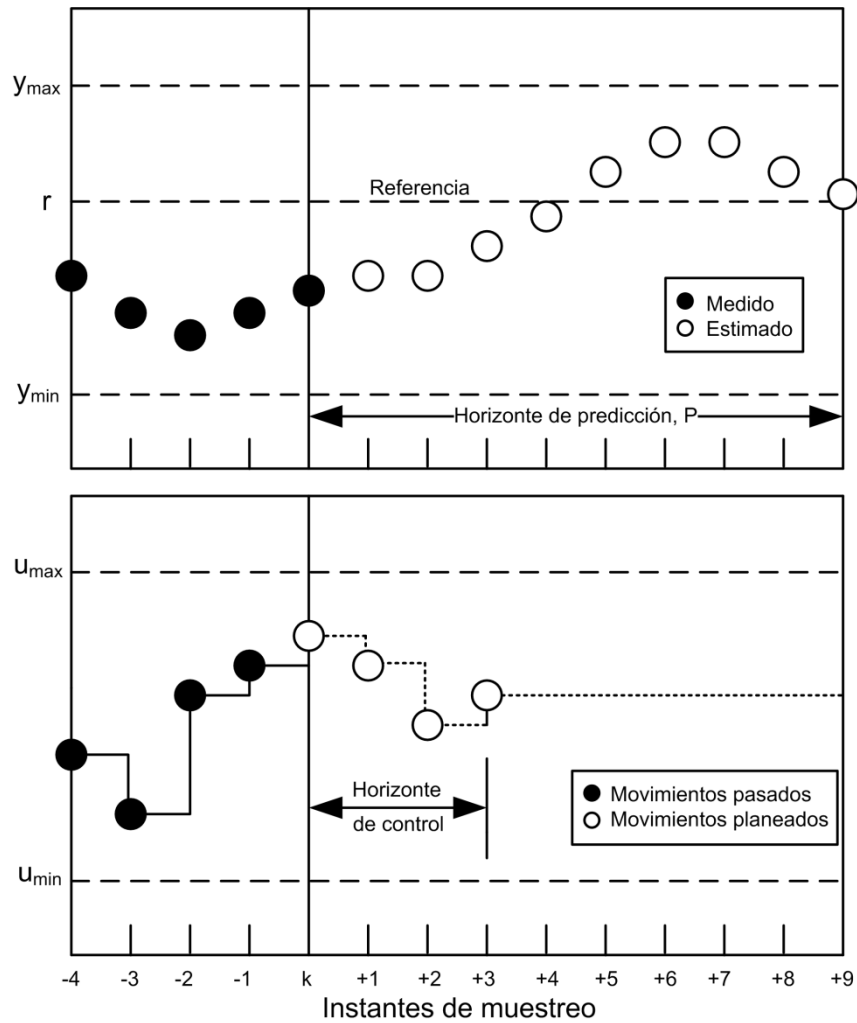


Figura 6.16. Funcionamiento de un hipotético controlador predictivo con una entrada y una salida.

1ª) *Estimación*. Para hacer un movimiento inteligente, el controlador necesita conocer el estado actual. Esto incluye el valor real de la variable controlada,  $y_k$ , y cualquier variable interna que inflencie la tendencia futura,  $y_{k+1}, \dots, y_{k+P}$ . Para lograr esto, el controlador usa todas las medidas pasadas y actuales y el modelo de planta  $u \rightarrow y$ .

2ª) *Optimización*. Se especifican los valores de referencia y los límites de las variables para un horizonte finito de futuros instantes de muestreo,  $k+1, k+2, \dots, k+P$ , donde  $P$  (un valor finito mayor o igual a uno) es el horizonte de predicción. El controlador computa  $M$  movimientos  $u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+M-1}$ , donde  $M (\geq 1, \leq P)$  es el horizonte de control. En el hipotético ejemplo de la figura 6.16,  $P=9$  y  $M=4$ . Los movimientos son la solución a un problema de optimización con limitaciones.

En el ejemplo de la figura 6.16, los movimientos óptimos son los cuatro círculos

abiertos del gráfico de abajo. El controlador predice que las variables de salida resultantes serán los nueve círculos abiertos de la figura superior. Véase que ambos están dentro de sus restricciones,  $u_{min} \leq u_{k+j} \leq u_{max}$  e  $y_{min} \leq y_{k+i} \leq y_{max}$ .

Cuando acaba de calcular, el controlador manda el movimiento  $u_k$  a la planta. La planta opera con esta entrada constante hasta el siguiente intervalo de muestreo,  $\Delta t$  unidades de tiempo después. El controlador entonces obtiene nuevas medidas y revisa totalmente su plan. Este ciclo se repite indefinidamente. La reformulación en cada instante de muestreo es esencial para un buen control. Las predicciones hechas durante la fase de optimización son imperfectas. La realimentación periódica permite al controlador corregir esta imperfección y perturbaciones inesperadas.

Como se muestra en la figura 6.17, el controlador predictivo compara las salidas del sistema ( $y$ ) con los valores de referencia seleccionados ( $r$ ) en cada instante de muestreo. El controlador genera las intensidades de referencia de cada controlador que son limitadas de forma similar al resto de estrategias.

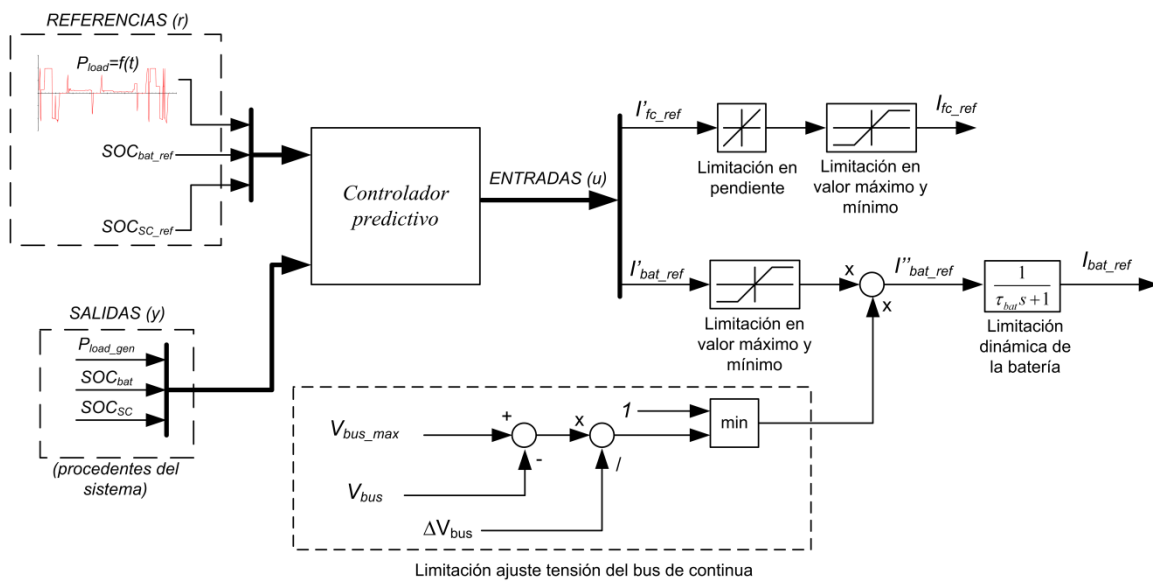


Figura 6.17. Esquema de control predictivo diseñado para el tranvía.

Se han seleccionado los siguientes parámetros a la hora de diseñar el controlador predictivo:

- Parámetros de los horizontes. Entre los que se encuentran el intervalo de control, el horizonte de predicción y el horizonte de control.
- Ajuste de los parámetros del controlador. Seleccionar un ajuste global (elección

de un control más robusto o una respuesta más rápida), y las tasas de penalización de las variables de entrada y salida (si la penalización es nula permite que la variable se pueda mover a cualquier parte entre su límite superior e inferior, y si es positiva cuanto mayor sea la penalización menos se moverá la variable de su valor nominal).

En la siguiente tabla se recogen los valores escogidos para el controlador predictivo.

Variable	Valor	Comentario
Intervalo de control	0.05 s	---
Horizonte de predicción, P (intervalos)	15	Equivalen a 0.75 segundos
Horizonte de control, M (intervalos)	5	Equivalen a 0.25 segundos
Límites de nivel de las entradas del controlador		
Potencia demandada	[-600,600] kW	---
SOC de la batería	[70,80] %	---
SOC del supercondensador	[55, 65] %	---
Parámetros del controlador		
Ajuste global	0.8	1=Respuesta rápida, 0=Más robusto
Penalización de las entradas al controlador		
Potencia demandada	0.001	Cercano a cero: sin penalización. Positivo: cuanto más positivo, más se mantiene la salida cerca del valor de referencia.
SOC de la batería	0.8	
SOC del supercondensador	0.2	
Penalización de las salidas del controlador		
Intensidad de referencia de la FC	0.01	Cercano a cero: Libertad de movimiento. Positivo: Más cerca del valor nominal de la variable.
Intensidad de referencia de la batería	0	

Tabla 6.3. Parámetros del controlador predictivo.





---

## CAPÍTULO 7

---

### Resultados y análisis

#### 7.1. Introducción.

Una vez desarrollados en los capítulos anteriores los modelos que componen el sistema y las estrategias de control se presentan las simulaciones realizadas en este trabajo. Dichas simulaciones nos permitirán comparar las estrategias propuestas y elegir la más adecuada para el tranvía en cuestión.

Las simulaciones consisten en someter a cada una de las estrategias propuestas a la demanda del tranvía durante un total de 8 viajes del mismo trayecto. Evidentemente, para que las estrategias sean válidas deben de ser capaces de cumplir los objetivos definidos en el capítulo anterior (suministrar la potencia demandada por el vehículo y mantener el SOC de las fuentes de energía secundarias en torno a un valor de referencia). De esta forma, se pretende demostrar la fiabilidad de las estrategias.

La comparación entre estrategias se llevará a cabo teniendo en cuenta desde diferentes puntos de vista, tales como: consumo de combustible, rendimiento del sistema, sostenimiento del SOC tanto de la batería y del supercondensador en torno al valor de referencia y menor disipación de energía en la resistencia regenerativa.

## **7.2. Comparación de los controles**

La comparación de los controles se realizará mediante simulaciones dinámicas en las cuales se considerará un estado de carga inicial de la batería del 65%, siendo éste el valor de referencia para el estado de carga de la misma. En el caso del supercondensador el valor inicial de carga del mismo será del 75% y, al igual que ocurre con la batería, dicho valor ha sido seleccionado como referencia para las distintas estrategias. Dichos niveles de carga se encuentran dentro de los límites en los que se recomienda que funcionen estos elementos [134].

Además, para comprobar el funcionamiento de los controles ante una situación extrema como puede ser el hecho de iniciar el funcionamiento el tranvía con un estado de carga por debajo del rango de funcionamiento, también se realizarán simulaciones considerando el estado de carga inicial de la batería en un 55%.

Todo esto se realizará utilizando el ciclo de trabajo recogido durante el funcionamiento del tranvía *Urbos 3*. Como se comentaba anteriormente, para demostrar la fiabilidad de las estrategias y que su comportamiento es estable durante más de un trayecto se han simulado un total de 8 ciclos de trabajo.

Por último, una vez realizadas las comparaciones se escogerá el mejor control según los factores comentados con anterioridad. La estrategia seleccionada es la que mejor se adaptaría a las solicitudes del ciclo de trabajo del tranvía.

### *7.2.1. Resultados de las simulaciones*

Debido a la longitud de los experimentos en algunas figuras se hace muy difícil ver con claridad los resultados obtenidos. Esto pasa, por ejemplo a la hora de representar la potencia de cada fuente de energía. Por tanto, en ciertas figuras se mostrarán sólo tramos de la simulación representativos.

En el caso de las simulaciones con un SOC inicial de la batería del 65% hay que anticipar que las estrategias se comportan de manera estable ciclo a ciclo. Por tanto,

para algunos parámetros sólo se necesita representar su comportamiento durante un ciclo de trabajo.

En el caso de las simulaciones con SOC inicial de la misma de 55% se produce una transición desde el estado desfavorable y transitorio inicial hasta uno estable similar al que ocurre en las primeras simulaciones. En este caso se representarían distintos tramos para poder ver la evolución.

#### **7.2.1.1. SOC inicial de la batería de 65%**

En las siguientes figuras se han tomado las siguientes abreviaturas a la hora de referirse a las estrategias: OMC (control por modos de operación), CC (control en cascada), LFC (control por lógica difusa), ECMS (control por minimización de consumo equivalente) y MPC (control predictivo).

En la figura 7.1a se muestra la potencia demandada por el tranvía para un ciclo de trabajo del tranvía. La velocidad correspondiente a dichos trayectos se aprecia en la figura 7.1b. Cada ciclo del tranvía corresponde a un viaje del mismo entre las dos paradas entre las que hace su recorrido. La duración de cada ciclo es de 396 segundos con una velocidad máxima de 50 km/h. Fijándonos en un solo ciclo podemos comprobar que cada uno de éstos se compone de 4 viajes. El primero de ellos tiene una duración de unos 60 segundos en los que realiza dos aceleraciones, la primera para pasar de 0 a 25 km/h en unos 7 segundos y la segunda hasta alcanzar la velocidad máxima en 20 segundos, posteriormente decelera 20 segundos hasta detenerse. En esa transición de aceleración hasta alcanzar la velocidad máxima y la frenada se produce una gran variación repentina de potencia. En el siguiente viaje, de unos 70 segundos, el tranvía acelera hasta alcanzar los 15 km/h, velocidad que mantendrá durante el viaje completo hasta llegar a la siguiente parada. El siguiente es similar en cuanto a que el tranvía mantiene una velocidad de 15 km/h durante el viaje con la peculiaridad de que es ligeramente más largo (30 segundos más aproximadamente). Por último, el tranvía vuelve a acelerar hasta su velocidad máxima mediante dos aceleraciones (la primera de 10 segundos hasta los 25 km/h) de forma parecida a como lo hacía en el primer viaje y frena pero con la particularidad de hacerlo en dos etapas, de 50 a 30 km/h y de ahí hasta frenarse definitivamente.

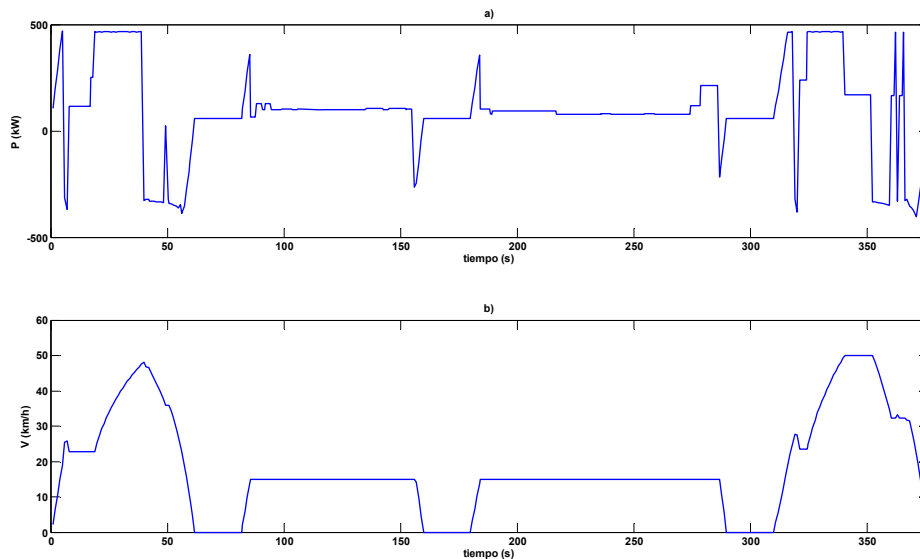


Figura 7.1. Ciclo de trabajo del tranvía. a) Potencia. b) Velocidad.

En la siguiente figura, 7.2, se representan las potencias de las diferentes fuentes de energía del sistema para el primer ciclo de trabajo del tranvía. En líneas generales se puede apreciar la similitud de las potencias generadas por las distintas estrategias para la batería y SC, y las mayores diferencias en el caso de la FC.

En el caso de la pila de combustible, figura 7.2a, se puede apreciar que todas las estrategias tienden a generar la misma potencia, coincidiendo en muchos tramos, sobre todo en los viajes intermedios de cada ciclo de trabajo y en las aceleraciones del primer y último viaje. Otra particularidad es que la estrategia de modos de operación tiende a mantener más constante el valor de la potencia de referencia de la FC. A modo aclaratorio se ha adjuntado en línea de puntos la velocidad del tranvía para que sea más fácil entender los comentarios. En el primer viaje, que dura hasta el segundo 61, se puede observar cómo las estrategias de cascada y predictivo trazan trayectorias muy parecidas en el tramo a velocidad constante después de la primera aceleración, mientras que las otras tres generan una potencia de referencia ligeramente menor hasta que el vehículo acelera de nuevo hasta la velocidad máxima. En el momento en que se inicia la deceleración, todas las estrategias hacen que la FC pase de funcionar a máxima potencia a mínima salvo la estrategia de modos de operación que baja hasta una potencia intermedia y la mantiene constante hasta el siguiente viaje (con el objetivo de carga a la batería). Durante la deceleración de dicho viaje y en la posterior parada, cada estrategia genera una potencia de referencia distinta, destacando la estrategia de lógica difusa por

generar la potencia máxima de la FC justo cuando el vehículo se detiene. En el segundo viaje, se aprecia que a pesar de las diferencias durante la aceleración inicial y deceleración final, en el tramo central las potencias de referencia son muy parecidas, salvo la de la estrategia de cascada que es ligeramente mayor. Además, se aprecia que una vez acabado el viaje en el segundo 161 aunque el tranvía está parado, todas las estrategias optan por aumentar la potencia de referencia menos la de predictivo que la mantiene en su valor mínimo. Se comprueba que, además se corroborará más adelante, que en las paradas entre viajes es cuando se producen mayores diferencias entre las estrategias. En el siguiente viaje, cabe destacar que la estrategia de control predictivo se vuelve a diferenciar del resto generando la potencia máxima una vez finalizada la primera aceleración. A parte, sigue ocurriendo que en las aceleraciones y deceleraciones es cuando se producen mayores diferencias entre estrategias. En la siguiente parada, al igual que ocurría en la anterior, cada estrategia genera una referencia distinta. En el último viaje, las estrategias se comportan de forma similar salvo en el tramo en el que se mantiene la velocidad máxima durante unos segundos, en la que las estrategias de minimización de consumo y lógica difusa optan por no generar la máxima potencia.

A parte de esto, en el caso de la potencia de la batería, representada en 7.2b, podemos observar que existe mayor similitud entre las diferentes estrategias de control que en el caso de la potencia de la FC, aunque las estrategias de modos de operación y predictiva difieren más del resto. Si se compara la potencia generada por las baterías con la potencia demandada por el vehículo (representada con una línea discontinua) se puede comprobar que la batería genera y absorbe la mayor parte de la demanda de potencia del vehículo, sobre todo en las aceleraciones y frenadas, y que en los tramos en los que se mantiene la velocidad constante la FC hace frente a la demanda de potencia haciendo que la potencia de la batería sea nula, o incluso negativa, por lo que sirve para mantener su SOC puesto que gran parte de la potencia necesaria para las aceleraciones se recupera en las frenadas.

Respecto a la potencia del SC podemos ver que se producen mayores diferencias entre las distintas estrategias que en el caso de las baterías. Se comprueba también que los SC trabajan sobre todo en los tramos de aceleraciones y frenadas, y dejan de hacerlo en tramos de velocidad constante.

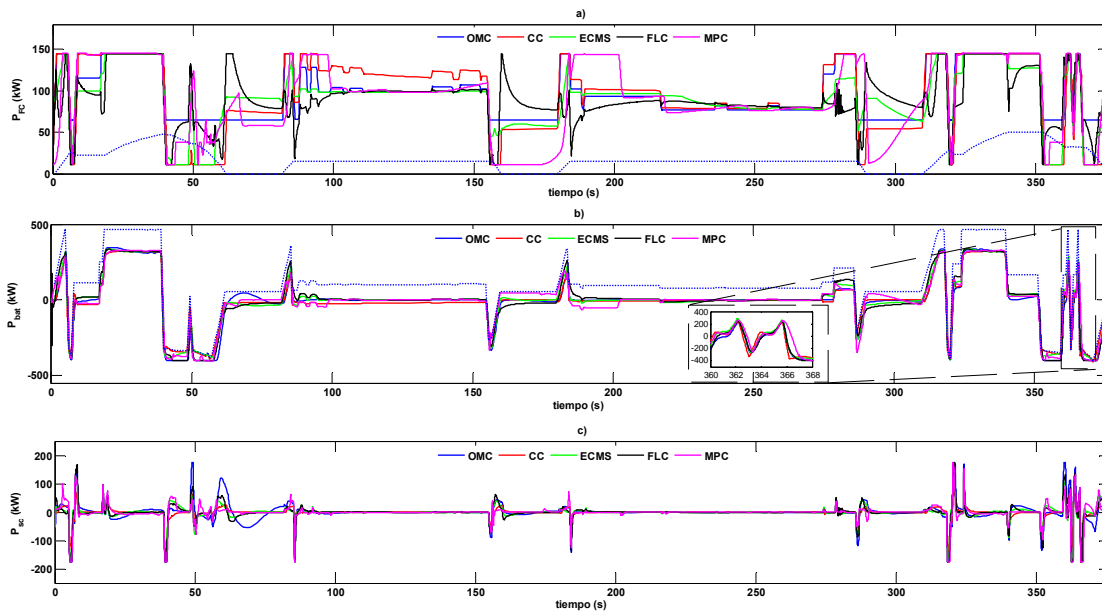


Figura 7.2. Potencias en las fuentes de energía. a) FC, b) Batería, y c) SC.

Por último, cabe destacar de esta figura de las potencias de las fuentes del sistema que de las dos fuentes auxiliares, la batería es la que tiene como función generar un alto porcentaje de la potencia demandada por el vehículo y recuperar casi la totalidad de la potencia generada por el freno regenerativo. Queda claro también que la misión del SC es generar/absorber los picos de potencia a los que la batería no puede hacer frente.

En la figura 7.3 se comprueba la respuesta dinámica de la pila usando como ejemplo los resultados obtenidos para la estrategia de modos de operación. Se representa la intensidad de referencia del sistema de FC generada por las estrategias de control y la intensidad generada por la FC. Se comprueba la velocidad de respuesta de la FC con respecto a la referencia generada por el control.

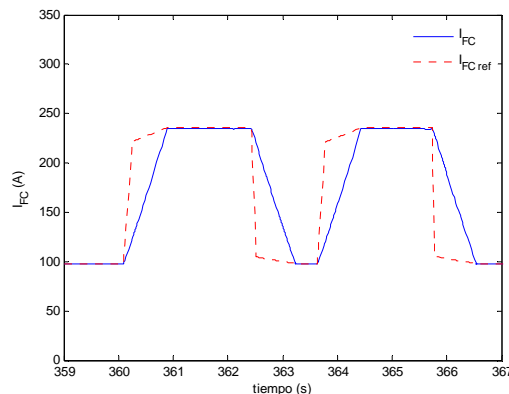


Figura 7.3. Respuesta dinámica de la pila.

En la figura 7.4 se representan la potencia total generada por el sistema completo del tranvía híbrido con todos los controles, la potencia disipada en la resistencia regenerativa y la energía total disipada para un ciclo de trabajo del tranvía. Se comprueba claramente en la figura 7.4a el correcto funcionamiento de todos los controles generando sin problemas la potencia total solicitada por el tranvía (tracción y servicios auxiliares).

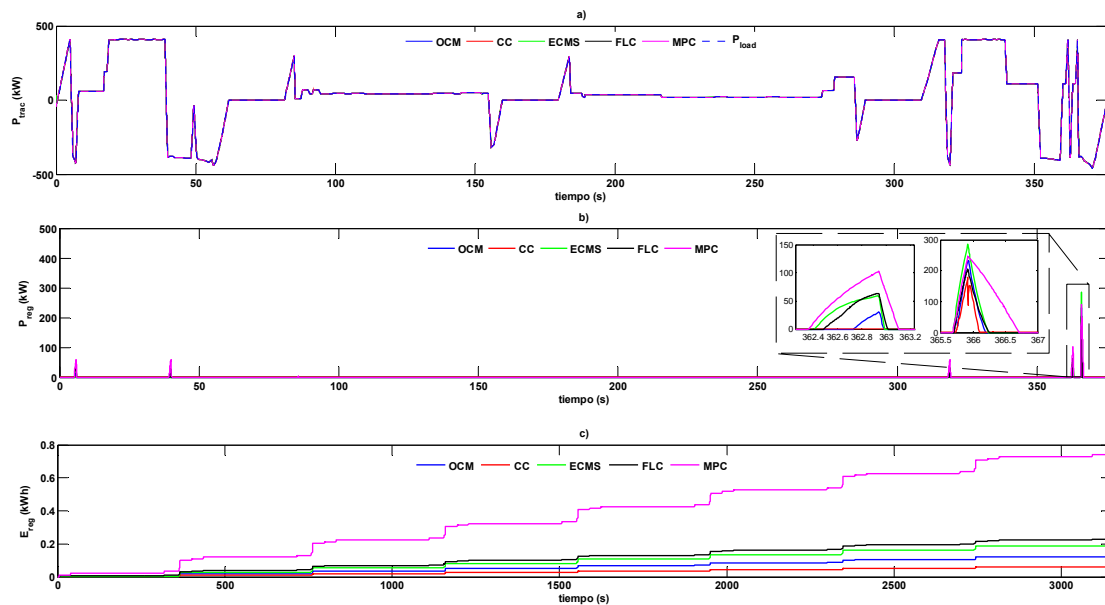


Figura 7.4. a) Potencia generada, b) Potencia disipada en la resistencia de frenado, y c) Energía disipada en la resistencia de frenado.

Con respecto a la potencia disipada en la resistencia de frenado, existen diferencias significativas entre las distintas estrategias de control. Como se puede observar la estrategia de control predictivo es la que disipa mayor energía debido a que la potencia de referencia generada de la batería es la que reacciona más lentamente a las variaciones de potencia demandada cuando se producen deceleraciones. La potencia de referencia de la batería generada en este caso varía más lento que en otras estrategias y tarda más en alcanzar su máximo valor de carga, el SC reacciona absorbiendo la máxima potencia permitida pero no es suficiente y el exceso sobrante ha de ser disipado. Esto ocurre sobre todo en las transiciones de aceleración a deceleración en el viaje inicial y final de cada ciclo de trabajo del tranvía, en el que se pasa de una potencia demandada por éste máxima positiva a máxima negativa. Para el resto de estrategias también se produce disipación de energía en el mismo tramo (véase el zoom de la figura 7.4b). La duración de esta disipación es más larga para la estrategia de control predictivo, siendo ésta la causa de una mayor disipación de energía.



Respecto a la energía disipada, representada en la figura 7.4c para la simulación completa de 8 ciclos de trabajo, se puede comprobar que la que menos energía disipa es la estrategia de control en cascada seguida de la de modos de operación, minimización de consumo, lógica difusa y predictivo habiendo una diferencia aproximada entre la primera citada y la última de 0.70kWh.

A parte de esto, se comprueba el correcto funcionamiento de los controles y el dimensionamiento de las baterías en las dos configuraciones ya que sólo se disipa potencia en las transiciones de velocidad máxima a parada. En el caso de los viajes centrales de cada ciclo de trabajo del tranvía se puede comprobar que la resistencia de frenado no es necesario que actúe.

Respecto a las tensiones, se han representado en la figura 7.5 para los 8 ciclos de trabajo. Las tensiones representadas corresponden de mayor a menor a la tensión de la batería, del bus de CC, de la FC y del SC.

La tensión de la pila varía entre su valor de tensión correspondiente para potencia máxima (615 V) y para potencia mínima (720 V) permitida por las estrategias de control, con una variación máxima de unos 105 V. En el caso de la batería podemos apreciar que la variación entre los valores máximos y mínimos de tensión es ligeramente superior a 100 V (de 1207 a 1337 V). En el SC, la variación de la tensión depende más de qué estrategia se esté examinando. En estrategias como la de cascada, minimización de consumo equivalente, difuso o predictivo se puede observar que la tensión varía en un rango inferior a 100 V. En cambio en la de modos de operación este rango ronda los 125 V.

La tensión de la batería y SC varían dependiendo de su estado de carga, por tanto, aumentos de su tensión se corresponden con la carga de la batería/SC y disminución de la misma corresponden con su descarga.

Por su parte, la tensión en bornes de la FC cambia en función de las curvas estáticas que se mostraron anteriormente en su modelado.

En el caso de la tensión del bus de corriente continua se puede observar que se consigue que la tensión se mantenga a un nivel prácticamente constante de 750 V. A parte, se puede observar que las estrategias en las que más varía la tensión en el bus de continúa son en las que se producen más variaciones de la tensión en el SC, cuyo convertidor bidireccional es el encargado de mantener la tensión en el bus en 750 V. Un

caso distinto se produce en la estrategia de cascada, en la que no se producen grandes variaciones en la tensión del bus salvo en el momento en el que entra a funcionar la resistencia de frenado, provocando variaciones de tensión en torno a los 100 V.

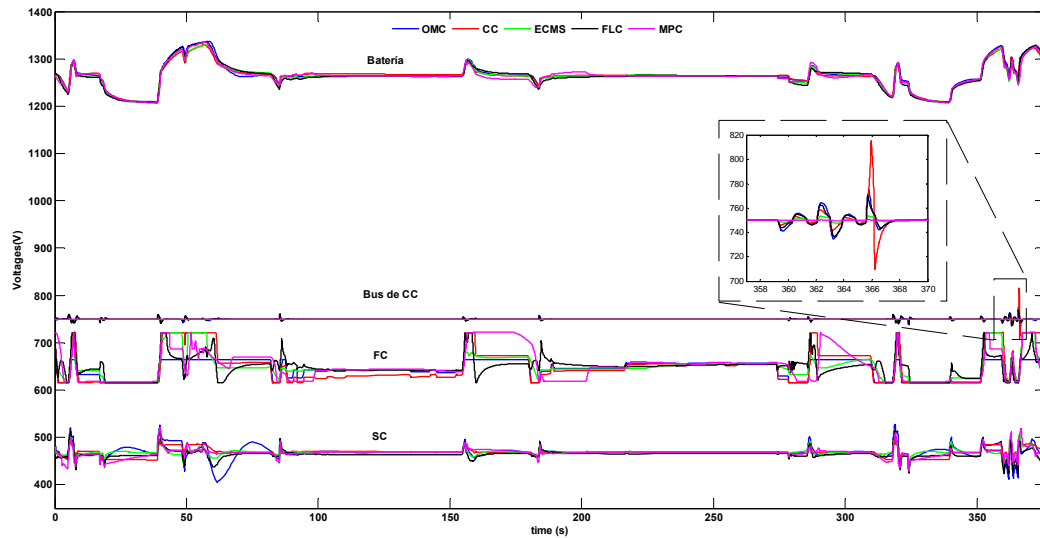


Figura 7.5. Tensiones en las fuentes de energía y en el bus de continua.

En la figura 7.6 se muestran los ciclos de trabajo de los distintos convertidores del sistema. En el caso de la FC se representa el ciclo de trabajo aplicado sobre su único transistor. En el caso de los convertidores bidireccionales se representa el ciclo de trabajo aplicado sobre el transistor inferior (denominado en el capítulo 5 como  $S_l$ ). Como se comentó anteriormente, el ciclo de trabajo aplicado sobre el otro transistor sería el pulso complementario del anterior (es decir,  $1-D_c$ ).

Se puede comprobar que, en el caso del convertidor de la FC este trabaja dentro de los límites calculados en el correspondiente capítulo (por encima de 0.13). En el caso de los convertidores bidireccionales cuando el ciclo de trabajo es menor que 0.5 el convertidor está funcionando en modo elevador y cuando es mayor que 0.5 en modo reductor. En el caso del SC, el funcionamiento en modo elevador supone la descarga del SC y el reductor la carga. En el de la batería, al contrario, el funcionamiento en modo elevador corresponde con la carga de la batería y en modo reductor su descarga.

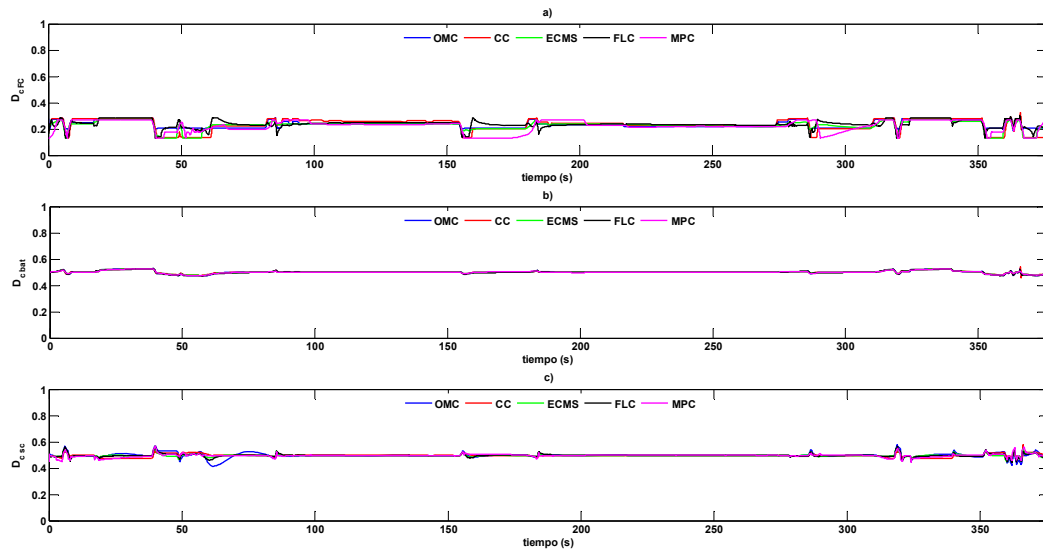


Figura 7.6. Ciclos de trabajo de los convertidores. a) FC, b) Batería, y c) SC.

A continuación se presenta una de las gráficas más importante para comprender con facilidad el funcionamiento de los controles implementados para esta tesis. En la figura 7.7, se representa, para la simulación completa, la variación del SOC de la batería y el SC en las diferentes estrategias y, además, la variación de los modos de operación de la estrategia con dicho nombre.

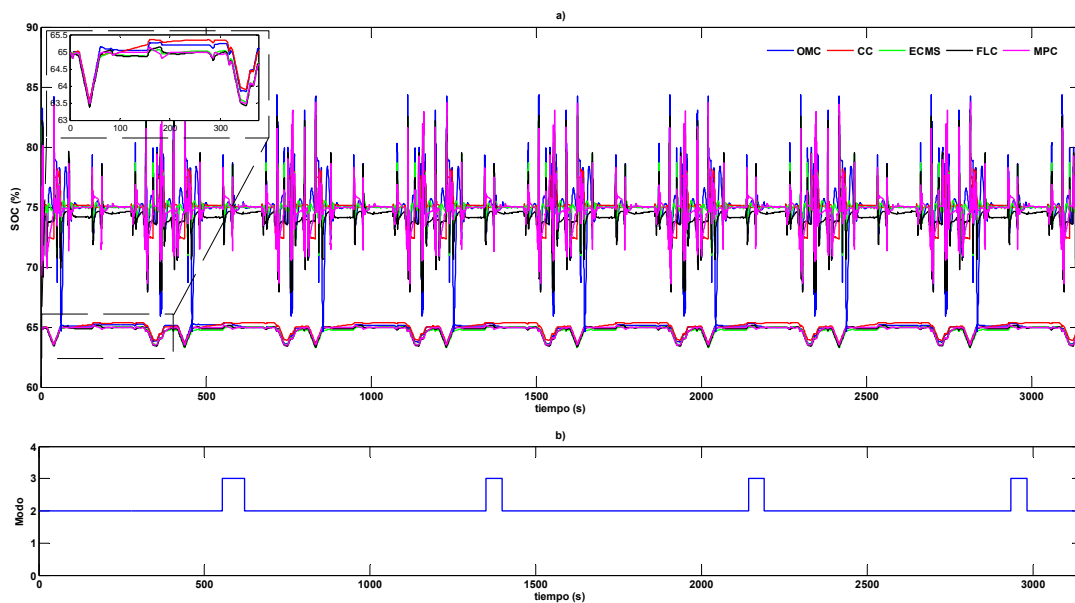


Figura 7.7. a) SOC de la Batería y el SC. b) Modos de funcionamiento.

Uno de los objetivos de todos los controles que se han implementado para esta tesis es el de mantener el estado de carga de la batería en torno a su valor de referencia

seleccionado, en este trabajo de 65%, y que la batería sea capaz de generar o absorber su potencia máxima de carga y descarga sin que ello produzca su carga excesiva (riesgo de destrucción del dispositivo) o descarga completa (problemas para el funcionamiento del vehículo, puesto que los controles han sido diseñados para funcionar combinando la energía de las distintas fuentes). Como se puede observar dicho objetivo se ha cumplido para todas las estrategias implementadas.

Examinando el SOC de la batería durante un solo ciclo de trabajo, se comprueba que la estrategia de cascada es la que mantiene el SOC de la batería a un nivel más alto y las de lógica difusa y minimización de consumo más bajo. El resto varía la mayor parte del tiempo entre éstos. Pese a las ligeras diferencias, el SOC de las diferentes estrategias sigue una trayectoria muy similar y se mantiene estable, lo cual es muy deseable puesto que significaría que para el funcionamiento del sistema no se requeriría la carga de la batería mediante conexión a red; se cargaría mediante la acción combinada de la FC y de la energía recuperada en las frenadas regenerativas. Por último, cabe destacar, que todas las estrategias funcionan de manera estable ciclo a ciclo.

En cuanto al SC, otro objetivo de las estrategias es mantener el SOC de éste en torno a su valor de referencia, 75%. Como se puede observar en la figura 7.7a, al igual que ocurría con la batería, este objetivo se cumple a la perfección aunque en la estrategia de lógica difusa en los viajes intermedios su carga se reduce bastante. De todas formas, en todas las estrategias se lograría que el SC, al igual que ocurre con la batería, funcionara sin necesidad de cargas en las paradas.

En cuanto a los modos de operación, en la figura 7.7b se representa el modo en el que trabaja la estrategia en cada momento, correspondiendo el valor 1 al modo de carga rápido, el 2 al de carga y el 3 al de descarga. Se observa que la mayor parte del tiempo funciona en el modo de carga y que, puntualmente, pasa al estado de descarga. Por ejemplo, en el segundo 553.4 se produce la transición del estado 2 al 3 debido a que se alcanza un SOC de 65.3%, y no vuelve al modo 2 hasta el segundo 620.6 en el que se vuelve a un SOC del 65%.

A continuación, en la siguiente figura, se representan cuatro de los parámetros más importantes a la hora de definir cuál es el mejor control para cada configuración. Dichas figuras recogen el rendimiento energético del sistema de FC, el rendimiento energético del vehículo, el consumo de hidrógeno de la FC y consumo equivalente de hidrógeno total del vehículo para los 8 ciclos de trabajo del tranvía. Además, a la derecha se

muestran con detalle los resultados al final de la simulación para cada uno de los parámetros representado.

El rendimiento del sistema híbrido completo, puede ser determinado a partir de la siguiente expresión.

$$\eta_{HV} = \frac{\int_{cycle} P_{HV} dt}{\int_{cycle} P_{H2} dt + \int_{cycle} P_{bat} dt + \int_{cycle} P_{sc} dt + \int_{cycle} P_{reg} dt} \quad (7.1)$$

Donde  $P_{HV}$  es la potencia total generada por el sistema híbrido de propulsión,  $P_{H2}$  la potencia asociada al hidrógeno entrante en un sistema FC,  $P_{bat}$  la potencia intercambiada por la batería,  $P_{sc}$  la potencia intercambiada por el SC y  $P_{reg}$  la potencia disipada en la resistencia de frenado.

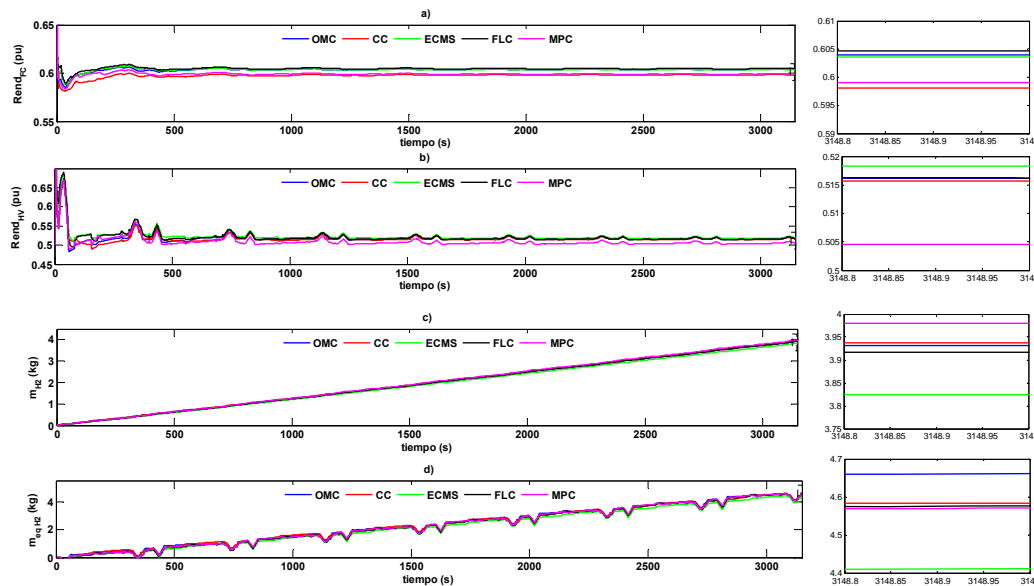


Figura 7.8. a) Rendimiento de la FC, b) Rendimiento del HV, c) Consumo de H2 de la FC, y d) Consumo equivalente total de H2.

La primera gráfica de la figura 7.8 representa el rendimiento medio de la FC, cabe destacar que es la estrategia de lógica difusa la que obtiene el mejor resultado, con aproximadamente un 0.2% más de rendimiento. Tras ésta, la siguiente estrategia con mejor rendimiento es la de modos de operación, debido a que, en ambas, en su diseño se tuvo en cuenta que la FC trabajara cerca de su punto de máximo rendimiento. Sin embargo, la estrategia de minimización de consumo sin tener en cuenta esa consideración en su diseño, obtiene un rendimiento similar. En líneas generales se obtiene un rendimiento de la FC en torno al 60%. Como se verá más adelante, el

rendimiento de la FC no está vinculado con el consumo de hidrógeno puesto que sólo depende del punto de funcionamiento de ésta.

Observando la segunda gráfica de la figura 7.8, en la que se muestra el rendimiento medio del vehículo híbrido para cada estrategia después de 8 ciclos de trabajo, se puede comprobar que es la estrategia de minimización de consumo la que obtiene mejor resultado. Además, como se comentará más adelante, se demuestra que cuanto menor es el consumo de hidrógeno mayor es el rendimiento del vehículo como era de esperar. Los rendimientos del vehículo híbrido obtenidos superan el 50%.

Respecto al consumo de hidrógeno, debido a que éste depende de la potencia generada por la FC, nos encontramos con bastante similitud en los consumos de las distintas estrategias; obteniéndose al final de los 8 ciclos un consumo menor a 4 kg de hidrógeno después de 8 ciclos de trabajo. Como era de esperar, el menor consumo se obtiene para la estrategia de minimización de consumo equivalente de hidrógeno. La estrategia de control predictivo es la que obtiene un mayor consumo puesto que, como se puede ver en la figura de la potencia de la FC, en muchas ocasiones en que el resto de estrategias hacen funcionar a la FC a potencia mínima ésta la mantiene en valores más altos cercanos a la potencia de máximo rendimiento y, además, da la impresión de que es la que reacciona de manera más lenta variando la potencia de la FC con respecto a las variaciones de demanda.

Por último se representa el consumo total equivalente de hidrógeno, que es la suma del consumo de hidrógeno de la FC y los equivalentes de la batería y el SC. Éstos últimos calculan el consumo de hidrógeno en función de la potencia generada por éstos, por lo que pueden tener valores negativos cuando se está absorbiendo potencia. Las expresiones para el cálculo de los consumos equivalentes [126], [131] son:

$$C_{total} = C_{fc} + k_1 \cdot C_{bat} + k_2 \cdot C_{sc} \quad (7.2)$$

$$C_{bat} = P_{bat} \cdot \frac{C_{FC,avg}}{P_{FC,avg}} \quad (7.3)$$

$$C_{sc} = P_{sc} \cdot \frac{C_{FC,sc}}{P_{FC,sc}} \quad (7.4)$$

Donde  $C_{total}$  es el consumo equivalente de hidrógeno total y,  $k_1$  y  $k_2$  son coeficientes de penalización son coeficientes de penalización, que modifican el consumo equivalente de la batería y el SC aumentándolo o disminuyéndolo dependiendo de la diferencia del SOC de éstos con respecto al SOC de referencia de cada uno. Dichos coeficientes de penalización se expresan como:

$$k_i = 1 - 2\mu \frac{(SOC - 0.5(SOC_H + SOC_L))}{SOC_H + SOC_L} \quad (7.5)$$

Donde la constante  $\mu$  debe ser ajustada para reproducir correctamente los procesos de carga y descarga, la cual se elige para equilibrar el SOC de la batería/SC durante el ciclo de trabajo;  $SOC_L$  es el límite inferior del SOC; y  $SOC_H$  es su límite superior.

De nuevo, se comprueba que es la estrategia de minimización de consumo la que obtiene un menor consumo equivalente con un consumo mucho menor que el resto. Un dato interesante es que el control predictivo, a pesar de es la que más hidrógeno consume en la FC obtiene el segundo mejor consumo equivalente de hidrógeno debido a un menor consumo equivalente en la batería.

A partir de la figura 7.8 se deduce que un menor consumo de hidrógeno en la FC está directamente relacionado con un mejor rendimiento en el vehículo híbrido.

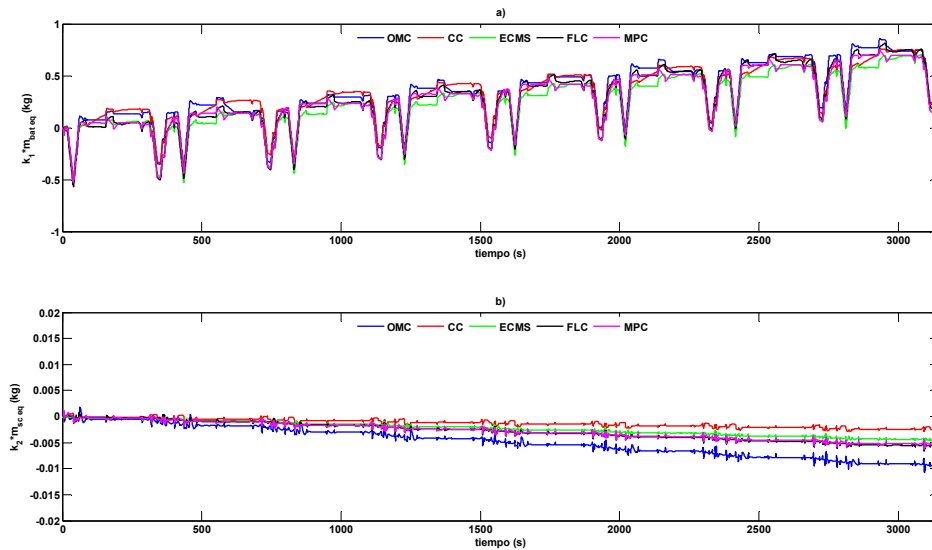


Figura 7.9. Consumos equivalentes teniendo en cuenta coeficientes de penalización. a) Batería, y b) SC.

En la figura 7.9 se muestran los términos relativos a la batería y al SC de la expresión (7.2). En dicha figura se representan los consumos de batería y SC multiplicados por el coeficiente de penalización correspondiente. Como se puede comprobar, el consumo del SC es despreciable con respecto a los consumos de la FC o la batería (tal y como se propuso en el desarrollo de la estrategia de minimización de consumo de hidrógeno equivalente). La batería suma en todas las estrategias al consumo del sistema aproximadamente un kg equivalente de hidrógeno.

Con respecto al consumo de hidrógeno, después de 8 ciclos se obtiene un consumo menor a 4 kg de hidrógeno. Como se comentó en el capítulo 2, en la actualidad existen múltiples autobuses funcionando con pila de combustible. Este es el caso de los autobuses Thunder Power [3], los cuales pueden almacenar hasta un máximo de 50 kg de hidrógeno a 35 MPa en 10 cilindros ofreciéndoles una autonomía de 400-480km. Suponiendo un sistema de almacenamiento de hidrógeno similar para el caso del tranvía en cuestión, las estrategias propuestas permitirían al tranvía ejecutar 96 ciclos de trabajo sin necesidad de repostaje. Una vez acabados dichos ciclos necesitaría repostar, pero sólo hidrógeno puesto que el sistema es capaz de mantener el SOC de las fuentes auxiliares. Cada ciclo es de 1877 m, por lo que el tranvía tendría una autonomía de 180 km.

### 7.2.1.2. SOC inicial de la batería de 55%

Según se ha comprobado en el apartado anterior, todos los controles de las dos



configuraciones son perfectamente válidos para ser utilizados como sistema gestión de energía en el nuevo tranvía híbrido.

En el presente apartado se pretende comprobar el funcionamiento de estos controles ante una situación más crítica que la anterior, en la cual, el estado de carga inicial de la batería se encuentra en un nivel bastante más bajo, un 55%.

En las siguientes figuras se mostrará el comportamiento de cada estrategia de control y como hace cada una de ellas para que el SOC de la batería aumente hasta unos niveles adecuados de funcionamiento sin que ningún parámetro o elemento, trabaje fuera de sus límites normales de funcionamiento.

Para entender el funcionamiento de estas estrategias en estas condiciones extremas nos apoyaremos primeramente en tres figuras. La primera figura representa la potencia de la FC para los 8 ciclos (fig. 7.10a), y para el primero y el último (figs. 7.10b,c). Mediante estas dos últimas, se aprecia cómo varía el funcionamiento de la FC cuando el SOC de la batería está lejos de su valor de referencia y cuando está en torno a ella.

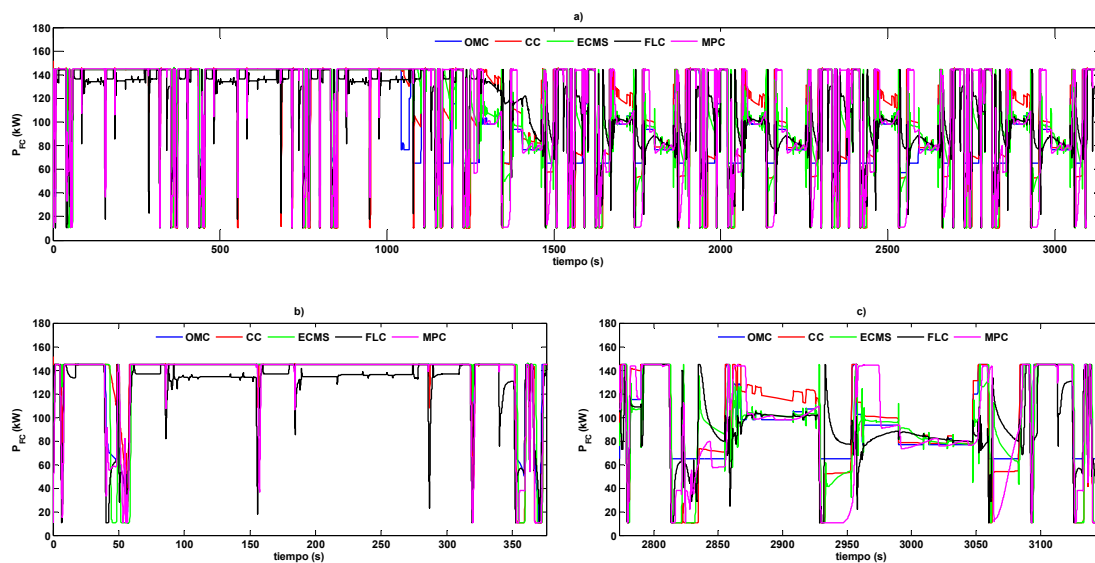


Figura 7.10. Potencia de la FC. a) 8 ciclos de trabajo, b) Ciclo inicial, y c) Ciclo final.

La segunda figura, 7.11, muestra las potencias de las otras dos fuentes durante los 8 ciclos de trabajo simulados.

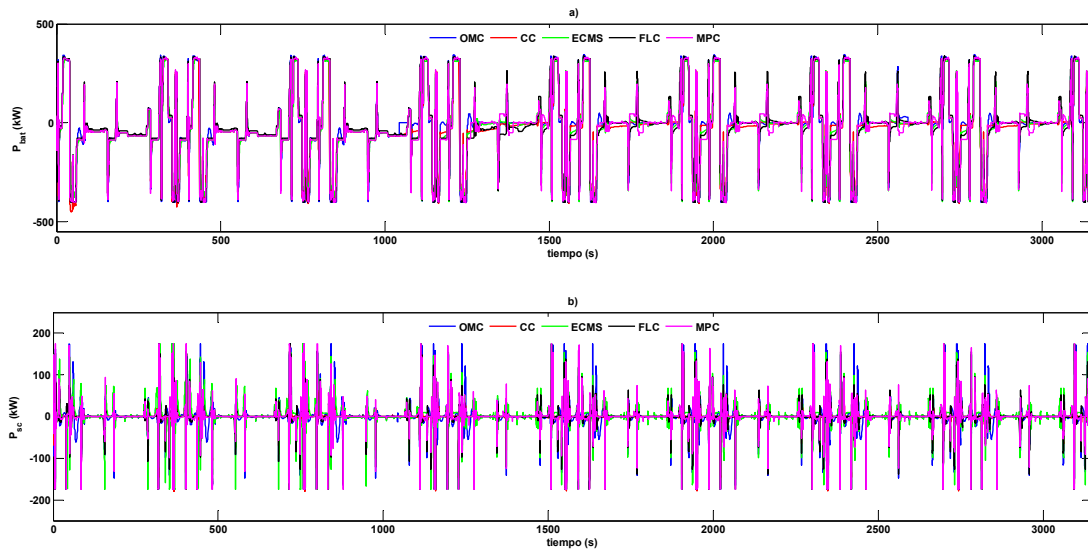


Figura 7.11. a) Potencia de la batería, y b) Potencia del SC.

Por último, la tercera figura muestra la evolución del SOC de la batería y SC junto con la evolución de los modos de operación de dicha estrategia, figura 7.12.

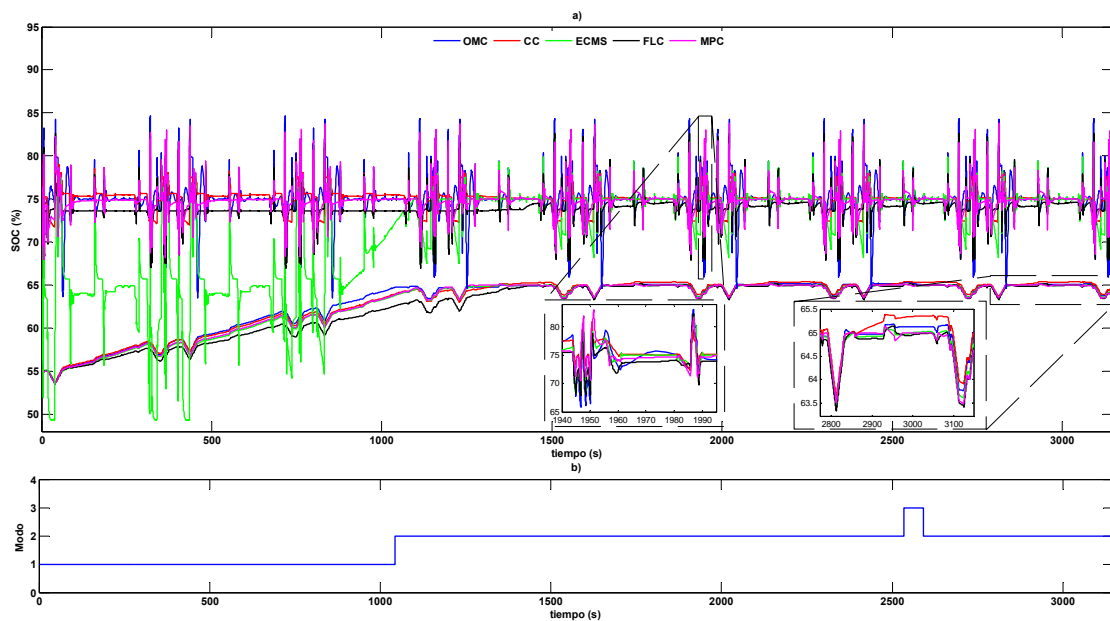


Figura 7.12. a) SOC de la batería y el SC, y b) Modos de operación.

Como se puede comprobar usando las figuras 7.10a y 7.12a, mientras el SOC de la batería se encuentra por debajo del valor de referencia la FC trabaja en todas las estrategias en una zona cercana a la potencia máxima (véase figura 7.10b). Como se puede comprobar, todas las estrategias apenas se alejan del valor máximo de potencia mientras el SOC de la batería permanece por debajo de su referencia. La estrategia de

control difuso genera una potencia algo menor al máximo durante la mayor parte de este periodo. Este hecho da lugar a que esta estrategia alcance el valor referencia después. En cambio, la de modos de operación alcanza la primera dicho valor puesto que mientras el SOC de la batería se encuentra bajo funciona en modo de carga rápido (véase figura 12b).

En la figura 7.10a y 7.11a se puede observar la transición de las estrategias trabajando bajo condiciones desfavorables a las condiciones normales entre los segundos 1000 y 1500, puesto que se aprecia el cambio de comportamiento de la FC y el escalón que experimenta la potencia media de la batería (pasando de un valor negativo a cero). Con respecto a la potencia del SC representada en 7.11b no se aprecia una gran diferencia en la potencia del SC entre el funcionamiento de la batería con SOC bajo y cuando se alcanza su valor de referencia. Sólo en la estrategia de minimización de consumo equivalente se percibe mientras se trabaja en condiciones desfavorables se generan picos positivos en el SC que dejan de aparecer una vez superadas esas condiciones. Éstos picos provocan que, como se aprecia en la figura 7.12a, el SOC del SC baje drásticamente hasta que se recupera el SOC de referencia de la batería.

Se observa claramente que todas las estrategias son capaces de superar la condición inicial de un estado de carga de la batería bajo. En el cuarto ciclo de trabajo todas las estrategias alcanzan el valor de referencia del SOC de la batería. En los sucesivos ciclos de trabajo ya se comportan de manera estable, tal y como ocurría en las simulaciones de la sección anterior. Se observa cómo la estrategia de minimización de consumo equivalente presenta bastantes problemas para mantener el estado de carga del SC hasta que no se alcanza el valor de SOC deseado de la batería. Esto se debe a que en esta estrategia los coeficientes de penalización para el cálculo del consumo equivalente de la estrategia dependen del SOC en la batería y de unos límites de éste definidos por el diseñador de la estrategia ( $SOC_H$  y  $SOC_L$ ): el estar el SOC de la batería inicialmente fuera de estos límites afecta de manera negativa a su funcionamiento y provoca que se tenga que emplear SC para suministrar energía a la batería.

Respecto a los modos de funcionamiento representados en la figura 7.12b, se ve claramente que la estrategia funciona en el “modo de carga rápido” (representado como 1) hasta que el SOC de la batería es suficiente y comienza a trabajar en el “modo de carga”. Sólo pasa al “modo descarga” durante un periodo en el que el SOC de la batería sube ligeramente.

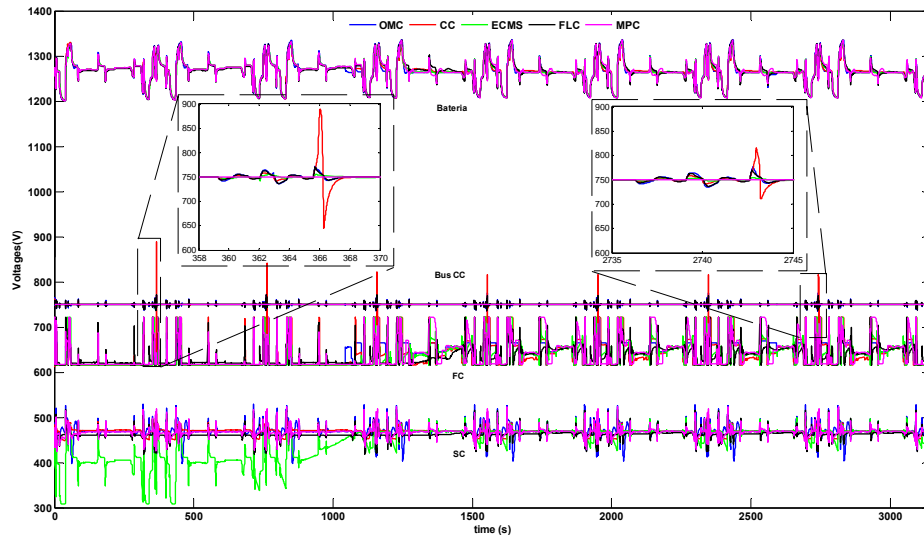


Figura 7.13. Tensiones de la FC, batería, SC y bus de CC.

Respecto a las tensiones de las fuentes, figura 7.13, podemos llegar a las mismas conclusiones de la sección anterior. La de la FC dependerá de la potencia que esté generando y, por tanto, su variación dependerá de la estrategia. Por otro lado, las tensiones de la batería y el SC dependen de su estado de carga, de ahí las diferencias entre unas estrategias y otras. Respecto a la tensión del bus de cc, podemos observar que el comportamiento de las estrategias una vez alcanzado el SOC de la batería es similar a la sección anterior. En la estrategia de cascada, se observa una evolución en los picos que se producían en esta tensión: cuando el SOC de la batería está por debajo de su valor de referencia estos picos se hacen mayores debido, como se verá en las siguientes figuras, a que los picos de potencia disipada en estas condiciones son mayores.

En la figura 7.14 se representa la potencia disipada en la resistencia de frenado y la energía disipada. Las estrategias que más energía disipan son la de control predictivo y minimización de consumo. Esto se debe a que son en las que la resistencia de frenado entra en funcionamiento con mayor frecuencia. Otro detalle interesante es que la estrategia de cascada sólo disipa energía en la zona en la que se trabaja lejos del SOC de referencia de la batería, una vez alcanzado éste la estrategia no disipa energía, obteniendo los mejores resultados en este sentido. En todos los casos, el tiempo estos picos de potencia se producen en intervalos de tiempo menores a un segundo.

Por último se representan los rendimientos medios de la FC y del vehículo híbrido, además del consumo de hidrógeno en la FC y el equivalente del vehículo.

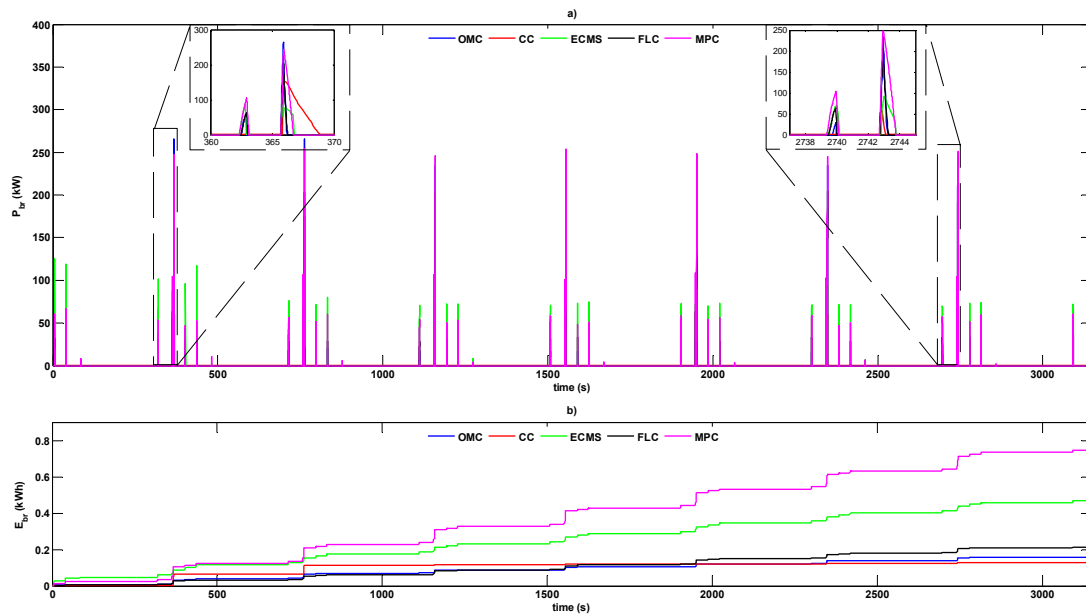


Figura 7.14. Resistencia de frenado. a) Potencia disipada, y b) Energía disipada.

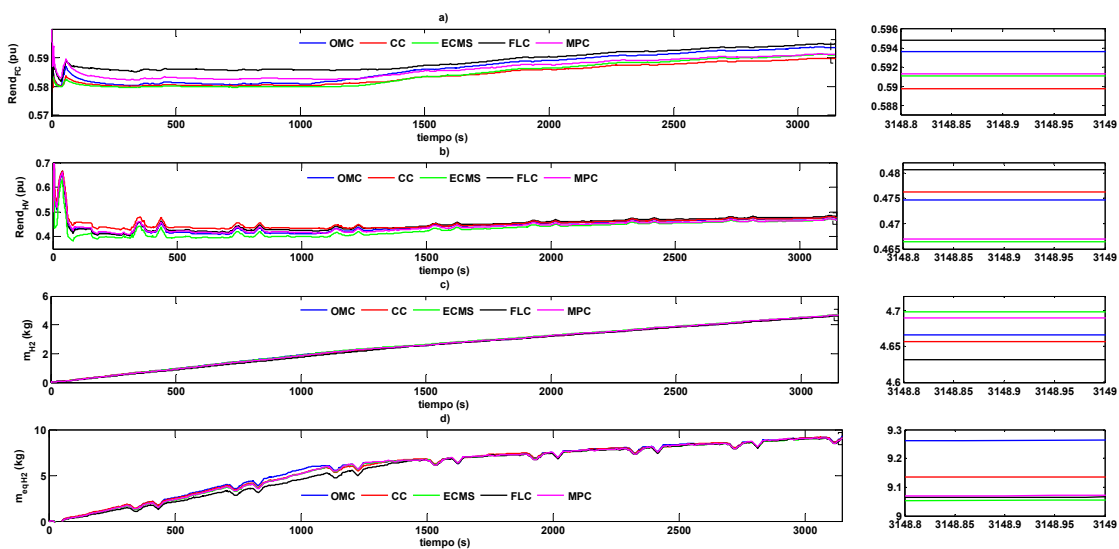


Figura 7.15. a) Rendimiento FC, b) Rendimiento HV, c) Consumo de H2 en la FC, y d) Consumo equivalente de H2 total.

En la primera gráfica de la figura 7.15 se representa el rendimiento medio de la FC, obteniendo resultados similares a las simulaciones en condiciones normales (con la diferencia de que el control predictivo consigue mejor rendimiento que el de minimización). De nuevo, las estrategias de lógica difusa y modos de operación obtienen los mejores rendimientos para la FC puesto que en su diseño se tuvo en cuenta. El hecho de que en los primeros ciclos la FC deba trabajar cerca del valor máximo de potencia el rendimiento final obtenido es menor que en las simulaciones anteriores,

como era de esperar.

En la figura 7.15b y 7.15c, se comprueba que es de nuevo la estrategia de control difuso la que obtiene el mejor rendimiento medio del vehículo híbrido y un menor consumo. De nuevo, como era de esperar, un menor consumo de hidrógeno equivale a un mayor rendimiento del vehículo híbrido. A parte, se comprueba cómo es a la estrategia de minimización de consumo a la que le afecta más negativamente, bajando su rendimiento hasta el 46.64%. En líneas generales, el rendimiento de todas se reduce en torno a un 5% con respecto a las simulaciones en condiciones normales.

Respecto a las últimas figuras, referentes al consumo de hidrógeno, se observa claramente que la estrategia de minimización de consumo equivalente de hidrógeno sólo es útil cuando las condiciones iniciales están dentro de los límites de funcionamiento de la estrategia (recordemos que en ésta estrategia se definen unos límites superiores e inferiores de SOC para ambas fuentes auxiliares). De todas formas, dicha estrategia experimenta una mejora al acercarse el SOC de la batería a su valor de referencia, puesto que cada vez la diferencia de consumo entre esta y el resto se hace menor.

A parte, en la figura 7.16 se representa el consumo equivalente del hidrógeno total para el que la estrategia de minimización de consumo obtiene el mejor resultado, fruto de un menor consumo equivalente en la batería.

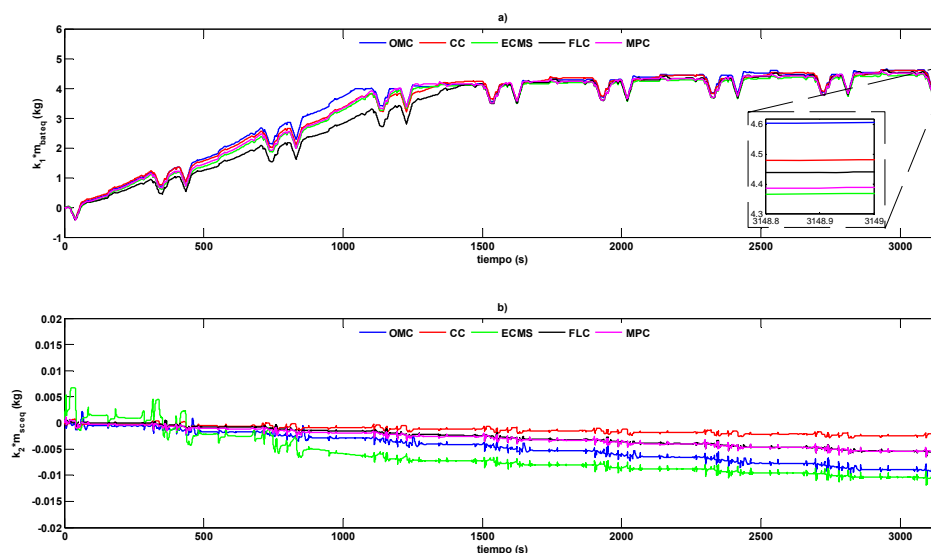


Figura 7.16. Consumos equivalentes con coeficiente de penalización. a) Batería, y b) SC.

### 7.2.1.3. Elección del mejor control

Una vez realizado la comparación de todos los controles ante dos situaciones de trabajo distintas, en el presente apartado se pretende seleccionar el mejor control en cada configuración para después hacer una comparación entre los dos controles seleccionados y obtener así la mejor configuración con el mejor control.

Para la selección de la mejor estrategia de control, se ha optado por comparar los parámetros más importantes del sistema híbrido de propulsión, otorgándole a cada uno de ellos un peso en función de su importancia en el nuevo tranvía híbrido. De esta forma, el parámetro más importante que se ha considerado es el consumo final de hidrógeno que se obtenga por parte del sistema híbrido de FC; el peso o la importancia que se ha otorgado es de 4. Otros parámetros considerados, a los cuales se les ha dado un peso 3, es la eficiencia del sistema de FC y del vehículo híbrido, y la potencia y energía disipada en la resistencia de frenado. Además de estas variables, para la selección del mejor control se ha tenido en cuenta distintos parámetros referentes al SOC de la batería y a la tensión del bus de continua, otorgándoles a todos ellos un peso de 1.

Después de esto, para cada parámetro, los controles de una misma configuración han sido ordenados de mejor a peor resultado. Así, si se considera, por ejemplo el SOC medio a lo largo de simulación, el mejor control es aquel con el que se obtenga un SOC medio más próximo al de referencia, o si se considera la tensión mínima de bus de continua, el mejor control sería con el que se obtenga una tensión mínima más alta. Por último, se le otorga 5 puntos al control con el que se haya obtenido mejor resultado, 3 puntos al segundo mejor control, 2 puntos al tercer control, 1 punto al cuarto y 0 puntos al peor control. La puntuación final de un control para un parámetro será el peso del parámetro multiplicado por los puntos otorgados según su resultado. El mejor control será con el que se obtenga más puntos teniendo en cuenta los distintos escenarios de simulaciones que se han realizado.

Para comparar las estrategias se han creado las tablas 7.1, 7.2 y 7.3. Los parámetros seleccionados para comparar las estrategias son: consumo de H<sub>2</sub> en la FC y equivalente total, rendimiento de la FC y del vehículo híbrido, energía y potencia disipada, SOC medio de la batería y SC, tensión media del bus de CC, variación de la tensión del bus de CC y, por último, el error cuadrático medio (*Mean Squared Error, MSE*) del SOC de la batería y el SC con respecto a sus valores de referencia. Dicho parámetro, presentado

en la expresión (7.6), indica lo que se alejan los valores medidos de SOC con respecto a sus valores de referencia, por lo que cuanto menor sea más se acerca la estrategia a dichos valores.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} (x_i - \hat{x})}{N_i} \tag{7.6}$$

donde  $N_i$  es el número total de datos para el cálculo del MSE,  $x_i$  son las variables medidas y  $\hat{x}$  es el valor de referencia.

En las tablas 7.1 y 7.2 aparecen junto a los parámetros medidos porcentajes. Éstos en unos casos corresponden a la diferencia con respecto al mejor resultado (consumos de hidrógeno o rendimientos) y otras a la diferencia con respecto al valor de referencia considerado (SOCs medios).

SOC inicial 65	PISC	MODOS				CASCADA				MCE				DIFUSO				PREDICTIVO			
		Valor		Pos	Pts	Valor		Pos	Pts	Valor		Pos	Pts	Valor		Pos	Pts	Valor		Pos	Pts
Consumo (kg)	4	3,9326	2,82%	3	4	3,9373	2,95%	4	0	<b>3,8246</b>	<b>0,00%</b>	1	20	3,9178	2,44%	2	12	3,9812	4,09%	5	0
Consumo Eq (kg)	4	4,664	5,66%	5	0	4,584	3,85%	4	0	<b>4,414</b>	<b>0,00%</b>	1	20	4,58	3,76%	3	4	4,575	3,65%	2	0
Rnd HV, med (%)	3	51,62	-0,39%	3	3	51,56	-0,50%	4	0	<b>51,82</b>	<b>0,00%</b>	1	15	51,62	-0,39%	2	9	50,45	-2,64%	5	0
Rnd FC, med (%)	3	60,39	-0,13%	2	9	59,81	-1,09%	5	0	60,36	-0,18%	3	3	<b>60,47</b>	<b>0,00%</b>	1	15	59,91	-0,93%	4	0
Ener. disp (kWh)	2	0,1365	94,72%	2	6	<b>0,0701</b>	<b>0,00%</b>	1	10	0,2149	206,56%	3	2	0,2479	253,64%	4	0	0,8107	1056,49%	5	0
Pot. disp, max (kW)	2	234,55	31,89%	3	2	<b>177,84</b>	<b>0,00%</b>	1	10	285,07	60,30%	5	0	204,89	15,21%	2	6	253,38	42,48%	4	0
SOCbat med (%)	1	64,7	-0,46%	2	3	<b>64,83</b>	<b>-0,26%</b>	1	5	64,47	-0,82%	4	0	64,45	-0,85%	5	0	64,69	-0,48%	3	3
MSE_SOCbat (65%)	1	0,3352	25,12%	3	1	<b>0,2679</b>	<b>0,00%</b>	1	5	0,5437	102,95%	4	0	0,5885	119,67%	5	0	0,325	21,31%	2	3
SOCscmed (%)	1	75,35	0,47%	3	1	75,42	0,56%	4	0	75,43	0,57%	5	0	<b>74,86</b>	<b>-0,19%</b>	1	5	75,31	0,41%	2	3
MSE_SOCsc (75%)	1	12,8594	262,65%	5	0	<b>3,546</b>	<b>0,00%</b>	1	5	5,8919	66,16%	4	0	5,8598	65,25%	3	1	4,8066	35,55%	2	0
Vbus med (V)	1	750,47	0,06%	4	0	750,28	0,04%	3	1	750,04	0,01%	2	3	751,37	0,18%	5	0	<b>750,01</b>	<b>0,00%</b>	1	5
ΔVbus (V)	1	40,95	4893,90%	3	1	106,36	#####	5	0	6,59	703,66%	2	3	33,44	3978,05%	4	0	<b>0,82</b>	<b>0,00%</b>	1	5
					30				36				66				52				19

SOC inicial 55	PISC	MODOS				CASCADA				MCE				DIFUSO				PREDICTIVO			
		Valor		Pos	Pts	Valor		Pos	Pts	Valor		Pos	Pts	Valor		Pos	Pts	Valor		Pos	Pts
Consumo (kg)	4	4,6661	0,73%	3	4	4,6572	0,54%	2	12	4,6984	1,43%	5	0	<b>4,6323</b>	<b>0,00%</b>	1	20	4,6905	1,26%	4	0
Consumo Eq (kg)	4	9,2660	2,31%	5	0	9,1360	0,87%	4	0	<b>9,0570</b>	<b>0,00%</b>	1	20	9,0690	0,13%	2	12	9,0760	0,21%	3	4
Rnd HV, med (%)	3	47,46	-1,25%	3	3	47,62	-0,92%	2	9	46,64	-2,95%	5	0	<b>48,06</b>	<b>0,00%</b>	1	15	46,69	-2,85%	4	0
Rnd FC, med (%)	3	59,37	-0,20%	2	9	58,98	-0,86%	5	0	59,11	-0,64%	4	0	<b>59,49</b>	<b>0,00%</b>	1	15	59,13	-0,61%	3	3
Ener. disp (kWh)	2	0,1720	33,13%	2	6	<b>0,1292</b>	<b>0,00%</b>	1	10	0,4952	283,28%	4	0	0,2347	81,66%	3	2	0,8158	531,42%	5	0
Pot. disp, max (kW)	2	265,66	112,53%	5	0	175,02	40,02%	2	6	<b>125</b>	<b>0,00%</b>	1	10	204,87	63,90%	3	2	254,2	103,36%	4	0
SOCbat med (%)	1	62,81	-3,37%	3	1	62,77	-3,43%	4	0	<b>62,97</b>	<b>-3,12%</b>	1	5	62,34	-4,09%	5	0	62,89	-3,25%	2	3
MSE_SOCbat (65%)	1	12,39	6,72%	2	3	<b>13,12</b>	<b>13,01%</b>	4	0	11,61	0,00%	1	5	16,70	43,84%	5	0	12,98	11,80%	3	1
SOCscmed (%)	1	75,31	0,41%	3	1	75,61	0,81%	4	0	72,34	-3,55%	5	0	<b>74,87</b>	<b>-0,17%</b>	1	5	75,29	0,39%	2	3
MSE_SOCsc (75%)	1	12,88	203,77%	4	0	<b>4,24</b>	<b>0,00%</b>	1	5	39,16	823,58%	5	0	6,03	42,22%	3	1	4,75	12,03%	2	3
Vbus med (V)	1	750,48	0,06%	3	1	751,44	0,19%	5	0	750,09	0,01%	2	3	751,43	0,19%	4	0	<b>750,01</b>	<b>0,00%</b>	1	5
ΔVbus (V)	1	40,95	4121,65%	4	0	243,95	#####	2	3	14,21	1364,95%	2	3	33,85	3389,69%	3	1	<b>0,97</b>	<b>0,00%</b>	1	5
					28				45				46				73				27

	ESTADOS	CASCADA	MCE	DIFUSO	PREDICTIVO
Total	58	81	112	125	46

Tabla 7.1. Comparación con SOCbat inicial de 65%, comparación con SOCbat inicial de 55% y comparación total.



Se comprueba que, como se comentaba anteriormente, considerando como el principal objetivo del control del sistema híbrido la reducción del consumo de hidrógeno es el control por minimización de consumo equivalente el que en condiciones normales obtiene los mejores resultados. El hecho de funcionar fuera de sus límites de funcionamiento le afecta de manera negativa aunque sigue obteniendo el consumo equivalente total más bajo.

Con respecto al rendimiento de la FC, se puede concluir que las estrategias basadas en la experiencia del diseñador (lógica difusa y modos de operación) obtienen mejores rendimientos puesto que se busca que ésta trabaje durante más tiempo en la zona de máximo rendimiento, tanto para condiciones normales como para desfavorables.

Con respecto al rendimiento del sistema, era evidente que éste depende del consumo de hidrógeno por lo que las estrategias con menor consumo obtienen mejor rendimiento. De todas formas, se puede ver que el hecho de hacer funcionar las estrategias en condiciones desfavorables hace que estrategias como la de cascada y predictivo mejoren sus resultados superando a la estrategia de minimización de consumo con respecto a las simulaciones en condiciones normales. Esto es debido a que ésta última durante los primeros tramos presenta un rendimiento muy bajo (consumo alto de hidrógeno) que hace que su rendimiento global al acabar los 8 ciclos sea peor que el resto. De todas formas, al aumentar el número de ciclos la influencia de éstos primeros ciclos se haría menor debido ya que todas trabajarían en condiciones similares a las simulaciones con SOC de la batería inicial de 65% y, por tanto, se acabarían obteniendo resultados similares a los de la parte superior de la tabla.

A parte de esto, el control predictivo es el que mantiene mejor la tensión en el bus de CC y la estrategia de cascada es la que mejores resultados ofrece en cuanto a mantener el SOC de la batería y del SC en torno al valor de referencia deseado y en cuanto a disipar menos energía.

Teniendo en cuenta todos los parámetros se obtiene que el control por lógica difusa es el que obtiene mejores resultados seguidos del control por minimización de consumo equivalente con 125 y 112 puntos respectivamente. Mirando los resultados aisladamente de tabla 7.1 y 7.2 podemos comprobar que los mejores resultados se deben a que el hecho de funcionar en condiciones desfavorables perjudica de manera notable a la estrategia de minimización, pasando de obtener 66 puntos a 46, al contrario de lo que le ocurre a la estrategia de lógica difusa.

---

Se puede concluir, por tanto, que en condiciones normales es la estrategia de minimización de consumo la que se consideraría la mejor, pero debido a su mal comportamiento en condiciones desfavorables se considera el control basado en lógica difusa como el mejor control para este sistema híbrido.

#### **7.2.1.4. Discusión**

Con el objetivo de encuadrar la presente tesis dentro del campo de investigación relativo al desarrollo de estrategias de gestión de energía en vehículos híbridos se comparará este trabajo con aquellos que tengan cierta similitud. Dichos trabajos fueron citados en el estado del arte de sistemas de gestión de vehículos híbridos.

Esta tesis presenta esquema de control basado en lógica difusa similar al presentado en el trabajo publicado por Ferreira *et al.* en 2008 [92], con la variante de que en este último los objetivos son mantener el SOC del SC y minimizar los cambios de potencia en la FC. Dicho controlador difuso genera la intensidad de referencia de la FC y una variación de la intensidad de referencia de la batería (dicha intensidad se calcula como la diferencia de la intensidad demandada por el vehículo menos la generada por la FC) a partir de la tensión de la batería y SC (proporcionales al SOC) y la intensidad demandada por el vehículo. El objetivo de minimizar los cambios de potencia es mejorar el rendimiento de la FC, pero en los resultados se puede comprobar que ésta permanece casi siempre trabajando a la mínima potencia establecida (máxima eficiencia) salvo en momentos puntuales en que pasa a la potencia máxima. Como resultado, se produce una descarga progresiva del SOC de la batería. Además, el SC inicialmente se descarga a un nivel inferior al inicial que es el que la estrategia logra mantener.

Con respecto a la estrategia de cascada presentada en este trabajo, hay que decir que es una variante de la presentada en [29]. En este caso las dimensiones de la FC permiten que pueda satisfacer la potencia máxima demandada por el vehículo. En la presente tesis pese a haber dimensionado la FC con una potencia con respecto a la del vehículo mucho menor, vemos que la estrategia cumple con su cometido de mantener el SOC de la batería y el SC en torno a sus valores de referencia respetando las limitaciones dinámicas de cada elemento: esta estrategia de cascada se diseñó pensando en que el SC mantuviera la tensión del bus de continua provocando que absorba los picos de potencia, la batería se cargue y descargue según el SOC del SC, y la pila sirva para

mantener el SOC de la batería.

En 2009, Erdinc *et al.* presentan en [26] una estrategia basada en descomponer la señal de potencia demandada del vehículo mediante técnicas de descomposición de señales en 3 señales. La señal con más oscilaciones sería la potencia de referencia del SC y la de menos la de la FC. Así se consigue que cada fuente haga frente a la porción del ciclo de trabajo que más se adecua a sus características dinámicas propias. Esta estrategia, a diferencia de las presentadas en este trabajo, no consigue mantener el SOC de la batería a pesar de la potencia de la FC, 50 kW frente a los 18.8 kW de batería y 28 kW de SC.

Por último, Yu *et al.* en [125] proponen controlar la potencia a generar por cada fuente a partir de una función de costes en la que se intenta optimizar los costes de energía totales, la vida de la batería y otros objetivos al mismo tiempo. Esta estrategia se compara con una en la que la FC trabaja a su máxima potencia cada vez que el SOC de la batería baja del 40% hasta que recupera el 80% (llamada estrategia de agotamiento de carga, “charge depletion strategy”). Se consigue mejorar respecto a esta que el SOC de la batería varíe menos (entre el 50 y el 70%) y que la FC no se apague nunca. Evidentemente se obtienen mejores resultados que para la estrategia de agotamiento de carga. De todas formas, consideran que el SOC del SC puede bajar hasta un valor de 25% o, incluso durante transitorios, el 15%. Por tanto, en comparación con las planteadas en esta tesis no se considera válida para el vehículo propuesto y ni si quiera se ha intentado reproducir.

Otras estrategias de estados, de lógica difusa y basadas en control predictivo, como se comentaba en el capítulo 6, han sido provadas en otras topologías de vehículos híbridos, pero no para los que combinan FC, batería y SC. El concepto de consumo equivalente de hidrógeno ha sido planteado para vehículos híbridos con motores de combustión interna, pero no en el caso propuesto.

---

## CHAPTER 8

---

# Conclusions and future research

### 8.1. Conclusions and contributions of the Thesis

In this Thesis the modeling of a hybrid vehicle propulsion system and five energy management strategies have been presented in order to evaluate which of them fits better with the driving cycle of the vehicle according to several objectives. The main conclusions of this work are summarized below and also, the original contributions of it.

For the modeling of the propulsion system each component has been modeled taking into account the real commercial characteristics given by their manufacturer datasheets.

The first strategy is a based on three operation modes which vary depending on the state of charge of the battery, the tramway speed and the power demanded. This strategy

generates the reference power of the fuel cell and the battery one as the subtraction between the demanded power and the fuel cell reference power plus a supercapacitor dependent power which depends on the supercapacitor state of charge.

The second strategy is called “cascade control”. It is composed of different control loops, one of this control loops generates the battery reference power from the supercapacitor state of charge. A second control loop generates the fuel cell reference power from the battery state of charge. The last one, which is shared between all the proposed strategies, generates the supercapacitor reference power from the DC bus voltage.

The third control developed is based on fuzzy logic. A fuzzy logic controller with three inputs generates the fuel cell reference power and a power variation of the battery. These inputs are the demanded power of the vehicle and the battery and supercapacitor states of charge. The battery reference power is calculated as the demanded power minus the sum of the fuel cell reference power and the commented power variation.

The objective of the fourth strategy is to minimize the hydrogen equivalent consumption of the system energy sources. This kind of control will be used as reference to compare the equivalent consumptions of the other strategies.

The last one, is a predictive strategy in which a predictive controller generates the fuel cell and battery reference powers depending on previous data and predictions. The inputs of this controller are the load power of the vehicle and the battery and supercapacitor states of charge. The outputs are the reference powers commented before.

Taking into account these strategies, the following conclusions are obtained from the performed simulations. One of them under normal conditions and another under unfavorable ones.

- All the proposed strategies have met the main objective of a control system applied to a hybrid vehicle: supplying the demanded power of the traction system at any time and maintaining all the components of the system inside their operating range.
- Similar fuel cell and hybrid vehicle average efficiencies are obtained for all the strategies which corroborate the validity of them.

- According to the hydrogen consumption, the equivalent consumption minimization strategy (ECMS) is clearly the best. However, its behavior out of the operating range (unfavourable conditions) isn't as good: any of the other strategies behave better under those conditions. Therefore, it is recommended if the initial conditions are around the reference values.
- The cascade control, despite being the simpler control, meets perfectly the objectives, maintaining the battery and supercapacitor SOC in their reference values.
- All the strategies are able to overcome an initial low SOC of the main power source as can be seen in the related simulations.
- Higher power peaks in the braking resistor does not imply higher energy dissipated.
- Fuzzy logic and OMC strategies obtain better FC efficiency. It is due to their rules/operation modes depend on the experience of the designer and FC efficiency is taken into account in the design process.
- If these control strategies are applied to another electric vehicle, only a few changes are required. The cascade control has the advantage that it only requires tuning the controllers. In case of the ECMS, it is necessary to redefine the minimization problem and calculate the new solution, since the hydrogen consumption depends on the FC used in the electric vehicle. In the OMC, the hysteresis cycles and the operation modes must be revised.
- Otherwise, the fuzzy logic and predictive controls require significant changes. For the fuzzy logic control, the logic rules as well as the membership functions must be changed to adapt the control to the new application or driving cycle. Furthermore, the logic rules and membership functions must be tuned from a suitable study of the driving cycle. In the MPC, the linear time-invariant model of the plant must be recalculated and the input and output constraints must also be adjusted.
- The complexity of each control influences highly on the computational time. In fact, the computational time of the fuzzy logic and predictive controls is much higher than the other controls.

- Fuzzy logic strategy is the best strategy. With a battery initial states of charge of 65%, its results are similar to the ECMS and under unfavorable initial conditions, those results are better than for the other strategies.

## **8.2. Original contributions**

In this Thesis the contributions presented are:

- Design of a complete model of a hybrid supply system for a tramway of 400 kW based on FC, battery and SC.
- Development of a new energy management strategy based on operation modes and two control loops for the proposed hybrid system.
- Modification of a strategy based on three control loops in cascade in order to be applied to the proposed hybrid system.
- Using the concept of equivalent consumption in order to design a new strategy for the proposed hybrid system.
- Improvement of an existent fuzzy logic based strategy to meet the initial objectives of the proposed hybrid system.
- Comparative study of the different strategies applied to the new hybrid system. Selection of the best strategy according to requirements related to the fuel consumption, system efficiency, battery and SC SOC sustaining around their reference values and less energy dissipation in the braking resistors.

## **8.3. Future research**

Taking into account the current Thesis status, several future researches can be developed. Some future research is considered:

- Incorporate new models for more complex DC/DC converter topologies in order to check their effects in the hybrid system.
- Evaluate the proposed strategies in other hybrid system topologies.
- Combining the current control strategies to improve the presented results.
- Development of new control strategies for the current system.

- Apply the knowledge acquired to hybrid systems in other fields such as distributed generation (DG).





## **Currículum Vítae**

---

### **DATOS PERSONALES**

Nombre: Juan Pérez Torreglosa

Fecha de nacimiento: 6 de junio de 1985

### **TÍTULOS ACADÉMICOS**

- Ingeniero Técnico Industrial, Esp. Electricidad por la Universidad de Jaén. Escuela Politécnica Superior de Linares (Septiembre 2006).
- Ingeniero Industrial, por la Universidad de Jaén. Escuela Politécnica Superior de Jaén (Enero 2009).
- Diploma de estudios avanzados (D.E.A.) del Programa de Doctorado “Electricidad fotovoltaica y control” en Febrero de 2012.



## Publicaciones generadas por esta Tesis

---

### ARTÍCULOS JCR

- García, P., Torreglosa, J.P., Fernández, L.M., Jurado, F. Viability study of a FC-battery-SC tramway controlled by equivalent consumption minimization strategy (2012) *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (11), pp. 9368-9382.
- Garcia, P., Fernandez, L.M., Torreglosa, J.P., Jurado, F. Comparative study of four control systems for a 400-kW fuel cell battery-powered tramway with two dc/dc converters (2012) *European Transactions on Electrical Power*, . Article in Press.
- García, P., Fernández, L.M., Torreglosa, J.P., Jurado, F. Fuzzy control of a hybrid tramway powered by fuel cell, battery and supercapacitor (2012) *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 9 (2), pp. 162-169.
- Torreglosa, J.P., Jurado, F., García, P., Fernández, L.M. Energy management for hybrid tramway based on fuel cell, battery and ultracapacitor (2012) *DYNA* 87 (2), pp. 204-213.

- Torreglosa, J.P., Jurado, F., García, P., Fernández, L.M. Hybrid fuel cell and battery tramway control based on an equivalent consumption minimization strategy (2011) *Control Engineering Practice*, 19 (10), pp. 1182-1194.
- Torreglosa, J.P., Jurado, F., García, P., Fernández, L.M. PEM fuel cell modeling using system identification methods for urban transportation applications (2011) *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (13), pp. 7628-7640.
- Torreglosa, J.P., Jurado, F., García, P., Fernandez, L.M. Application of cascade and fuzzy logic based control in a model of a fuel-cell hybrid tramway (2011) *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24 (1), pp. 1-11.
- Fernandez, L.M., Garcia, P., Garcia, C.A., Torreglosa, J.P., Jurado, F. Comparison of control schemes for a fuel cell hybrid tramway integrating two dc/dc converters (2010) *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (11), pp. 5731-5744.

## **CONFERENCIAS INTERNACIONALES**

- Fernandez, L.M., Garcia, C.A., Garcia, P., Torreglosa, J.P., Jurado, F. Control strategies of a fuel-cell hybrid tramway integrating two dc/dc converters (2010) *SPEEDAM 2010 - International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, nro. 5542094, pp. 1052-1057.
- Garcia, P., Perez, J., Fernandez, L.M., Garcia, C.A., Jurado, F. Control strategies for a fuel-cell hybrid tramway (2010) *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pp. 1183 - 1188

## **Bibliografía**

---

Las referencias bibliográficas que se han utilizado para la realización de esta Tesis se han ordenado según el orden de aparición en el documento.

- [1] Adcock P., Kells A., and Jackson C., "PEM Fuel Cells for Road Vehicles," in *EET-2008 European Ele-Drive Conference*.
- [2] Farrell A.E., Keith D.W., and Corbett J.J., "A strategy for introducing hydrogen into transportation," *Energy Policy*, vol. 31, no. 13, pp. 1357-1367, 2003.
- [3] Rand D.A.J., and Dell R.M., *Hydrogen Energy Challenges and Prospects*.: RSC Publishing, 2008.
- [4] ThunderPower Bus Evaluation at SunLine Transit Agency, "Fuel Cell Transit Buses," Department of Energy,.
- [5] Van Hool Fuel Cell Bus. [Online]. "<http://www.vanhool.be/FRA/transport-public/hybride-pile-a-combustible/Resources/folderFuelCell.pdf>"
- [6] Project HyFLEET: CUTE. [Online]. "<http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/>"
- [7] Daimler. [Online]. "<http://www.daimler.com/technology-and-innovation/drive-technologies/fuel-cell>"
- [8] ECTOS final report. [Online]. "[http://www.transport-research.info/Upload/Documents/200607/20060727\\_144147\\_64112\\_ECTOS\\_Final\\_Report.pdf](http://www.transport-research.info/Upload/Documents/200607/20060727_144147_64112_ECTOS_Final_Report.pdf)"
- [9] STEP webpage. [Online]. "<http://www.dpi.wa.gov.au/ecobus/>"
- [10] Toyota Hino FCHV-BUS. [Online]. "[http://www.jari.or.jp/jhfc/fcv/img/t\\_hino\\_p.jpg](http://www.jari.or.jp/jhfc/fcv/img/t_hino_p.jpg)"
- [11] East Japan Railway Company JR-EAST. [Online]. "<http://www.jreast.co.jp/e/>"
- [12] RailwayTechnical Research Institute RTRI. [Online]. "<http://www.rtri.or.jp/>"
- [13] WCRR, World Congress of Raylway Research. [Online]. "[www.wcrr2008.org.](http://www.wcrr2008.org.)"
- [14] Fuel Cell Propusion Institute. [Online]. "<http://www.fuelcellpropulsion.org/>"
- [15] The Hydrogen Train. [Online]. "<http://www.greenhydrogen.dk/>"
- [16] Autotram - Fraunhofer. [Online]. "<http://www.autotram.info/en.html>"
- [17] Chang S., Yang K.-Y., and Kim T.-H., "Hydrail Project in Korea," in *3rd International Hydrail Conference*, Carolina del Norte, EE.UU, 2007.
- [18] Vehicle Projects Inc. [Online]. "<http://www.vehicleprojects.com/proj.html>"
- [19] (2004) Honda Fuel Cell Power FCX. [Online]. "<http://world.honda.com/FuelCell/FCX/>"
- [20] Uzunoglu M., and Alam M.S., "Dynamic modeling, design, and simulation of a combined PEM fuel cell and ultracapacitor system for stand-alone residential applications," *IEEE Trans Energy*

- 
- Conversion*, vol. 21, no. 3, pp. 767–75, 2006.
- [21] Uzunoglu M., and Alam M.S., "Dynamic modeling, design and simulation of a PEM fuel cell/ultra-capacitor hybrid system for vehicular applications," *Energy Conversion Management*, vol. 48, no. 5, pp. 1544–53., 2007.
- [22] Yalcinoz T., and Alam M.S., "Improved dynamic performance of hybrid PEM fuel cells and ultracapacitors for portable applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 7, pp. 1932–40, 2008.
- [23] Jiang Z., Gao L., and Dougal R.A., "Adaptive control strategy for active power sharing in hybrid fuel cell/battery power sources," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 507–15, 2007.
- [24] Sripakagorna A., and Limwuthigrajirajit N., "Experimental assessment of fuel cell/supercapacitor hybrid system for scooters," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 15, pp. 6036–44., 2009.
- [25] Zhang X., Mi C.C., Masrur A., and Daniszewski D., "Wavelet-transform-based power management of hybrid vehicles with multiple on board energy sources including fuel cell, battery and ultracapacitor," *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 2, pp. 1533–43, 2008.
- [26] Erdinc O., Vural B., and Uzunoglu M., "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. 369–80, 2009.
- [27] Erdinc O., Vural B., Uzunoglu M., and Ates Y., "Modeling and analysis of an FC/UC hybrid vehicular power system using a wavelet-fuzzy logic based load sharing and control algorithm," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 5223–33., 2009.
- [28] Thounthong P., Chunkag V., Sethakul P., Davat B., and Hinaje M., "Comparative study of fuel-cell vehicle hybridization with battery or supercapacitor storage device," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 8, pp. 3892–903, 2009.
- [29] Thounthong P., Rael S., and Davat B., "Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications," *Journal of Power Sources*, vol. 193, no. 1, pp. 376–85., 2009.
- [30] D., Serra, M. and Riera, J. Feroldi, "Design and Analysis of Fuel Cell Hybrid Systems Oriented to Automotive Applications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, pp. 4720–4729, 2009.
- [31] Williamson S. and Emadi A., "Comparative assessment of hybrid electric and fuel cell vehicles based on comprehensive well-to-wheels efficiency analysis," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 54, no. 3, pp. 856–862, 2005.
- [32] Burke, A., "Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 806–820, 2007.
-



- [33] Bauman J., and Kazerani M., "A Comparative Study of Fuel-Cell–Battery, Fuel-Cell–Ultracapacitor, and Fuel-Cell–Battery–Ultracapacitor Vehicles," *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 57, no. 2, pp. 760-69, 2008.
- [34] Markel T., Zolot M., Wipke K.B., and Pesaran A.A., "Energy storage system requirements for hybrid fuel cell vehicles," in *Advanced Automotive Battery Conference*, Nice, France, 2005.
- [35] N.P. et al. Brandon, "Design and characterization of a fuel cell-battery powered hybrid system for vehicle applications," in *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007.
- [36] (2011) Ballard fuel cell power. [Online].  
"http://www.ballard.com/files/pdf/Spec\_Sheets/FCvelocity-HD6\_SPC5101744-0G.pdf"
- [37] Winston Battery Limited Website - ThunderSky Lithium Battery. [Online].  
"http://www.thunder-sky.com/"
- [38] Maxwell Technologies - BMOD0063 Datasheet. [Online].  
"http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/datasheet\_bmod0063\_1014696.pdf"
- [39] Pukrushpan J.W., Stefanopoulou A.G., and Huei Peng, *Control of Fuel Cell Power Systems - Principles, modeling, analysis and feedback design.*: Springer, 2004.
- [40] Larminie J., and Dicks A., *Fuel Cell Systems Explained*, 1st ed., Ltd John Wiley and Sons, Ed., 2000.
- [41] ECW Technical Report 193-1, "Fuel cells for distributed generation - a technology and marketing summary," 2000.
- [42] ECW report number 193-2, "State-of-the Art Fuel Cell Technologies for Distributed Generation," 2000.
- [43] Appleby, A. and Foulkes, F., *Fuel Cell Handbook.*: Van Nostrand Reinhold, New York., 1989.
- [44] Caux S., Lachaize J., Fadel M., Shott P., and Nicod L., "Modelling and control of a Fuel cell System and Storage Elements in transport applications," *Journal of Process Control*, vol. 15, pp. 481-491., 2005.
- [45] Miotti A., Di Domenico A., Guezennec Y.G., and Rajagopalan S., in *Vehicle Power and Propulsion IEEE Conference*, 2005, pp. Control- Oriented Model for an Automotive PEM Fuel Cell System with Imbedded 1+1D Membrane Water Transport.
- [46] Wang C., Nehrir M.H., and Shaw S.R., "IEEE Transactions on Energy Conversion," *Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cells Using Electrical Circuits*, vol. 20, no. 2, pp. 442-451., 2005.
- [47] Kunusch C., Husar A., Puleston P.F., Mayosky M.A., and Moré J.J. , "Linear identification and model adjustment of a PEM fuel cell stack," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 13, pp. 3581-3587, 2008.

- 
- [48] El-Sharkh M.Y., Sisworahardjo N.S., Yalcinoz T., and Alam M.S., "Portable Direct Hydrogen Fed PEM Fuel Cell Model and Experimental Verification," *International Journal of Energy Research*, 2009.
- [49] Yongping Hou, Zhihua Yang, and Gang Wan , "An improved dynamic voltage model of PEM fuel cell stack," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, pp. 11154-11160, 2010.
- [50] Jannelli E., Minutillo M., and Perna A., "Experimental Characterization and Numerical Modeling of PEMFC Stacks Designed for Different Application Fields," *Fuel Cells*, vol. 11, no. 6, pp. 838-849, 2011.
- [51] Torreglosa J.P., Jurado F., García P., and Fernández, L.M., "PEM fuel cell modeling using system identification methods for urban transportation applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 13, pp. 7628-7640, 2011.
- [52] Garcia, P., Fernández, L. M., Garcia, C. A. and Jurado, "Comparative Study of PEM Fuel Cell Models for Integration in Propulsion Systems of Urban Public Transport," *Fuel Cells*, vol. 10, no. 6, pp. 1024–1039, 2010.
- [53] Jurado, F. , "Fuzzy logic applied to the inverter to a SOFT power plant," *Fuel Cells 4*, vol. 4, no. 4, pp. 378-387, 2004.
- [54] Padulle's J., Ault G.W., and McDonald J.R., "An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation," *Journal of Power Sources 86 (2000):.*, vol. 86, pp. 495–500, 2000.
- [55] Corbo P., Corcione F.E., Migliardini F., and Veneri O., "Experimental study of a fuel cell power train for road transport application," *Journal of Power Sources*, vol. 145, pp. 610– 619, 2005.
- [56] Cho, H.Y, Gao W., and Ginn H.L., "A New Power Control Strategy for Hybrid Fuel Cell Vehicles," *Center for Advanced Vehicular Systems*, pp. 159-166, 2004.
- [57] Gao L., Liu S., and Dougal R.A., "Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation," *IEEE Transactions on Components And Packaging Technologies*, vol. 25, no. 3, 2008.
- [58] Ehsani M., Gao Y., and Emadi A., *Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles: fundamentals, theory and design*, 2nd ed.: CRC Press, 2009.
- [59] Kalhammer F.R., Kopf B.M., Swan D., Roan V.P., and Walsh M.P., "Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology: Report of the ARB Independent Expert Panel ," State of California Air Resources Board, 2007.
- [60] Anderman, M., "Gap Analysis for Li-Ion Batteries in Automotive Applications," in *Advanced Automotive Batteries Conference*, Long Beach, California, 2007.
- [61] Kromer M. and Heywood J., "Electric Powertrains: Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet," Sloan Automotive Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA., 2007.
- [62] Jongerden M.R. and Haverkort B.R. (2008) Battery modeling. [Online].
-

"http://eprints.eemcs.utwente.nl/11645/"

- [63] Doyle M., Fuller T.F., and Newman J., "Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 140, no. 6, pp. 1526 – 1533, 1993.
- [64] Fuller T.F., Doyle M., and Newman J. , "Simulation and optimization of the dual lithium ion insertion cell," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 141, no. 1, pp. 1-10, 1994.
- [65] Shen W.X., Chan C.C., Lo E.W.C., Chau K.T., "A new battery available capacity indicator for electric vehicles using neural network," *Energy Conversion Management*, vol. 43, pp. 817–826, 2002.
- [66] Wang Junping, Chen Quanshi, and Cao Binggang, "Support vector machine based battery model for electric vehicles," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 7-8, pp. 858-864, 2006.
- [67] Wang J.P., Xu L., Guo J.G., Ding L., "Modelling of a battery pack for electric vehicles using a stochastic fuzzy neural network," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 223, no. 1, pp. 27-35, 2009.
- [68] Xiaoling H., and Hodgson J.W., "Modeling and Simulation for Hybrid Electric Vehicle," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation*, vol. 3, no. 4, pp. 235-243, 2002.
- [69] Tremblay, O., and Dessaint, L.A. , "Experimental validation of a battery dynamic model," *EV applications World Electric Vehicle Journal*, vol. 3, no. 1, 2009.
- [70] Shepherd, C. M., "Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge," *Journal of Electrochemical Society*, vol. 112, no. 657-664, 1965.
- [71] Chan C.C. and Chau K.T., *Modern Electric Vehicle Technology*. Oxford: Oxford University Press, 2001.
- [72] Gao Y., Moghbelli H., Ehsani M., Frazier G., Kajs J., and Bayne S., "Investigation of high-energy and high-power hybrid energy storage systems for military vehicle application," *Society of Automotive Engineers (SAE) Journal*, 2003.
- [73] Burke, A., "Ultracapacitors: why, how, and where is the technology," *Journal of Power Sources*, vol. 91, no. 1, pp. 37-50, 2000.
- [74] Kotz, R. and Carlen M., "Principles and applications of electrochemical capacitors," *Electrochimica Acta*, vol. 45, no. 15-16, pp. 2483-2498, 2000.
- [75] Conway, B. E., *Electrochemical Supercapacitors : Scientific Fundamentals and Technological Applications*. New York: Kluwer-Plenum, 1999.
- [76] Weidner V., Srinivasan and J.W., "Mathematical modeling of electrochemical capacitors," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 146, pp. 1650-1658, 1999.
- [77] Sikha G., White R.E., and Popov B.N., "A Mathematical Model for a Lithium-Ion Battery/Electrochemical Capacitor Hybrid System," *Journal of the Electrochemical Society*, vol.

- 
- 152, no. 8, pp. 1682-1693, 2005.
- [78] Nelms R.L., and R.M.Spyker, "Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor," *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 36, pp. 829-836, 2000.
- [79] Lisheng Shi and Crow M.L., "Comparison of ultracapacitor electric circuit models," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008, pp. 1-6.
- [80] Marie-Francoise J.-N., Gualous H. and Berthon A., "Supercapacitor thermal and electrical behavior modeling using ANN," *IEE Proceedings on Electric Power Applications*, vol. 153, no. 2, pp. 255-261, 2006.
- [81] De Levie R., "On porous electrodes in electrolyte solutions," in *Electrochimica Acta Pergamon Press Ltd.*, Northern Ireland, 1963, pp. 751-780.
- [82] Buller Karden S., Kok D., and De Doncker R.W., "Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy," *IEEE Trans on Industry Applications*, vol. 38, no. 6, pp. 1622-1626, 2002.
- [83] Zubieta L., and Boner R., "Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 1, pp. 199-205, 2000.
- [84] Kheraluwala M.H., DeDoncker R.W., and Divan D.M., "Analysis, design and experimental evaluation of a high-frequency bi-directional DC/DC converter," in *EPE 1991*, pp. 568-573.
- [85] Kazimierczuk, M.K., *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters.*: John Wiley and Sons, Ltd., 2008.
- [86] Kunrong Wang, Lizhi Zhu, Dayu Qu, Odendaal H., Lai J., and Lee F.C., "Design, implementation, and experimental results of bi-directional fullbridge DC/DC converter with unified soft-switching scheme and softstarting capability," in *PESC*, 2000, pp. 1058-1063.
- [87] Kunrong Wang, Lee F.C., and Lai J., "Operation principles of bi-directional fullbridge DC/DC converter with unified soft-switching scheme and softstarting capability," in *APEC*, 2000, pp. 111 -118.
- [88] Hui Li, Peng F.Z., and Lawler J.S., "A natural ZVS high-power bi-directional DC-DC converter with minimum number of devices," in *Industry Applications Conference*, vol. 3, 2001.
- [89] Hui Li, Fang Zheng Peng, and Lawler J., "Modeling, simulation, and experimental verification of soft-switched bi-directional DC-DC converters," in *APEC*, 2001, pp. 736 -742.
- [90] Hui Li, Fang Zheng Peng, and Lawler J.S., "A natural ZVS medium-power bidirectional DC-DC converter with minimum number of devices," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 2, pp. 525-535, 2003.
- [91] Jiang Z., Gao L., and Dougal R.A., "Flexible Multiobjective Control of Power Converter in Active Hybrid Fuel Cell/Battery Power Sources," *IEEE Transactions On Power Electronics*,
-

- vol. 20, no. 1, pp. 244-253, 2005.
- [92] Ferreira A.A., Pomilio J.A., Spiazzi, G., and de Araujo Silva L., "Energy Management Fuzzy Logic Supervisory for Electric Vehicle Power Supplies System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 107-115, 2008.
- [93] Solero L., Lidozzi A., and Pomilio J.A., "Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 5, pp. 1007- 1016, 2005.
- [94] Thounthong P., Raël S., and Davat B., "Control strategy of fuel cell/supercapacitors hybrid power sources for electric vehicle," *Journal of Power Sources*, vol. 158, no. 1, pp. 806-814, 2006.
- [95] Jih-Sheng Lai, and Nelson, D.J., "Energy Management Power Converters in Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 766-777, 2007.
- [96] Schupbach R.M., and J.C. Balda, "Comparing DC-DC converters for power management in hybrid electric vehicles," in *Electric Machines and Drives Conference*, 2003, pp. 1369-1374.
- [97] Corbo P., Corcione F.E., Migliardini F., and Veneri O., "Experimental assessment of energy-management strategies in fuel-cell propulsion systems," *Journal of Power Sources*, vol. 157, no. 2, pp. 799-808, 2006.
- [98] Corbo P., Corcione F.E., Migliardini F., and Veneri O., "Energy management in fuel cell power trains," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 18-19, pp. 3255-3271, 2006.
- [99] Min-Joong Kim, and Huei Peng, "Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 165, no. 2, pp. 819-832, 2007.
- [100] He Hong-wen, Zhang Cheng-ning, and Yu Xiao-jiang, "Power Distribution Control for a Fuel Cell Hybrid Electric Bus," in *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007, pp. 62-65.
- [101] He Hong-wen, Zhang Ying-qi, and Wan Fan, "Control strategies design for a fuel cell hybrid electric vehicle," in *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2008, pp. 1-6.
- [102] Xiangjun Li, Liangfei Xu, Jianfeng Hua, Xinfan Lin, Jianqiu Li, and Minggao Ouyang, "Power management strategy for vehicular-applied hybrid fuel cell/battery power system," *Journal of Power Sources*, vol. 191, no. 2, pp. 542-549, 2009.
- [103] Liangfei Xu, Jianqiu Li, Jianfeng Hua, Xiangjun Li, Minggao Ouyang, "Optimal vehicle control strategy of a fuel cell/battery hybrid city bus," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 17, pp. 7323-7333, 2009.
- [104] Liangfei Xu, Jianqiu Li, Jianfeng Hua, Xiangjun Li, Minggao Ouyang, "Adaptive supervisory control strategy of a fuel cell/battery-powered city bus," *Journal of Power Sources*, vol. 194, no. 1, pp. 360-368, 2009.
- [105] Torreglosa J.P., Jurado F., García P., and Fernández L.M., "Application of cascade and fuzzy logic based control in a model of a fuel-cell hybrid tramway," *Engineering Applications of*

- 
- Artificial Intelligence*, vol. 24, no. 1, pp. 1-11, 2011.
- [106] Fernandez L.M., Garcia P., Garcia C.A., and Jurado F. , "Hybrid electric system based on fuel cell and battery and integrating a single dc/dc converter for a tramway," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 5, pp. 2183-2192, 2011.
- [107] Torreglosa J.P., Jurado F., García P., and Fernández L.M., "Hybrid fuel cell and battery tramway control based on an equivalent consumption minimization strategy," *Control Engineering Practice*, vol. 19, no. 10, pp. 1182-1194, 2011.
- [108] Jenn Jiang Hwang, and Wei Ru Chang, "Characteristic study on fuel cell/battery hybrid power system on a light electric vehicle," *Journal of Power Sources*, vol. 207, no. 1, pp. 111-119, 2012, Characteristic study on fuel cell/battery hybrid power system on a light electric vehicle, Available online 11 February 2012.
- [109] Kim Y.B., and Kang S.J., "Time delay control for fuel cells with bidirectional DC/DC converter and battery," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 16, pp. 8792-8803, 2010.
- [110] Ouyang M., Xu L., Li J., Lu L., Gao D., and Me Q., "Performance comparison of two fuel cell hybrid buses with different powertrain and energy management strategies," *Journal of Power Sources*, vol. 163, no. 1, pp. 467-479, 2006.
- [111] Amirabadi M., and Farhangi S., "Fuzzy Control of Hybrid Fuel Cell / Battery Power Source in Electric Vehicle," in *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2006, pp. 1-5.
- [112] Arce A., del Real A.J., and Bordons C., "MPC for battery/fuel cell hybrid vehicles including fuel cell dynamics and battery performance improvement," *Journal of Process Control*, vol. 19, no. 8, pp. 1289-1304, 2009.
- [113] Fernandez L.M., Garcia P., Garcia C.A., Torreglosa J.P., and Jurado F., "Comparison of control schemes for a fuel cell hybrid tramway integrating two dc/dc converters," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 11, pp. 5731-5744, 2010.
- [114] Thounthong P., Rael S., and Davat D., "Control strategy of fuel cell and supercapacitors association for a distributed generation system," *IEEE Transactions on Energy Conversion* , vol. 54, no. 6, pp. 3225-33., 2007.
- [115] Geng B., Mills J.K., and Sun D., "Two-Stage Energy Management Control of Fuel Cell Plug-In Hybrid Electric Vehicles Considering Fuel Cell Longevity," *IEEE Transactions on Vehicular Technology* , vol. 61, no. 2, pp. 498-508, 2012.
- [116] Vural B., Boynuegri A.R., Nakir I., Erdinc O., Balikci A., Uzunoglu M., Gorgun H., and Dusmez S., "Fuel cell and ultra-capacitor hybridization: A prototype test bench based analysis of different energy management strategies for vehicular applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 20, pp. 11161-11171, 2010.
- [117] Rodatz P., Paganelli G., Sciarretta A., and Guzzella L., "Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle," *Control Engineering Practice*,
-

- vol. 13, no. 1, pp. 41-53, 2005.
- [118] Paganelli G., Tateno M., Brahma A., Rizzoni G., and Guezennec Y., "Control development for a hybrid-electric sport-utility vehicle: Strategy, implementation and field test results," in *Proceedings of the American Control Conference*, 2001.
- [119] Feroldi D., Serra M., and Riera J., "Energy Management Strategies based on efficiency map for Fuel Cell Hybrid Vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 190, no. 2, pp. 387-401, 2009.
- [120] Wei-Song Lin, and Chen-Hong Zheng, "Energy management of a fuel cell/ultracapacitor hybrid power system using an adaptive optimal-control method," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 6, pp. 3280-3289, 2011.
- [121] Ates Y., Erdinc O., Uzunoglu M., and Vural B., "Energy management of an FC/UC hybrid vehicular power system using a combined neural network-wavelet transform based strategy," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 2, 2010.
- [122] Dawei Gao, Zhenhua Jin, and Qingchun Lu, "Energy management strategy based on fuzzy logic for a fuel cell hybrid bus," *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 1, pp. 311-317, 2008.
- [123] Dawei Gao, Zhenhua Jin, and Qingchun Lu, "Energy management strategy based on fuzzy logic for a fuel cell hybrid bus," *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 1, pp. 311-317, 2008.
- [124] Murphey Y.L., Chen Z., Kiliaris L., and Masrur M.A., "Intelligent power management in a vehicular system with multiple power sources," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 4, pp. 2351-2359, 2011.
- [125] Zhihong Yu, Zinger D., and Bose A., "An innovative optimal power allocation strategy for fuel cell, battery and supercapacitor hybrid electric vehicle," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 4, pp. 2351-2359, 2011.
- [126] García P., Torreglosa J.P., Fernández L.M., and Jurado F., "Viability study of a FC-battery-SC tramway controlled by equivalent consumption minimization strategy," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 11, pp. 9368-9382, 2012.
- [127] Bizon N., "A new topology of fuel cell hybrid power source for efficient operation and high reliability," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 6, pp. 3260-3270, 2011.
- [128] Thounthong P., Raël S., and Davat B., "Control Algorithm of Fuel Cell and Batteries for Distributed Generation System," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 148-155, 2008.
- [129] Liu C., and Li Y., "Optimal fuzzy power control and management of fuel cell/battery hybrid vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 192, pp. 525-533., 2009.
- [130] Paganelli G., Delprat S., Guerra T. M., Rimaux J., and Santin J.J., "Control Algorithm of Fuel Cell and Batteries for Distributed Generation System," in *Vehicular Technology Conference*, Birmingham, Alabama, 2002.

- [131] Pisu P. , Koprubasi K., and Rizzoni G., "Energy Management and Drivability Control Problems for Hybrid Electric Vehicles," in *Conference on Decision and Control, and The European Control Conference*, Seville, 2005.
- [132] He B., and Yang M., "Optimisation-based energy management of series hybrid vehicles considering transient behaviour," *International Journal of Alternative Propulsion*, vol. 1, no. 1, pp. 79-96, 2006.
- [133] Chen Q., Gao L., Dougal R.A., and Quan S., "Multiple model predictive control for a hybrid proton exchange membrane fuel cell system," *Journal of Power Sources*, vol. 191, no. 2, pp. 473-482, 2009.
- [134] Linden D., and Reddy T.B., *Handbook of batteries*. New York: McGraw- Hill, 2002.