

Universidad de Huelva

Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas
Informáticos y Automática



Prototipo experimental de sistema híbrido basado en pila de combustible: diseño, modelado, implementación y testeo

Memoria para optar al grado de doctora
presentada por:

Francisca Segura Manzano

Fecha de lectura: 8 de julio de 2009

Bajo la dirección del doctor:

José Manuel Andújar Márquez

Huelva, 2009

ISBN: 978-84-92679-66-9

D.L.: H 263-2009



Universidad
de Huelva

Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática
Escuela Politécnica Superior

PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE SISTEMA HÍBRIDO BASADO EN
PILA DE COMBUSTIBLE: DISEÑO, MODELADO,
IMPLEMENTACIÓN Y TESTEO

Tesis Doctoral de
Francisca Segura Manzano

Dirigida por
José Manuel Andújar Márquez

UNIVERSIDAD DE HUELVA
Mayo de 2009

D. José Manuel Andújar Márquez, Catedrático de Escuela Universitaria de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Huelva,

CERTIFICA:

Que Dña. Francisca Segura Manzano, Licenciada en Ciencias Físicas (especialidad Electrónica) e Ingeniero en Electrónica, ha realizado bajo mi dirección y dentro del programa de doctorado **Ingeniería de Control, Informática y Electrónica**, el trabajo de investigación correspondiente a su Tesis Doctoral titulado:

Prototipo Experimental de Sistema Híbrido Basado en Pila de Combustible: Diseño, Modelado, Implementación y Testeo

Revisado el presente trabajo, estimo que puede ser presentado al Tribunal que ha de juzgarlo.

Y para que así conste a efectos de lo establecido en el artículo octavo del Real Decreto 778/1998 y por la normativa Reguladora del título de Doctor de la Universidad de Huelva, autorizo la presentación de este trabajo en la Universidad de Huelva.

Huelva, a 8 de Mayo de 2009

Director: Dr. José Manuel Andújar Márquez

Doctorando: Francisca Segura Manzano

Agradecimientos

En primer lugar quiero dar las gracias a M^a Ángeles Martín, quien con sus clases de “Sistemas Electrónicos para Fuentes de Energía Renovable” durante mis estudios de ingeniería, me introdujo en el apasionante mundo de las pilas de combustible.

A José Manuel Andújar, por su búsqueda incesante de nuevos y desafiantes proyectos capaces de mantener trabajos experimentales como éste, y por haber apostado por un campo hasta ahora novedoso en este departamento en particular, y en esta universidad en general.

A mis compañeros, Diego, Iñaki, Eladio y Manolo Redondo. A Diego, por ser un excelente compañero de despacho e intentar buscar siempre el mejor ambiente de trabajo. A Iñaki, por hacerme creer que el software libre es posible y convencerme para utilizarlo. A Eladio, por haber tenido la generosidad de compartir sus conocimientos conmigo y por hacer que mis largos días en el laboratorio no fuesen sólo espinas. Y, cómo no, a Manolo Redondo, a quien tengo un gran cariño, por sus valiosos y sinceros consejos y por transmitirme su pasión por la docencia. A ellos, gracias por conseguir de forma inconsciente, que mis casi seis años aquí en Huelva hayan sido como si estuviese en casa.

A mis amigas, especialmente a Carmen y Afrique, por su interés en el avance de este trabajo, por sus ánimos y por sus consejos en el trozo de vida que nos queda fuera de lo profesional; en definitiva gracias por vuestra fiel amistad.

Y, finalmente quiero dar las gracias a mi familia, a mis padres Antonio y Nieves, y a mis hermanas, Lola, Blanca y Toñi. Por estar siempre a mi lado, por comprender que no estoy con vosotros todo el tiempo que me gustaría y por hacer que mis viajes de ida y vuelta no sean tan amargos.

A to@s, GRACIAS por contribuir a que este sueño se haga realidad

*A Fran,
por su infinita paciencia,
su comprensión sin límites
y su derroche desmesurado de amor*

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos.....	IX
Índice de Figuras.....	XIII
Índice de Tablas.....	XIX
Capítulo 1. Planteamiento General de la Tesis.....	1
1.1 Resumen de la Tesis.....	4
1.2 Innovaciones que aporta la Tesis.....	7
1.3 Rendimiento científico de la Tesis.....	12
Capítulo 2. Sistemas de Pilas de Combustible.....	19
2.1 Reseña histórica de los sistemas de pilas de combustible.....	20
2.2 Pilas de combustible: características y clasificación.....	28
2.2.1 Principio de funcionamiento.....	33
2.2.2 Estructura física.....	34
2.2.3 Eficiencias termodinámica y electroquímica.....	36
2.2.4 Características eléctricas.....	40
2.2.5 Clasificación.....	47
2.2.6 Aplicaciones y disponibilidad comercial.....	59
2.2.7 Comparación entre las pilas de combustible, los motores de combustión interna, las baterías y los ultracondensadores.....	83
2.3 Sistemas de pilas de combustible. Hibridación.....	86
2.3.1 Circuitos de acondicionamiento de potencia.....	87
2.3.2 Hibridación.....	100
2.4 Conclusiones y comentarios bibliográficos.....	106

Capítulo 3. Modelado del Sistema Pila de Combustible – Convertidor DC/DC.....	109
3.1 Sistema Pila de Combustible.....	111
3.1.1 Introducción.....	111
3.1.2 Modelos estático y dinámico de una pila de combustible tipo PEM.....	113
3.1.3 Modelo de estado de una pila de combustible tipo PEM.....	119
3.1.4 Modelo linealizado de una pila de combustible tipo PEM.....	121
3.2 Sistema Convertidor DC/DC.....	128
3.2.1 Control del punto de funcionamiento de la pila de combustible mediante el convertidor Boost.....	129
3.2.2 Modelo de estado del convertidor Boost.....	132
3.2.3 Modelo linealizado del convertidor Boost.....	134
3.3 Sistema completo: Pila de combustible - Convertidor DC/DC.....	137
3.3.1 Modelo linealizado del sistema completo.....	138
3.3.2 Simulaciones.....	142
3.4 Conclusiones y comentarios bibliográficos.....	149
Capítulo 4. Sistema Híbrido de Pila de Combustible: Implementación y Testeo	155
4.1 Introducción.....	156
4.2 Consideraciones de diseño.....	163
4.2.1 Módulo de potencia de pila de combustible PEM tipo Nexa de Ballard.....	166
4.2.2 Convertidor DC/DC elevador Boost.....	167
4.2.3 Banco de baterías.....	170
4.2.4 Banco de cargas.....	171
4.2.5 Convertidor DC/DC reductor.....	179
4.3 Resultados experimentales.....	187
4.3.1 Banco de cargas conectado al Bus DC de 48 V.....	187
4.3.2 Banco de cargas conectado a la salida de 12 V-DC	194
4.4 Conclusiones y comentarios bibliográficos.....	199
Capítulo 5. Control en Corriente del Sistema Híbrido de Pila de Combustible.....	203
5.1 Introducción.....	204
5.2 Control analógico de corriente.....	207
5.2.1 Control de corriente de pico y de corriente de valle	207
5.2.2 Control de corriente media.....	219

5.2.3 Control de corriente por conductancia.....	221
5.2.4 Control de corriente por deslizamiento.....	227
5.2.5 Control de corriente por tiempo de conducción (on-time) y por tiempo de no conducción (off-time) constante	234
5.3 Control en corriente del sistema híbrido de pila de combustible	239
5.3.1 Justificación de la técnica de control de corriente empleada.....	239
5.3.2 Sensado de corriente.....	242
5.3.3 Implementación práctica del circuito de control.....	245
5.3.4 Testeo experimental del sistema.....	248
5.4 Conclusiones y comentarios bibliográficos.....	255
Capítulo 6. Conclusiones y Desarrollos futuros.....	257
6.1 Conclusiones	258
6.2 Desarrollos futuros.....	262
Referencias Bibliográficas.....	265
Índice Alfabético.....	275

Índice de Figuras

Figura 2.1: Retrato de Christian Friedrich Schönbein.....	21
Figura 2.2: Retrato de Sir William Robert Grove.....	21
Figura 2.3: Francis Thomas Bacon y su pila de hidróxido, 1959.....	26
Figura 2.4: Tractor Allis Chalmers con pila de combustible, 1959.....	26
Figura 2.5: Evolución histórica de las pilas de combustible.....	29
Figura 2.6: Relación de eficiencia en una planta de generación de potencia eléctrica.....	30
Figura 2.7: Esquema de funcionamiento básico de una pila de combustible.....	30
Figura 2.8: Dependencia de la eficiencia con la temperatura en una máquina térmica y en una pila de combustible.....	32
Figura 2.9: Esquema básico de una celda de combustible.....	33
Figura 2.10: Estructura planar rectangular de una pila de combustible.....	35
Figura 2.11: Sección transversal de una celda tubular.....	36
Figura 2.12: Comparación de eficiencias de sistemas de generación de potencia eléctrica.....	37
Figura 2.13: Curva de polarización de una celda de combustible.....	45
Figura 2.14: Curva de potencia de una celda de combustible.....	46
Figura 2.15: Esquema básico de una celda de combustible de tipo AFC.....	51
Figura 2.16: Esquema básico de una celda de combustible de tipo MDFC.....	52
Figura 2.17: Esquema básico de una celda de combustible de tipo PAFC.....	54
Figura 2.18: Esquema básico de una celda de combustible de tipo MCFC.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.19: Esquema básico de una celda de combustible de tipo SOFC.....	57
Figura 2.20: Esquema básico de un sistema de potencia de pila de combustible.....	87
Figura 2.21: Diagrama de bloques de un sistema de pila de combustible para cargas aisladas... .	89
Figura 2.22: Topología con transformador de baja frecuencia.....	90
Figura 2.23: Topología con transformador de alta frecuencia.....	92
Figura 2.24: Topología con convertidor DC/DC Push-Pull.....	93
Figura 2.25: Diagrama de bloques de un sistema UPS basado en pilas de combustible.....	95
Figura 2.26: Topología para UPS con transformador de baja frecuencia.....	96
Figura 2.27: Topología para UPS con transformador de alta frecuencia para cada fuente.....	97
Figura 2.28: Diagrama de bloques de un sistema de pila de combustible trabajando en paralelo con la red.....	98
Figura 2.29: Diagrama de bloques de un sistema de pila de combustible inyectando potencia a la red.....	98
Figura 2.30: Diagrama de bloques de un sistema de automoción con pila de combustible.....	99
Figura 2.31: Topología para para un sistema de automoción con pila de combustible.....	100
Figura 2.32: Esquema de sistema híbrido pila de combustible-turbina de vapor.....	102
Figura 2.33: Esquema de sistema híbrido pila de combustible-solar térmico.....	103
Figura 2.34: Esquema de sistema híbrido pila de combustible-turbina eólica.....	104
Figura 2.35: Diferentes conexiones en HEVs.....	105
Figura 3.1: Modelo eléctrico estático equivalente de una celda de combustible PEM.....	114
Figura 3.2: Modelo eléctrico dinámico equivalente de una celda de combustible PEM.....	114
Figura 3.3: Ajuste de la curva de polarización y curva de potencia del modelo teórico.....	119
Figura 3.4: Ajuste de la respuesta dinámica teórica y experimental.....	120
Figura 3.5: Modelo de estado de un sistema genérico.....	121
Figura 3.6: Curva de polarización y de potencia para la pila Nexa.....	125
Figura 3.7: Respuesta de los modelos eléctrico dinámico y linealizado a una perturbación en la entrada.....	127
Figura 3.8: Esquema eléctrico de un convertidor Boost ideal.....	130
Figura 3.9: Esquema de conexión en conducción (a) y no conducción (b) del convertidor Boost.	130
Figura 3.10: Intersección de la curva de polarización de la pila de combustible con la recta de carga, variando el ciclo de servicio del convertidor.....	131

Figura 3.11: Esquema eléctrico de un convertidor Boost con pérdidas en los elementos pasivos.	132
Figura 3.12: Esquema de conexión del sistema: Pila de combustible-convertidor Boost.....	138
Figura 3.13: Esquema de conexión del modelo de estado del sistema pila-convertidor.....	144
Figura 3.14: Valores medio e instantáneo de la corriente en la bobina y la tensión en el condensador.....	144
Figura 3.15: Esquema para comparación de modelo lineal y no lineal del sistema pila de combustible-convertidor Boost.....	145
Figura 3.16: Evolución temporal de la corriente en la bobina según el modelo promedio y lineal para una perturbación positiva en la entrada.....	146
Figura 3.17: Evolución temporal de la corriente en la bobina según el modelo de valores promedio y el modelo de valores instantáneos para una variación incremental positiva en la entrada ($d\delta = 0,01$).....	147
Figura 3.18: Respuesta de la tensión en los extremos de la pila de combustible a una variación incremental positiva en la entrada ($d\delta = 0,01$).....	148
Figura 4.1: Esquema del sistema híbrido con pila de combustible a construir en el laboratorio.	157
Figura 4.2: Perfil de carga típico de un sistema de telecomunicaciones.....	159
Figura 4.3: Módulo de Pila de Combustible Nexa de Ballard.....	167
Figura 4.4: Esquema de control de tensión por PWM del sistema de pila de combustible.....	169
Figura 4.5: Esquema eléctrico del circuito de control de tensión del convertidor Boost.....	169
Figura 4.6: Fotografía del convertidor Boost construido.....	170
Figura 4.7: Fotografía de la placa de control de tensión del convertidor Boost.....	170
Figura 4.8: Características de los periodos de carga y de descarga de la batería GF 12 094 Y VRLA.....	171
Figura 4.9: Detalle del panel de control de relés implementado en Labview.....	174
Figura 4.10: Puntos de operación alcanzados con el banco de cargas conectado a una de las pilas de combustible.....	175
Figura 4.11: Puntos de operación alcanzados con el banco de cargas conectado a las dos pilas de combustible.....	175
Figura 4.12: Esquema conceptual del banco de cargas construido: comunicación con el PC,	

ÍNDICE DE FIGURAS

número de resistencias por grupo y niveles de potencia alcanzables.	176
Figura 4.13: Esquema eléctrico de la placa de control de relés de estado sólido.....	177
Figura 4.14: Fotografía del banco de cargas construido, conectado al banco de baterías y a las pilas de combustible.....	178
Figura 4.15: Detalle de la placa de control del banco de cargas.....	178
Figura 4.16: Esquema eléctrico de un convertidor Sepic sin pérdidas.....	180
Figura 4.17: Esquema de conexión del convertidor Sepic en periodo de conducción (a) y no conducción (b).....	180
Figura 4.18: Fotografía del convertidor Sepic construido.....	182
Figura 4.19: Fotografía de la placa de control de tensión por PWM del convertidor Sepic.....	182
Figura 4.20: Esquema eléctrico de un convertidor Buck sin pérdidas.....	183
Figura 4.21: Esquema de conexión del convertidor Buck en periodo de conducción (a) y no conducción (b).....	183
Figura 4.22: Evolución de la corriente por la bobina y la tensión en el condensador del convertidor Buck.....	184
Figura 4.23: Esquema de conexión del driver IR2110 para generar la señal PWM de conmutación del convertidor Buck.....	185
Figura 4.24: Fotografía del convertidor Buck construido.....	186
Figura 4.25: Fotografía de la placa de control en tensión para el convertidor Buck.....	186
Figura 4.26: Resultados experimentales cuando el banco de cargas es alimentado por el banco de baterías.....	188
Figura 4.27: Resultados experimentales cuando el banco de cargas es alimentado exclusivamente por el sistema de Pila de Combustible.....	191
Figura 4.28: Esquema ilustrativo para la conexión 3.....	192
Figura 4.29: Perfil de carga demandado para la conexión 3.....	192
Figura 4.30: Resultados experimentales cuando el banco de cargas es alimentado por pila de combustible + banco de baterías.....	193
Figura 4.31: Esquema de conexión del banco de cargas a la salida de 12 V-DC.....	194
Figura 4.32: Resultados experimentales cuando el banco de cargas se conecta a la salida 12 V-DC mediante convertidor Sepic.....	196
Figura 4.33: Resultados experimentales cuando el banco de cargas se conecta a la salida 12 V-DC mediante el convertidor Buck.....	197

Figura 4.34: Resultados experimentales cuando el banco de cargas se conecta a la salida 12 V-DC mediante el convertidor Buck.....	198
Figura 5.2: Esquema básico del control de corriente para un convertidor DC/DC.....	205
Figura 5.1: Esquema básico del control de tensión para un convertidor DC/DC.....	205
Figura 5.3: Circuito de control de corriente de pico para un convertidor Boost.....	208
Figura 5.4: Formas de onda para el control de corriente de pico.....	209
Figura 5.5: Formas de onda de la corriente por la bobina en estado estacionario y perturbado para el convertidor Boost.....	213
Figura 5.6: Formas de onda de la corriente por la bobina con compensación de la pendiente..	215
Figura 5.7: Circuito de control de corriente media.....	219
Figura 5.8: Esquema de control de corriente por conductancia para un convertidor Buck.....	222
Figura 5.9: Esquema eléctrico de un convertidor Boost ideal.....	228
Figura 5.10: Ejemplo con banda de histéresis finita en modo deslizante.....	230
Figura 5.11: Circuito que realiza el control de corriente por deslizamiento.....	234
Figura 5.12: Esquema eléctrico y formas de onda para el control en corriente por tiempo de no conducción constante para un convertidor Boost.	235
Figura 5.13: Rechazo a las perturbaciones en el control de corriente por tiempo de no conducción constante.....	236
Figura 5.14: Comparación de formas de onda para el control de corriente a frecuencia constante y variable.....	237
Figura 5.15: Circuito para la implementación del control de corriente por tiempo de no conducción constante.....	238
Figura 5.16: Sistema híbrido de pila de combustible a controlar.....	239
Figura 5.17: Esquema de sistema híbrido con pila de combustible y control de corriente.....	240
Figura 5.18: Amplificador de instrumentación para el sensado de corriente.....	243
Figura 5.19: Sensado de corriente mediante el CI INA139.....	244
Figura 5.20: Característica V-I del sensor LEM de efecto Hall utilizado.	245
Figura 5.21: Esquema eléctrico del circuito de control de corriente.....	246
Figura 5.22: Detalle de la implementación física del sistema completo.....	247
Figura 5.24: Pila de combustible + convertidor DC/DC. Resultados experimentales cuando se varia la referencia manteniendo constante la carga.....	253
Figura 5.23: Pila de combustible + convertidor DC/DC. Resultados experimentales cuando se	

ÍNDICE DE FIGURAS

varia la carga manteniendo fija la referencia.....	253
Figura 5.25: Sistema híbrido completo. Resultados para una referencia de corriente en la pila de 12 A y RL fija a 10 Ω (a).....	254
Figura 5.26: Sistema híbrido completo. Resultados experimentales para una referencia de corriente en la pila de 12 A y RL conmutando entre 10 y 5 Ω (b).....	254

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Grosor de las membranas de Nafion.....	43
Tabla 2.2: Vehículos con pila de combustible.....	61
Tabla 2.3: Autobuses con pila de combustible.....	68
Tabla 2.4: Vehículos especiales con pila de combustible.....	74
Tabla 3.1: Parámetros de la pila Mark V de Ballard.....	117
Tabla 3.2: Parámetros experimentales de la pila Nexa de Ballard de 1,2 kW.....	118
Tabla 4.1: Parámetros eléctricos de los componentes del convertidor Boost.....	169
Tabla 4.2: Parámetros eléctricos de los componentes del convertidor Sepic.....	182
Tabla 4.3: Parámetros eléctricos de los componentes del convertidor Buck.....	185

Capítulo 1. Planteamiento General de la Tesis

Esta Tesis no está concebida como un trabajo aislado, sino que dentro del Grupo de Investigación en el que se ha desarrollado, forma parte del conjunto de Tesis que se están realizando de forma simultánea y que persiguen implementar lo que pretende ser un *Sistema generador de energía eléctrica autónomo, continuo y no contaminante*; nombre y objetivo del proyecto de I+D DPI 2007-62336 que financia¹ en parte esta Tesis. Se trata de un sistema que mediante el vector hidrógeno, pueda funcionar las 24 horas de todos los días del año generando su propio combustible de forma no contaminante, y produciendo energía eléctrica para alimentar cargas AC y DC, también de forma no contaminante. La fuente de energía renovable es fotovoltaica, y se emplea tanto para producir electricidad de forma diurna como para producir hidrógeno mediante electrolisis del agua. Cuando no hay luz solar, la electricidad es producida mediante pilas de combustible, utilizando el hidrógeno producido y almacenado.

El otro proyecto de investigación, esta vez de transferencia de tecnología, que financia esta Tesis, es el contrato suscrito con la empresa Hynergreen Technologies S.A que lleva por título *Diseño, desarrollo, construcción y pruebas de un sistema generador de energía eléctrica basado en pilas de combustible, integrado por un depósito de hidrógeno y un electrolizador para la producción del mismo*.

Dentro de las tareas de los proyectos de investigación mencionados anteriormente, esta Tesis tiene por objeto el diseño, desarrollo y construcción de un sistema híbrido con pila de combustible. La hibridación para este caso consiste en una o más pilas de combustible

¹ El proyecto antecesor que permitió iniciar al Grupo de Investigación en el sector de las fuentes de energía renovable en general y en el de las pilas de combustible en particular, fue el DPI 2005-01065 *Diseño de un sistema de propulsión controlado por lógica borrosa para un vehículo de emisión cero*.

conectadas a un banco de baterías. Mediante el diseño y construcción de sistemas acondicionadores de potencia (convertidores DC/DC reductores y elevadores) se consigue que a partir de una tensión no regulada suministrada por las pilas de combustible, se garantice, dentro de la potencia nominal del sistema híbrido, tensiones continuas estabilizadas, independientemente de la corriente demandada por la/s carga/s.

Esta Tesis estudia y atiende de forma práctica, mediante una implementación real, la dinámica de las pilas de combustible. Para ello, presupone disponible el caudal de hidrógeno necesario sin entrar en su producción y almacenamiento, y asume que el banco de baterías está siempre cargado, sin considerar la forma como se ha hecho.

El grupo de investigación en el seno del cual se ha realizado esta Tesis, tiene capacidad de producir hidrógeno de forma renovable (energía solar fotovoltaica + agua + electrolizador) en el propio laboratorio, y de recargar baterías de forma también renovable (a partir de energía primaria renovable); sin embargo, al igual que la etapa de obtención de AC en el sistema híbrido, éstos son ámbitos de otras Tesis en curso en el grupo y, por tanto, no abordados por ésta.

El Capítulo 2 comienza con una revisión del estado del arte de la ciencia y tecnología de las pilas de combustible, donde se incluye una breve reseña histórica sobre las mismas así como conceptos respecto a su utilización práctica. Además se realiza una clasificación pormenorizada de las pilas de combustible de acuerdo al tipo de electrolito que emplean, añadiendo los últimos tipos de pilas de combustible que recientemente están apareciendo. A continuación se presentan las múltiples y diversas alternativas que integran los sistemas híbridos, entendiendo como sistema híbrido aquél que combina más de una fuente de potencia de diferente naturaleza. Así por ejemplo, se pueden consultar esquemas de conexión para sistemas con pila de combustible, panel solar, turbina eólica, turbina de vapor, batería o ultracondensador. También se describen varias topologías de conexionado de sistemas de acondicionamiento de potencia, casi siempre imprescindibles en aplicaciones con pilas de combustible. Estas topologías resuelven los problemas de abastecimiento a cargas aisladas, cargas conectadas a red, sistemas de alimentación ininterrumpida (SAIs), unidades de potencia auxiliar (APUs) o sistemas de automoción. En concreto, esta Tesis aborda la implementación física de un sistema híbrido de pila de combustible que responde a una de las topologías que se describen en el Capítulo 2.

Para afrontar la tarea de diseño y posterior implementación física del sistema híbrido, es necesario disponer primeramente de un modelo del sistema de pila de combustible con el que realizar simulaciones y que sea apto para el control. En este sentido, se desarrolla en el Capítulo 3 un modelo de estado para un sistema no lineal de pila de combustible formado por un módulo de pila de combustible y un convertidor DC/DC. Para ello se parte de los modelos de estado de cada uno de estos subsistemas. A partir del modelo de estado se obtiene el modelo linealizado del sistema alrededor de un punto de operación genérico. Este modelo es apto para implementar técnicas de control lineal.

Una vez que se realiza el estudio teórico del sistema y su diseño, se procede a la implementación física del mismo; a esto se dedica el Capítulo 4. La elección de cada uno de los componentes reales se hace en base al dimensionado que se realiza de acuerdo al perfil de carga para el que se proyecta el sistema. A continuación se diseñan y construyen las distintas etapas de acondicionamiento de potencia, así como los sistemas de control encargados de garantizar los niveles de tensión establecidos en los distintos puntos de interconexión eléctrica. Para realizar las pruebas experimentales, y debido al elevado coste y reducida versatilidad de las cargas electrónicas específicas para pilas de combustible, ha sido necesario construir un banco de pruebas que consiste en un banco de cargas capaz de ser controlado electrónicamente. Este banco de cargas permite no sólo realizar las pruebas relativas al perfil de carga considerado en esta Tesis, sino que también se podrán exigir otros niveles de demanda de potencia para otras situaciones prácticas. Los resultados experimentales permiten comprobar el correcto funcionamiento del sistema híbrido, asegurando los niveles de tensión en cada punto de conexión independientemente de la potencia demandada por la carga. En resumen, las etapas de potencia diseñadas y construidas mediante convertidores DC/DC con topología elevadora, reductora y reductora-elevadora cumplen su propósito, y son capaces de manejar de forma controlada toda la potencia que entrega la fuente a la que están conectadas.

Por último, es necesario recordar que el sistema implementado en esta Tesis lo integran varias fuentes de potencia (pilas de combustible y baterías); por otro lado, hay que tener en cuenta las características propias de las pilas de combustible: generación de potencia no regulada, puntos de máxima potencia y máxima eficiencia no coincidentes y limitación de la variación máxima de corriente demandada para evitar problemas de respuesta. Esta variedad de sistemas junto a las limitaciones y restricciones en su funcionamiento, sugieren la necesidad de

disponer de un sistema de control de potencia, de forma que se pueda decidir el punto de operación de la/s pila/s de combustible en cada instante. El uso de acondicionadores de potencia con el sistema de control adecuado exige un estudio teórico de los diferentes métodos de control disponibles; dando comienzo así al Capítulo 5. Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de cada método, y atendiendo a criterios de estabilidad, facilidad y sencillez de implementación e inmunidad al ruido, se opta por el control analógico de corriente media. Los resultados experimentales sirven para demostrar que en un sistema formado por pila/s de combustible y batería/s, es posible fijar el valor de tensión en el bus de conexión así como la corriente suministrada por la pila de combustible, para cualquier demanda de la carga dentro de la potencia nominal que es capaz de suministrar el sistema híbrido. Además se demuestra la forma de solucionar el problema de suministro de la/s pila/s de combustible cuando la variación de la demanda de potencia supera un nivel determinado.

1.1 Resumen de la Tesis

Esta memoria está organizada en 6 capítulos de acuerdo a la siguiente distribución: en el Capítulo 1, *Planteamiento General de la Tesis*, como su propio nombre indica, se realiza una descripción de la estructura de la Tesis, se comentan brevemente cada uno de los capítulos que la forman incidiendo en las principales aportaciones, y se efectúa un análisis del rendimiento científico que hasta la fecha ha producido el trabajo realizado en esta Tesis.

En el Capítulo 2, *Sistemas de Pilas de Combustible*, comienza realizando una revisión histórica de las pilas de combustible. Se recorre el camino desde la propia invención de la celda de combustible hasta el momento actual, donde se realiza una puesta al día tanto a nivel de prototipos como de oferta comercial disponible.

La historia enseña una vez más que la pila de combustible, aunque parece un invento reciente, es en realidad el fruto de muchos años (casi dos siglos en este caso) de arduas investigaciones. Si bien los fundamentos de las pilas de combustible quedaron establecidos a principios del siglo XX, la falta de tecnología disponible retrasó su avance e introducción en el mercado.

Después de una breve reseña histórica, el capítulo analiza los principios básicos de funcionamiento de las celdas de combustible, así como los distintos tipos de pilas de

combustible. Se revisan los sistemas de pilas de combustible clasificados por su aplicación y los que están disponibles comercialmente según los fabricantes. Se realiza también una comparativa de las pilas de combustible respecto de otras fuentes de potencia de ámbito de uso similar: motores diesel, baterías y ultracondensadores (o supercondensadores). Este capítulo finaliza con una sección dedicada a los sistemas híbridos de pilas de combustible, es decir, sistemas donde se integran diferentes fuentes de potencia en torno a una pila de combustible para conformar una solución más efectiva para generar potencia eléctrica.

El siguiente capítulo, Capítulo 3, *Modelado del Sistema Pila de Combustible-Convertidor DC/DC*, está dedicado al modelado de sistemas de pilas de combustible. Comienza con una revisión del estado del arte sobre el modelado de pilas de combustible, del cual se deduce que los modelos originales de pilas de combustible consideraban el sistema como estático, gobernado por la relación entre la tensión y corriente que es capaz de generar. Sin embargo, las carencias de estos modelos estáticos se hacían visibles cuando, al realizar pruebas con pilas de combustible reales, los datos experimentales se alejaban de los esperados. Esto es, los modelos no capturaban la dinámica de la pila de combustible, con lo cual, los cambios en la tensión y corriente disponibles entre los extremos de la pila de combustible no se correspondían con los previstos en los modelos teóricos. En consecuencia, no eran aptos para utilizarlos en el diseño de sistemas de control.

Con objeto de solventar estos inconvenientes, empezaron a desarrollarse hace una década aproximadamente, modelos dinámicos de pilas de combustible. Estos modelos recogen las ecuaciones empíricas que describen las reacciones electroquímicas dentro de cada celda de la propia pila de combustible. El inconveniente de estos modelos dinámicos, la mayoría de ellos semiempíricos, es que tienen poco interés desde la óptica de la ingeniería eléctrica, electrónica y de control. En este sentido, es más útil disponer de un modelo eléctrico que permita conocer la tensión y la corriente que puede suministrar la pila en todo su rango de funcionamiento. Con este propósito, el objetivo de las investigaciones más recientes ha estado centrado en el modelado dinámico de pilas de combustible desde el punto de vista de sus terminales eléctricos. Para que el sistema de control pueda decidir qué cantidad de potencia entrega la pila en cada momento, el modelo debe reflejar el comportamiento de la pila de combustible frente a cambios en la demanda de potencia en sus terminales de salida. En concreto, en este capítulo se propone un modelo de estado para el conjunto formado por la pila de combustible y el convertidor

DC/DC a partir de los modelos desarrollados para ambos sistemas por separado. Esto es, el sistema pila de combustible + convertidor DC/DC es considerado todo él como una planta a controlar cuya señal de entrada (señal de control) es el ciclo de servicio del convertidor. Esta señal de control permite ubicar el punto de funcionamiento y adaptarlo a las demandas de la carga, manteniendo el sistema a su salida (terminales de conexión de la carga) una tensión regulada.

El modelo desarrollado se somete a simulación y se comprueba su correcto funcionamiento, ya que sigue de forma fiel el comportamiento dinámico de la pila de combustible. Es más, se aprecia un hecho conocido que el modelo refleja en su comportamiento: la respuesta dinámica de la pila de combustible es bastante más lenta que la del convertidor DC/DC.

En el Capítulo 4, *Sistema Híbrido de Pila de Combustible: Implementación y Testeo*, se describe el diseño, implementación física y pruebas experimentales de un sistema híbrido de pila de combustible, proyectado y dimensionado para alimentar una carga real que presenta un perfil típico de un sistema de telecomunicaciones. Este sistema responde a una de las topologías que se proponen en el Capítulo 3. Con objeto de hacer el sistema más versátil, se configura con dos salidas diferentes, una de alterna monofásica² de 230 V y otra de continua de 12 V. Esto permite extender las aplicaciones del sistema a otros campos.

Para comprobar que el sistema prototipo construido es capaz de abastecer el perfil de carga requerido, se diseña e implementa físicamente un banco de cargas resistivas capaz de ser controlado electrónicamente. Mediante este banco de cargas y a través de las órdenes que se envían desde un ordenador mediante un instrumento virtual, es posible simular tanto el perfil de carga considerado como cualquier otro, aportando así mayor versatilidad al sistema. Además, esto permite seleccionar determinados puntos de funcionamiento que impliquen que el/los módulo/s de pila/s de combustible esté/n trabajando en zonas de máxima eficiencia o máxima potencia.

La construcción del banco de cargas surge como una necesidad debido a que las cargas electrónicas comerciales presentan un coste muy elevado para los niveles de potencia del sistema desarrollado (hasta 5 kW). Además, los sistemas comerciales son cerrados y, por tanto,

² Esta característica del prototipo implementado no es objeto de estudio en esta Tesis, aunque sí de otra en el marco del proyecto DPI 2007-62336.

no permiten la necesaria capacidad de actuación que, sobre un prototipo, ha de tener el equipo de investigación. A partir de los resultados experimentales, previamente corroborados mediante simulación en el Capítulo 3, se demuestra el correcto funcionamiento del sistema.

En el Capítulo 5, *Control en Corriente del Sistema Híbrido de Pila de Combustible*, se analiza en profundidad el control en corriente de convertidores DC/DC. Se estudian las diferentes soluciones presentes en la literatura para realizar controladores de corriente para convertidores clasificados en dos grandes grupos: a frecuencia constante y a frecuencia variable. Además, se describe y justifica la implementación física de una de las técnicas de control en corriente a frecuencia constante que consiste en el control de corriente media. Se aportan los resultados experimentales obtenidos que acreditan el correcto funcionamiento del sistema híbrido integrado por un sistema de pila de combustible (pila de combustible + convertidor) y un banco de baterías. Se demuestra que el sistema pila de combustible es capaz de seguir una referencia de corriente a la vez que la tensión en el bus se mantiene a un valor fijo. Se comprueba experimentalmente que el funcionamiento simultáneo de la pila de combustible junto con las baterías aparece siempre que se fija el punto de trabajo de la primera y las variaciones en la carga implican un aumento en la demanda de potencia, que debido a la referencia de corriente fijada por el controlador, no puede ser atendida por la pila de combustible.

En el último capítulo, Capítulo 6, *Conclusiones y Desarrollos Futuros*, se presentan las conclusiones más relevantes de esta Tesis, se esbozan las líneas de investigación que han sido abiertas por la misma, y se proponen estrategias y actuaciones en este sentido.

Las Referencias Bibliográficas consultadas cierran la memoria de esta Tesis.

1.2 Innovaciones que aporta la Tesis

En esta sección se recorren cada uno de los capítulos que integran esta memoria, destacando las aportaciones novedosas que se hacen en cada uno respecto a la situación del estado del arte antes de abordar las diferentes tareas que conforman cada capítulo.

El Capítulo 2 comienza intentando aclarar la controversia existente sobre la autoría de la invención de las pilas de combustible. A partir de la consulta de diversas fuentes y su ubicación temporal, científica y tecnológica [1], [2] y [4], parece procedente concluir que fue Sir William

Robert Grove y no Christian Friendrich Schöbein, el padre de la primera *batería de gas* o celda de combustible. Ciertamente, la aparición de la celda de combustible no fue un hecho aislado, sino que tuvo mucho que ver el descubrimiento realizado años atrás por Sir Anthony Carlisle y William Nicholson de la electrolisis del agua [3].

Hecho este estudio, la siguiente contribución del capítulo consiste en realizar un recorrido por el desarrollo histórico de las pilas de combustible. En este sentido, no se había encontrado hasta el momento ningún trabajo donde se compendiará el avance de las pilas de combustible desde su fundamentación teórica, reflejando los diferentes hitos alcanzados en el tiempo, hasta su sucesiva implementación práctica. De este modo, se plasma el desarrollo histórico hasta el momento actual, mostrando el funcionamiento e ilustraciones de los diferentes tipos de pilas de combustible comerciales. En la revisión bibliográfica realizada sí se han encontrado referencias donde se mostraban trabajos específicos asociados bien al avance de las pilas, [5]-[13], o a las soluciones comerciales, [9], [10].

La clasificación de las pilas de combustible realizada en base a las referencias [14]-[56], incorpora, además de las comúnmente conocidas, los últimos tipos de pilas que aún están en laboratorio y que difícilmente se encuentran en la bibliografía.

Por último, este capítulo cierra con una recopilación de circuitos de acondicionamiento de potencia y topologías de sistemas híbridos que hasta el momento aparecían repartidos en multitud de referencias [87]-[96]: pila de combustible-carga DC, pila de combustible-carga AC aislada, pila de combustible conectada a red, pila de combustible + turbina de vapor, pila de combustible + panel solar térmico, pila de combustible + turbina eólica, pila de combustible para sistema de automoción, etc.

En el siguiente capítulo, Capítulo 3, se ha desarrollado un modelo de estado y de función de transferencia apto para el control de la planta integrada por la pila de combustible más un convertidor DC/DC conectado a su salida. Para ello se ha seguido un desarrollo por pasos a partir del modelado por separado de la pila de combustible y del convertidor DC/DC, para luego integrarlos bajo el concepto de planta a controlar cuya señal de control es el ciclo de servicio del convertidor.

Las carencias de los primeros modelos de pila de combustible [97], [98] para describir su comportamiento real, obligaron a la comunidad científica a proponer modelos más precisos y que fueran capaces de capturar la dinámica de la pila de combustible [99]-[102]. Algunos

consistían en modelos dinámicos semiempíricos, donde se relacionaban variables puramente físico-químicas, y otros describían el comportamiento dinámico real de las pilas de combustible desde el punto de vista de sus terminales eléctricos.

En este sentido, el modelo propuesto en este capítulo es novedoso y consiste en un modelo dinámico que describe el comportamiento real de un tipo de pila de combustible comercial, el módulo Nexa de Ballard de 1,2 kW. Previo al desarrollo del modelo de estado de la pila de combustible, se ha realizado un modelo dinámico parametrizado basado en sus ecuaciones físico-químicas. Hasta el momento, habían aparecido modelos para otros tipos de pilas, [104], [105], pero no se había encontrado información relativa al modelado del módulo Nexa. Además, el modelo desarrollado puede ser aplicado a otro tipo de pila PEM, para lo cual sólo hay que seguir los pasos especificados en este capítulo. Es decir, el modelo desarrollado puede ser considerado genérico y válido para describir el comportamiento real de cualquier pila de combustible de tipo PEM, aunque haya sido particularizado en este caso para el módulo Nexa.

Con idea de obtener un modelo de estado de la pila de combustible a partir del modelo dinámico parametrizado desarrollado, se consultaron las referencias [107]-[109], ya que si bien trataban sobre el modelado de otro tipo de pilas, concretamente SOFC y DMFC, fueron las únicas encontradas. En consecuencia, el modelo de estado de pila de combustible de tipo PEM que se propone, supone otra de las aportaciones de este trabajo de investigación.

Una vez realizado el modelo de estado de la pila de combustible, se afrontó el de la etapa de acondicionamiento de potencia, convertidor DC/DC [114]. De la combinación de ambos modelos de estado, el de la pila de combustible y del convertidor, resulta el modelo de estado de la planta pila de combustible + convertidor DC/DC que se propone en esta Tesis, el cual ha sido también linealizado para obtener un modelo de función de transferencia. Ambos modelos se consideran novedosos por no haber sido encontrados en la bibliografía.

El Capítulo 4 se puede entender como una continuación o aplicación práctica del trabajo teórico desarrollado en el capítulo anterior, estando caracterizado por su alto contenido experimental. La implementación real de un sistema híbrido de pila de combustible conlleva realizar un estudio minucioso de todos los elementos que componen el sistema y la interrelación entre ellos. Además, hay que tener en cuenta que los sistemas de pila de combustible tienen todavía muy poca implantación en el mercado y, por tanto, su disponibilidad y oferta comercial es bastante limitada. Por otro lado, las características físicas y funcionamiento de este tipo de

sistemas exigen unos requerimientos adicionales en los acondicionadores de potencia y fuentes auxiliares.

En la bibliografía existían trabajos previos donde se trataba de forma teórica el concepto de hibridación [119], o se mostraban las diferentes topologías asociadas a sistemas híbridos de pila de combustible [128]-[134]. Sin embargo, en esta Tesis se da un paso más allá, ya que el dimensionado de todas las fuentes de potencia queda completamente justificado; también se diseñan, construyen y testean todas las etapas de conversión de potencia, así como los lazos de control para cada etapa de potencia. Por último, la construcción de un prototipo de laboratorio ha permitido realizar una adecuada batería de pruebas y mostrar muchos resultados experimentales.

Como esfuerzo investigador adicional y no previsto a priori en la Tesis, para el testeo del prototipo experimental desarrollado en este capítulo se ha requerido disponer de una carga variable que permita configurar diferentes escenarios de demanda de potencia. Las referencias [120]-[127] hacen un recorrido por las diferentes propuestas que al respecto hacen los últimos trabajos bibliográficos publicados. Las referencias [121]-[123] recogen una de las soluciones caracterizadas por su bajo coste, consistente en la implementación de una carga variable basada en el control del ciclo de servicio de un convertidor conectado a la pila de combustible. No obstante las referencias anteriores y como se demuestra en el capítulo, por una u otra razón ninguna de las propuestas encontradas era útil para solventar los requerimientos exigidos por el prototipo experimental construido.

Se planteó como solución alternativa el uso de cargas electrónicas comerciales. Sin embargo, el principal inconveniente es su elevado coste y la poca o nula viabilidad y capacidad de actuación que permiten sobre lo que ocurre internamente. En consecuencia se ha optado por el diseño y construcción de un banco de cargas controlable desde un PC capaz de alcanzar diferentes niveles de potencia. Esto ha permitido que en el sistema de generación eléctrica construido se pueda alternar el funcionamiento de las distintas fuentes de potencia, así como hacerlas trabajar de forma conjunta. La versatilidad del banco de pruebas construido, que ha hecho innecesaria la adquisición de una carga programable comercial, permite realizar en el sistema híbrido implementado toda una batería de pruebas para comprobar su funcionamiento experimental.

El Capítulo 5 consta de dos partes claramente diferenciadas: una primera teórica de revisión crítica y una segunda de diseño práctico y testeo experimental.

Teniendo en cuenta la arquitectura del prototipo construido, en el que la tensión en el bus DC queda fijada por un banco de baterías, se vio la necesidad de implementar un controlador en corriente, de modo que se pudiera decidir en todo momento qué fracción de la potencia demandada por la carga debía ser suministrada por la pila de combustible. A partir de aquí, la pregunta era clara: ¿qué topología de controlador se debía implementar? Para responder a esta pregunta, la primera parte del capítulo realiza un análisis detallado y crítico de todas las topologías de controladores analógicos de corriente para convertidores DC/DC encontradas en la literatura [137]-[155]. Este trabajo constituye una aportación novedosa de la Tesis, ya que no se ha encontrado ninguna referencia bibliográfica que muestre semejante recopilación y revisión crítica. Respecto del objetivo del capítulo, implementar un controlador en corriente para la pila de combustible, la primera parte del capítulo ha servido para decidir con propiedad y de manera justificada el método de control en corriente a emplear. Concretamente el de *control de corriente media a frecuencia constante*. Esta justificación razonada en la elección del método de control constituye otra aportación de la Tesis, ya que en los trabajos consultados donde se proponen alternativas para implementar el control en corriente [156]-[159], ninguna de las alternativas está debidamente justificada.

Decidida la topología del controlador de corriente, una última cuestión a resolver es el modo de medir la corriente en el convertidor para, junto a la corriente de referencia, generar la señal de error. Esta decisión se toma de nuevo de forma justificada tras un análisis previo de las opciones posibles: amplificador de instrumentación, circuito integrado de monitorización y sensor de efecto Hall. El análisis de las tres opciones es otro aspecto novedoso, ya que valora, teniendo en cuenta las características del prototipo de laboratorio sobre el que se va a implementar el controlador, los pros y los contras de cada técnica, para concluir que la mejor elección es medir la corriente mediante un sensor de efecto Hall.

Diseñado e implementado el controlador en corriente, la última parte del capítulo es experimental, y está destinada a poner de manifiesto el buen funcionamiento del prototipo de laboratorio. En este sentido, los resultados experimentales permiten demostrar las afirmaciones que se realizaban en trabajos previos [160] acerca de los niveles de tensión en los puntos de interconexión pila de combustible + convertidor DC/DC y batería. Por último, también se ha

comprobado experimentalmente que para el módulo de pila de combustible Nexa, la demanda de corriente no puede ser superior a 4 As^{-1} , ya que en caso contrario aparecería en la pila el conocido problema de *starvation*³. Este dato es especialmente importante en trabajos inmediatos futuros destinados a la implementación de estrategias de reparto de potencia para sistemas híbridos de pilas de combustible.

En conclusión, esta Tesis aporta un prototipo de laboratorio de un sistema híbrido configurado en base a una pila de combustible, con un bus de conexión DC fijado por un banco de baterías y toda la electrónica de potencia y control necesaria para gestionar la potencia del sistema. Un aspecto muy importante del sistema desarrollado es que puede ser paralelizado para construir sistemas de mayor potencia, para lo cual sólo es necesario implementar un sistema de gestión de potencia de alto nivel que maneje el funcionamiento de cada módulo, ya que su gestión interna está solucionada en base a los controladores de bajo nivel desarrollados en esta Tesis.

1.3 Rendimiento científico de la Tesis

Esta sección está dedicada a enmarcar el entorno científico en el que se ha desarrollado la Tesis y a destacar los resultados de la investigación realizada; para ello se detallarán las publicaciones con índice de impacto así como los congresos internacionales más importantes. También, por supuesto, dentro del entorno científico de la Tesis, se hará hincapié en los Proyectos de Investigación que han permitido financiarla. En definitiva, el objetivo principal de esta sección es mostrar que la memoria que se presenta constituye la recopilación ordenada e hilvanada de una producción científica realizada durante cinco años.

- Proyectos de investigación que financian la Tesis

Diseño de un Sistema de propulsión controlado por lógica borrosa para un vehículo de emisión cero (DPI2005-01065)

Entidad financiadora: Ministerio de Educación y Ciencia

Entidades participantes: Universidad de Huelva

³ El problema de suministro de combustible en la pila de combustible es conocido en las fuentes bibliográficas internacionales como *fuel starvation phenomenon*.

Duración: 15/10/2005 a 15/10/2006

Subvención: 11.900 €

Investigador responsable: Dr. José Manuel Andújar Márquez

Sistema híbrido generador de energía eléctrica autónomo, continuo y no contaminante
(DPI2007-62336)

Entidad financiadora: Ministerio de Educación y Ciencia

Entidades participantes: Universidad de Huelva

Duración: 01/10/2007 a 30/09/2010

Subvención: 121.000 €

Investigador responsable: Dr. José Manuel Andújar Márquez

Diseño, desarrollo, construcción y pruebas de un sistema generador de energía eléctrica basado en pilas de combustible, integrando un depósito de hidrógeno y un electrolizador para la producción del mismo

Empresa financiadora: Hynergreen Technologies, S.A.

Entidades participantes: Universidad de Huelva

Duración: 01/07/2006 a 31/12/2008

Cuantía del proyecto: 208.800 €

Investigador responsable: Dr. J. M. Andújar Márquez

- Producción científica por capítulos

Capítulo 2. Sistemas de Pilas de Combustible

Cuando se abordó la realización de este capítulo se pudo comprobar que no existían referencias disponibles que permitieran realizar un recorrido por la historia de las pilas de combustible, sus tipos, características y usos. Más aún cuando se pretendía recorrer una historia

de casi dos siglos llegando hasta reflejar el estado del arte en el momento actual. Dada la situación comentada, el capítulo ha sido escrito en base a un exhaustivo trabajo de investigación bibliográfica, ya que han sido consultadas más de 200 referencias, de las cuales han sido incluidas como bibliografía 96. Además, también han sido consultados multitud de portales de Internet de Empresas, Universidades, Centros de Investigación, etc. Fruto de este trabajo de meses es la publicación siguiente:

J. M. Andújar, F. Segura. “Fuel Cells History and Update. A walk along Two Centuries”. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. Artículo en revisión. **Índice de calidad:** Esta revista está incluida en el primer tercio del JCR. Es la nº 2 del mundo en la categoría *Energy & Fuels*, y su último índice de impacto disponible (2007) es de 3,774.

Capítulo 3. Modelado del Sistema Pila de Combustible – Convertidor DC/DC

El enfoque con el que se abordó este capítulo aportaba dos novedades fundamentales: 1) se pretendía encontrar un modelo de la pila de combustible apto para control, esto es, en forma de modelo de estado de señales eléctricas, o fácilmente relacionables con variables eléctricas; y 2) la planta a controlar se abordaba como un conjunto (pila de combustible + convertidor) que debía proporcionar una tensión regulada y que pudiera ser gobernado por una señal de control única, el ciclo de servicio del convertidor. De esta forma, se podía tener el control del punto de trabajo de la pila de combustible sin necesidad de tener que actuar sobre ella. La novedad del trabajo permitió que enseguida que se obtuvieron resultados, éstos pudieron ser publicados:

J. M. Andújar, F. Segura, M. J. Vasallo. “A Suitable Model Plant for Control of the Set Fuel Cell-DC/DC Converter”. *Renewable Energy*, Vol. 33(4) pp. 813-826, 2008. **Índice de calidad:** Esta revista está incluida en el primer tercio del JCR en la categoría *Energy & Fuels*. Es la revista oficial de la WREN (World Renewable Energy Network) y su último índice de impacto disponible (2007) es de 1,213.

J. M. Andújar, F. Segura, M. J. Vasallo. “Fuel Cell Control Systems: A Practical Case”. *International Congress of Renewable Energy and Power Quality (ICREPO)*, Vol. 1, pp. 89-90, Seville (Spain), 2007. ISBN (libro): 978-84-611-4706-9. **Índice de calidad:** Congreso

internacional organizado por la *European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality*.

Capítulo 4. *Sistema Híbrido de Pila de Combustible: Implementación y Testeo*

Este es un capítulo fundamentalmente de ingeniería, ya que está dedicado al diseño y construcción de un prototipo experimental de sistema híbrido (pila de combustible + baterías) completo, esto es, con todos los acondicionadores de potencia necesarios, los cuales también han sido diseñados y construidos. El capítulo está planteado para cubrir todas las fases hasta llegar al producto acabado, es decir, además de la construcción del prototipo se incluye también el testeo de su funcionamiento con todas las pruebas experimentales precisas. La configuración del capítulo como desarrollo total y pruebas de un prototipo experimental a partir de unos requerimientos de demanda en la carga, ha permitido generar publicaciones muy atractivas:

F. Segura, E. Durán, J. M. Andújar. “Design, building and testing of a stand alone fuel cell hybrid system”. *Journal of Power Sources*. Aceptado para su publicación: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.12.111>. **Índice de calidad:** Esta revista está incluida en el primer tercio del JCR. Es la nº 5 del mundo en la categoría *Energy & Fuels*, y su último índice de impacto disponible (2007) es de 2,809.

M. J. Vasallo, F. Segura, E. Durán, J. M. Andújar. “Sizing of fuel cell based power back-up systems using HOMER tool”. *International Youth Conference on Energetics 2007 (IYCE '07)*. Vol. 1, pp. 215-216, Budapest (Hungary), 2007. ISBN: 978-963-420-908-9. **Índice de calidad:** Congreso internacional organizado para dar a conocer las mejores Tesis doctorales sobre sistemas de energía renovable.

F. Segura, E. Durán, J. M. Andújar, J. Brey, C. García. “Design and verification methodology reconfigurable for the loads of fuel cells”. *Fuel Cells Science and Technology (FUCE' 08)*. FUEL CELLS SCIENCE AND TECHNOLOGY 2008, Copenhagen (Denmark). **Índice de calidad:** Congreso internacional organizado por Elsevier y dedicado de forma específica a las pilas de combustible: tecnologías, sistemas y aplicaciones.

Capítulo 5. *Control en Corriente del Sistema Híbrido de Pila de Combustible*

El contenido de este capítulo ha sido especialmente arduo, y por ser el último de la Tesis, la mayor parte de su producción científica esperable está aún por llegar. Los resultados del capítulo han permitido poner en valor el prototipo experimental construido, ya que el diseño, construcción y pruebas del controlador de corriente implementado, permite regular la potencia demandada a la pila en todo momento. Esto es especialmente importante, ya que la planta pila de combustible + convertidor DC/DC puede ser repetida tantas veces como sea necesario para conseguir escalados de potencia, donde en cada circuito de control de cada planta se puede elegir la potencia de trabajo.

La exhaustiva revisión bibliográfica (escasísima en algunas configuraciones de control de corriente) realizada, los conocimientos teóricos de control de convertidores adquiridos así como la experiencia alcanzada en implementaciones prácticas y testeo, han permitido enviar las publicaciones siguientes:

J. M. Andújar, E. Durán, F. Segura. “Optimal Interface based on Power Electronics in Distributed Generation Systems for Fuel Cells”. *Fuel Cells*. Artículo en revisión. **Índice de calidad:** Esta revista está incluida en el primer tercio del JCR. Es la nº 3 del mundo en la categoría *Energy & Fuels*, y su último índice de impacto disponible (2007) es de 3,273.

F. Segura, J. M. Andújar. “Current control techniques for fuel cell hybrid systems: a critical review and a practical case”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Artículo en revisión. **Índice de calidad:** Esta revista está incluida en el primer tercio del JCR. Es la nº 3 del mundo en la categoría *Automation & Control Systems*, y su último índice de impacto disponible (2007) es de 2,216.

F. Segura, J. M. Andújar, E. Durán. “AC and DC output fuel cell hybrid system: design, building and testing”. *13th International European Power Electronics Conference and Exhibition (EPE 2009)*. Aceptado para su defensa en el Congreso en Septiembre de 2009. **Índice de calidad:** Congreso internacional anual organizado por la European Power Electronics Conference.

El trabajo realizado con convertidores DC/DC durante el transcurso de la Tesis, ha originado la adquisición de un gran conocimiento sobre este tipo de acondicionadores de potencia en sus diferentes topologías. Es más, previo a los desarrollos e implementaciones físicas, se han realizado multitud de simulaciones en las que se han probado diferentes configuraciones, algunas de las cuales fueron implementadas y otras no. Fruto de este *know-how* ha sido el diseño e implementación de un conjunto de algoritmos que permiten calcular el ahorro de costes y la mejora del rendimiento de instalaciones de energía renovable mediante la paralelización de convertidores. Si bien este trabajo no forma parte como tal de esta Tesis, sino que está englobado en otra en curso dentro del Grupo de Investigación, no es menos cierto que se ha colaborado en él de forma decisiva y se han utilizado sus resultados para evaluaciones previas. Una aplicación específica de este trabajo que permite la optimización de instalaciones solares fotovoltaicas ha dado lugar a la publicación siguiente:

M. J. Vasallo, J. M. Andújar, F. Segura. “A Methodology for Optimizing Stand-alone PV System Size using Parallel-connected DC/DC Converters”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55(7), pp. 2664-2673, 2008. **Índice de calidad:** Esta revista está incluida en el primer tercio del JCR. Es la nº 3 del mundo en la categoría *Automation & Control Systems*, y su último índice de impacto disponible (2007) es de 2,216.

Capítulo 2. Sistemas de Pilas de Combustible

Este capítulo está estructurado en cuatro secciones. La primera de ellas realiza una revisión histórica de las pilas de combustible. Se recorre el camino desde la propia invención de la celda de combustible⁴, hasta el momento actual, donde se analizan los últimos modelos de vehículos basados en pilas de combustible que pueden ser adquiridos por el consumidor. La historia enseña, una vez más, que dispositivos percibidos por el gran público como inventos recientes, son realmente el fruto de muchos años (más de un siglo y medio en este caso) de arduas investigaciones. Como casi siempre suele ocurrir, si bien los principios teóricos se establecen con cierta celeridad, la falta de tecnología disponible retrasa su introducción en el mercado.

En la segunda sección se describen los principios básicos de funcionamiento de las celdas de combustible y se analizan los distintos tipos de pilas de combustible⁵. Además, se revisan los sistemas de pilas de combustible⁶ clasificados por su aplicación, y los que están disponibles comercialmente según los fabricantes. Esta sección finaliza con una comparativa de las pilas de combustible respecto de los motores diesel, las baterías y ultracondensadores (o supercondensadores). La tercera sección está dedicada a los sistemas híbridos, esto es, la integración de diferentes sistemas en torno a una pila de combustible para conformar la solución

⁴ **Celda de combustible:** Ensamblado integrado por una capa de electrolito en contacto con un ánodo y un cátodo a ambos lados. Se analiza con detalle en la sección 2.2.

⁵ **Pila de combustible:** Unión de varias celdas de combustible montadas modularmente hasta conseguir la potencia deseada. Se analiza con detalle en la sección 2.2.

⁶ **Sistema de pila de combustible:** Pila de combustible equipada con sistemas encargados de regular el flujo de gases y de fluidos, la temperatura o el nivel de humedad. También puede llevar un reformador de combustible si es necesario, e incluso, algunos sistemas de pilas incluyen el sistema de acondicionamiento de potencia. No obstante lo anterior, usualmente los términos de pila de combustible y sistema de pila de combustible se emplean indistintamente para indicar lo mismo. Por lo tanto, en la práctica, el término pila de combustible puede indicar tanto la agrupación de celdas como el sistema completo. Los sistemas de pilas de combustible se analizan con detalle en la sección 2.3.

más efectiva para generar potencia eléctrica, mover un vehículo, etc. La cuarta y última sección recoge las principales conclusiones de este capítulo y comenta las ideas fundamentales extraídas de las referencias bibliográficas consultadas.

2.1 Reseña histórica de los sistemas de pilas de combustible

Existen controversias sobre quién descubrió el principio de funcionamiento de las pilas de combustible. Así, desde el Departamento de Energía de los Estados Unidos, en su publicación “The Birth of the Fuel Cell 1835 – 1845”, [1] en *Power for the 21st Century*, se asegura que fue el químico alemán Christian Friedrich Schönbein⁷ (Figura 2.1) quien, en 1838, llevó a cabo la primera investigación científica sobre el fenómeno de una celda de combustible, cuyo trabajo fue publicado en *Philosophical Magazine* en la edición de Enero de 1839. Por el contrario, en otros trabajos [2], se afirma que fue Sir William Robert Grove⁸ (Figura 2.2) quien introdujo el concepto de pila de hidrógeno. Grove descubrió que sumergiendo dos electrodos de platino por uno de sus extremos en una solución de ácido sulfúrico y los otros dos extremos,

⁷ **Christian Friedrich Schönbein** nació el 18 de Octubre de 1799 en Metzingen, Swabia (Alemania) y murió el 29 de Agosto de 1868, en Sauerberg (Alemania). Con trece años trabajó de aprendiz para una empresa químico-farmacéutica en Böblingen. Pasados los años, superó las pruebas para ser profesor de química en la Universidad de Tübingen. Es en 1828, cuando empieza a trabajar en la Universidad de Basel, donde permanece hasta su muerte. Desde la Universidad de Basel, es donde escribe sus cartas a Michael Faraday. Concretamente, en la carta que Schönbein escribe a Faraday el 4 de Abril de 1840, se puede leer literalmente “(...) *Our friend Grove wrote me the other day communicating to me some very interesting results of his later researches with which you are no doubt acquainted. What do you think about the fact that the transfer or oxidation of particles in the voltaic arc is definite for a definite current?. Important as such fact is I cannot yet understand it, that is to say, I cannot conceive that by the simple oxidation of the positive electrode the current can be conducted in the same way as by electrolysis, both actions being so very different from each other (...).*” A lo que responde Faraday en su carta del 24 de Abril desde Brighton: “(...) *Yours doubts of Grove announcement of a definite transfer matter across air coincide with my own. I cannot deny it but it is so peculiar that it requires the most convincing proofs (...).*”

⁸ **Sir William Robert Grove** nació el 11 de Julio de 1811 en Swansea (Inglaterra) y murió el 1 de Agosto de 1896 en Londres. Fue abogado, juez y científico físico. Anticipó la teoría de la conservación de la energía y fue pionero en la tecnología de las pilas de combustible. Fue hijo único de un matrimonio cuyo padre era magistrado y diputado en la cámara de los Lord de Glamorgan. Su educación corrió a cargo de tutores privados antes de ingresar en el Brasenose College (Oxford) para estudiar Humanidades, por lo que su interés científico pudo ser cultivado por el matemático Baden Powell. En 1835 entra a formar parte de la Royal Institution y funda la Swansea Literary and Philosophical Society.

separadamente sellados, en recipientes de oxígeno e hidrógeno, se detectaba que una corriente constante fluía entre los electrodos. Los contenedores sellados contenían agua junto con los gases respectivos. Grove observó que el nivel del agua subía en ambos tubos a medida que la corriente fluía. El siguiente paso fue darse cuenta de que combinando un número de pares de electrodos conectados en serie, obtenía una mayor caída de tensión, creando así lo que él llamó *a gas battery*, es decir la primera pila de combustible.



Figura 2.1: Retrato de Christian Friedrich Schönbein



Figura 2.2: Retrato de Sir William Robert Grove.

Por otro lado, en [3] se afirma que fue en 1800 cuando los científicos británicos Sir Anthony Carlisle⁹ y William Nicholson¹⁰ describieron el proceso de la electrolisis del agua (descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno empleando electricidad). Ambos científicos

⁹ **Sir Anthony Carlisle** nació el 15 de Febrero de 1768 en Stillington (Inglaterra) y murió el 2 de Noviembre de 1842 en Londres. Trabajó como médico cirujano. En 1804 fue elegido miembro de la Royal Society.

¹⁰ **William Nicholson** nació en 1753 (se desconoce el día y el mes) y murió el 21 de Mayo de 1815 en Bloomsbury (Inglaterra). Fue un célebre químico del que también se conoce su faceta de traductor, periodista, editor, científico e inventor. Después de salir del colegio, realizó dos viajes como aspirante a oficial de marina en la compañía británica British East India. En 1775 se traslada a Amsterdam donde trabaja como agente de venta de alfarería. En su regreso a Inglaterra, colabora con Thomas Holcroft desarrollando su talento como periodista. En 1781 publica su trabajo “An Introduction to Natural Philosophy” y poco más tarde la traducción de “Elements of the Newtonian Philosophy” de Voltaire. En 1784 fue secretario de la General Chamber of Manufacturers de Gran Bretaña. Se considera el inventor del hidrómetro (instrumento que permite medir la densidad relativa de los líquidos respecto a la del agua). En 1797 empieza a publicar en el *Journal of Natural Philosophy, Chemistry and the Arts*, comúnmente conocido como *Nicholson's Journal*. En 1799 abre un colegio en el barrio londinense de Soho donde enseña filosofía y química. En 1788 escribió “First Principles of Chemistry”. En 1800 descubre junto con Anthony Carlisle el proceso de la electrolisis. En 1795 edita la Enciclopedia Británica.

se consideran los primeros en producir una reacción química empleando electricidad. Para su experimento emplearon una pila de Volta. Conectaron un par de hilos conductores por un extremo a los electrodos de la pila mientras el otro extremo de cada conductor estaba sumergido en una solución salina. El agua actuaba como conductor y en consecuencia, hidrógeno y oxígeno gas se acumulaban en los extremos de los conductores. En [4] se pueden leer un conjunto de cartas escritas por Schönbein y Faraday entre 1836 y 1862. Dichas cartas reflejan los avances científicos que alcanzaba Schönbein durante su estancia en Bale y que ponía en conocimiento de su admirado Faraday. El editor de estas cartas, Georg W. A Kahlbaum recibe dichas cartas por parte de la sobrina de Faraday y de la familia de Schönbein. En estas cartas, en concreto en las páginas 78 y 82, se hace visible la incredulidad de ambos científicos hacia los experimentos que Grove estaba llevando a cabo. Comentan de forma explícita que no conciben la forma en la que éste último era capaz de generar corriente mediante oxidación de un electrodo positivo, de la misma manera que se produce la electrolisis. De esta forma, se puede casi afirmar que la idea original de pila de combustible proviene de Grove y no de Schönbein.

En 1889, Ludwing Mond¹¹ y su ayudante Carl Langer, describieron el proceso para la obtención del níquel (proceso de Mond) con una batería alimentada de gas que suministraba 6,5 mA/cm² (de área del electrodo) a 0,73 V, con electrodos perforados de platino [5]. En 1893, Friedrich Wilhelm Ostwald¹², considerado fundador de la química-física, determinó

¹¹ **Ludwing Mond** nació el 7 de Marzo de 1839 en Kassel (Alemania) y murió el 11 de Diciembre de 1909 en Londres. Estudió Ciencias Químicas en la Universidad de Marburg y de Heidelberg, pero nunca llegó a finalizar sus estudios. Trabajó en el sector de la industria, hasta que en 1862 se traslada a Widnes (Inglaterra) para trabajar en la compañía John Hutchinson & Co. Aquí patenta un método para obtener sulfuro en base a los subproductos del proceso Leblanc (proceso para obtener la soda). En 1872, Mond conoce a Ernest Solvay con quien desarrolla un proceso mejor para obtener la soda (el llamado proceso de Solvay). Años más tarde, junto con John Brunner crea la compañía Brunner Mond & Company, que fue la mayor productora de soda en el mundo durante 20 años. No obstante, Mond continuó investigando nuevos procesos químicos. Descubrió el carbonilo de níquel (tetracarbonylnickel), un componente desconocido hasta el momento, que podía descomponerse fácilmente en níquel puro a través del denominado proceso de Mond. Fundó la compañía Mond Nickel, para la que se traía el mineral desde las minas de Canadá hasta Clydach (Gales, Gran Bretaña).

¹² **Friedrich Wilhelm Ostwald** nació el 2 de Septiembre de 1853 en Riga (Letonia) y murió el 3 de Abril de 1932 en Grossbothen (Alemania). Fue químico, profesor universitario y filósofo. Obtuvo la nacionalidad alemana, y fue premio Nobel de Química en 1909. Cursó estudios en la Universidad Estatal de Tartu, donde se graduó en 1875, y trabajó hasta 1881. De 1881 hasta 1887 fue profesor del Instituto Politécnico de Riga, cuando se traslada a la Universidad de Leipzig como profesor de física-química. Aquí funda el Instituto Ostwald (primer instituto dedicado

experimentalmente, la interconexión de los distintos componentes de una pila de combustible: electrodos, electrolito, agentes oxidante y reductor, aniones y cationes [6]. En su momento, Grove había especulado que la acción en su batería de gas tenía lugar en la zona de contacto entre electrodo, gas y electrolito, pero quedaba aún bastante por explicar. Ostwald, recurriendo a su trabajo pionero relacionado con las propiedades físicas y las reacciones químicas en las celdas de combustible, resolvió el puzzle de la batería de gas de Grove. Sus investigaciones sobre la química de las pilas de combustible fue el trabajo preliminar para las investigaciones posteriores en este campo. En 1896, William Jacques [7] desarrolla la primera pila de combustible con utilidad práctica, y en 1900, Walther Nernst¹³, utiliza por primera vez circonio como electrolito sólido. En 1921, Emil Baur [8] construye la primera pila de combustible de carbonato fundido¹⁴.

al estudio de la físico-química). Formuló la ley de Ostwald que rige los fenómenos de disociación en las disoluciones de electrolisis. En 1900 descubre un procedimiento de preparación de ácido nítrico por oxidación del amoníaco, facilitando la producción en masa de fertilizantes y de explosivos por Alemania durante la I Guerra Mundial. Ideó un viscosímetro que aún se sigue utilizando para medir la viscosidad de las disoluciones. En el campo de la filosofía, destaca la aportación de la doctrina energética que intenta explicar la mayoría de los fenómenos en función de su energía física. Entre sus obras, destacan “Filosofía Natural” (1902) y “Ciencia del Color” (1923). Obtuvo el premio Nobel por sus investigaciones sobre la catálisis, los principios fundamentales que gobiernan los equilibrios químicos, la velocidad de reacción y el equilibrio químico.

¹³ **Walther Nernst** nació el 25 de Junio de 1864 en Briesen (Prusia) y murió el 18 de Noviembre de 1941 en Ober-Zibelle (Alemania). Físico y químico con Premio Nobel en 1920. Estudió en las Universidades de Zúrich, Berlín, Graz y Wuzburgo. A partir de 1891 ejerce como profesor de física en la Universidad de Gotinga, donde en 1895 funda el Instituto de Química, Física y Electroquímica. En 1905 se traslada a la Universidad de Humboldt (Berlín), como profesor y director del Instituto de Química-Física. En 1922 es nombrado presidente del Instituto Fisicotécnico de Berlín-Charlottenburg, cargo que deja en 1933 y se dedica a la electroacústica y astrofísica. De entre sus conocidas aportaciones, destacan la ecuación de Nerst (ecuación que permite conocer el potencial termodinámico entre los electrodos de una pila de combustible), el teorema del calor, el concepto de entropía o la tercera ley de la termodinámica. Desarrolló también una teoría osmótica para explicar y determinar el potencial entre los electrodos de una pila de concentración y formuló la ley de distribución de una materia entre dos fases dadas. Inventó la llamada lámpara de Nernst, cuyo filamento (constituido por óxidos de circonio e itrio) se hace conductor al calentarse, pudiendo alcanzar temperaturas superiores a 1000 °C respecto a otras lámparas. Eran más eficaces que las antiguas lámparas de arco de carbón y solían emplearse como fuente de rayos infrarrojos. Con sus estudios de electroacústica y astrofísica, inventó una microbalanza, así como un piano eléctrico en colaboración con las compañías Bechstein y Siemens. Para ello utilizó amplificadores de radio. En su honor se bautizó al asteroide Nernst, descubierto el 26 de Septiembre de 1992 por Freimut Bögmgen y Ludtz D. Schmadel.

Hasta el momento se han presentado, cronológicamente, una serie de nombres asociados a descubrimientos concretos. Merece la pena hacer ahora una pausa para resumir cómo ha ido avanzando el concepto de pila de combustible [7].

La batería de gas de Grove constaba de 50 monoceldas con electrodos bidimensionales de platino de 31,75 mm de anchura. La observación más importante de Grove fue la necesidad de una notable área de acción entre el gas, electrolito y electrodo. Mond y Langer fueron los primeros en perfeccionar la pila de Grove. Los electrodos eran porosos y con forma tridimensional, creando así la estructura de lo que serían las nuevas pilas de combustible. Con la llegada del carbón como combustible, Mond y Langer se dieron cuenta de que éste se podía utilizar como fuente de hidrógeno para las pilas de combustible, en contra de lo que Grove sostenía de que sólo se podía emplear, como combustible, hidrógeno puro. Mond, Langer y Ostwald coincidían en que el hidrógeno podría convertirse en un combustible tan común como el carbón y que con el siglo XX, comenzaría la denominada *Era de la Combustión Electroquímica*, donde la máquina térmica con ciclo de Rankine se sustituiría por las pilas de combustible (mucho más eficientes y libres de contaminación). Pero aún en el siglo XXI, ésto no es todavía una realidad. Los destacados investigadores de la *Era del Carbón* en el campo de las pilas de combustible, fueron Jacques y Baur. Jacques fue el primero en construir sistemas de mayor potencia: una pila de combustible de 1,5 kW con 100 celdas tubulares¹⁵ y una pila de 30 kW.

A principios de 1933, con el trabajo de Francis Thomas Bacon¹⁶ (Figura 2.3), se puede

14 Pilas de combustible de carbonato fundido: Son un tipo de pilas de combustible que emplean un electrolito compuesto por una mezcla de carbonatos de litio y de potasio. Trabajan a altas temperaturas, por encima de 600 °C. La clasificación de las pilas se analiza en la subsección 2.2.2.

15 Celda tubular: El ensamblado de electrolito y electrodos para formar una celda de combustible puede realizarse de dos formas básicas, con estructura planar o tubular. En la estructura planar se disponen láminas unidas unas con otras. En la estructura tubular se disponen cilindros concéntricos donde el electrolito está rodeado por los electrodos. Estos conceptos se detallan en la subsección 2.2.1.

16 Francis Thomas Bacon nació el 21 de Diciembre de 1904 en Ramsden Hall, Billericay, Essex (Inglaterra) y murió el 24 de Mayo de 1992. Ingeniero, descendiente directo de Sir Nicolas Bacon, fue educado en el Eton College y el Trinity College, en Cambridge. Posteriormente, trabaja como aprendiz para la compañía C. A. Parsons and Company dedicada a la fabricación de turbinas. En Enero de 1940, se traslada al laboratorio King's College London, donde desarrolla una doble pila formada por dos unidades: una unidad para generar hidrógeno y oxígeno (proceso de electrolisis) y la otra que actuaba propiamente como una pila de combustible (produciendo electricidad). El

decir que la pila de combustible alcanzó su adolescencia. Bacon desarrolló la primera pila de combustible de hidrógeno y oxígeno con utilidad práctica. Esta pila convertía aire e hidrógeno directamente en electricidad mediante procesos electroquímicos. Empezó investigando las pilas alcalinas (ver apartado 2.2.2). En 1939, construye una celda con electrodos de níquel que trabajaba a altas presiones (200 atm) para evitar que el electrolito inundara los poros de los electrodos. Durante la II Guerra Mundial, Bacon desarrolla una pila de combustible para ser usada en los submarinos de la Royal Army. En 1958 presenta a la Britain's National Research Development Corporation, una pila alcalina con electrodos de 25,4 mm de diámetro. A pesar del alto coste, las pilas de Bacon demostraron ser lo suficientemente fiables como para atraer la atención de Pratt & Whitney, la compañía que adquirió la patente de los trabajos de Bacon para la pila de combustible que llevaba la nave espacial Apollo. Bacon deseaba emplear metales comunes (no metales nobles), un entorno no corrosivo (para aumentar el tiempo de vida máximo) y la mayor densidad de corriente con la mayor tensión entre los electrodos (mayor eficiencia). En 1959, con apoyo de la compañía Marshall Aerospace, presenta públicamente una pila de 40 celdas de 5 kW y eficiencia del 60%.

Sobre 1950, el teflón (politetrafluoretileno o ptfe) empieza a estar disponible. Se utilizó por primera vez en pilas de electrodos de platino con electrolito ácido y de electrodos de carbón con electrolito alcalino. El uso de este importante material permitió desarrollar las pilas de electrolito acuoso hasta su forma actual. En 1955, Thomas Grubb, químico que trabajaba para la compañía General Electric (GE), modificó el diseño original de pila de combustible, para ello, usó como electrolito una membrana de ión-intercambiable de poliestireno sulfatado. Tres años después, otro químico de GE, Leonard Niedrach, concibe una forma de depositar platino sobre la membrana, actuando así como catalizador para las reacciones de oxidación de hidrógeno y reducción de oxígeno. GE desarrolla su tecnología para la NASA y McDonnell Aircraft durante el programa Gemini. En 1959, el equipo dirigido por Harry Ihrig construye una pila de

inconveniente de este sistema era la alta temperatura y presión de operación así como la naturaleza corrosiva de los componentes químicos. En 1946, se traslada al Department of Colloid Science, en la Universidad de Cambridge. Aquí, el equipo de Bacon, desarrolla muestras de obleas porosas de níquel que utilizó para desarrollar electrodos con grandes poros en el lado en contacto con el gas y poros finos en el lado en contacto con el electrolito. Esto permitía conseguir una interfaz electrodo-electrolito más estable. Durante los últimos años de su vida, Bacon fue asesor de la firma Energy Conversion Limited and Johnson Matthey. Fue socio fundador de la Fellowship of Engineering y miembro honorífico del European Fuel Cell Group.

combustible de 15 kW que se emplea en un tractor de Allis-Chalmers (Figura 2.4). Consistía en un tractor de 20 caballos, con una pila de combustible de 1008 celdas de 1 V cada celda y electrolito de hidróxido de potasio. Como combustible empleaba una mezcla de gases, principalmente propano e hidrógeno comprimido, el oxígeno actuaba como agente oxidante. Este tractor se encuentra en el Smithsonian Institute [9].



Figura 2.3: Francis Thomas Bacon y su pila de hidróxido, 1959.



Figura 2.4: Tractor Allis Chalmers con pila de combustible, 1959.

A principios de los sesenta, la atención giró en torno a las pilas de electrolito ácido y catalizador de platino en dos formas diferentes. Una empleaba electrolito polimérico, lo que la hacía simple y fiable. La otra forma fue desarrollada para intentar usar directamente combustibles derivados del carbón, algo que no era posible en las pilas alcalinas. Este tipo de pilas permitían trabajar a altas temperaturas (150 °C – 200 °C). De forma paralela, los daneses G. H. J. Broers y J. A. A. Ketelaar [10],[11] abandonan la línea de los electrolitos óxidos y optan por las sales fundidas. En 1960 informan haber trabajado durante seis meses con una pila de combustible con un electrolito compuesto de una mezcla de carbonatos de litio, sodio y/o potasio, impregnados sobre un disco poroso de magnesio, cuya temperatura de operación alcanza los 650 °C.

En 1961, G. V. Elmore y H. A. Tanner dan a conocer una pila de ácido fosfórico [12] en su trabajo “Intermediate Temperature Fuel Cells”. El electrolito estaba formado por una mezcla de un 35% de ácido fosfórico y un 65% de polvo de silicio pegado al teflón. Observaron que a diferencia de las pilas de ácido sulfúrico, en éstas, la reducción electroquímica no se producía

durante el funcionamiento de la propia pila. Además, esta pila podía trabajar directamente con aire y no con oxígeno puro. Afirmaron que su pila de ácido fosfórico podía trabajar durante seis meses a 90 mA/cm^2 y $0,25 \text{ V}$ sin ningún deterioro aparente. En 1962, Weissbart y Ruka [13] consiguen hacer trabajar una pila de combustible a una temperatura de operación de $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ y adaptan el óxido cerámico conductor impregnado de circonio de la pila de Nerst a un electrolito sólido. En 1965, el Centro de Desarrollo e Investigación de Equipos de Movilidad de la Armada Estadounidense en Fort Belvoir (Virginia), prueba varias pilas de carbonato fundido fabricadas por Texas Instruments.

Las pilas de combustible desarrolladas desde 1970 han estado caracterizadas por los aspectos siguientes: la eliminación de las limitaciones de difusión en los electrodos para obtener una mayor área de acción (como anunció Grove), la eliminación de los costes de los catalizadores, el aumento de las prestaciones y la mejora del tiempo de vida. También se ha extendido el uso de combustibles derivados del petróleo, empleando la correspondiente unidad de reformado¹⁷. De esta forma, y aprovechando el poder calorífico de estos combustibles, la eficiencia de las pilas de ácido fosfórico alcanza el 45%, las de óxido sólido el 50% y en las de carbonato fundido¹⁸ el 60%. Un siglo después de la predicción de Ostwald, la alta eficiencia, combinada con las bajas emisiones de gases nocivos a la atmósfera, hacen que las pilas de combustible sean firmes candidatas a revolucionar el sector de la generación de potencia eléctrica. La potencia específica de los sistemas de pilas de combustible ha aumentado considerablemente en los últimos veinte años. En concreto, en dos órdenes de magnitud en las pilas alcalinas de hidrógeno puro.

En 1990, el Jet Propulsion Laboratory de la NASA junto con la Universidad del Sur de California, desarrollan una pila de metanol directo. En 2007, el fabricante de vehículos Honda presenta el modelo FCX Clarity en el salón del automóvil de Los Ángeles. Dicho modelo está disponible para el consumidor desde el verano de 2008. Se trata del primer vehículo con pila de

¹⁷ El **reformado con vapor** es un método para la obtención de hidrógeno a partir de hidrocarburos. Este proceso consiste en exponer por ejemplo gas natural, de alto contenido en metano, con vapor de agua a alta temperatura y presión. Se obtiene como resultado de la reacción química hidrógeno y dióxido de carbono, y dependiendo del compuesto reformado, también monóxido de carbono. Para el caso de gas natural la reacción es $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$. Debe quedar claro que sea cual sea el hidrocarburo empleado, el proceso de obtención de hidrógeno por reformado es contaminante.

¹⁸ Como ya se ha comentado anteriormente, el análisis de los distintos tipos de pilas se realiza en la subsección 2.2.2.

combustible de plataforma exclusiva en el mundo. En la subsección 2.2.3 se pueden consultar las Tablas 2.2, 2.3 y 2.4 que recogen las características básicas de los automóviles, autobuses y vehículos especiales basados en pilas de combustible desarrollados hasta el momento. La Figura 2.5 esquematiza de forma gráfica la evolución temporal de las pilas de combustible.

2.2 Pilas de combustible: características y clasificación

En esta sección se describen las pilas de combustible, sus características y clasificación, que se hace en función de su modo de funcionamiento, del tipo de combustible empleado, así como de las posibles aplicaciones de cada una de ellas [14].

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten directamente la energía química de un combustible en energía eléctrica, consiguiendo una alta eficiencia al no existir pasos intermedios en la transformación. Un gran valor añadido de este proceso de conversión es que no provoca impacto al medio ambiente. Una pila de combustible no posee las limitaciones termodinámicas de las máquinas térmicas con ciclo de Carnot [15] cuya eficiencia termodinámica (2.1) viene determinada por la diferencia de temperatura entre el foco caliente (T_H) y el foco frío (T_L) entre los que trabaja la máquina térmica.

$$\eta_{term} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (2.1)$$

La Figura 2.6 muestra los valores típicos de porcentajes de trabajo útil y pérdidas producidas en una planta de generación eléctrica de tipo central térmica.

En una pila de combustible, en el proceso de conversión electroquímico, los reactivos y los productos salen del dispositivo a presión y temperatura ambiente, por lo que el flujo de energía térmica es cero (Figura 2.7). Esto es, la transferencia de calor (Q_o) tiene lugar a temperatura ambiente (T_o).

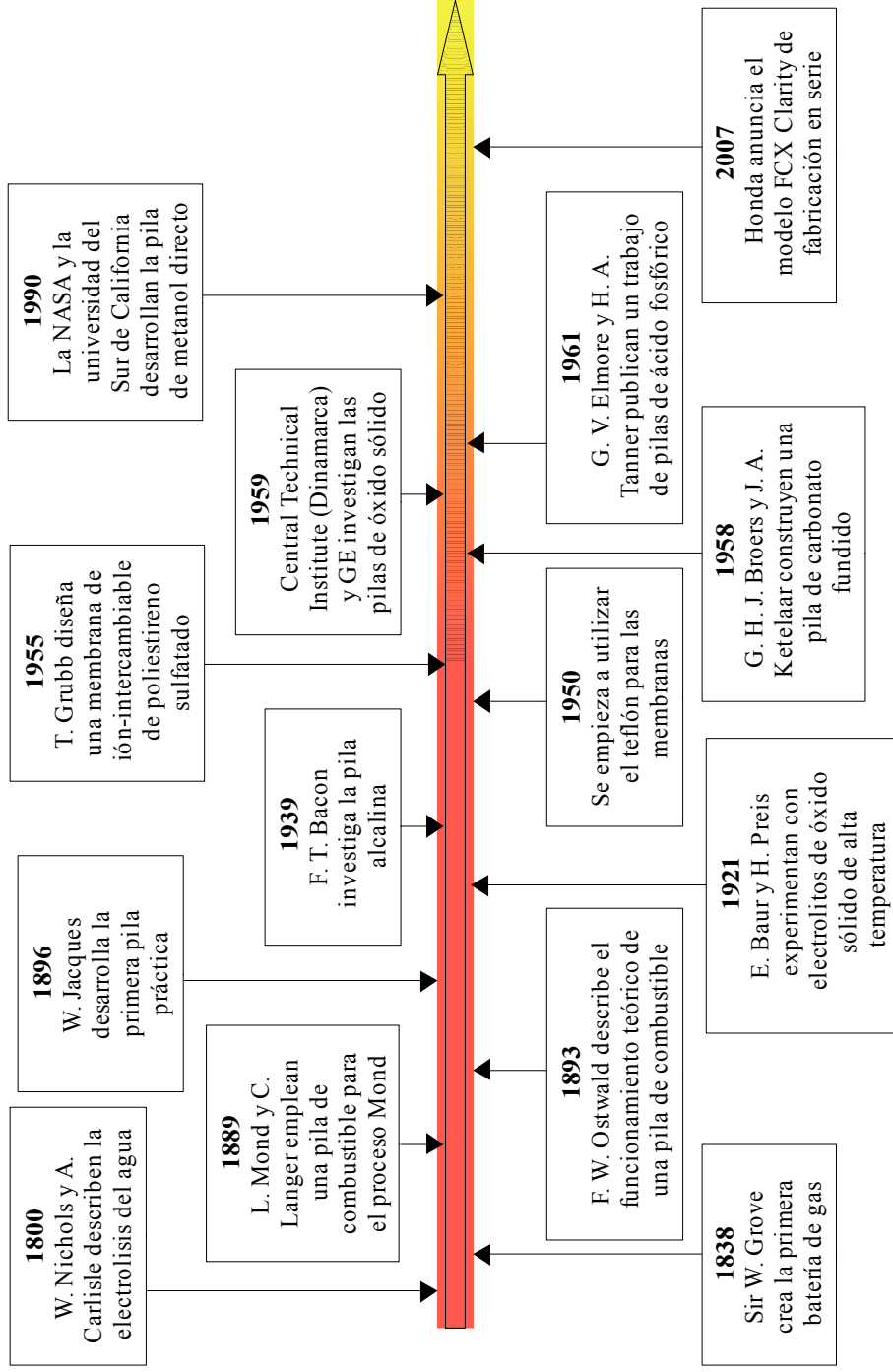


Figura 2.5: Evolución histórica de las pilas de combustible.

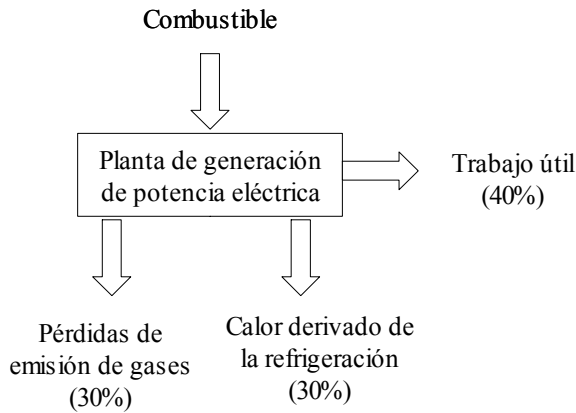


Figura 2.6: Relación de eficiencia en una planta de generación de potencia eléctrica.

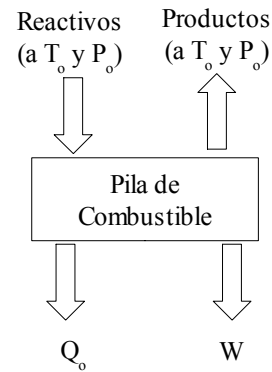


Figura 2.7: Esquema de funcionamiento básico de una pila de combustible.

La primera ley de la termodinámica establece que la cantidad de trabajo útil por unidad de tiempo \dot{W} se calcula a partir de (2.2).

$$\dot{W} = -\dot{m} \cdot (\Delta H^o + \dot{Q}_o) \quad (2.2)$$

Donde la variación de entalpía¹⁹ en condiciones estándar ΔH^o coincide con la variación de entalpía de formación entre reactivos y productos. El flujo de calor \dot{Q}_o es función de la temperatura T_o , el flujo de masa \dot{m} , la variación de entropía²⁰ ΔS^o , y la producción de entropía en la propia celda de combustible $\prod FC$, ecuación (2.3):

$$\dot{Q}_o = T_o \cdot [\dot{m}(-\Delta S^o) + \prod FC] \quad (2.3)$$

La potencia máxima extraída \dot{W}_{max} , se calcula considerando que la producción de

19 La **variación de entalpía** expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, o, lo que es lo mismo, la cantidad de energía que tal sistema puede intercambiar con su entorno.

20 La **variación de entropía** muestra la variación del orden molecular ocurrido en una reacción química. Si la variación de entropía es positiva, los productos presentan un mayor desorden molecular (mayor entropía) que los reactivos. En cambio, cuando el incremento es negativo, los productos son más ordenados. Hay una relación entre la entropía y la espontaneidad de una reacción química, que viene dada por la Energía Libre de Gibbs [ecuación (2.6)]. Desde un punto de vista termodinámico, la entropía es la magnitud física que mide la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo.

entropía es nula, entonces (2.4).

$$\dot{W}_{max} = -\dot{m}(\Delta H^o - T_o \Delta S^o) = -\dot{m} \Delta G^o \quad (2.4)$$

Por lo tanto, la máxima eficiencia termodinámica de una pila de combustible será el cociente entre la potencia máxima extraída y la energía necesaria para la formación de productos a partir de reactivos, que coincide con la variación de entalpía de la reacción, quedando expresada de forma genérica según (2.5).

$$\eta_{term} = \frac{\dot{W}_{max}}{E_i} = \frac{\Delta G^o}{\Delta H^o} \quad (2.5)$$

Se observa que la eficiencia máxima termodinámica de una pila de combustible depende linealmente con la temperatura de reacción. Cuando la temperatura aumenta, la eficiencia máxima disminuye. En cambio, en una máquina térmica, recuérdese la ecuación (2.1), cuando la temperatura del foco caliente aumenta, la eficiencia de la máquina también aumenta. La Figura 2.8 muestra la variación de la eficiencia con la temperatura en ambos casos [16]. No obstante, el concepto de eficiencia termodinámica se explica más detalladamente en la sección 2.2.3.

Además de la diferencia en términos de eficiencia entre una pila de combustible y una máquina térmica, en las pilas de combustible, la producción de potencia se realiza en condiciones de contaminación mínima al medio ambiente, ya que no existe el proceso de combustión de las máquinas térmicas.

Por otro lado, si se comparan las pilas de combustible con las baterías, las primeras necesitan que el combustible sea suministrado constantemente para trabajar de forma continua [17]. Sin embargo, al contrario que en una batería, la potencia suministrada por una pila de combustible es independiente de la cantidad de energía que almacena (capacidad energética del hidrógeno), y viene definida por las características de la pila de combustible. Es decir, el número y área de celdas empleadas para formar la pila. Además, si se asocia el concepto de “recarga” al proceso de añadir más cantidad de reactivos al sistema, en una batería, este proceso puede llegar a durar horas, mientras que en una pila de combustible es instantáneo [18], [19].

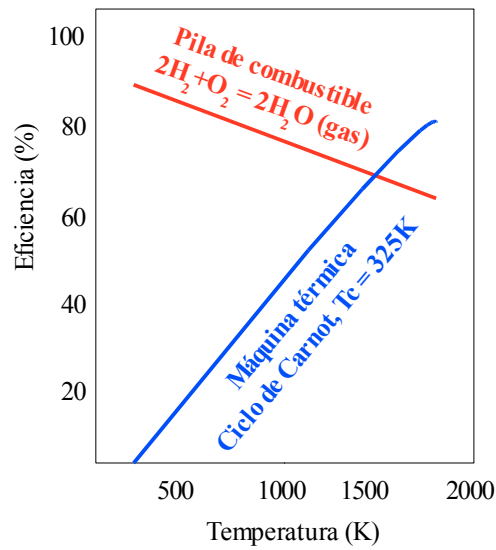


Figura 2.8: Dependencia de la eficiencia con la temperatura en una máquina térmica y en una pila de combustible.

De forma genérica, la mayoría de los *sistemas de pila de combustible* se componen de los siguientes bloques:

- Celdas unitarias en las que tienen lugar las reacciones electroquímicas.
- *Stack* o pila, donde las celdas individuales se montan modularmente hasta conseguir la potencia deseada.
- *Balance of Plant* (BOP), que consiste en todo el equipamiento necesario para el correcto funcionamiento del sistema: mantenimiento térmico, mantenimiento de agua, suministro de aire, acondicionamiento de potencia, reformador de combustible (en el caso de que sea necesario), sistemas de control, etc.

En las secciones que siguen se comentan las principales características de las pilas de combustible, su funcionamiento, la disponibilidad comercial y, finalmente, se realiza una comparativa con motores de combustión, baterías y ultracondensadores.

2.2.1 Principio de funcionamiento

La estructura básica de una mono-celda o celda unitaria en base a la que se construye una pila de combustible, consiste en una capa de electrolito en contacto con un ánodo y un cátodo a ambos lados. El combustible (agente reductor) es suministrado por la parte del ánodo (electrodo negativo) y el oxígeno (agente oxidante) se suministra por la parte del cátodo (electrodo positivo). Las reacciones electroquímicas tienen lugar en los electrodos, produciéndose una corriente eléctrica de carga positiva a través del electrolito y su complementaria (flujo de electrones) a través del circuito externo que se conecte en los extremos de la pila [20], [21]. El único residuo que se genera es agua pura. Dependiendo de la tecnología utilizada, el combustible puede tratarse de hidrógeno puro, gas natural o metanol. La Figura 2.9 muestra el esquema de funcionamiento básico de una celda de combustible.

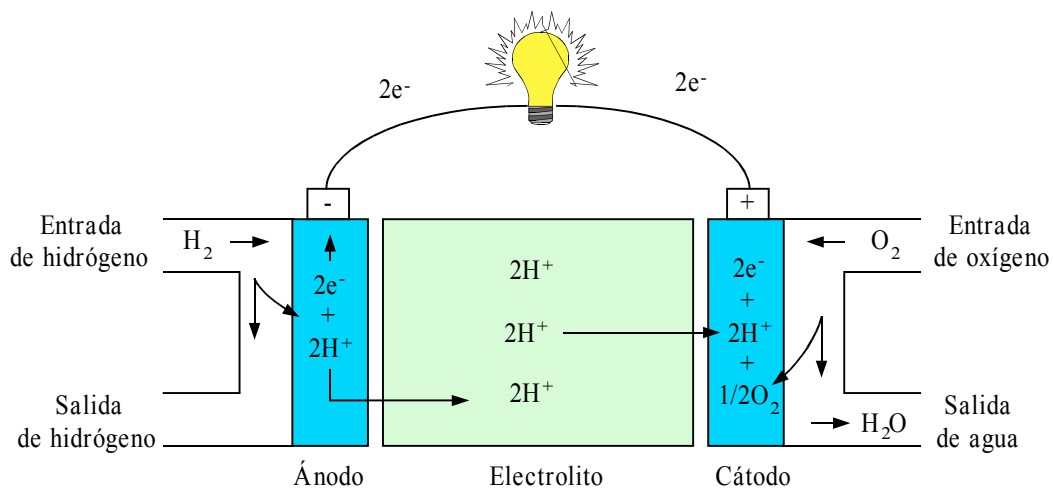


Figura 2.9: Esquema básico de una celda de combustible.

De la Figura 2.9 se deduce que el área activa de la celda es la zona que está expuesta a los reactivos, que está en contacto eléctrico con los electrodos, que está en contacto iónico con el electrolito y que contiene una cantidad suficiente de catalizador para que se desencadene la reacción electroquímica. La densidad de estas zonas y la naturaleza de las interfaces juegan un papel crítico en el correcto funcionamiento tanto de las pilas de electrolito líquido como en las de sólido. En una pila con electrolito líquido [22], los gases reactivos se difunden a través de una capa fina de electrolito que humidifica parte del electrodo y reacciona electroquímicamente

con la superficie de contacto. Si el electrodo, poroso, contiene una cantidad excesiva de electrolito, puede haber riesgo de inundación del electrodo y restringir con ello el transporte de las partículas gaseosas. En consecuencia, se produce una reducción de la capacidad de funcionamiento del electrodo poroso. En las pilas de electrolito sólido [23], el objetivo es disponer de una gran cantidad de catalizador expuesto a los gases reactivos y en la interfaz que se conecta eléctrica e iónicamente al electrodo y electrolito respectivamente. Para conseguir una interfaz de alto rendimiento, se necesita en la zona próxima al catalizador que el electrodo presente una conductividad mixta (que conduzca tanto electrones como cationes).

Los componentes de la celda tienen otras funciones además de las comentadas. Así, el electrolito conduce la carga iónica entre los electrodos, con lo cual, cierra el circuito eléctrico. Además, actúa como barrera física para evitar la mezcla directa del combustible y el oxígeno. Respecto a los electrodos, otras funciones son: conducir electrones para ser enviados o recogidos desde el circuito externo, asegurar que los gases reactivos se repartan uniformemente por toda la zona activa y también que los gases de los productos sean expulsados correctamente.

2.2.2 Estructura física

Otra de las características de las celdas de combustible es su geometría. La mayoría de las celdas tiene una estructura planar (rectangular o circular) o tubular. En una estructura planar [24], las mono-celdas se conectan eléctricamente mediante interconectores. Estos interconectores consisten en platos separados cuyas funciones son: proporcionar la conexión eléctrica serie entre celdas adyacentes y actuar como una barrera para separar el combustible y el oxígeno de celdas contiguas. Normalmente, los interconectores suelen incluir unos canales que permiten distribuir uniformemente el gas por toda el área activa. Esta estructura minimiza la resistencia eléctrica al paso de corriente. La Figura 2.10 muestra un esquema de la estructura planar rectangular.

El flujo de aire y de combustible puede ser cruzado (ambos flujos son perpendiculares, como se muestra en la Figura 2.10), paralelo (ambos en la misma dirección y sentido), encontrados (misma dirección pero distinto sentido), en serpentin (ambos flujos siguen una trayectoria en serpentin) o en espiral (para platos circulares).

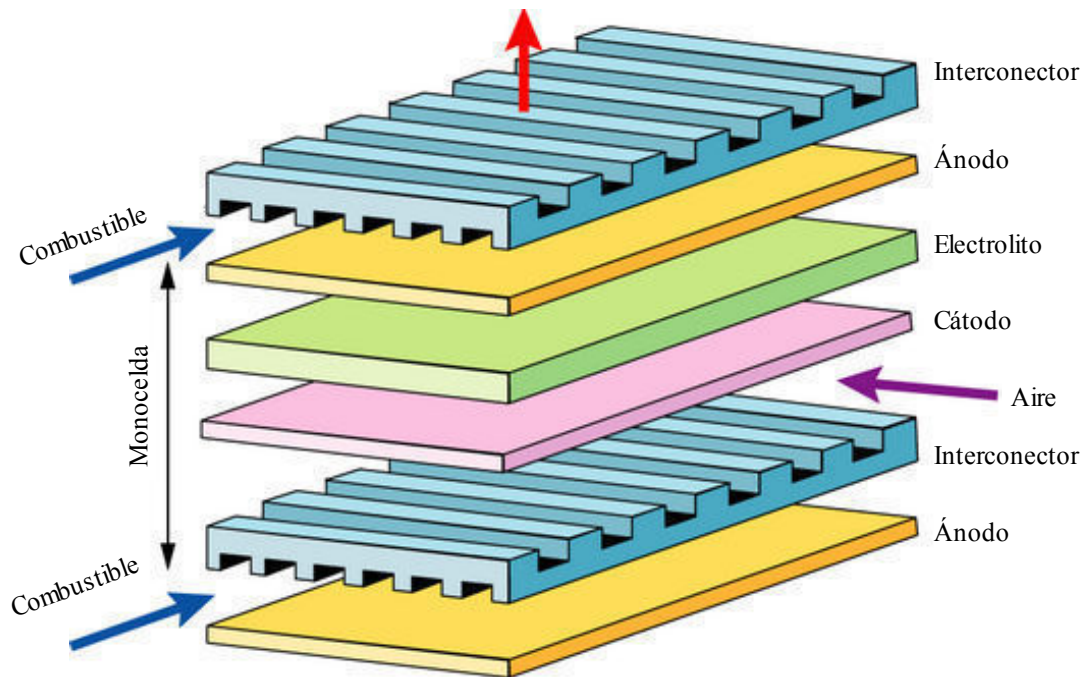


Figura 2.10: Estructura planar rectangular de una pila de combustible.

Por otra parte, en la estructura tubular (ver Figura 2.11) [25], [26] (especialmente utilizada en pilas de combustible de alta temperatura) el aire es canalizado a través del centro del tubo y el combustible fluye sobre la capa más externa que actúa como ánodo. La capa más interna corresponde al cátodo y está rodeada por una capa intermedia que corresponde al electrolito. Las ventajas más significativas que presenta esta estructura son un sellado seguro y la integridad estructural de las celdas. Su desventaja es el desafío que supone, desde el punto de vista geométrico, cuando se pretende conseguir alta densidad de potencia y recorridos cortos de corriente. En los primeros diseños tubulares, la corriente era tangencial al propio tubo.

Los interconectores entre los tubos se usan para formar arrays rectangulares con los cilindros. Otra opción es que la corriente circule a lo largo del eje del tubo, en cuyo caso la interconexión se hace al final de los tubos. Para minimizar la longitud de los caminos por donde circula la corriente eléctrica en las celdas individuales, las celdas se suelen conectar secuencialmente en serie. Para evitar las limitaciones de la densidad de empaquetamiento (o apilamiento), los tubos adquieren una forma plana. La estructura tubular fue desarrollada por la

compañía Siemens Westinghouse, sin embargo, esta tecnología aún está lejos de estar disponible comercialmente, debido principalmente al alto coste y el corto tiempo de vida.

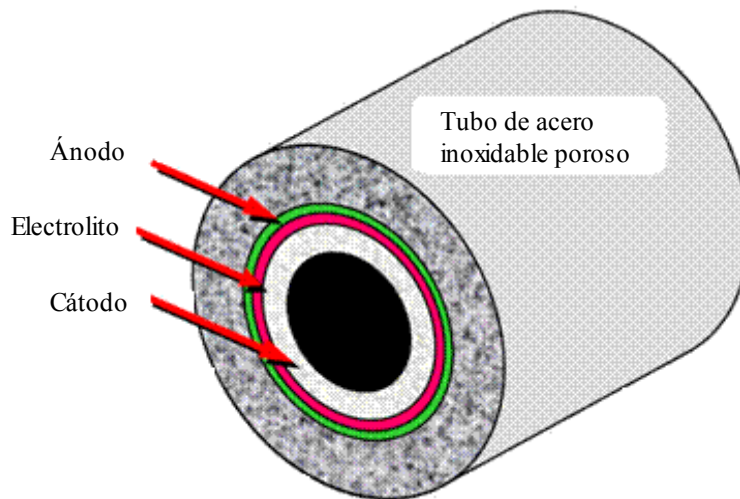


Figura 2.11: Sección transversal de una celda tubular.

2.2.3 Eficiencias termodinámica y electroquímica

Cuando se estudia la eficiencia de una pila de combustible, es necesario diferenciar la eficiencia termodinámica y la eficiencia electroquímica. La eficiencia termodinámica hace referencia a la relación entre el trabajo máximo que puede generar el sistema y la variación de entalpía en la reacción de oxidación del hidrógeno [ecuación (2.5)]. A esta eficiencia también se le llama eficiencia de Gibbs. Como se sabe (ver Figura 2.8), la eficiencia termodinámica tiene una dependencia lineal decreciente con la temperatura. De la ecuación (2.1), que proporciona la eficiencia termodinámica de una máquina térmica, se deduce que la mayor eficiencia se consigue cuando la fuente o foco frío alcanza las temperaturas más bajas y el foco caliente las temperaturas más altas. Por lo tanto, en teoría, para alcanzar una eficiencia deseada, basta con hacer que la temperatura más alta llegue al valor determinado, ya que la temperatura del foco frío no puede ser inferior a la temperatura ambiente. Sin embargo, en un motor térmico real, el valor de la temperatura superior viene limitado por las características físicas de los materiales de fabricación. Además, en el caso concreto de que la máquina térmica se utilice para generar electricidad, para valorar la eficiencia del proceso completo hay que tener en cuenta las pérdidas

mecánicas originadas en el movimiento de un rotor con un eje acoplado. En una pila de combustible, el proceso de producción eléctrica no es por combustión, sino por reacción electroquímica. Es decir, el número de pasos de transformación energética es menor ya que la transformación es directa y no se necesitan partes mecánicas adicionales. En consecuencia, la eficiencia del proceso de conversión energética de una pila de combustible es significativamente superior al de una máquina térmica. La Figura 2.12 compara la eficiencia térmica de las pilas de combustible con la de otros sistemas de generación de potencia eléctrica [27].

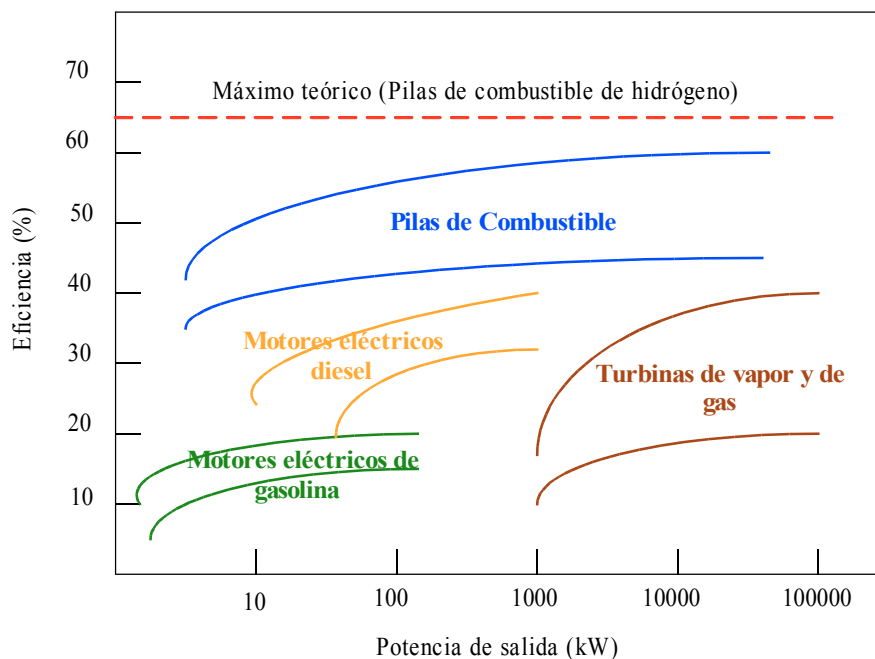


Figura 2.12: Comparación de eficiencias de sistemas de generación de potencia eléctrica.

La eficiencia electroquímica o de potencial hace referencia a la relación entre la tensión entre los extremos de la pila de combustible respecto al potencial teórico o de Nerst. Esta eficiencia se emplea para evaluar pérdidas, sobretensiones o polarizaciones. Como las pérdidas son función de la intensidad de corriente eléctrica que circula por la pila, la eficiencia electroquímica será mayor cuanto menor sea la corriente. Para calcular esta eficiencia [28], [29] se tiene en cuenta la cantidad de energía liberada en la reacción de formación del agua $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ (conocida como entalpía de reacción ΔH°). Este valor se puede conocer experimentalmente y depende de si el agua se forma en estado líquido, $\Delta H^\circ = -285,13 \text{ kJ/mol}$,

en condiciones estándar a 25 °C y 1 atm, o gaseoso, $\Delta H^\circ = -241,82$ kJ/mol, en condiciones estándar. El signo negativo indica que la energía es liberada en la reacción, no absorbida. El efecto de la temperatura de reacción es más significativo que el de la presión. La cantidad de energía liberada disminuye cuando la temperatura aumenta, llegando a variar hasta en un 30% en pilas de combustible de alta temperatura. Por este motivo, las pilas de alta temperatura son menos eficientes que las de baja temperatura. Pero, como es sabido, no toda la entalpía de reacción está disponible para realizar trabajo útil. Parte de esta entalpía se libera al exterior en forma de entropía. La energía restante se conoce como energía libre de Gibbs, ΔG° , y viene expresada según la ecuación (2.6).

$$\Delta G^\circ = -\epsilon^\circ \cdot n \cdot F \quad (2.6)$$

Donde ϵ° es el potencial eléctrico teórico de la celda en condiciones estándar (25 °C y 1 atm), n es el número de electrones implicados en la reacción (2 moles de electrones por cada mol de agua formado, ver Figura 2.9) y F es la constante de Faraday (96485,309 C/mol de electrones). Al igual que sucedía con la entalpía, el valor de la energía libre de Gibbs de la reacción de formación de agua es conocido: $\Delta G^\circ = -228,57$ KJ/mol de agua líquida formada y $\Delta G^\circ = -237,13$ KJ/mol de vapor de agua formado. Por lo tanto, el potencial máximo teórico de una celda de combustible es $\epsilon^\circ = 1,187$ V (producto agua líquida) ó $\epsilon^\circ = 1,229$ V (producto agua vapor). Con esto, la eficiencia electroquímica se calcula del cociente entre el potencial teórico y la tensión real de la celda [ecuación (2.7)]:

$$\eta_{elect} = \frac{V_{real}}{\epsilon^\circ} \quad (2.7)$$

Para evaluar la eficiencia global de la celda se tienen en cuenta los dos rendimientos anteriores y también el combustible empleado, (2.8). La eficiencia global se calcula como el cociente entre la potencia generada, $W = V \cdot I$, y la cantidad de energía consumida durante el tiempo de operación, que depende de la cantidad de hidrógeno consumido m_{H_2} y de su poder calorífico inferior LHV_{H_2} , [16], [30]:

$$\eta_{global} = \frac{W}{m_{H_2} \cdot LHV_{H_2}} = \frac{V \cdot I}{\frac{I \cdot M_{H_2}}{2 \cdot F} \cdot LHV_{H_2}} = \frac{2 \cdot V \cdot F}{M_{H_2} \cdot LHV_{H_2}} \quad (2.8)$$

Donde M_{H_2} es la masa molecular del hidrógeno (2 g/mol). Su poder calorífico inferior es de -242 kJ/mol.

La eficiencia global es independiente de la corriente, pero sí depende de la tensión en la celda. Es más, la curva de eficiencia presentará la misma forma que la curva de polarización. Como la tensión de la celda cae a medida que suministra más potencia, la eficiencia de la celda disminuye a medida que suministra más potencia.

Una vez analizados los conceptos de eficiencia térmica, eficiencia electroquímica y eficiencia global de una celda de combustible, se va a introducir el concepto de eficiencia del sistema de pila de combustible [31]. Como ya se ha comentado, un sistema de pila de combustible necesita un equipamiento adicional encargado de regular el flujo de gases y de fluidos, la temperatura, el nivel de humedad, un reformador de combustible si es necesario, e incluso algunos sistemas vienen equipados con el sistema de acondicionamiento de potencia incluido. Todo este equipamiento implica pérdidas eléctricas ya que son alimentados por la propia pila, reduciendo así la eficiencia del sistema completo respecto de la eficiencia global teórica. Por lo tanto, para poder comparar la eficiencia de las pilas de combustible con otros sistemas de generación de potencia, todas las plantas de potencia deben ser definidas de forma similar.

Supóngase el siguiente ejemplo. Se quiere comparar una planta de pila de combustible con un motor de combustión interna para aplicaciones de automoción. Para ello, es conveniente definir cada sistema como un dispositivo que recibe como entradas combustible y aire, y cuya salida viene expresada en forma de potencia mecánica. En ambos casos el combustible es extraído de un tanque en estado líquido o gaseoso, donde ha sido almacenado después de un proceso de reformado o similar. Ambos sistemas comprimen el aire capturado de la atmósfera: la pila de combustible mediante un compresor externo y el motor de combustión mediante la acción de un pistón. Para entregar la potencia mecánica de salida, la pila de combustible necesita un inversor y un motor eléctrico, mientras que el motor de combustión entrega dicha potencia directamente. Ambos sistemas expulsan al exterior agua caliente como consecuencia de la acción de una bomba refrigeradora, un radiador u otro dispositivo similar. Ambos sistemas alimentan a las mismas cargas auxiliares del vehículo. La eficiencia total del motor de combustión interna es del 15-25% [32]. En el caso del sistema de pila de combustible, se tendrán en cuenta la eficiencia global de la pila (50%), la del compresor de aire (75-80%), la del

inversor (85%) y la del motor eléctrico (95%), resultando una eficiencia total del sistema de pila de combustible de entre el 30-35%. Si el suministro de hidrógeno se hace empleando un reformador, la eficiencia del sistema completo se reduce entre un 65-75% (dependiendo del tipo de reformador), resultando una eficiencia total del sistema del 20-25%. No obstante, la tendencia actual del mercado en el mundo de la automoción es que la alimentación de la pila de combustible se realice desde un tanque de hidrógeno incorporado en el propio vehículo; por tanto, la comparativa entre vehículo con motor térmico y vehículo con pila de combustible proporcionaría como mínimo un 10% más de eficiencia a favor del segundo.

Una vez que se han introducido los conceptos genéricos de las pilas de combustible, se va a proceder a describir sus características eléctricas: estudio de la curva de polarización, curva de potencia, efecto de la temperatura y de la presión.

2.2.4 Características eléctricas

A) Curva de polarización

Como se ha demostrado en la sección anterior, el máximo valor teórico de tensión en una celda de combustible es de $\epsilon^o = 1,229V$. Experimentalmente, este valor de tensión es el que se puede medir en una celda cuando no tiene ninguna carga conectada.

Para conocer la variación del potencial termodinámico con la temperatura, (2.9), basta con tener en cuenta la ecuación (2.6) y conocer la dependencia de la energía libre de Gibbs con la temperatura [14]:

$$\Delta G = \Delta G^o + RT \cdot \ln \left(\frac{f_{H_2O}}{f_{H_2} \cdot f_{O_2}} \right) \quad (2.9)$$

Donde f_{H_2O} es la fugacidad²¹ del único producto de la reacción, el agua, y f_{H_2} junto con f_{O_2} es la de los reactivos, hidrógeno y oxígeno. Sustituyendo la ecuación (2.6) en (2.9), se obtiene la ecuación (2.10), que permite conocer el valor del potencial termodinámico de la celda para una temperatura T (ecuación general de Nernst).

²¹ La **fugacidad** es la medida del potencial químico en la forma de *presión ajustada*. Está directamente relacionada con la tendencia de una sustancia de preferir una fase (líquida, sólida o gaseosa) frente a otra. A una temperatura y presión fijas, el agua por ejemplo tendrá una fugacidad diferente para cada fase. Aquella fase con la menor fugacidad será la más favorable; la sustancia minimiza entonces la energía libre de Gibbs [33].

$$\Delta E = \Delta E^o + \frac{RT}{nF} \cdot \ln \left(\frac{f_{H_2O}}{f_{H_2} \cdot f_{O_2}} \right) \quad (2.10)$$

Las pilas de combustible trabajan normalmente a una presión lo suficientemente baja como para aproximar la fugacidad de los reactivos y los productos a sus presiones parciales en la interfaz electrodo-electrolito. El potencial electroquímico de referencia E^o se calcula a partir del potencial electroquímico de referencia en condiciones estándar ($E^o = 1,229$ V), la variación de la temperatura respecto a la temperatura de referencia (25 °C) y la variación de la entropía de la reacción ΔS^o , ecuación (2.11). El valor de la temperatura T viene expresada en Kelvin.

$$E^o = E^o + (T - 298,15) \cdot \left(\frac{\Delta S^o}{nF} \right) \quad (2.11)$$

Combinando las ecuaciones (2.10) y (2.11), el potencial electroquímico de una celda de combustible se puede calcular mediante (2.12), ecuación de Nernst, [34], [35]:

$$E_{Nernst} = 1,229 - (8,5 \cdot 10^{-4}) \cdot (T - 298,15) - (4,308 \cdot 10^{-5}) \cdot T \cdot (\ln(P_{H_2}) + 1/2 \cdot P_{O_2}) \quad (2.12)$$

Donde P_{H_2} y P_{O_2} son las presiones parciales del hidrógeno y oxígeno respectivamente.

Sin embargo, esta medida va disminuyendo a medida que aumenta la demanda de corriente. La representación de los valores de tensión de la celda frente a los valores de intensidad genera la curva de polarización de la celda. En esencia, esta curva de polarización representa la eficiencia electroquímica de la celda para todo el rango de operación. La variación de la tensión en la celda respecto al valor inicial cuando no se conecta ninguna carga, depende de tres fenómenos principalmente: efecto de la caída de tensión por activación, efecto de las pérdidas óhmicas y efecto de la caída de tensión por concentración. La desviación del potencial real respecto del teórico resulta de la suma de estos tres factores en cada uno de los puntos de operación [34], [36], [37], [38]. A continuación se describen estos tres fenómenos.

- **Pérdidas por Activación.** Las pérdidas por activación están relacionadas con la barrera energética que se debe vencer para iniciar la reacción química entre los reactivos. A baja corriente, el índice de transferencia electrónica es bajo y una parte de la tensión entre los electrodos se pierde para compensar la pérdida de la actividad electrocatalítica. Como se indica en [34], el potencial de activación puede calcularse mediante la ecuación (2.13):

$$V_{act} = \zeta_1 + \zeta_2 \cdot T + \zeta_3 \cdot T \cdot \ln(C_{O_2}) + \zeta_4 \cdot T \cdot \ln(I_{FC}) \quad (2.13)$$

donde I_{FC} es la corriente que atraviesa la celda, $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$ son coeficientes experimentales cuyos valores dependen de cada tipo de celda y C_{O_2} es la concentración de oxígeno en la interfaz entre el cátodo y el catalizador (expresada en mol/cm³) que viene dada por la ecuación (2.14):

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5,08 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(\frac{-498}{T}\right)} \quad (2.14)$$

- **Pérdidas Óhmicas.** Las pérdidas óhmicas o resistivas se deben a la oposición que presentan los electrodos y el electrolito al paso de electrones. Estas pérdidas obedecen a la ley de Ohm. Para conocer el valor de las pérdidas óhmicas, se distingue la resistencia de la membrana R_m de la resistencia de los electrodos R_c . La resistencia de la membrana se puede conocer a partir de su resistividad, que variará según el tipo de material. Por ejemplo, en el caso de una membrana de Nafion (marca registrada por Dupont), muy comunmente utilizadas en las pilas de membrana polimérica (pilas PEM), la resistividad ρ_m se calcula a partir de la expresión (2.15):

$$\rho_m = \frac{181,6 \cdot \left[1 + 0,03 \cdot \left(\frac{I_{FC}}{A} \right) + 0,062 \cdot \left(\frac{T}{303} \right)^2 \cdot \left(\frac{I_{FC}}{A} \right)^{2,5} \right]}{\left[\varphi - 0,634 - 3 \cdot \left(\frac{I_{FC}}{A} \right) \right] \exp\left(\frac{4,18 \cdot (T - 303)}{T}\right)} \quad (2.15)$$

Donde A es el área de la celda y φ es un parámetro ajustable con un valor máximo de 23. Este parámetro depende del proceso de fabricación de la membrana y es función de la humedad relativa y de la relación estequiométrica²² del gas en el ánodo. Bajo condiciones ideales de humedad (100%) este parámetro puede tener un valor aproximado de 14. El término $181,6 / (\varphi - 0,634)$ representa la resistividad específica (Ωcm) de la membrana a 30 °C y sin generación de corriente. El término exponencial en

²² La **estequiometría** en química es el cálculo de las relaciones cuantitativas entre reactivos y productos en el transcurso de una reacción química. El primero que enunció los principios de la estequiometría fue Jeremias Benjamin Richter (1762-1807) en 1792.

el denominador es el factor de corrección en temperatura si la celda trabaja a una temperatura diferente de 30 °C.

De lo anterior se deduce que la caída de potencial debido a las pérdidas resistivas se puede calcular a partir de la ecuación (2.16), donde l es el grosor de la membrana.

$$V_{ohm} = I_{FC} \cdot (R_m + R_c) = I_{FC} \cdot \left(\frac{\rho_m \cdot l}{A} + R_c \right) \quad (2.16)$$

La Tabla 2.1 recoge algunos valores típicos de grosor de membranas de Nafion [39].

Tabla 2.1: Grosor de las membranas de Nafion.

Membrana	Grosor
Nafion 117	175 μm
Nafion 115	125 μm
Nafion 113	90 μm
Nafion 112	50 μm

- Pérdidas por concentración.** Las pérdidas por concentración derivan de la dificultad que supone el efecto de transferencia de masa (de hidrógeno y oxígeno) de las reacciones en los electrodos. En este caso, los reactivos llegan a ser consumidos en proporciones superiores de las que pueden ser suministrados, a la vez que los productos se acumulan en proporciones mayores de las que pueden ser eliminados. Estas pérdidas son más acusadas para valores altos de corriente, llegando a anular las anteriores y llevando la tensión de celda a cero. La caída de tensión por concentración se debe principalmente al exceso de concentración de reactivos que existe próximo a las superficies catalizadoras. Cuando existe una demanda alta de corriente, el producto (agua) no se forma a la misma velocidad a la que se consumen los reactivos. Para determinar una expresión para esta caída de tensión, se define un valor máximo de densidad de corriente J_{max} por debajo del cuál el combustible se suministra en una proporción similar a la que se consume. Valores típicos de J_{max} están en el rango de 500-1500 mA/cm². De esta forma, la caída de tensión debido al transporte de masa puede ser conocida, (2.17):

$$V_{conc} = -B \ln \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (2.17)$$

Donde B es un parámetro que depende del tipo de celda y J representa la densidad de corriente que atraviesa la celda en cada instante (A/cm^2).

En conclusión, la tensión de polarización de una celda de combustible (2.18) resulta de la suma de todos los térmicos recogidos en la ecuaciones (2.12), (2.13), (2.16) y (2.17). Esto es,

$$V_{celda} = E_{Nerst} + V_{act} + V_{ohm} + V_{conc} \quad (2.18)$$

La Figura 2.13 muestra la curva de polarización genérica de una celda en la que se puede ver cómo para valores bajos de corriente, dominan las pérdidas por activación; para valores intermedios, prevalecen las pérdidas resistivas; y para valores altos de corriente, son las pérdidas por concentración las que superan a las dos anteriores [40], [41]. Para una pila formada por n celdas, la tensión de polarización entre los extremos de la pila, resulta de multiplicar el número de celdas que la componen por la tensión en cada celda.

La curva de polarización varía con la temperatura y la presión de operación de la celda. En general, la variación de cualquier parámetro que provoque un aumento en la tensión de polarización es beneficioso porque que se consigue una mayor potencia y mayor eficiencia electroquímica.

En concreto, cuando la presión de operación aumenta, la tensión de polarización también aumenta. Esto es debido a que la relación de reacciones químicas es proporcional a las presiones parciales de hidrógeno y oxígeno (la presión total resulta de la suma de las presiones parciales). Las altas presiones ayudan a que el hidrógeno y el oxígeno estén en contacto con el electrolito. Sin embargo, los platos por donde circula el flujo de combustible u oxígeno (los interconectores) trabajan mejor a baja presión, ya que existen menos pérdidas de flujo de masa. Es por este compromiso por lo que las celdas de combustible trabajan a presiones del orden de unas pocas atmósferas.

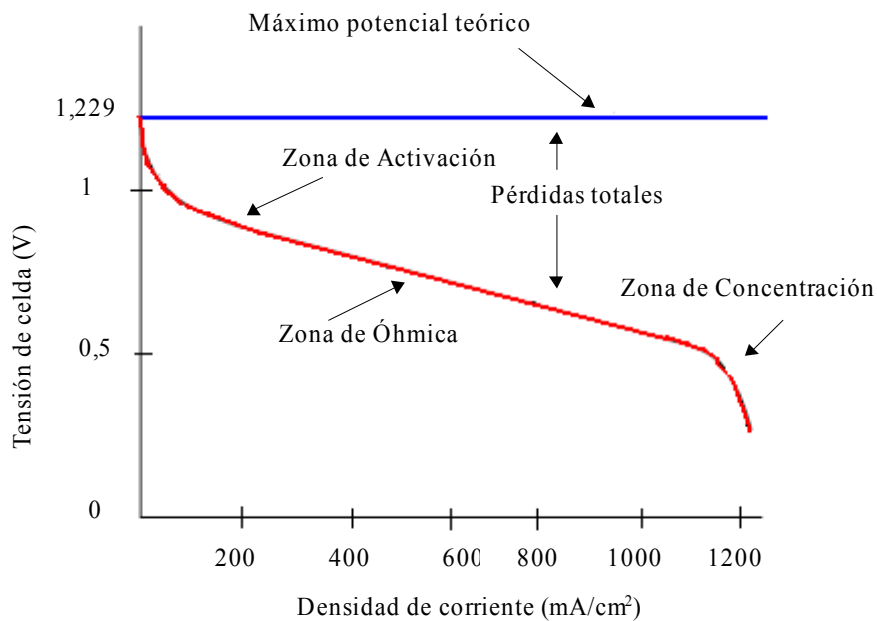


Figura 2.13: Curva de polarización de una celda de combustible.

Respecto a las variaciones de la temperatura, la curva de polarización aumenta cuando la temperatura de operación aumenta. El aumento de la temperatura propicia la transferencia de masa y reduce la resistencia interna de la celda. Sin embargo, en el caso de las pilas de tipo PEM (PEMFC), ver apartado 2.2.5, la acumulación de agua en el cátodo limita la temperatura de operación por debajo de 100 °C. A esta temperatura, el agua empieza a hervir y disminuye la presión parcial del oxígeno, dañando el funcionamiento de la celda debido a la inanición de oxígeno. Para obtener un alto rendimiento de una celda, una solución sería hacer trabajar a la celda a la temperatura más alta que se puede alcanzar con un valor alto de presión de funcionamiento, ya que se consigue aumentar la temperatura del punto de ebullición del agua. Sin embargo, el efecto real sobre una celda es que la tensión aumenta hasta que la temperatura se acerca al punto de ebullición del agua, momento en el que la tensión empieza a bajar. En conclusión, las pilas de tipo PEM trabajan a temperaturas próximas a 70 - 90 °C que es cuando ambos efectos se equilibran.

En [42], [43] y [44] se desarrollan análisis detallados del comportamiento de pilas de combustible bajo varias condiciones de operación. Estos análisis ayudan a identificar los

parámetros críticos que afectan al comportamiento de estos sistemas. El análisis paramétrico se hace sobre distintos tipos de pilas, pilas de membrana polimérica (PEMFC) o pilas de óxido sólido (SOFC).

B) Curva de potencia

La potencia eléctrica generada por una celda de combustible es el producto de la tensión por la corriente que es capaz de entregar. A partir de la curva de polarización, es posible obtener la correspondiente curva de potencia [45], [46]. La Figura 2.14 representa la curva de potencia típica de una celda de combustible. Se observa que el valor máximo de potencia se alcanza cuando la tensión de la celda es 0,5 - 0,6 V, lo que corresponde con un valor alto de corriente. En este punto, la resistencia interna de la celda es igual a la resistencia equivalente del circuito externo. Sin embargo, como ya se ha visto anteriormente, la eficiencia de la celda cae a medida que aumenta la corriente, por lo tanto, a la hora de elegir el punto de funcionamiento del sistema, existe un compromiso entre trabajar a alta eficiencia o a alta potencia.

Las variaciones de la temperatura y la presión de funcionamiento afectan de la misma forma a la curva de potencia y a la curva de polarización. Es decir, cuando la temperatura o la presión aumentan, la potencia suministrada por la celda es mayor.

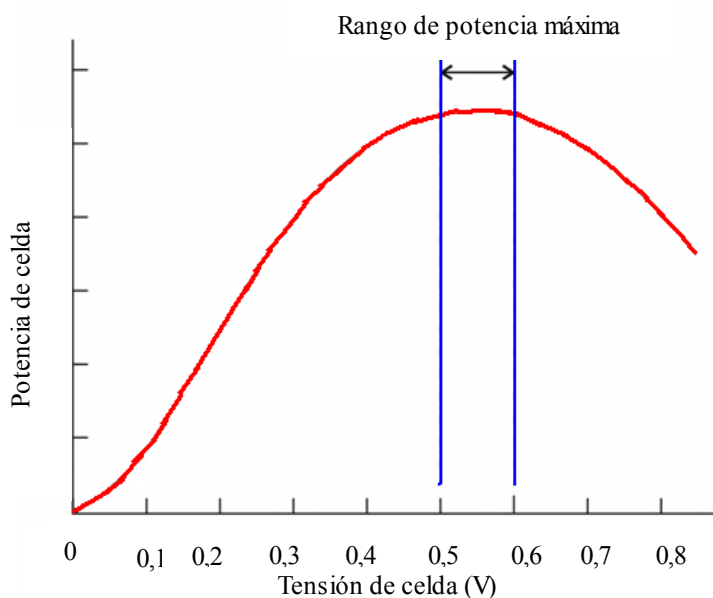


Figura 2.14: Curva de potencia de una celda de combustible.

2.2.5 Clasificación

Existen seis grandes grupos en los que se encuadran los distintos tipos de pilas de combustible [14], [47], [48]: Pilas de Membrana Polimérica (Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC), Pilas Alcalinas (Alkaline Fuel Cell - AFC), Pilas de Metanol Directo (Direct Methanol Fuel Cell - DMFC), Pilas de Ácido Fosfórico (Phosphoric Acid Fuel Cell - PAFC), Pilas de Carbonato Fundido (Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC) y Pilas de Óxido Sólido (Solid Oxide Fuel Cell - SOFC). A continuación se estudiará cada una de ellas. La clasificación genérica de las pilas de combustible se hace en base al tipo de electrolito empleado. A su vez, el tipo de electrolito determina la temperatura de operación de la propia pila.

Las pilas de baja temperatura trabajaban por debajo de 250 °C, por tanto no es posible el reformado interno (producción del hidrógeno necesario a partir de otro combustible) en este tipo de pilas y, en consecuencia, necesitan una fuente de hidrógeno externa. Este tipo de pilas tienen un arranque rápido y el material con el que están fabricadas no sufre deterioro. Se pueden utilizar en aplicaciones portátiles y de automoción. Dentro de este conjunto se encuentran las pilas tipo PEM, AFC, PAFC y DMFC.

Las pilas de combustible de alta temperatura, MCFC y SOFC, trabajan a temperaturas superiores a 600 °C, lo que permite el reformado interno del combustible. La ventaja del reformado interno es que desaparece la necesidad de emplear un procesador de combustible adicional externo y también que se pueden emplear otros combustibles además del hidrógeno puro. Esta ventaja supone un aumento de la eficiencia global del sistema por encima del 15%.

Como cualidad adicional, el calor generado por las pilas de alta temperatura puede emplearse en aplicaciones de cogeneración. Además, este tipo de pilas pueden reaccionar fácil y eficientemente sin necesidad de emplear metales nobles de alto coste como catalizador (por ejemplo el platino). Sin embargo, la cantidad de energía liberada en la reacción electroquímica se degrada a medida que aumenta la temperatura de operación. Hay que tener en cuenta también que el material de fabricación de las pilas de alta temperatura debe ser especial, ya que está sometido a una gran degradación. Este tipo de pilas no es recomendable para aplicaciones que requieren un arranque rápido, sino más bien para plantas de potencia estacionarias, ya que la posibilidad de reformado interno y la capacidad de cogeneración superan las desventajas del deterioro de material y el arranque lento.

A) Pila de Membrana Polimérica (PEMFC)

La tecnología de membrana polimérica fue inventada por la compañía GE a principios de los años sesenta con los trabajos de T. Grubb y L. Niedrach. GE anunció un primer éxito a mediados de los sesenta cuando desarrolló una pequeña pila de combustible para un programa de investigación que mantenía con la División Electrónica de la Armada Estadounidense. Este sistema era alimentado por hidrógeno generado mediante una mezcla de agua e hidróxido de litio que se almacenaba en botellas. De esta manera, se facilitaba el suministro de combustible en actividades que se desarrollaban en zonas aisladas. El combustible era compacto y transportable, pero el catalizador de platino encarecía considerablemente el sistema. La temperatura de operación de este tipo de pilas es relativamente baja (alrededor de 60 – 80 °C), por lo que el arranque es más rápido que en las pilas de alta temperatura. Tienen alta densidad de potencia y pueden variar con relativa velocidad su punto de funcionamiento con objeto de entregar la demanda de potencia exigida. Entre sus aplicaciones destacan sistemas de automoción, edificios o aplicaciones portátiles en sustitución de las baterías recargables. La potencia máxima suministrada por este tipo de pilas varía entre unos pocos vatios hasta varias decenas de kilovatios. La Figura 2.9 muestra el principio de funcionamiento de una pila de tipo PEM.

- Ventajas:
 - ✓ Gracias a que el separador de ánodo y cátodo es una película de polímero sólido (estructura planar) y que la celda trabaja a temperaturas relativamente bajas, aspectos como manipulación, montaje o hermeticidad son menos complejos que en la mayoría de los demás tipos de celdas.
 - ✓ Emplean un electrolito no corrosivo. Desaparece la necesidad de manipular ácido o cualquier otro componente corrosivo. Se aumenta la seguridad.
 - ✓ Son tolerantes al CO₂, por lo que pueden emplear el propio aire atmosférico.
 - ✓ Emplean un electrolito sólido y seco por lo que se elimina la manipulación de líquidos o los problemas de reabastecimiento.
 - ✓ Presentan alta tensión, corriente y densidad de potencia.
 - ✓ Pueden trabajar a baja presión (1 ó 2 bares), lo que añade seguridad.

- ✓ Presentan una buena tolerancia a la diferencia de presiones de los reactivos.
- ✓ Son compactas y robustas.
- ✓ Tienen un diseño mecánico sencillo.
- ✓ Emplean materiales de construcción estables.
- Desventajas:
 - × Son muy sensibles a las impurezas del hidrógeno, por lo que se han desarrollado multitud de unidades de reformado para poder emplear combustibles convencionales para este tipo de pilas. Las pilas PEMFC que directamente utilizan como combustible el metanol, sin ser reformado, han dado lugar a la variante de las pilas de Metanol Directo (DMFC).
 - × No toleran más de 50 ppm de CO y presentan una baja tolerancia a partículas de azufre.
 - × Necesitan unidades de humidificación de gases reactivos. Si se utiliza agua para la humidificación de gases, la temperatura de operación de la pila debe ser inferior a la de ebullición del agua, restringiendo las posibilidades de cogeneración.
 - × Emplean un catalizador (platino) y una membrana (de polímero sólido) muy costosos.

B) Pila Alcalina (AFC)

F. T. Bacon fue el primero que experimentó con pilas alcalinas utilizando hidróxido de potasio en vez de los electrolitos ácidos conocidos desde los primeros experimentos de Grove. Los electrodos de *gas-diffusion* aumentaban el área de reacción entre el electrodo, el electrolito y el combustible. Además, Bacon utilizaba el hidrógeno comprimido a alta presión para resguardar los poros de los electrodos del electrolito acuoso. En 1960, la NASA y la compañía Pratt & Whitney establecen un convenio bajo el programa Apollo para enviar al espacio una nave propulsada por una pila de tipo alcalina. En la actualidad, la NASA emplea pilas de este tipo fabricadas por UTC Fuel Cells en el programa Shuttle.

A diferencia de las pilas de tipo PEM, en este tipo de pilas, el electrolito conduce iones hidróxido (OH⁻) desde el cátodo hacia el ánodo. El electrolito está formado por una mezcla

alcalina fundida de hidróxido de potasio (KOH) que puede ser móvil o no. En el caso de pilas con electrolito fluido, el electrolito circula continuamente entre los electrodos. En las pilas con electrolito fijo, el electrolito consiste en una fina pasta adherida a una matriz porosa de amianto. La temperatura de operación oscila entre 65 °C y 220 °C, y presión de una atmósfera. Cada celda puede entregar entre 1,1 V y 1,2 V. La Figura 2.15 muestra el funcionamiento básico de las celdas AFC.

- Ventajas:
 - ✓ Trabajan a baja temperatura.
 - ✓ Tienen un rápido arranque.
 - ✓ Alta eficiencia.
 - ✓ Emplean muy poca cantidad de catalizador, disminuye costes.
 - ✓ No tiene problemas de corrosión.
 - ✓ Tienen una operación sencilla.
 - ✓ Poseen bajo peso y volumen.
- Desventajas:
 - × Son extremadamente intolerantes al CO₂ (máximo 350 ppm) y muestran cierta intolerancia al CO. Ésto limita tanto el tipo de oxidante como el tipo de combustible. El oxidante debe ser oxígeno puro o aire libre de CO₂. El combustible debe ser hidrógeno puro.
 - × Emplean un electrolito líquido, lo que supone problemas de manipulación.
 - × Requieren un tratamiento de evacuación del agua complejo.
 - × Tienen un tiempo de vida relativamente corto.

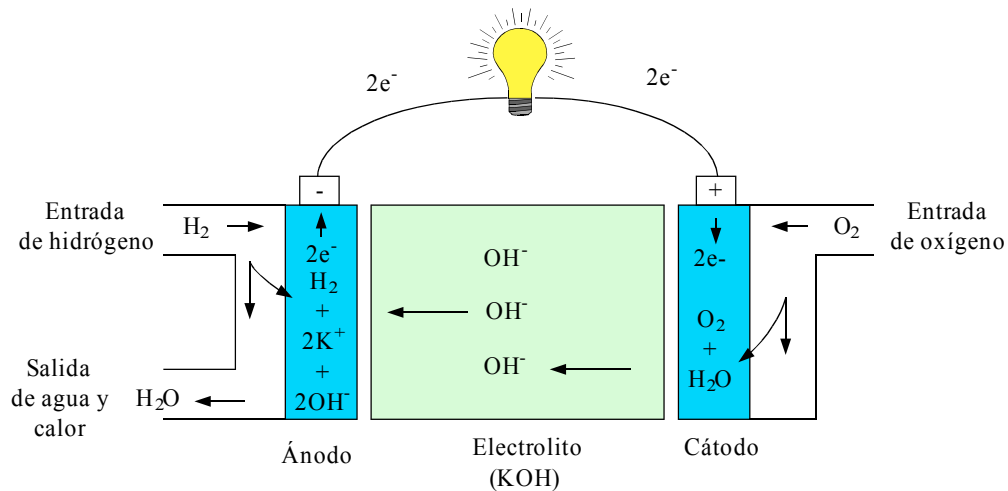


Figura 2.15: Esquema básico de una celda de combustible de tipo AFC.

C) Pila de Metanol Directo (DMFC)

En 1990, el Jet Propulsion Laboratory de la NASA junto con la Universidad del Sur de California, desarrollaron una pila de metanol directo. Este tipo de pilas vienen reemplazando a las baterías tradicionales en algunas aplicaciones. Se espera que ganen espacio en el mercado gracias a que poseen un mayor tiempo de vida en comparación con las baterías de ión Litio y que pueden ser recargadas cambiando simplemente el cartucho de combustible. Este tipo de pilas está siendo desarrollado por las compañías Samsung (en Corea) y Toshiba, Hitachi, NEC y Sanyo (en Japón). Al igual que las pilas PEM, estas pilas emplean un electrolito de membrana polimérica, sin embargo, en las pilas de metanol directo el catalizador del ánodo extrae el hidrógeno del metanol líquido, eliminando así la necesidad de un reformador de combustible. Presentan eficiencias del orden del 40% y trabajan a temperaturas de alrededor de 130 °C. Son empleadas en aplicaciones de pequeño y medio tamaño, para alimentar teléfonos móviles y ordenadores portátiles. La Figura 2.16 muestra el funcionamiento básico de las celdas DMFC.

- Ventajas:
 - ✓ Utilizan un combustible líquido. El tamaño de los depósitos es menor y puede aprovecharse la infraestructura actual de suministro.
 - ✓ No es necesario ningún proceso de reformado.

- ✓ El electrolito es una membrana de intercambio protónico (similar a las pilas de tipo PEMFC).
- Desventajas:
 - ✗ Baja eficiencia respecto a las celdas de hidrógeno.
 - ✗ Necesita grandes cantidades de catalizador (metal noble) para la electro-oxidación del metanol en el ánodo.

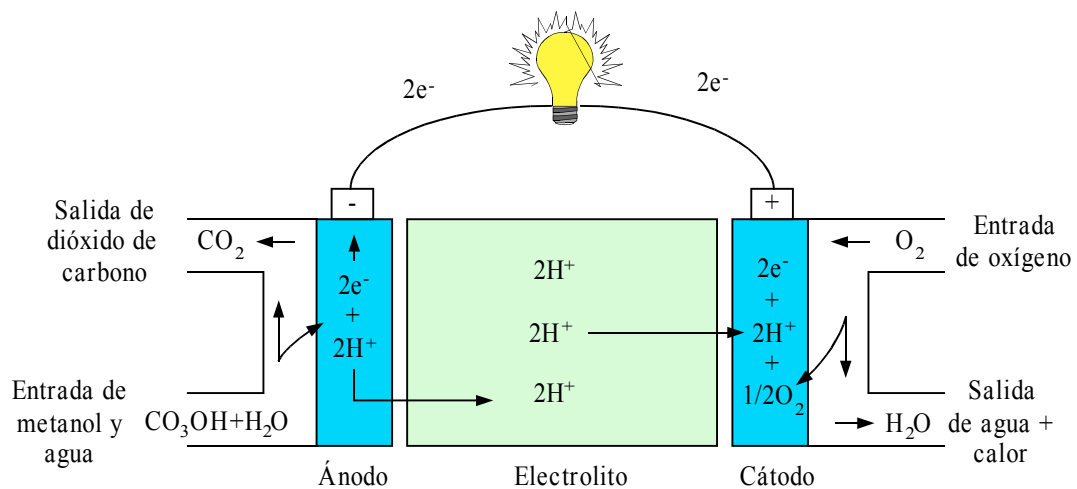


Figura 2.16: Esquema básico de una celda de combustible de tipo MDPC.

D) Pila de Ácido Fosfórico (PAFC)

Las pilas de ácido fosfórico han sufrido un progreso más lento que las demás debido a la baja conductividad del ácido. En 1961, G. V. Elmore y H. A. Tanner realizan un experimento con una pila de este tipo empleando un electrolito que era 35% de ácido y 65% de polvo de silicio pegado en una junta de teflón. Esta pila funcionaba con aire y no con oxígeno. A mediados de los sesenta, la Armada Estadounidense estudia las posibilidades de emplear combustibles convencionales en las pilas PAFC. Para ello emplearon una pila fabricada por Allis-Chalmers y un reformador de Engelhard Industries. Las pilas de ácido fosfórico están muy extendidas comercialmente (instaladas en 19 países en: hospitales, hoteles, edificios de oficinas, colegios, plantas de tratamiento de aguas). La eficiencia de este tipo de pilas alcanza el 40% en la producción de electricidad y el 85% en cogeneración. Trabajan a temperaturas comprendidas

entre 150 - 200 °C y presiones de una atmósfera. Cada celda puede producir en torno a 1,1 V. Tolera aproximadamente el 1,5% de impurezas de monóxido de carbono.

Este tipo de pilas emplean un electrolito que conduce iones de hidrógeno (H⁺) desde el ánodo hacia el cátodo. El electrolito está formado, como su propio nombre indica, por un líquido de ácido fosfórico dentro de una matriz de carburo de silicio. Existen algunas pilas que emplean un electrolito de ácido sulfúrico. La Figura 2.17 muestra el funcionamiento básico de las celdas PAFC.

- Ventajas:
 - ✓ Toleran hasta un 30% el CO₂, por lo tanto, este tipo de pilas pueden emplear aire directamente de la atmósfera.
 - ✓ Aunque trabajan a baja temperatura, éstas son superiores a las de las pilas vistas hasta el momento, lo cual permite aprovechar el calor residual para realizar cogeneración.
 - ✓ Emplean un electrolito con características estables, de baja volatilidad incluso para temperaturas superiores a 200 °C.
- Desventajas:
 - x Presentan una tolerancia máxima del 2% al CO.
 - x Emplean un electrolito líquido corrosivo a temperaturas medias, lo cual supone problemas de manipulación y seguridad.
 - x Permite la entrada de agua que puede diluir el electrolito ácido.
 - x Son grandes y pesadas.
 - x No pueden autoreformar el combustible.
 - x Necesitan alcanzar una determinada temperatura antes de empezar a funcionar, es decir, deben mantener su temperatura de operación.

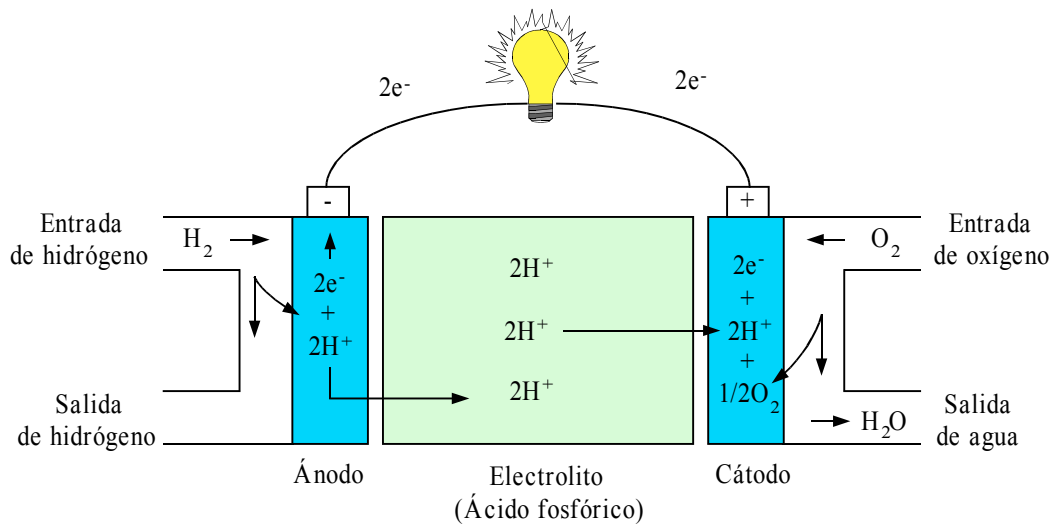


Figura 2.17: Esquema básico de una celda de combustible de tipo PAFC.

E) Pila de Carbonato Fundido (MCFC)

Durante los años treinta, E. Baur y H. Preis experimentaron con electrolitos de óxido sólido a alta temperatura. Encontraron problemas con la conductividad eléctrica y las reacciones químicas no deseadas entre el electrolito y algunos gases (entre ellos el monóxido de carbono). Dos décadas después, los científicos H. J. Broers y J. A. A. Ketelaar, viendo las limitaciones de los óxidos sólidos, centran su trabajo en las sales de carbonato fundido. En 1960, anuncian que han conseguido hacer trabajar, durante seis meses, una pila de combustible que emplea como electrolito una mezcla de litio, sodio y carbonato de potasio, impregnado en un disco de aglomerado poroso de óxido de magnesio. Sin embargo, descubrieron que la cantidad de energía producida respecto a la cantidad de combustible consumido era inferior a lo esperado. Esto era debido a que por la zona de unión de electrodo y electrolito (por las juntas), se producían pérdidas. A mitad de los años sesenta, el Centro de Desarrollo e Investigación de Equipos de Movilidad de la Armada Estadounidense prueba varias pilas de carbonato fundido fabricadas por Texas Instruments. Eran pilas con potencia de salida de entre 100 W y 1000 W y eran diseñadas para ser utilizadas en vehículos de combate usando un reformador externo para extraer el hidrógeno. La Armada pretendía emplear combustibles tradicionales para que el suministro en el campo no presentara dificultades.

Las pilas de carbonato fundido emplean un electrolito compuesto por una mezcla de carbonatos de litio y de potasio. Por este electrolito se transportan iones de carbonato (CO_3^{2-}) desde el cátodo hasta el ánodo (a la inversa de la mayoría de las pilas). Son pilas que trabajan a altas temperaturas (alrededor de 650 °C) y presiones de entre 1 y 10 atmósferas. Cada celda puede llegar a producir entre 0,7 V y 1 V. Requieren dióxido de carbono y oxígeno como combustibles. Hasta el momento se han realizado pruebas con pilas desde 10 kW hasta 2 MW y han sido las primeras en emplearse en aplicaciones prácticas. La Figura 2.18 muestra el funcionamiento básico de las celdas MCFC.

- Ventajas:
 - ✓ Permiten el reformado interno espontáneo de combustible.
 - ✓ Generan una gran cantidad de calor.
 - ✓ Alta velocidad en las reacciones.
 - ✓ Alta eficiencia.
 - ✓ No necesitan catalizador de metal noble (reducción del coste).
- Desventajas:
 - × Para su mayor desarrollo, necesitan que se diseñen materiales resistentes a la corrosión y dimensionalmente estables y resistentes. El catalizador de óxido de níquel del cátodo puede disolverse en el electrolito provocando fallos de funcionamiento. La inestabilidad dimensional puede provocar deformación, alterando la zona activa de los electrodos.
 - × Presentan una alta intolerancia al azufre. En particular, el ánodo no tolera más de 1,5 ppm de partículas de azufre en el combustible. En caso contrario, la pila sufriría un significativo deterioro de su funcionamiento.
 - × Tienen un electrolito líquido, con los correspondientes problemas de manipulación.
 - × Requieren de una fase de pre-calentamiento antes de empezar a funcionar.

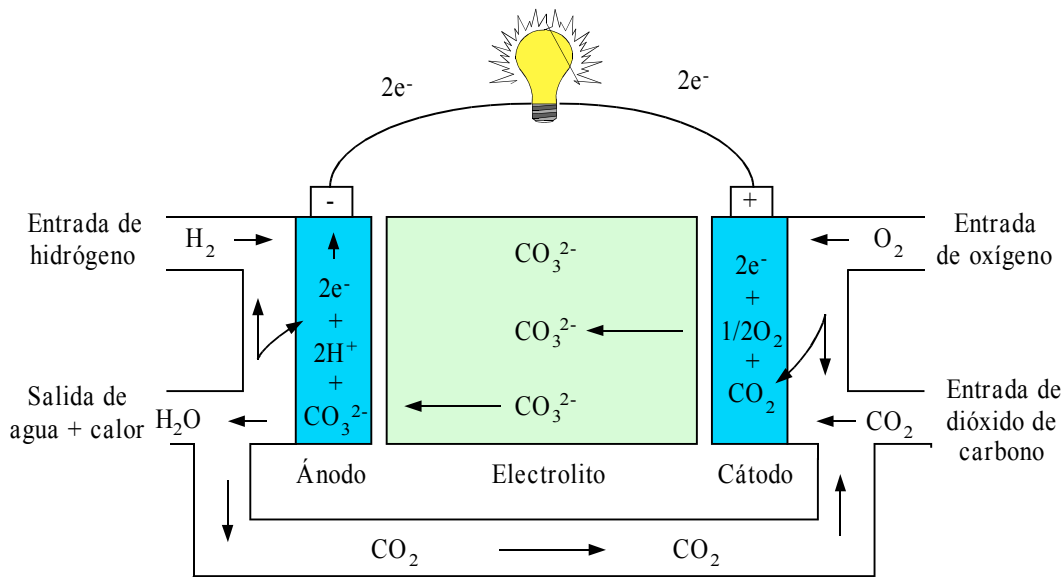


Figura 2.18: Esquema básico de una celda de combustible de tipo MCFC.

F) Pila de Óxido Sólido (SOFC)

A finales de los años treinta, los científicos E. Baur y H. Preis experimentaron con electrolitos de óxido sólido, empleando materiales como el zirconio, ytrio o lantano.

Las pilas SOFC emplean un electrolito que conduce iones de óxido (O^{2-}) desde el cátodo al ánodo (al contrario que otras pilas). El electrolito es un óxido sólido, normalmente el zirconio. Para los electrodos, se emplean metales como el níquel o el cobalto. Trabajan a muy alta temperatura (alrededor de $1000\text{ }^\circ\text{C}$) y presiones de una atmósfera. Cada celda puede producir en torno a $0,8\text{ V}$ ó 1 V . Este tipo de pilas se emplean en aplicaciones estacionarias o como sistemas auxiliares de potencia (APUs). La Figura 2.19 recoge el funcionamiento básico de las celdas SOFC.

- Ventajas:
 - ✓ Permiten el reformado interno espontáneo de combustible. Gracias a que los iones de óxido viajan a través del electrolito, la celda de combustible se puede emplear para oxidar cualquier combustible gaseoso.
 - ✓ Generan una gran cantidad de calor.
 - ✓ Las reacciones químicas son muy rápidas.

- ✓ Tienen una alta eficiencia.
- ✓ Pueden trabajar a densidades de corriente más altas que las pilas de carbonato fundido.
- ✓ El electrolito es sólido. Se evitan los problemas de manipulación de líquidos.
- ✓ No necesitan catalizadores de metales nobles.
- Desventajas:
 - ✗ Para su total implantación en el mercado, necesitan que se desarrollen materiales que tengan suficiente conductividad, que permanezcan sólidos a las temperaturas de operación, que sean químicamente compatibles con otros componentes de la celda, que sean dimensionalmente estables y que tengan alta resistencia.
 - ✗ Presentan una moderada intolerancia al azufre (50 ppm).
 - ✗ No es una tecnología madura.

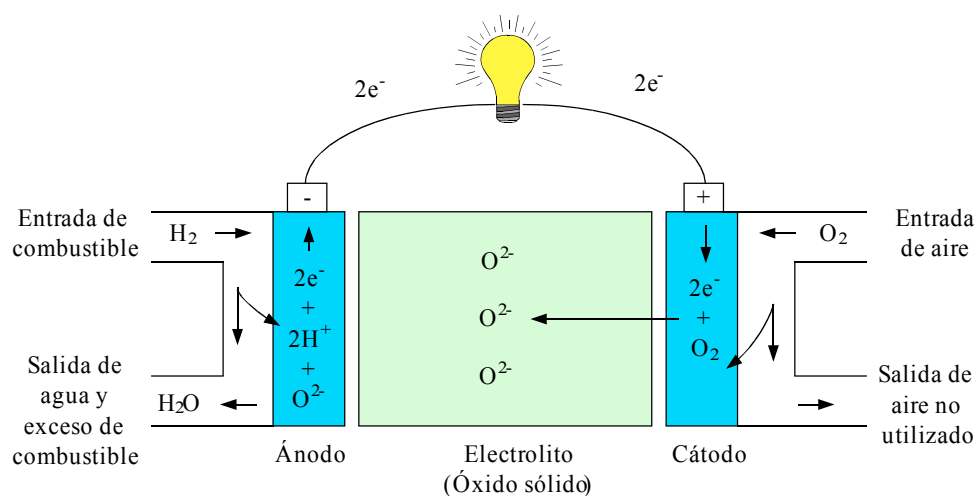


Figura 2.19: Esquema básico de una celda de combustible de tipo SOFC.

Además de los seis tipos de pilas de combustible vistos, están apareciendo otros subtipos como consecuencia del desarrollo e investigación en algunas de éstas.

Por ejemplo, la pila de *Ácido Fórmico Directo* (DFAFC) [49], [50] que es una subcategoría de las pilas de tipo PEM. En ellas el ácido fórmico (el combustible) alimenta directamente a la pila sin necesidad de reformado. Entre sus aplicaciones destacan dispositivos electrónicos

portátiles como teléfonos u ordenadores portátiles. Este tipo de pilas presentan dos ventajas importantes respecto a las pilas de membrana polimérica. Por un lado, el almacenamiento del ácido fórmico es mucho más sencillo y seguro que el del hidrógeno. Por otro, al ser líquido a temperatura ambiente, no necesita estar sometido a altas presiones o bajas temperaturas. La reacción química que tiene lugar en el ánodo es la oxidación del ácido fórmico convirtiéndose en dióxido de carbono y agua. En el cátodo, los iones de hidrógeno que atraviesan la membrana se combinan con el oxígeno para formar agua.

Las pilas de ***Etanol Directo*** (DEFC) [51], [52] también son una subcategoría de las pilas tipo PEM, donde el etanol alimenta directamente a la pila sin necesidad de reformado. El etanol como combustible es una alternativa atractiva, ya que es menos tóxico y más fácil de suministrar que el metanol. Además es más rico en hidrógeno y tiene mayor densidad energética (8 kW/kg) que el metanol (6,1 kW/kg). Puede obtenerse en grandes cantidades a partir de la biomasa mediante procesos de fermentación de recursos renovables como el azúcar de caña, el trigo o el maíz. Las pilas DEFC no necesitan metales nobles como catalizadores, es más, se han obtenido densidades de potencia del orden de 140 mW/cm² empleando hierro, níquel o cobalto.

Las pilas de ***Cerámica Protónica*** (PCFC) [53], [54] emplean como electrolito un material cerámico que presenta una alta conductividad protónica a elevadas temperaturas. Este tipo de pilas poseen las mismas ventajas térmicas y cinéticas que las pilas de alta temperatura (alta eficiencia en cogeneración) a la vez que tiene la capacidad de oxidar el combustible fósil directamente sin necesidad de reformado. Las moléculas gaseosas de los hidrocarburos (combustible fósil) son absorbidas en la superficie del ánodo en presencia de vapor de agua, liberándose así los átomos de hidrógeno que viajarán a través del electrolito.

Por último, las pilas de ***Borhídrido Directo*** (DBFC) [55], [56], que son consideradas una subcategoría de las pilas alcalinas, emplean como combustible una solución de borhídrido de sodio. La ventaja del borhídrido de sodio respecto al hidrógeno en una pila de tipo alcalina, es que el uso de un combustible altamente alcalino y con cantidad de borax (borato de sodio) protege a la pila de combustible de posibles envenenamientos de dióxido de carbono. Es decir, hacen que este tipo de pilas tolere mejor el dióxido de carbono que existe en el aire.

2.2.6 Aplicaciones y disponibilidad comercial

Aunque muchos de los fabricantes están trabajando en pilas de combustible con aplicación directa en el sector de la automoción, existen multitud de usos de las pilas de combustible. Entre las aplicaciones más extendidas se puede encontrar su uso en aviones, barcos, trenes, autobuses, coches, motocicletas o máquinas elevadoras propulsadas mediante un sistema de pila de combustible. También existen máquinas expendedoras, máquinas limpiadoras en vacío o señales de tráfico que funcionan en base a pilas de combustible. Por otro lado, existe un mercado creciente de pilas de combustibles para teléfonos móviles, ordenadores portátiles y aparatos eléctricos portátiles. A escalas mayores, hay hospitales, centros de policía y bancos que disponen de un sistema de pila de combustible para la generación de potencia eléctrica en sus instalaciones. Plantas de tratamiento de aguas residuales y vertederos están empezando a usar pilas de combustible para llevar a cabo el proceso de transformar el gas metano que generan en electricidad. Como se puede observar, el número de aplicaciones diferentes de las pilas de combustible es muy extenso.

A) Aplicaciones estacionarias

Más de 2500 sistemas con pilas de combustible han sido instalados por todo el mundo en hospitales, casas de acogidas, centros para el cuidado de personas mayores, hoteles, oficinas y colegios. En estos casos, el sistema de pila de combustible está conectado a la red eléctrica para proporcionar potencia eléctrica adicional a la planta [57], [58], o bien actúa como sistema independiente de la red para generar electricidad en zonas aisladas o remotas [59], [60].

Los sistemas de generación de potencia eléctrica basados en pilas de combustible alcanzan hoy en día una eficiencia del 40% en el proceso completo: utilizando como combustible algún hidrocarburo y tomando como punto de partida el combustible y como punto final la obtención de la electricidad. Ya que las pilas trabajan silenciosamente y no producen contaminación ambiental, se pueden ubicar próximas a la zona en la que se va a utilizar su electricidad. Además, en aplicaciones estacionarias, se utilizan pilas de combustible de alta temperatura, por lo que la cogeneración puede aumentar la eficiencia hasta el 85%, además de reducir los costes en consumo energético.

En el campo de las telecomunicaciones, los ordenadores, Internet y las redes de telecomunicación se han convertido en algo imprescindible para el ser humano. Esto implica la

necesidad de disponer de un abastecimiento eléctrico completamente fiable. Precisamente en este campo de aplicación, se demuestra que las pilas de combustible alcanzan un porcentaje de fiabilidad del 99,999% [61]. Por ello, las pilas de combustible están empezando a competir con las baterías para rangos de potencia de entre 1 - 5 kW en sistemas de telecomunicaciones ubicados en lugares remotos inaccesibles a la red eléctrica. También se emplean las pilas de combustible para suministrar potencia primaria o como sistema de apoyo en nodos de conmutación de telecomunicaciones, torres de transmisión-recepción u otros dispositivos electrónicos que puedan beneficiarse de la potencia en DC que puede suministrar una pila de combustible a su salida [62].

Otras aplicaciones estacionarias de las pilas de combustible son en los vertederos o en las plantas de tratamiento de aguas residuales [63]. El uso de las pilas de combustible reduce las emisiones nocivas y permite la generación de potencia a partir del gas metano (combustible rico en hidrógeno utilizado por determinados tipos de pilas) que produce la propia planta. También se han instalado pilas de combustible en las cervecerías de Sierra Nevada (California) y de Kirin, Asahi y Sapporo (Japón), para aprovechar el metano derivado de los vertidos no tratados de las mismas.

B) Aplicaciones en el transporte






La mayoría de los fabricantes de vehículos tienen un vehículo con pila de combustible en desarrollo o en investigación y prueba. Es más, como se indica en la Figura 2.5, la compañía Honda ha sacado al mercado el primer vehículo movido exclusivamente por pila de combustible de fabricación en serie. La Tabla 2.2 recoge un resumen de los modelos de vehículos con pilas de combustible (el primero y el más reciente) clasificados por fabricante [64].



Respecto a los autobuses con pilas de combustible, en los últimos cuatro años, un buen número de autobuses con pilas de combustible se han puesto en funcionamiento en todo el mundo. Estos vehículos son altamente eficientes incluso si el hidrógeno es producido a partir de combustibles fósiles, ya que reducen las emisiones de CO₂ llegando a ser nulas si el hidrógeno es producido a partir de energías renovables. Además, colaboran en la reducción del nivel de ruido de las grandes ciudades. La Tabla 2.3 muestra las realizaciones llevadas a cabo con autobuses de pilas de combustible clasificados por fabricantes de autobuses [65].






Tabla 2.2: Vehículos con pila de combustible.

Fabricante	Modelo coche	Año	Tipo de motor	Fabricante pila de combustible	Autonomía- Velocidad máx	Tipo de combustible
Audi	A2	2004	Híbrido Pila+Batería	Ballard	220 km- 175 km/h	Hidrógeno gas
BMW	Serie 7	2000	Motor combustión (Pila-APU)	UTC	300 km- 220 km/h	Gasolina / Hidrógeno líquido
Daimler-Chrysler	Necar 1	1994	Pila de combustible	Ballard	130 km- 90 km/h	Hidrógeno comprimido
	EcoVoyager	2008	Híbrido Pila+Batería	-	483 km- 185 km/h	Hidrógeno comprimido
Fiat	Seicento	2001	Híbrido Pila+Batería	Nuvera	140 km- 100 km/h	Hidrógeno comprimido



Fabricante	Modelo coche	Año	Tipo de motor	Fabricante pila de combustible	Autonomía- Velocidad máx	Tipo de combustible					
	Panda	2007	Pila de combustible	Nuvera	200 km- 130 km/h	Hidrógeno comprimido					
Ford	P2000 HFC	1999	Pila de combustible	Ballard Mark Serie 900	160 km	Hidrógeno comprimido					
	HySeries edge	2007	Híbrido Pila+Batería	Ballard	491 km- 137 km/h	-					
GM	Sintra	1997	Pila de combustible	-	-	-					
	Provoq	2008	Híbrido Pila+Batería	GM	483 km- 160 km/h	-					

Fabricante	Modelo coche	Año	Tipo de motor	Fabricante pila de combustible	Autonomía- Velocidad máx	Tipo de combustible
GM (Sanghai) PATAC	Phoenix	2001	Híbrido Pila+Batería	Sanghai GM	200 km- 113 km/h	Hidrógeno comprimido
						
Honda	FCX-V1	1999	Híbrido Pila+Batería	Ballard Mark Serie 700	117 km- 130 km/h	Hidrógeno (hidruros metálicos)
	FCX Clarity	2007	Pila de combustible	Honda	570 km- 160 km/h	Hidrógeno comprimido
Hyundai	Santa Fe SUV	2000	Pila de combustible	UTC	160 km- 124 km/h	Hidrógeno comprimido
	I-Blue	2007	Pila de combustible	-	600 km- 165 km/h	Hidrógeno comprimido
						

Fabricante	Modelo coche	Año	Tipo de motor	Fabricante pila de combustible	Autonomía- Velocidad máx	Tipo de combustible
Kia	Sportage	2004	Pila de combustible	UTC	300 km- 150 km/h	Hidrógeno comprimido
						
Mazda	Demio	1997	Pila combustible + Ultra-condensador	Mazda	170 km- 90 km/h	Hidrógeno (hidruros metálicos)
						
	Premacy FC-EV	2001	Pila de combustible	Ballard Mark Serie 900	1240 km/h	Metanol
						
Mitsubishi	SpaceLiner	2001	Híbrido Pila+Batería	-	-	Metanol
						
	Grandis FCV	2003	Híbrido Pila+Batería	Daimler Chrysler/Ballard	150 km- 140 km/h	Hidrógeno comprimido
						

Fabricante	Modelo coche	Año	Tipo de motor	Fabricante pila de combustible	Autonomía- Velocidad máx	Tipo de combustible
Morgan	LIFECar	2008	Pila de combustible	QinetiQ	402 km- 137 km/h	-
Nissan	R'nessa (SUV)	1999	Híbrido Pila+Batería	Ballard Mark Serie 700	70 km/h	Metanol
PSA Peugeot Citroën	Peugeot Hydro- Gen	2001	Híbrido Pila+Batería	- Nuvera	- 300 km- 95 km/h	- Hidrógeno comprimido
	H2Origin	2008	Híbrido Pila+Batería	Intelligent energy	300 km	Hidrógeno comprimido



Fabricante	Modelo coche	Año	Tipo de motor	Fabricante pila de combustible	Autonomía- Velocidad máx	Tipo de combustible
Renault	EU FEVER	1997	Híbrido Pila+Batería	Nuvera	400 km- 120 km/h	Hidrógeno Líquido
	Scenic FCV H2	2008	Híbrido Pila+Batería	Nissan	240 km- 161 km/h	Hidrógeno comprimido
Suzuki	Covie	2001	Pila de combustible	GM	-	-
Toyota	SX4-FCV	2008	Pila de combustible	GM	250 km- 150 km/h	Hidrógeno comprimido
	RAV 4 FCEV	1996	Híbrido Pila+Batería	Toyota	250 km- 100 km/h	Hidrógeno (hidruros metálicos)
	FCHV-adv	2008	Híbrido Pila+Batería	-	830 km- 155 km/h	-



Fabricante	Modelo coche	Año	Tipo de motor	Fabricante pila de combustible	Autonomía- Velocidad máx	Tipo de combustible
VW	EU Capri	1999	Híbrido Pila+Batería	Ballard Mark Serie 500	-	Metanol
	Tiguan HyMotion	2008	Híbrido Pila+Batería	-	149 km/h	



Tabla 2.3: Autobuses con pila de combustible.

Fabricante	Tipo autobús	Año	Tipo de motor	Fabricante pila de combustible	Autonomía- Velocidad máx	Tipo de combustible
Bus Manufacturing USA, Inc.	Urbano	1994	Híbrido Pila+Batería	Fuji Electric	402 km- 90 km/h	Metanol
	Urbano	1995	Híbrido Pila+Batería	Fuji Electric	402 km- 90 km/h	Metanol
Volvo	Urbano	1998	Híbrido Pila+Batería	UTC	563 km- 106 km/h	Metanol
	Urbano	2005	Híbrido Pila+Batería	Ballard	563 km- 106 km/h	Metanol
New Flyer Industries Ltd.	Urbano	1993	Híbrido Pila+Batería	Ballard	400 km- 95 km/h	Hidrógeno comprimido



Fabricante	Tipo autobús	Año	Tipo de motor	Fabricante pila de combustible	Autonomía- Velocidad máx	Tipo de combustible
	Urbano	2006	Pila combustible + Ultra-condensador	Hydrogenics	-	Hidrógeno comprimido
Enova Systems	-	2004	Híbrido Pila+Batería	Hydrogenics	-	Hidrógeno
Daimler Chrysler	Urbano regular	1997 Nebus	Híbrido Pila+Batería	Ballard	250 km- 80 km/h	Hidrógeno comprimido
	Medio recorrido	2003 Mercedes Benz Citaro	Híbrido Pila+Batería	Ballard	200 km- 80 km/h	Hidrógeno comprimido
Renault	Urbano	2001	Híbrido Pila+Batería	UTC	-	Hidrógeno comprimido



Fabricante	Tipo autobús	Año	Tipo de motor	Fabricante pila de combustible	Autonomía- Velocidad máx	Tipo de combustible
Man	Urbano Bavaria	2000	Híbrido	Ballard	300 km- 80 km/h	Hidrógeno comprimido
			Pila+Batería			
Neoplan	Medio recorrido N8008 FC	1999	Híbrido	Nuvera	600 km- 50 km/h	Hidrógeno comprimido
			Pila+Batería			
	Medio recorrido N8012-33 FC	2000	Híbrido	GmbH	250 km- 80 km/h	Hidrógeno comprimido
			Pila+Volante de inercia			
Van Hol	Urbano regular	1995	Híbrido	Elenco	250 km- 80 km/h	Hidrógeno líquido
			Pila+Batería			
	Urbano	2006	Híbrido	UTC	400 km- 105 km/h	Hidrógeno comprimido
			Pila+Batería			
Toyota	Urbano FCHV-BUS2	2001	Híbrido Pila+Batería	Toyota	300 km- 80 km/h	Hidrógeno comprimido



Otro medio de transporte en el que se están utilizando pilas de combustible es la motocicleta [66], [67]. A pesar de su tamaño reducido, las motocicletas son una importante fuente de contaminación en las ciudades. Las motocicletas con motores de dos tiempos producen una cantidad de emisiones desproporcionada respecto a su tamaño (casi tanto como un camión diesel). Empleando pilas de combustible se reducirían estas emisiones.

Las pilas de combustible están empezando también a ser utilizadas en las máquinas transportadoras y elevadoras eléctricas. El empleo de pilas de combustible en estas máquinas supone una reducción del coste logístico, ya que apenas si necesitan mantenimiento ni recambio respecto a las que son alimentadas por batería. Además, debido a las continuas paradas y arranques de este tipo de máquinas, se producen numerosos fallos e interrupciones. Con pilas de combustible, el suministro continuo de potencia está garantizado eliminando los problemas ocasionados por la caída de tensión debido a la descarga de las baterías.

Otra de las aplicaciones en el sector del transporte es el uso de pilas de combustible como Unidades de Potencia Auxiliar (APUs) en camiones de largo recorrido [68]. En este sentido, el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) ha estimado en 1,17 billones de dólares [69] el coste anual de gastos de combustible y mantenimiento del motor durante el tiempo en el que el camión está en relenti (periodos de estacionamiento y descanso del conductor). Durante este tiempo, la APU tiene que alimentar todos los aparatos eléctricos útiles para el conductor (calentador, aire acondicionado, ordenador, televisor, radio, frigorífico, microondas, etc). El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) afirma que empleando APUs basadas en pilas de combustible en los camiones Mercedes-Benz Clase 8 de todo el país se pueden llegar a ahorrar aproximadamente 2500 millones de litros de diesel y entre 11 y 80 toneladas de CO₂ al año [70].

Las pilas de combustible también se están desarrollando para su uso en las locomotoras de las minas ya que no producen contaminación [71], [72]. Un consorcio internacional (integrado por Vehicle Projects LLC, la Armada Estadounidense, el Centro Nacional del Automóvil de los Estados Unidos, AeroViroment Inc., HERA Hydrogen Storage Systems Inc, Mesofuel Inc, Nuvera Fuel Cells, Jacobs Engineering Group Inc. y el Departamento de Energía y Recursos Naturales de Canadá) está desarrollando desde 2003 una locomotora de 109 toneladas métricas con una planta de potencia 1,2 MW basada en ocho módulos idénticos de pilas de combustible de tipo PEM de 150 kW.

Por razones estratégicas, la Armada Estadounidense ve en las pilas de combustible aplicadas a los aviones una opción realmente atractiva. El uso de las pilas de combustible en este caso [73] consigue reducir las emisiones de ruido del avión, que no sea fácilmente detectable a radares de temperatura gracias a la baja temperatura de operación de las pilas de combustible utilizadas y también permite aprovechar el agua producida por las pilas de combustible, lo que supone una reducción significativa de las necesidades en aviones de largo recorrido.

Las ventajas de reducción de consumo de combustible y una mayor eficiencia son los principales motivos que llevan a considerar el uso de las pilas de combustible en barcos. De forma general, por cada litro de combustible consumido en un barco, se produce 140 veces más contaminación que en un coche moderno. Esto ha llevado a que países como Islandia se hayan comprometido a que para 2015, su flota pesquera emplee pilas de combustible para suministrar potencia auxiliar. En una segunda fase se pretende emplearlas como unidades de suministro de potencia primaria [74].

La Tabla 2.4 recoge un resumen de estas últimas aplicaciones de las pilas de combustible en el sector del transporte con vehículos especiales [75].

C) Aplicaciones portátiles

Las pilas de combustible pueden proporcionar potencia eléctrica en aquellos lugares donde la red eléctrica no está disponible. Por ejemplo, en un lugar de vacaciones al aire libre (zona de acampada), el uso de una pila de combustible para el suministro eléctrico en vez de un generador diesel, evita las emisiones nocivas, ayuda a conservar el medio ambiente y no acarrea problemas de ruido a otras personas en el entorno [76], [77].

También, las pilas de combustible están siendo utilizadas como unidades de apoyo cuando se producen cortes eléctricos y en aplicaciones militares. Las pilas de combustible son mucho más ligeras y más duraderas que las baterías, algo especialmente importante en periodos de maniobras para los soldados y, más aún en caso de conflicto bélico.

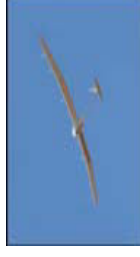
D) Micropotencia

Las pilas de combustible podrían llegar a cambiar el mundo de las telecomunicaciones, ya que pueden ser usadas en teléfonos móviles u ordenadores portátiles con mucha más duración que una batería [78], [79]. Para estas aplicaciones, y dadas las características de las pilas de

combustible, se suelen emplear pilas de metanol directo. Compañías como Motorola, Toshiba Samsung Panasonic, Sanyo o Sony [80] ya han demostrado que las pilas de combustible pueden alimentar equipos de telecomunicación. Por ejemplo, han demostrado que los teléfonos móviles pueden estar funcionando durante el doble de tiempo con respecto a uno que utilice una batería de litio con un tamaño equivalente y además, sólo necesita diez minutos para la recarga. En lo que a ordenadores portátiles se refiere, se ha demostrado que los ordenadores portátiles con pila de combustible pueden estar trabajando hasta cinco horas sin necesidad de recarga. Otras aplicaciones para micro-pilas de combustible incluyen buscapersonas, video-regrabadoras, audífonos, detectores de humo, alarmas de seguridad o revisores de contador. En estos casos, las pilas de combustible también están alimentadas de metanol.







Tabla 2.4: Vehículos especiales con pila de combustible.

Fabricante	Tipo vehículo	Año	Tipo de pila de combustible	Autonomía- Velocidad máx	Tipo de combustible
Aerovironment	Aeroplano (Helios)	2003	PEM	402 km- 43 km/h	Hidrógeno comprimido
	Aeroplano (Global observer)	2005	-	-	Hidrógeno líquido
Anuvu	Barco	2003	PEM	-	Hidrógeno de borhídrido de sodio
Asia Pacific Fuel cell Technologies (APFCT)	Motocicleta (ZES III)	2002	PEM	120 km- 58 km/h	Hidrógeno (hidruros metálicos)
	(ZES V)	2005	PEM+ batería de litio	80 km- 60 km/h	Hidrógeno (hidruros metálicos)



Fabricante	Tipo vehículo	Año	Tipo de pila de combustible	Autonomía-Velocidad máx	Tipo de combustible
Astris Energi	Carro de golf	2001	Alcalina	10h- 31 km/h	Hidrógeno comprimido
Besel SA	Silla de ruedas	2003	PEM	-	Hidrógeno (hidruros metálicos)
	Motocicleta (Derbi)	2003	PEM	-	Hidrógeno (hidruros metálicos)
Cellex Power Products	Máquina elevadora	2004	Cellex PEM	-	Hidrógeno comprimido



Fabricante	Tipo vehículo	Año	Tipo de pila de combustible	Autonomía- Velocidad máx	Tipo de combustible	
Deere & Company	Tractor	2003	Hydrogenic	4 h- 50 km/h	Hidrógeno comprimido	
Deutsches Zentrum	Moto acuática (HyFish)	2007	Horizon Fuel Cell	200 km/h	Hidrógeno comprimido	
ECN	Motocicleta	2004	PEM	100 km- 74 km/h	Hidrógeno	
EIVD-MW	Barco Hydroxy 3000	2003	PEM	160 km- 24 km/h	Hidrógeno comprimido	
FAAM	Bicicleta	2003	PEM	90 km	Hidrógeno (hidruros metálicos)	

Fabricante	Tipo vehículo	Año	Tipo de pila de combustible	Autonomía-Velocidad máx	Tipo de combustible
FASTTec-ATP	Aeroplano	2001	PEM	370 km/h	Hidrógeno a bordo
Georgia Institute of Technology	Aeroplano	2006	PEM	-	Hidrógeno
H2 Logic ApS	Máquina transportadora	2005	PEM	15 km/h	Hidrógeno almacenado a baja presión
HaveBlue LLC	Barco	2004	PEM	-	Hidrógeno (hidruros metálicos)
Honda	Motocicleta	2004	Honda PEM	-	Hidrógeno



Fabricante	Tipo vehículo	Año	Tipo de pila de combustible	Autonomía-Velocidad máx	Tipo de combustible
Howaldtswerke	Submarino	2002	Siemens Fuel Cell	-	
Hydrogenic	Máquina elevadora	2004	PEM	-	Hidrógeno
Intelligent Energy	Motocicleta	2005	Intelligent Energy CORE PEM	160 km-80 km/h	Hidrógeno comprimido
Kurimoto	Silla de ruedas	2003	APFCT PEM	60 km-160 km/h	Hidrógeno comprimido
Los Alamos National Laboratory	Vehículo de movilidad personal	2003	PEM	80 km-8 km/h	Hidrógeno (hidruros metálicos)



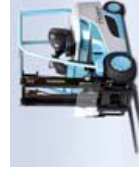
Fabricante	Tipo vehículo	Año	Tipo de pila de combustible	Autonomía- Velocidad máx	Tipo de combustible
Manhattan Scientifics	Hidrociclo (Aprilia)	2000	Novars PEM	100 km- 30 km/h	Hidrógeno comprimido
	Vehículo de movilidad personal	2003	PEM	27 km/h	Hidrógeno comprimido
Masterflex AG	Bicicleta	2004	MasterflexPEM	120 km	Hidrógeno (hidruros metálicos)
	Bicicleta de transporte	2007	MasterflexPEM	250 km- 6 km/h	Hidrógeno comprimido
MES-DEa	Motocicleta (Aprilia)	2004	PEM	140 km- 85 km/h	Hidrógeno comprimido



Fabricante	Tipo vehículo	Año	Tipo de pila de combustible	Autonomía- Velocidad máx	Tipo de combustible
MTU Friedrichshafen	Barco	2003	CoolCell PEM	225 km- 6 km/h	Hidrógeno comprimido
Palcan Fuel Cells Ltd.	Motocicleta de 3 ruedas	2003	PEM	50 km- 30 km/h	Hidrógeno comprimido
Peugeot	Quark	2004	MES-DEA PEM	100 km- 110 km/h	Hidrógeno comprimido
Powerzinc Electric	Bicicleta	2002	ZAFC	200 km- 20 km/h	Óxido de Zinc
	Motocicleta	2003	ZAFC	250 km- 70 km/h	Óxido de Zinc



Fabricante	Tipo vehículo	Año	Tipo de pila de combustible	Autonomía- Velocidad máx	Tipo de combustible
Proton Motor Fuel Cell	Máquina trasportadora	2004	PEM	8 horas	Hidrógeno comprimido
Quantum Fuel Systems Technologies	Todoterreno Biplaza	2004	PEM	128 km/h	Hidrógeno comprimido
Siemens/KWU	Máquina elevadora	1999	PEM	8 horas	Hidrógeno comprimido
Suzuki	Motocicleta de Cros	2007	PEM	-	Hidrógeno comprimido
Toyota	Máquina elevadora	2005	PEM	18 km/h	Hidrógeno comprimido



Fabricante	Tipo vehículo	Año	Tipo de pila de combustible	Autonomía- Velocidad máx	Tipo de combustible
Yamaha Motor Company	Motocicleta	2003	PEM	200 km- 40 km/h	Metanol
	Motocicleta (FC-Dii)	2007	PEM	-	Metanol



2.2.7 Comparación entre las pilas de combustible, los motores de combustión interna, las baterías y los ultracondensadores

A) Pilas de combustible y baterías

Tanto las pilas de combustible como las baterías están construidas mediante celdas galvánicas por lo que tienen muchas similitudes [81], [82]. La estructura básica de ambas consiste en una celda formada por un ánodo y un cátodo que rodean un electrolito. La generación de energía eléctrica se realiza, en los dos casos, mediante la conversión de energía química en energía eléctrica a través de una reacción electroquímica. Dicha reacción sucede en el ánodo y en el cátodo forzando la transferencia de electrones a través de una carga externa en base a completar la reacción (cerrar eléctricamente el circuito). Cada monocelda de una pila de combustible y de una batería genera una tensión muy pequeña, por lo que es necesario combinarlas en serie para alcanzar valores considerables de tensión y potencia.

La curva de polarización de una pila de combustible y de una batería son bastante parecidas. Ambas presentan un comportamiento excelente a cargas parciales, ya que la tensión entre sus extremos disminuye a medida que aumenta la carga. Por tanto, ambas son electroquímicamente igual de eficientes.

Por contra, las pilas de combustible difieren de las baterías en la naturaleza del ánodo y del cátodo. En una batería, ambos electrodos son metales (normalmente zinc o litio en el ánodo y óxidos metálicos en el cátodo). En una pila de combustible, el ánodo y el cátodo se forman a partir de poner en contacto un gas con un catalizador de platino para propiciar la reacción que genera la energía eléctrica. El gas que se suele emplear en el ánodo es el hidrógeno, mientras que para el cátodo es el oxígeno.

Otro de los aspectos en los que se diferencian las pilas de combustible de las baterías es el método fundamental por el que se almacenan los reactivos químicos. En una batería, el ánodo y el cátodo forman una parte integral de la estructura de la batería y son consumidos durante el uso de la propia batería. Por tanto, una batería sólo puede estar funcionando hasta que estos materiales son completamente consumidos. Después de esto, la batería debe ser recargada (necesitando una fuente de potencia eléctrica para la recarga) o reemplazada, dependiendo de la naturaleza de los materiales. En una pila de combustible, los reactivos químicos se suministran

desde una fuente externa, por lo que la pila de combustible puede estar trabajando de forma continua todo el tiempo, mientras se estén suministrando reactivos y los productos de la reacción se vayan expulsando.

Cuando se emplean ambas fuentes en aplicaciones de automoción, los sistemas de baterías necesitan de un inversor y un motor eléctrico, mientras que las pilas requieren de un sistema de compresión del aire y un complejo equipamiento de refrigeración y reformado de combustible. Las baterías como sistema de almacenamiento de potencia son más pesadas que las pilas de combustible.

En definitiva, si bien en muchas aplicaciones las pilas de combustible están sustituyendo ya a las baterías (ver apartado 2.2.6), hasta ahora suelen ser complementarias, ya que las pilas tienen un tiempo de respuesta inferior a las baterías y, además, el BOP de las pilas de combustible necesita inicialmente, hasta que lo puede hacer la propia pila, estar alimentado por baterías.

B) Pilas de combustible y motores de combustión interna

Una de las similitudes que comparten las pilas de combustible con los motores de combustión interna es que ambos emplean un combustible gaseoso extraído de una fuente de almacenamiento externa [83], [84]. Ambos usan combustible rico en hidrógeno. Las pilas emplean hidrógeno puro o una mezcla de gas reformado. En general, los motores de combustión interna emplean directamente combustibles fósiles que contienen hidrógeno, aunque pueden ser configurados para trabajar con hidrógeno puro.

Ambos sistemas emplean aire comprimido como oxidante. En una pila de combustible, el aire se comprime mediante un compresor externo. En un motor de combustión, el aire se comprime internamente mediante la acción de un pistón. Ambos sistemas necesitan también unidades de refrigeración.

En cambio, existen otros aspectos en los que ambos sistemas se diferencian. En una pila de combustible, el combustible y el oxidante reaccionan electroquímicamente mientras que en un motor de combustión, como su propio nombre indica, la reacción es por combustión. Además, en una pila de combustible existen dispositivos de estado sólido que generan energía eléctrica, mientras que en un motor de combustión existen dispositivos mecánicos que generan energía mecánica.

Desde el punto de vista de las emisiones nocivas, los niveles de contaminación generados dependen de la composición del combustible y de la temperatura de reacción. Los motores que funcionan con pilas de combustible trabajan con hidrógeno puro y no producen emisiones nocivas, tan sólo aquellos que funcionan con reformado rico en hidrógeno llegan a producir cierta cantidad de contaminación dependiendo de la naturaleza del proceso de reformado. De la misma forma, los motores de combustión interna que trabajan con hidrógeno puro, pueden ser diseñados para no generar emisiones nocivas, mientras que los que funcionan con combustibles convencionales producen importantes niveles de contaminación.

Las pilas de combustible son más eficientes a baja y media carga mientras que los motores de combustión interna trabajan más eficientemente a plena carga.

Respecto al peso del sistema completo, los sistemas de pilas de combustible (incluyendo el almacenamiento de combustible) son más pesados que los sistemas con motor de combustión para valores de potencia similares.

Atendiendo al combustible, el origen del mismo es un aspecto importante a la hora de valorar la eficiencia global del sistema y poder efectuar comparativas. Para alimentar al motor de combustión interna, es necesario un proceso de refinado a partir del petróleo. Una pila de combustible implica producir hidrógeno a partir de combustibles fósiles, mediante la electrolisis del agua o mediante la producción de combustibles secundarios tales como el metanol utilizando un reformador a bordo. En general, la evaluación de costes en este sentido es compleja, ya que el análisis y evaluación de estos factores depende del origen del combustible, la dificultad en la manipulación, tratamiento y transporte del mismo, la energía requerida para comprimir o licuar el combustible final, etc.

C) Pilas de combustible, ultracondensadores y baterías

Los ultracondensadores son, más que dispositivos alternativos a las pilas de combustible, dispositivos auxiliares o complementarios [85], [86]. Es decir, por sus características, los ultracondensadores pueden compensar las limitaciones que presentan las propias pilas. Por ejemplo, los ultracondensadores tienen alta densidad de potencia, es decir, pueden entregar valores altos de potencia en instantes cortos de tiempo. En cambio, en una pila de combustible, debido a los sistemas mecánicos auxiliares que necesita (compresor, equipo de refrigeración, etc), la respuesta dinámica de una pila es lenta, no pudiendo llegar a suministrar

instantáneamente toda la potencia que se le solicite. Por contra, los ultracondensadores poseen baja densidad de energía, es decir, no son capaces de suministrar energía durante periodos largos de funcionamiento; sin embargo, en una pila de combustible, su funcionamiento continuo está asegurado mientras exista suministro de combustible.

Los ultracondensadores alcanzan valores altos de corriente en la carga y en la descarga, por lo que son muy recomendables en aplicaciones de automoción para aceleraciones bruscas o cuando se pretende aprovechar la energía liberada durante la frenada (frenada regenerativa). En una pila de combustible no es posible almacenar energía de forma inversa. La única posibilidad de almacenar energía en una pila de combustible es a través del hidrógeno, empleándolo como vector energético.

Comparando ultracondensadores con baterías, los primeros tienen una gran capacidad de almacenamiento de energía, por lo que en términos de volumen y peso, es más eficiente emplear ultracondensadores que baterías. Además, tienen un ciclo de vida mayor que el de las baterías. No obstante, los ultracondensadores no soportan suministros continuos a cargas, con lo cual, salvo en aplicaciones muy específicas, las baterías y los ultracondensadores son complementarios.

2.3 Sistemas de pilas de combustible. Hibridación

Debido a las limitaciones que poseen las pilas de combustible, un sistema de generación de potencia eléctrica basado en pilas de combustible necesita la integración de muchos otros componentes más allá de la propia pila, ya que, entre otros motivos, las pilas de combustible tienen una dinámica lenta y necesitan una ignición inicial, producen potencia eléctrica en régimen continuo (DC) y sólo emplean determinados tipos de combustibles no convencionales. Por tanto, con objeto de que el sistema pueda ser puesto en marcha, funcione con combustibles convencionales, pueda alimentar cargas en corriente alterna y permita la reutilización del calor generado para aumentar la eficiencia total del sistema, a la pila de combustible se le añaden otros componentes o dispositivos, de forma que se le llama sistema pila de combustible²³ al conjunto completo integrado por la propia pila más los dispositivos adicionales añadidos que consiguen los objetivos mencionados. El arranque del sistema pila de combustible corre a cargo

²³ La definición de sistema de pila de combustible se ha realizado en la sección 2.2.

de un sistema inicial (batería u otro) de energía que alimenta las cargas auxiliares de la pila de combustible.

De forma genérica (dependiendo del tipo de pila y su aplicación puede incluir todos los bloques o no), los sistemas de pila de combustible están formados por un procesador de combustible, la propia pila de combustible, un sistema de acondicionamiento de potencia y ocasionalmente, dependiendo de la aplicación, un sistema de cogeneración para el aprovechamiento del calor residual. Un esquema básico de conexión de los distintos bloques se recoge en la Figura 2.20. El combustible convencional (gas natural, carbón, derivados del petróleo) se pasa a través de una unidad de reformado para obtener gas rico en hidrógeno. Dicho gas reacciona dentro de la pila de combustible produciendo electricidad. La potencia generada se convierte de DC a AC a través del sistema de acondicionamiento de potencia. Por supuesto, cada una de las transformaciones supone unas pérdidas y una consiguiente disminución de la eficiencia.

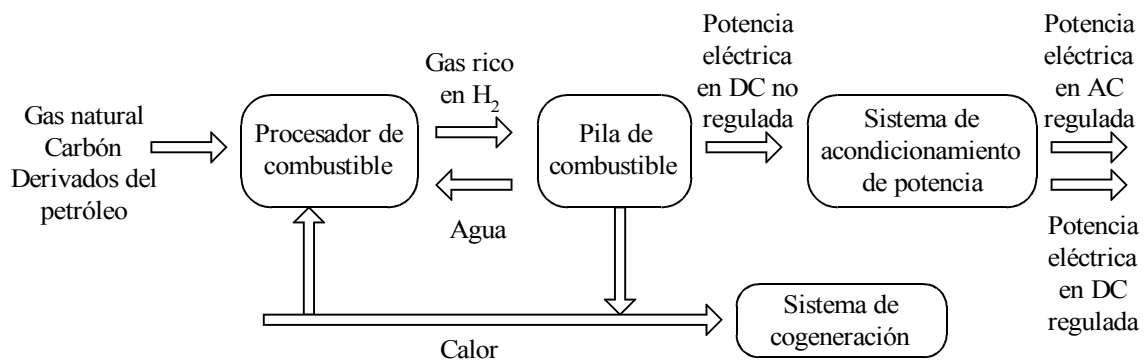


Figura 2.20: Esquema básico de un sistema de potencia de pila de combustible.

2.3.1 Circuitos de acondicionamiento de potencia

Los sistemas de acondicionamiento de potencia permiten aprovechar la potencia eléctrica generada por una pila de combustible, de forma que puede ser utilizada para cargas estacionarias, cargas dinámicas (por ejemplo de automoción) o en interfaces con sistemas que prestan un servicio de suministro eléctrico. En esta subsección se presentarán soluciones de estos tipos de circuitos para las aplicaciones más comunes [14], [87], a saber:

- Sistema de pila de combustible para alimentar cargas aisladas.

- Sistema de pila de combustible para el suministro ininterrumpido de potencia (Uninterrupted Power System-UPS) conectado de forma local.
- Sistema de pila de combustible alimentando una carga funcionando en paralelo con la red eléctrica general (servicio interactivo).
- Sistema de pila de combustible conectado directamente a la red eléctrica general.
- Sistema de pila de combustible aplicado a un sistema de automoción.

Los bloques de conversión de potencia que van a ser analizados, tales como convertidores DC/DC e inversores, son los sistemas básicos que conforman las topologías para los sistemas basados en pila de combustible en las distintas aplicaciones anteriormente citadas.

Como se observa de la Figura 2.13, la tensión de polarización entre los extremos de una pila de combustible varía en función de la demanda de corriente. Por ejemplo, para pilas con potencia nominal de 5 W - 10 kW, la tensión puede llegar a variar de 0 - 50 V; para pilas con rango de potencia de hasta 300 kW, la tensión varía de 0 - 350 V. Por tanto, es necesario un convertidor elevador que se encargue de asegurar una tensión DC controlada de 360 V (valor típico para salidas de alterna de 230 V - 50 Hz). El convertidor DC/DC es el responsable de acondicionar la potencia eléctrica de la pila de combustible; por tanto debe ser diseñado, entre otras consideraciones, de acuerdo a las especificaciones de rizado de corriente de la pila que da el propio fabricante. Además, el convertidor DC/DC no debe permitir la circulación de ninguna corriente negativa o inversa hacia la pila, ya que podría dañarla. Respecto del inversor tiene, como es sabido, la función de suministrar una salida AC a 50 Hz. Un filtro conectado a la salida del inversor permite filtrar los armónicos producidos a la frecuencia de conmutación y generar una onda senoidal AC de calidad necesaria para la carga.

A) Sistema pila de combustible para alimentar cargas aisladas

Un sistema de pila de combustible para alimentar cargas aisladas (no conectadas a red) es un ejemplo representativo de generación de potencia eléctrica distribuida. De la curva de polarización de una celda de combustible (Figura 2.13) se deduce que la tensión de una celda puede variar en un rango de 2:1 en función de la corriente suministrada. En el caso de una pila de combustible, la curva de polarización es similar a la de una celda, pero escalada por el número de celdas que constituyen el apilamiento. Por tanto, la electrónica de acondicionamiento

de potencia debe ser capaz de trabajar en todo el rango de potencia de la pila; en concreto, debe poder suministrar la potencia nominal de la pila a la vez que regular la tensión de salida. Otra de las características que se le exigen al sistema de acondicionamiento de potencia es que la calidad de la potencia entregada sea alta (menos del 5% de THD²⁴). Además, debe soportar los picos de potencia típicos necesarios para el arranque de la propia carga.

Por último, como ya se ha comentado anteriormente, debido a la lenta respuesta de una pila de combustible a los cambios en la demanda de corriente, es necesario otra fuente de energía adicional complementaria como pueden ser baterías y/o ultracondensadores. Con objeto de que el sistema completo sea totalmente autónomo, el sistema de acondicionamiento de potencia ha de encargarse también de la recarga de esta fuente adicional, de forma que se garantice el suministro eléctrico en todos los picos de potencia. La Figura 2.21 muestra el diagrama de bloques de un sistema pila de combustible + batería que alimenta a una carga aislada. Desde la Figura 2.22 hasta la Figura 2.24 se muestran tres posibles topologías para esta aplicación.

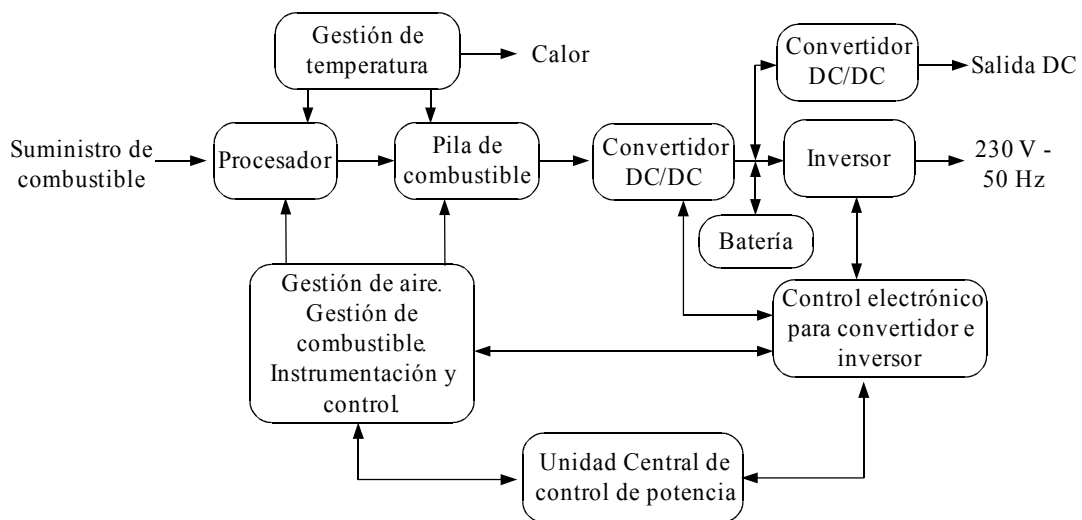


Figura 2.21: Diagrama de bloques de un sistema de pila de combustible para cargas aisladas.

Sistema de pila de combustible con transformador de baja frecuencia. La Figura 2.22 muestra la topología para este tipo de conexión. La tensión de salida típica de las pilas de

²⁴ El **THD** es un parámetro que permite conocer la distorsión armónica total de una señal. Se define como la suma de las contribuciones a la distorsión de cada armónico (diferente del fundamental). Siendo la distorsión de cada armónico el cociente entre la amplitud de dicho armónico y la del armónico fundamental [88].

combustible empleadas en este tipo de aplicaciones (24 – 42 V) es elevada mediante un convertidor Boost²⁵ [89], [90], a un valor fijo de tensión de 48 V (tensión típica para un bus DC). Esta tensión regulada es procesada a través de un inversor mediante la técnica de modulación por anchura de pulso (PWM²⁶) para proporcionar una tensión senoidal de baja amplitud (35 V AC rms). Para obtener la salida de alterna de 230 V, se emplea un transformador con aislamiento de baja frecuencia (frecuencia de línea – 50 Hz), con relación de conversión de 1:6,5. La batería de 48 V asegura los picos de potencia en el arranque o en los transitorios y estabiliza la tensión en el bus, mientras que la pila de combustible se encarga de entregar la potencia necesaria en estado estacionario y para la recarga de la batería.

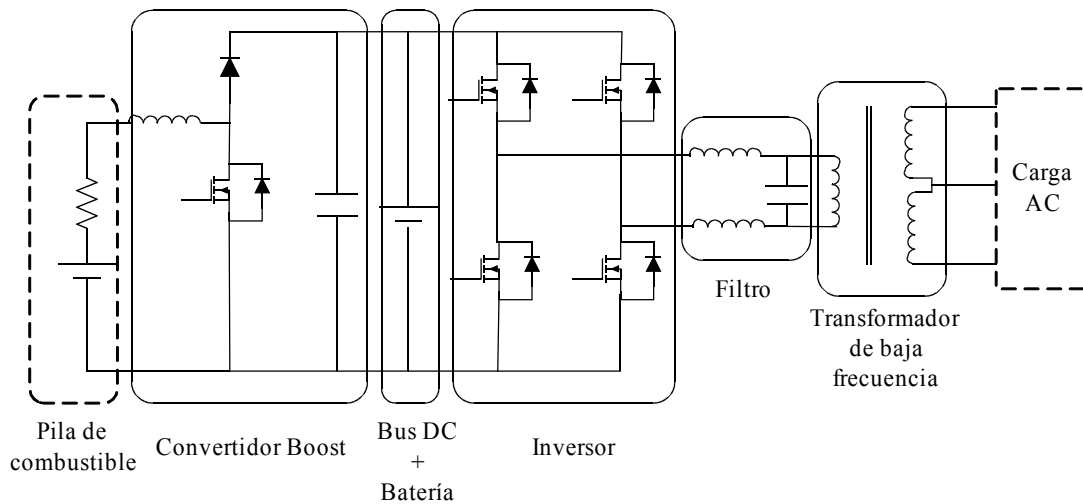


Figura 2.22: Topología con transformador de baja frecuencia.

La principal limitación de este sistema es el valor bajo de tensión en el bus de continua, de modo que cuando el sistema está suministrando la potencia máxima, la corriente que circula por el bus de continua es muy alta, reduciendo la eficiencia total del sistema. Otra desventaja es que el uso de un transformador de baja frecuencia implica un aumento en el tamaño y en el peso

²⁵ **Convertidor Boost** es un convertidor de potencia que obtiene a su salida una tensión continua mayor que a su entrada. Es un tipo de fuente de alimentación conmutada que contiene al menos dos dispositivos semiconductores y al menos un elemento para almacenar energía. Se estudia en detalle en el Capítulo 3.

²⁶ La técnica de **Modulación por Anchura de Pulso (PWM)** consiste en variar el ancho relativo de la parte positiva de una señal respecto a su periodo. Es una técnica comúnmente utilizada para ajustar la tensión de salida respecto a la de entrada en los convertidores conmutados, [91].

(aproximadamente 10 kg/kW).

Para conocer la eficiencia del sistema, hay que tener en cuenta la eficiencia de las tres etapas: convertidor Boost, inversor y transformador de baja frecuencia.

Sistema de pila de combustible con transformador de alta frecuencia. La Figura 2.23 muestra la topología para este tipo de conexión. En este diseño, el transformador con aislamiento de baja frecuencia ha sido eliminado empleando una etapa de conversión adicional. La etapa de conversión de 48 V a 360 V incluye un transformador de alta frecuencia.

La Figura 2.24 muestra una topología con un menor número de etapas de conversión en serie. En este caso, se emplea un convertidor DC/DC Push-Pull²⁷ con un transformador con aislamiento de alta frecuencia y con relación de 1:7,5. La salida del convertidor Push-Pull se fija a 360 V con ± 180 V. La salida del convertidor se conecta a un inversor en medio puente para obtener el nivel de tensión de AC 230 V - 50 Hz. Para regular la salida del convertidor, se coloca un conjunto de baterías de ± 180 V. Para conocer la eficiencia de este sistema, basta con conocer la eficiencia de las dos únicas etapas de acondicionamiento de potencia existentes.

El sistema de gestión de potencia debe asegurar el suministro continuo a la carga. El convertidor DC/DC y el inversor son controlados por separado. La potencia consumida por la carga es la señal de referencia para conocer la potencia que debe suministrar por un lado, la pila de combustible y por otro el inversor. El convertidor DC/DC junto al sistema de baterías aseguran la tensión en el bus de continua. Este bloque ha de poseer la circuitería necesaria para proteger, tanto a la pila de combustible como al bus de continua, de sobrecorrientes y sobretensiones respectivamente. Las cargas auxiliares de la pila de combustible se alimentan a través del bus de continua.

²⁷ El convertidor **Push-Pull** es un convertidor DC/DC elevador que emplea un transformador con aislamiento de alta frecuencia. Permite aislar la entrada de la salida y reducir el tamaño del propio convertidor [92].

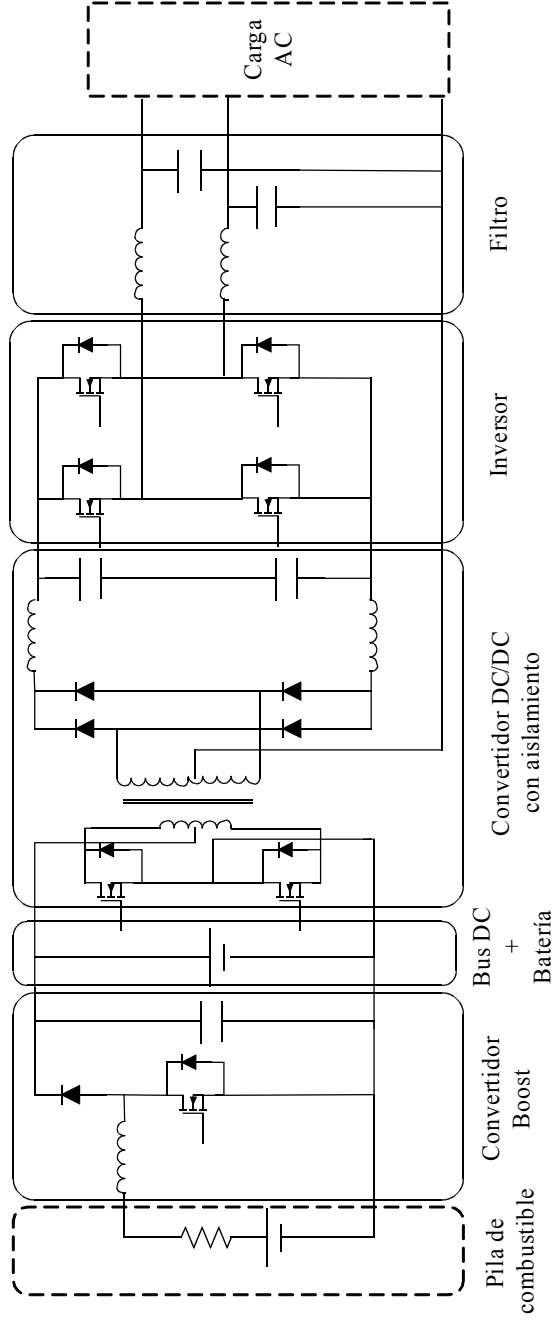


Figura 2.23: Topología con transformador de alta frecuencia.

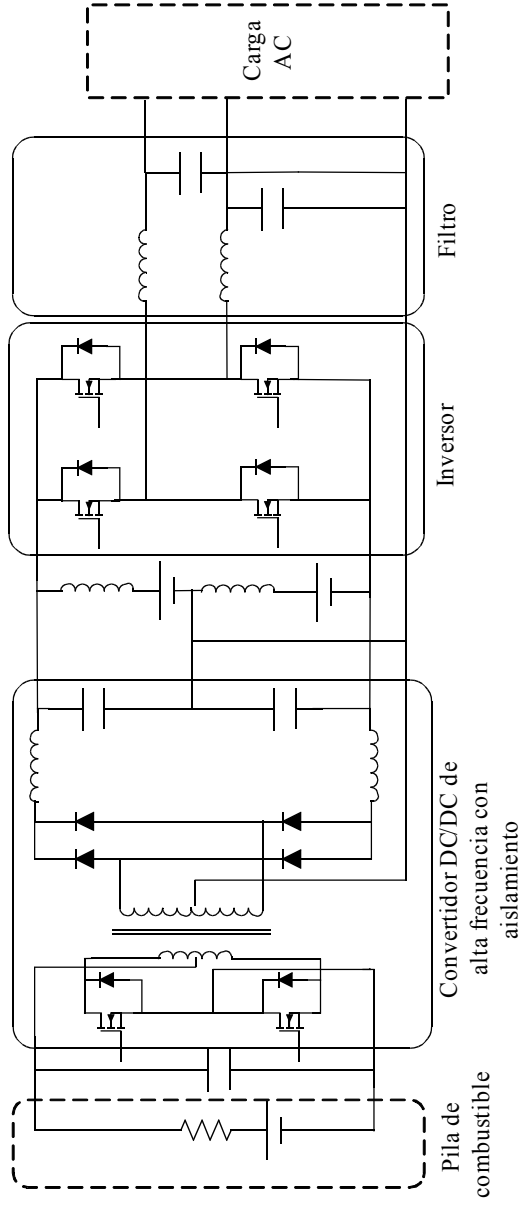


Figura 2.24: Topología con convertidor DC/DC Push-Pull.

B) Sistema de pila de combustible para el suministro de potencia ininterrumpido (Uninterrupted Power System-UPS) conectado de forma local

Los sistemas de suministro de potencia ininterrumpido (UPS) emplean generadores y/o baterías como fuentes principales para proporcionar la potencia eléctrica en situaciones críticas (como consecuencia de cortes en la red), así como para proporcionar una potencia eléctrica de calidad cuando el suministro no es adecuado para el equipo en cuestión. Un sistema UPS típico está formado por un conjunto de baterías recargables. Estas baterías contienen componentes altamente tóxicos como el plomo, cadmio, mercurio o ácidos que pueden causar serios problemas medioambientales si no son tratados con especial cuidado. Sustituir el banco de baterías en un sistema UPS por un sistema de pila de combustible es especialmente ventajoso ya que, de esta forma, se garantiza el suministro de potencia durante todo el periodo de tiempo que dure el corte eléctrico, que en muchas ocasiones es desconocido (la pila trabaja de forma continua mientras tenga disponible los reactivos) y, además, no se genera residuo tóxico alguno para el medio ambiente. Por otro lado, cuando cese el corte, no es necesario proceder a recargar las baterías para tenerlas preparadas para el corte siguiente, sino simplemente apagar la pila de combustible.

La Figura 2.25 muestra el diagrama de bloques de un sistema UPS con pilas de combustible. La carga se conecta mediante interruptores estáticos bien a la red eléctrica o bien al sistema UPS, de forma que siempre esté garantizado el suministro eléctrico a la carga. El interruptor 1 desconecta la carga de la red cuando se produce el corte. El tiempo que transcurre desde el instante en el que se produce el corte eléctrico hasta que se cierra el interruptor que conecta la carga con el sistema UPS (interruptor 2), depende de cómo se haya configurado el sistema de control, es decir, del tiempo de espera que se haya establecido frente a cortes eléctricos. El número de pilas de combustible empleados dependerá de la potencia nominal de la carga y de la disponibilidad comercial de las pilas de combustible. El ultracondensador se emplea para suministrar los picos de corriente que se producen al conectar la carga al sistema UPS. Para no sobrecargar demasiado al ultracondensador, es aconsejable que el tipo de pilas de combustible que se empleen en estos casos, sean pilas de baja temperatura con menor tiempo de arranque. La autonomía del sistema dependerá de la capacidad del depósito de hidrógeno. Una forma de conseguir un mayor rango de funcionamiento, es aprovechar el agua generada por las pilas de combustible y, a través de un proceso de electrolisis, convertirla en hidrógeno, de forma que

siempre haya combustible suficiente en el depósito. Las Figuras 2.26 y 2.27 muestran dos posibles topologías de sistemas UPS basados en pilas de combustible. En la topología de la Figura 2.27 cada pila posee su propio transformador de aislamiento.

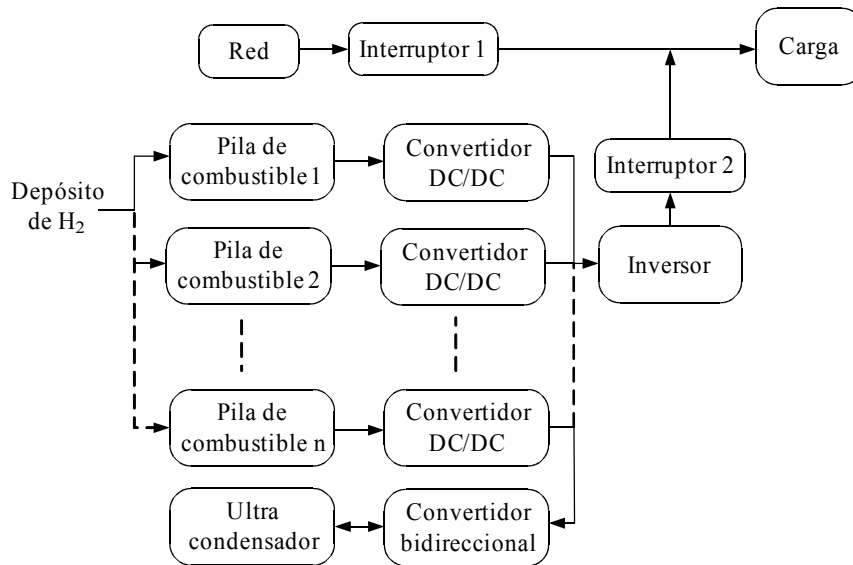


Figura 2.25: Diagrama de bloques de un sistema UPS basado en pilas de combustible.

C) Sistema pila de combustible alimentando una carga funcionando en paralelo con la red eléctrica general

La Figura 2.28 muestra el diagrama de bloques de un sistema de pila de combustible alimentando a una carga y funcionando de forma paralela con la red. En esta configuración, en ausencia de baterías o ultracondensadores, los picos de potencia son suministrados por la propia red. Por lo tanto, si se produce un corte eléctrico, el sistema no tiene capacidad para suministrar los picos de corriente necesarios en el arranque. Se necesitan unos interruptores especiales que limiten la demanda máxima de la carga a la potencia nominal de la pila. Otras de las características es que en algunos casos, se puede establecer un valor fijo de la potencia que entrega la pila de combustible (se ahorra en circuitería al no existir la necesidad de un control de reparto de potencia). La topología de esta configuración es similar a la mostrada en la Figura 2.23.

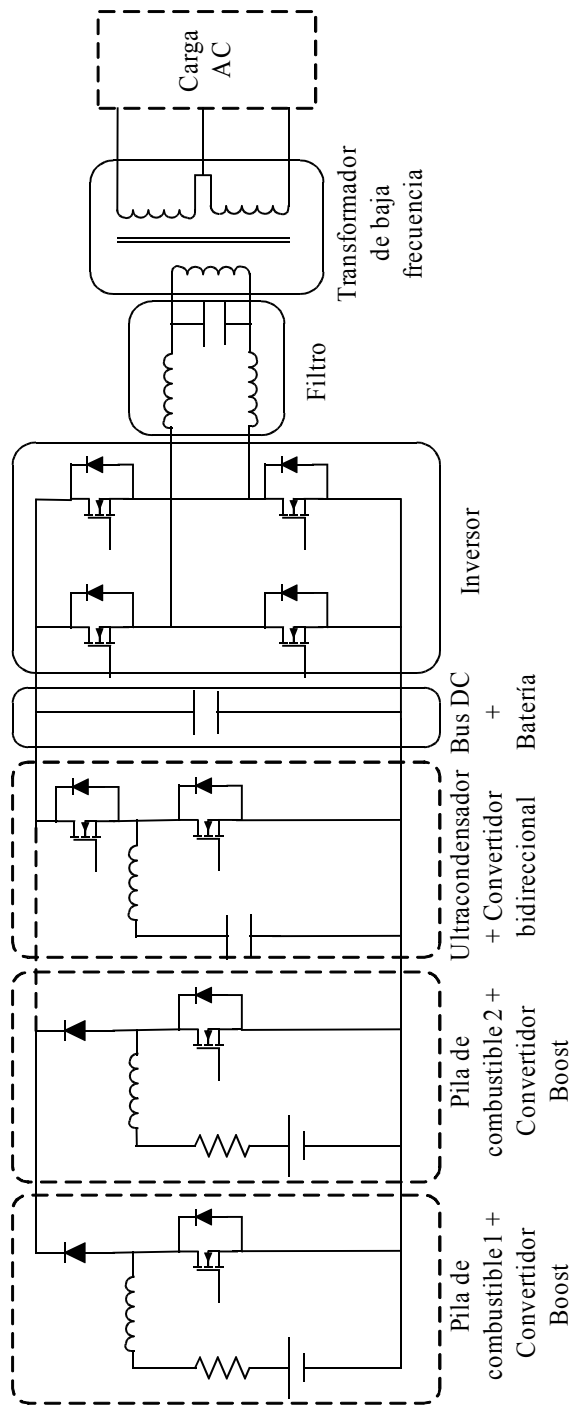


Figura 2.26: Topología para UPS con transformador de baja frecuencia.

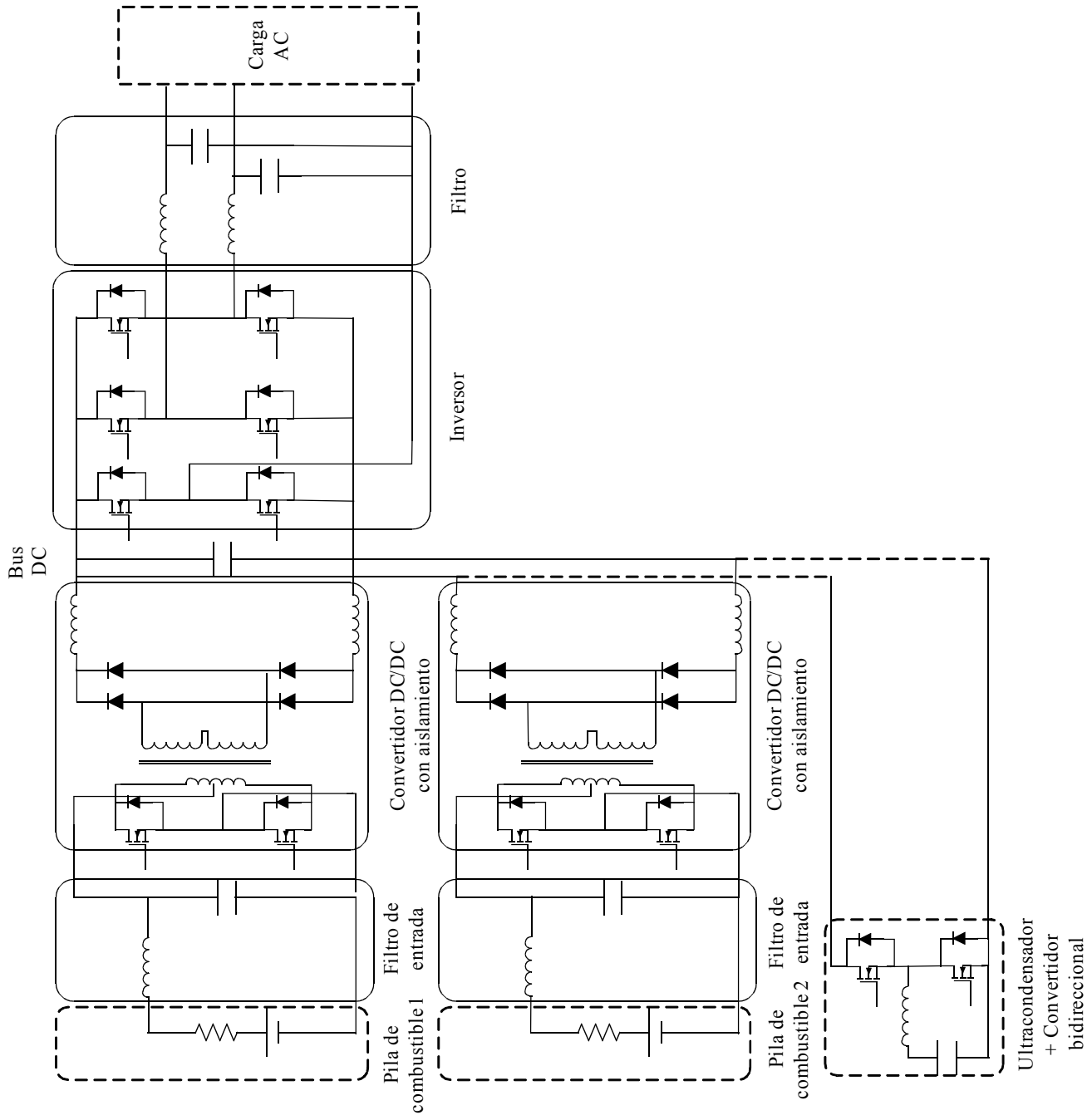


Figura 2.27: Topología para UPS con transformador de alta frecuencia para cada fuente.

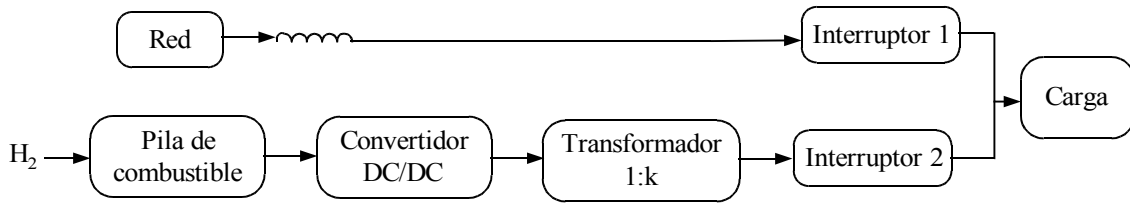


Figura 2.28: Diagrama de bloques de un sistema de pila de combustible trabajando en paralelo con la red.

D) Sistema pila de combustible conectado directamente a la red eléctrica

Para la conexión a red de fuentes de generación de potencia distribuida se deben tener en cuenta, entre otros aspectos, las recomendaciones de la normativa aplicable²⁸ en cada zona. Una de las condiciones es que el sistema se desconecte inmediatamente si se produce un corte o fallo en la red. Además, la tensión en la red no debe fluctuar más de un $\pm 5\%$. La Figura 2.29 muestra el diagrama de bloques de este tipo de sistemas. La topología asociada, de nuevo, vuelve a ser una topología muy similar a la que se mostró en la Figura 2.22.

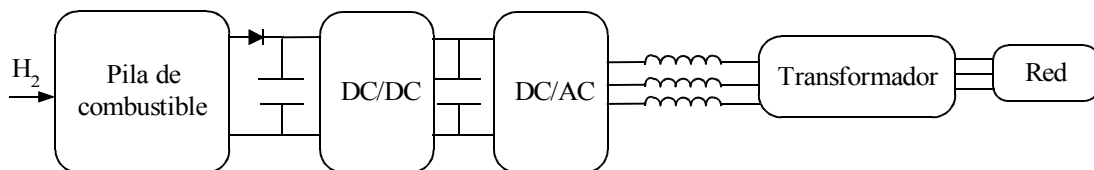


Figura 2.29: Diagrama de bloques de un sistema de pila de combustible inyectando potencia a la red.

E) Sistema de pila de combustible aplicado a un sistema de automoción

Los sistemas de pilas de combustible aplicados a sistemas de automoción son, junto con las aplicaciones estacionarias, uno de los principales propulsores del desarrollo de las pilas de combustible (investigación y aplicaciones comerciales). De la Figura 2.30, se deduce que un sistema de automoción con pila de combustible está formado por tres componentes principales:

²⁸ A nivel europeo es la norma **CENELEC EN 50160** [93] equivalente a la norma estadounidense **IEEE P1547** [94]. Fija la normativa de interconexión de fuentes de energía distribuidas con el sistema eléctrico, determinando los requerimientos más importantes de implementación, operación, ensayos, condiciones de seguridad y mantenimiento de las interconexiones.

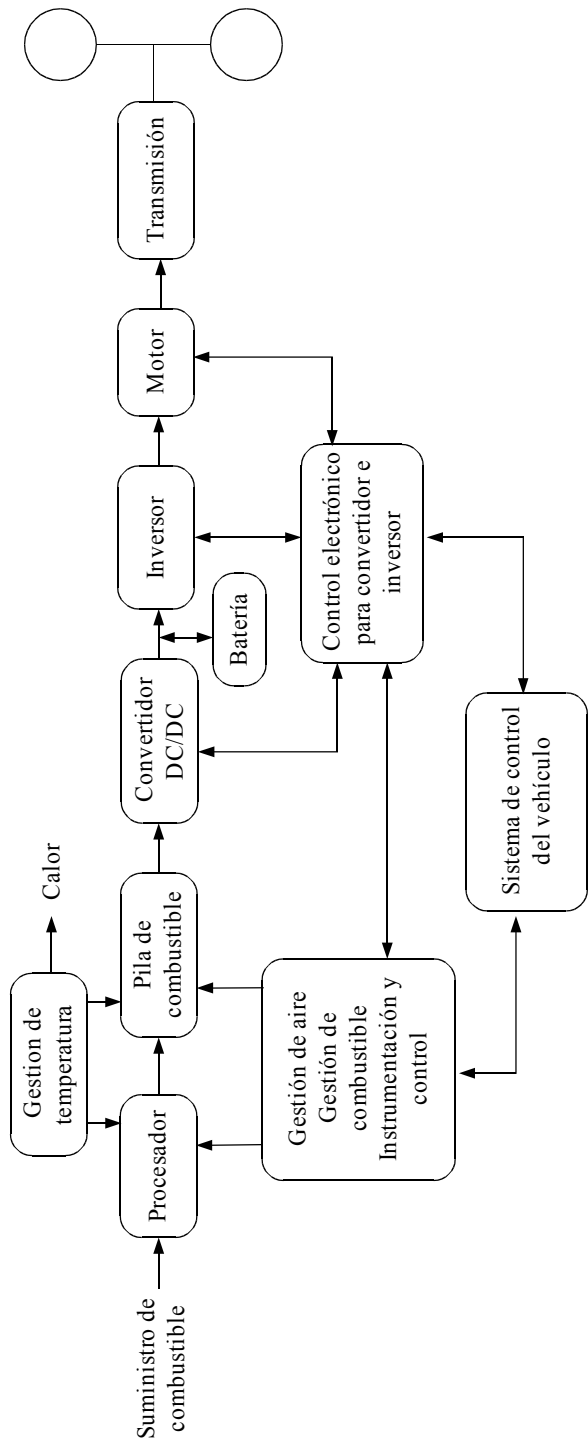


Figura 2.30: Diagrama de bloques de un sistema de automoción con pila de combustible.

un procesador de combustible, una pila de combustible y un sistema de acondicionamiento de potencia para accionar el motor de tracción. Un sistema de pila de combustible diseñado para este propósito debe tener un peso, volumen, densidad de potencia, arranque y respuesta transitoria similar a las de un motor de combustión interna actual. Es por ello por lo que el mercado de las pilas de combustible de tipo PEM está avanzando en este propósito. Sin embargo, una de las limitaciones a tener en cuenta, como ya se vio cuando se comentaron las desventajas de este tipo de pilas (ver apartado 2.2.5), es su lenta respuesta a cambios en la demanda de potencia, lo que justifica la necesidad de otra fuente de energía adicional. La Figura 2.31 propone una topología para este tipo de aplicación.

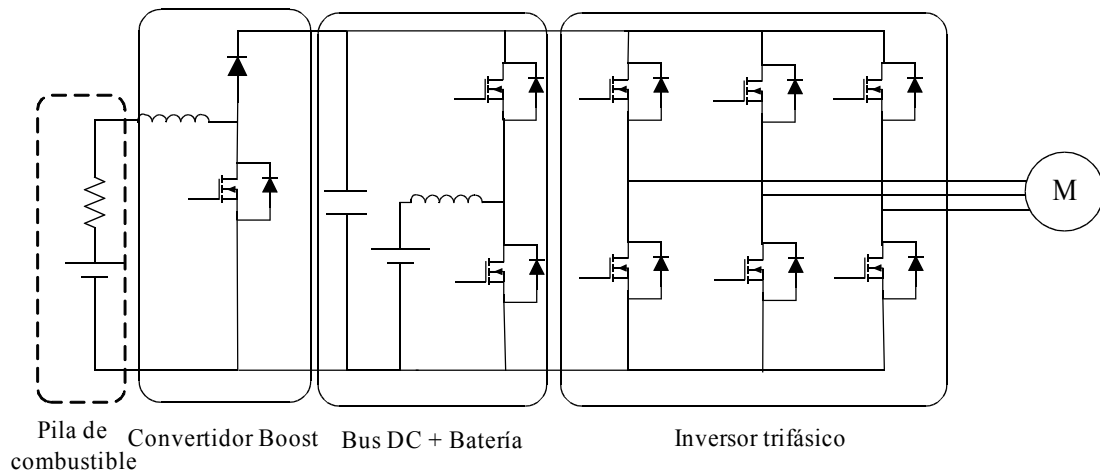


Figura 2.31: Topología para para un sistema de automoción con pila de combustible.

2.3.2 Hibridación

En este campo, el concepto de sistema híbrido se asocia a aquellos sistemas de suministro de potencia eléctrica integrados por dos o más fuentes de energía de diferente naturaleza [95]. Con esto se pretende hacer un mejor uso de sus características de funcionamiento y aumentar la eficiencia que se obtiene si sólo se utiliza una única fuente. En el caso concreto de los sistemas híbridos de pilas de combustible, se refiere a los sistemas de generación de potencia integrados por un sistema de pila de combustible y otra u otras fuentes de energía diferentes. El objetivo de combinar varias fuentes de energía es el de anular o

minimizar las principales desventajas que presentan las pilas de combustible: lenta respuesta transitoria y baja eficiencia a potencias altas. Por lo tanto, la mayoría de las topologías de sistemas de acondicionamiento de potencia vistas en el apartado 2.3.1 corresponden, por definición, a sistemas híbridos. Sin embargo, un sistema basado simplemente en una pila de combustible no posee ningún atractivo desde el punto de vista práctico, ya que la carga a la que puede alimentar debe ser muy concreta y con unas restricciones muy limitadas.

Las configuraciones que se van a ver a continuación corresponden a sistemas híbridos de pila de combustible en los que se combina una pila de combustible con una turbina de gas, un panel solar térmico, una turbina eólica y un panel solar fotovoltaico [95].

En la última parte de esta subsección se analiza el concepto de hibridación asociado a los sistemas de automoción.

A) Sistema híbrido pila de combustible – turbina de vapor

En un sistema en el que se conecta una pila de combustible a una turbina de vapor se aumenta su eficiencia global (del sistema completo) y se reduce el ruido y las emisiones nocivas por kilowatio. El tipo de pila de combustible a emplear corresponde al de pilas de alta temperatura. La diferencia de presión y el calor generado por la pila de combustible se aprovechan para mover la turbina sin necesidad de consumir ninguna energía adicional. Las principales ventajas de este tipo de sistemas son: mayor eficiencia que sistemas que trabajan con combustible fósil, bajas emisiones de ruido, escalabilidad y flexibilidad en el combustible utilizado. La Figura 2.32 recoge un esquema de funcionamiento básico de este tipo de sistema híbrido.

B) Sistema híbrido pila de combustible – panel solar térmico

Otra alternativa de los sistemas híbridos es la unión de una pila de combustible de alta temperatura con un panel solar térmico. En estos sistemas se pueden utilizar los gases que salen de la pila de combustible a alta temperatura como una fuente térmica para producir la radiación electromagnética requerida por el panel solar-térmico.

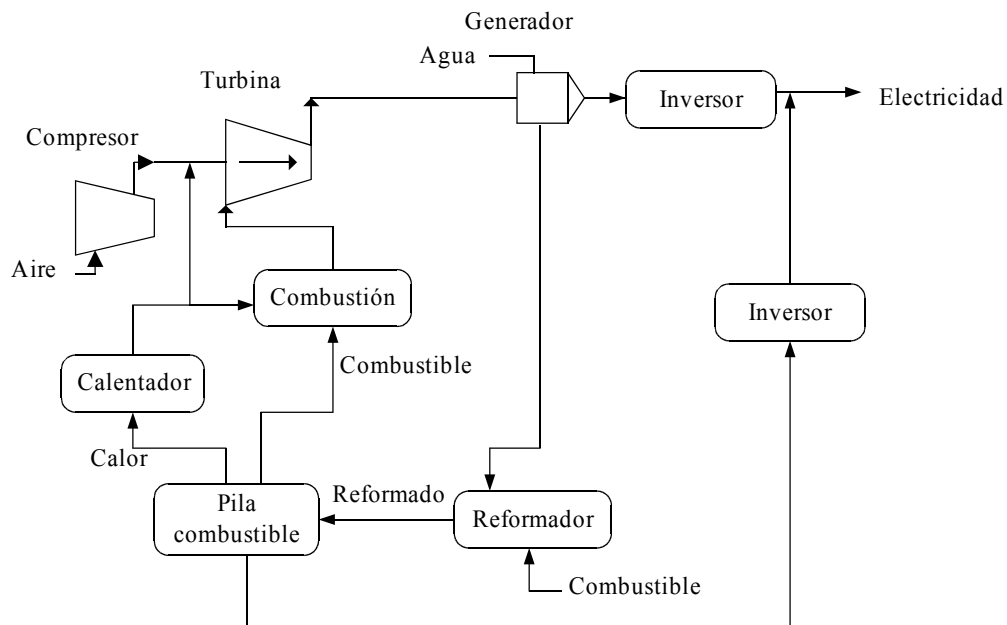


Figura 2.32: Esquema de sistema híbrido pila de combustible-turbina de vapor.

En un panel solar térmico el emisor, que está a alta temperatura, genera radiación electromagnética. Un filtro selectivo transmite esta radiación por encima de la banda de energía de las fotoceldas y refleja la parte de energía que no se transmite al emisor. Los gases de salida de la pila de combustible se hacen pasar a través de un sistema de combustión para aumentar su temperatura hasta el nivel requerido para el funcionamiento del panel solar térmico. Esto reducirá las necesidades de combustible que requiere la fuente térmica del panel solar. Inclusive se puede utilizar el propio combustible que no utiliza la pila de combustible. Es decir, una vez que el sistema de pila de combustible empiece a funcionar, el combustible no utilizado por la pila se puede emplear para calentar más aún los gases de salida de la pila de combustible, mejorando el funcionamiento del panel solar térmico. De esta forma, y dependiendo de los requerimientos de potencia, puede ser posible que dicho panel solar no necesite combustible externo adicional. El panel solar térmico se utiliza para generar la potencia eléctrica necesaria para el arranque de la pila de combustible y para sus cargas auxiliares durante su funcionamiento normal. La Figura 2.33 muestra un esquema de un sistema híbrido de pila de combustible y panel solar térmico.

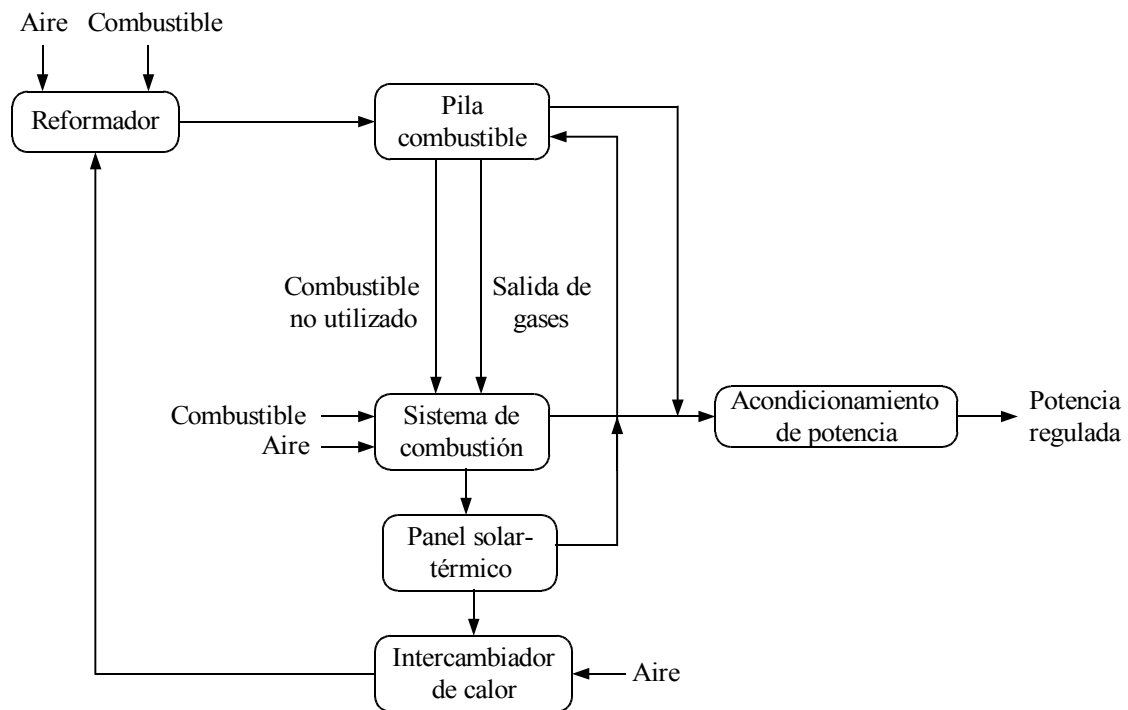


Figura 2.33: Esquema de sistema híbrido pila de combustible-solar térmico.

C) Sistema híbrido pila de combustible – turbina eólica

Cabe plantearse también la posibilidad de conectar una pila de combustible a otra fuente renovable como es una turbina eólica. Esta hibridación permite solventar uno de los grandes problemas de la energía eólica, su intermitencia. La potencia generada por la turbina se emplea para alimentar la carga y también para producir, mediante electrolisis, el hidrógeno necesario para la pila de combustible. De esta forma se asegura por un lado, el suministro continuo a la carga, ya que la pila de combustible, actuando conjuntamente con el generador eólico, cubre los huecos de éste. Por otro, al tener la energía almacenada en forma de hidrógeno (se utiliza el hidrógeno como vector energético), se reduce el número de baterías que se necesitan para almacenar la energía respecto a las que necesita un sistema eólico convencional. La Figura 2.34 muestra el esquema de conexión de este tipo de sistemas híbridos.

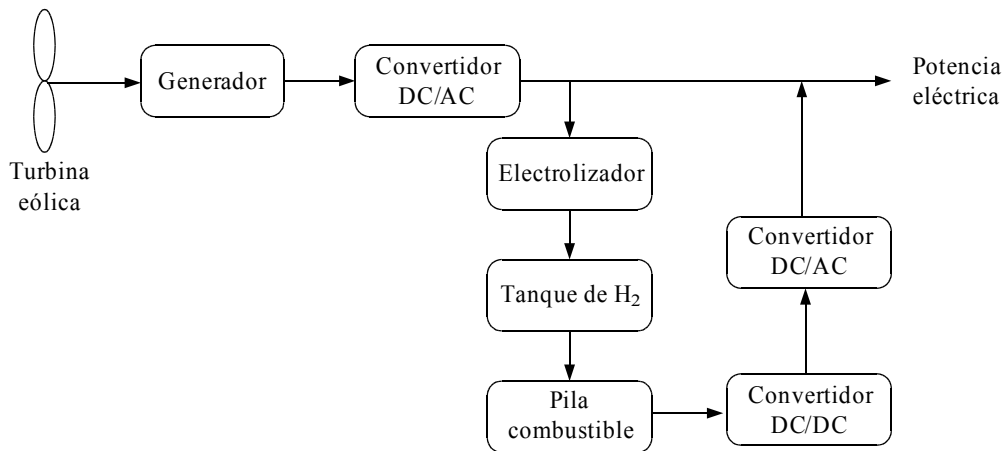


Figura 2.34: Esquema de sistema híbrido pila de combustible-turbina eólica.

De modo similar, es posible conectar una pila de combustible a un panel solar. En este caso, las funciones del panel solar son las mismas que las de la turbina eólica (alimentar la carga y producir hidrógeno). El esquema de conexión es similar al de la Figura 2.34, donde el lugar de la turbina lo ocuparía el panel solar. Este tipo de sistemas es comúnmente utilizado en los proyectos espaciales, donde durante el tiempo en que el sistema recibe radiación solar, el panel solar aprovecha esta energía. En los periodos en los que no hay sol, es la pila de combustible la que alimenta la carga. En estos casos, considerando la temperatura de operación y disponibilidad del hidrógeno, el tipo de pila de combustible empleado es el de pilas de baja temperatura de tipo PEM.

D) Sistemas de automoción: vehículos eléctricos, vehículos híbridos y vehículos de pila de combustible

Para concluir esta sección, y aprovechando que se está tratando el concepto de hidridación, se procederá a fijar los términos asociados a la automoción con pilas de combustible, como son: Vehículos Eléctricos (EVs), Vehículos de pilas de combustible (FCVs) y Vehículos Híbridos Eléctricos (HEVs) [96]. Los EVs son los vehículos alimentados exclusivamente por baterías. Sus principales inconvenientes son: alto coste, baja autonomía, largo periodo de recarga y reducido espacio de habitáculo.

Los HEVs surgieron como solución a los EVs. Combinan un motor de combustión interna (ICE) junto con un motor eléctrico. El ICE utiliza combustible (gasolina o gasoil) para producir energía mecánica. Esta energía mecánica se emplea para hacer funcionar el motor eléctrico (en el caso de una configuración de HEV serie) o para hacerla llegar a las ruedas junto con el motor eléctrico (en el caso de una configuración de HEV paralela, serie-paralela o compleja). La Figura 2.35 recoge un esquema de conexión de las distintas soluciones. El motor eléctrico se emplea para optimizar la eficiencia del ICE así como para recuperar la energía cinética liberada durante la frenada del vehículo.

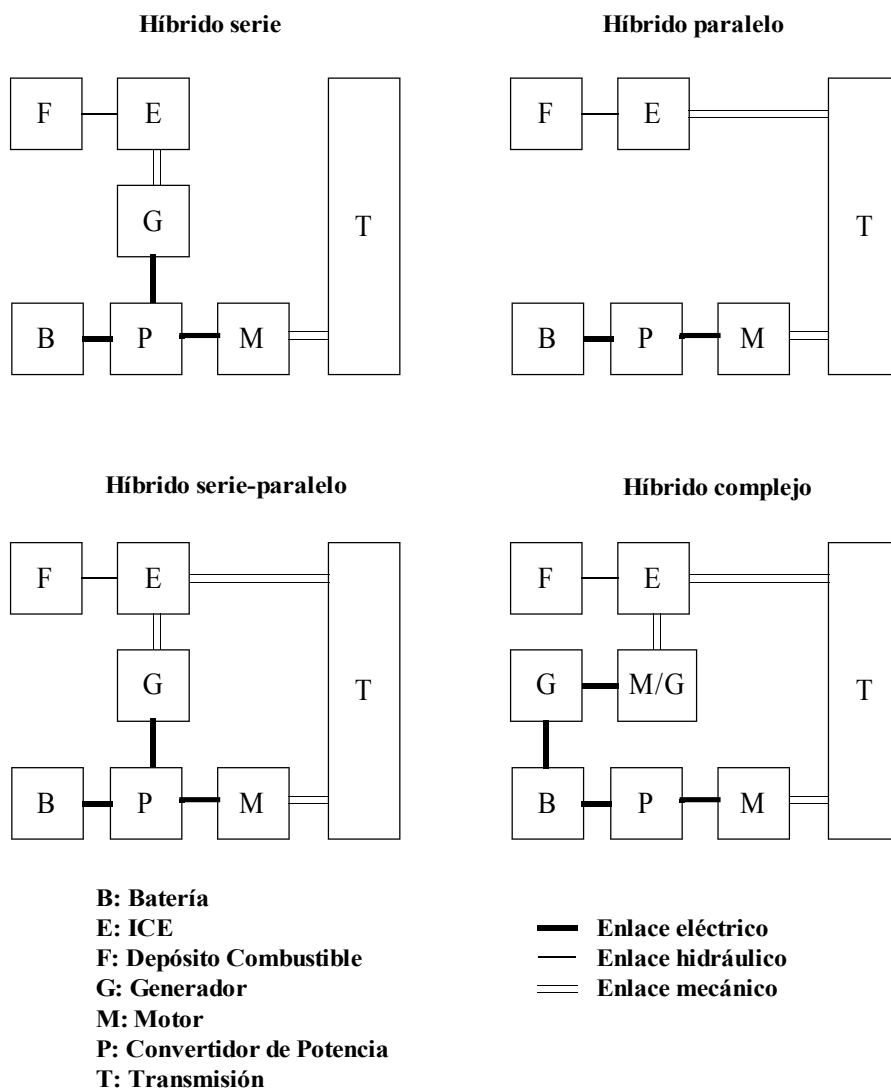


Figura 2.35: Diferentes conexiones en HEVs.

Los FCVs emplean un sistema de pila de combustible para generar la electricidad que los mueve. Parte de dicha electricidad se almacena (corresponde a una configuración de conexión serie). El almacenamiento energético puede hacerse mediante un banco de baterías o de ultracondensadores para poder utilizar la energía en el arranque o en periodos de aceleración. En este caso, se anulan las emisiones contaminantes y se reduce el ruido del vehículo.

2.4 Conclusiones y comentarios bibliográficos

A lo largo de este capítulo se ha visto primero cómo el estado actual de tecnología de las pilas de combustible ha sido fruto de un arduo desarrollo que ha durado casi dos siglos. Realmente no es fácil comprender que en épocas donde el petróleo era abundante, barato y la contaminación ambiental no era un problema de interés (gran parte del siglo XX), hubiera investigadores trabajando en el campo de las pilas de combustible. Muy probablemente, como ha ocurrido en otros campos de la ciencia y la tecnología, las aplicaciones militares y, más recientemente, espaciales, han sustentado el interés en las pilas de combustible. No es hasta hoy en día, cuando el petróleo es un bien escaso, caro y sujeto a avatares políticos y, la Tierra está sometida a una severa agresión medioambiental, cuando las pilas de combustible se están convirtiendo en una opción seria y creíble para sustituir otras tecnologías contaminantes en la producción de electricidad.

Si bien ha habido una cierta controversia sobre la autoría de la invención de las pilas de combustible, las referencias [1], [2] y [4] permiten concluir que fue Sir William Robert Grove y no Christian Friedrich Schöbein el padre de la primera batería de gas o celda de combustible. Ciertamente, la aparición de la celda de combustible no fue un hecho aislado, sino que tuvo mucho que ver el descubrimiento realizado años atrás por Sir Anthony Carlisle y William Nicholson de la electrolisis del agua. Este descubrimiento puede ser consultado en [3].

En las referencias [5] a [8] pueden ser consultados diferentes hitos en el desarrollo histórico de las pilas de combustible. De ellos, quizás los dos más importantes sean su fundamentación teórica debida a Friedrich Wilhelm Ostwald, y su implementación práctica de forma útil, realizada por Francis Thomas Bacon. Las referencias [9] a [13] realizan un recorrido por los avances de las pilas de combustible desde un punto de vista comercial, mostrando los diferentes tipos.

Las referencias [14] a [56] enseñan sobre las características de las pilas de combustible, su principio de funcionamiento y clasificación según el tipo de electrolito usado, el cual, a su vez, determina la temperatura de funcionamiento de la pila. Estas referencias han permitido desarrollar gran parte de la sección 2 de este capítulo. En ella se ha pretendido explicar los principios y las leyes físicas que sustentan el funcionamiento de las pilas de combustible, las cuales pueden ser clasificadas hoy en día en seis grandes grupos. Realmente no todos los tipos analizados tienen aún un desarrollo adecuado como para ser utilizados comercialmente. Sin embargo, se ha querido ser exhaustivos, ya que el campo de las pilas de combustible está en continua evolución y los hitos científicos, tecnológicos y comerciales se suceden día a día.

Las referencias [57] a [79] reúnen el amplio abanico de posibilidades que ofrecen actualmente las pilas de combustible para su explotación comercial. Así, se detallan aplicaciones estacionarias, portátiles, de micropotencia y de transporte. Es quizás en este campo donde el mercado se está mostrando más dinámico. Primero fueron los vehículos que hibridaban la pila de combustible con un motor térmico, hasta estar ya disponibles en la actualidad vehículos movidos exclusivamente por pilas de combustible. La evolución ha sido tan rápida que hoy en día todos los fabricantes importantes de automóviles, autobuses y camiones disponen ya de versiones comerciales de modelos conocidos movidos por pilas de combustible. Las aplicaciones en el sector del transporte se han ampliado para su uso en locomotoras, motocicletas, barcos, etc.

La segunda sección de este capítulo finaliza con una comparativa entre las pilas de combustible, los motores de combustión interna, las baterías y los ultracondensadores. Esta comparativa, que se extrae de las referencias [80] a [86], muestra que las baterías, los ultracondensadores y las pilas de combustible son dispositivos complementarios para la mayoría de las aplicaciones. Por tanto, en general, la sustitución de un motor de combustión interna por una pila de combustible requiere que ésta esté hibridada casi siempre con baterías y en algunos casos y para aplicaciones muy específicas, con ultracondensadores. También, es posible que se dé la hibridación pila de combustible + batería + ultracondensador. La razón de lo anterior estriba en que las dos principales carencias de las pilas de combustible (respuesta lenta e imposibilidad de recuperar energía, mediante frenada regenerativa, por ejemplo) son resueltas empleando baterías y/o ultracondensadores. Respecto de estos dos últimos elementos también son complementarios, ya que mientras los ultracondensadores tiene gran capacidad de

almacenamiento de energía en términos de peso y volumen, son incapaces de realizar un suministro constante a una carga, ya que su descarga es muy rápida. Por tanto, el ultracondensador es ideal para estar sometido a continuas cargas y descargas con requerimientos de liberación de energía muy rápidos. Esto ocurre por ejemplo cuando en un vehículo se demandan aceleraciones bruscas. No obstante, los últimos desarrollos en baterías de iones de litio están poniendo en duda la necesidad de disponer de ultracondensadores en aplicaciones de automoción y otras.

Como conclusión final de la segunda sección puede extraerse que hoy en día, hay tecnología suficiente para sustituir en los vehículos los motores de combustión interna por sistemas híbridos no contaminantes basados en pilas de combustible. No obstante, ello requiere también de una fuerte inversión en infraestructuras para repostar, sustituyendo las tradicionales gasolineras por hidrogeneras.

Las referencias [87] a [96] tratan sobre el concepto de sistema de pila de combustible, esto es, la pila de combustible más todos los sistemas asociados necesarios. Éste es uno de los contenidos de la tercera sección de este capítulo. Puesto que la potencia eléctrica que produce una pila de combustible no es regulada, se precisan circuitos de acondicionamiento de potencia que, conectados a su salida, permitan conseguir una potencia regulada de suministro a la carga. En la tercera sección se tratan los circuitos de acondicionamiento en función de la aplicación a la que se destine la pila de combustible. Así, se analizan los casos de suministro a cargas aisladas, sistemas de generación de potencia ininterrumpida, sistemas de generación de potencia para inyección a red y sistemas de automoción.

La última parte de la tercera sección está dedicada a la integración de las pilas de combustible con otros sistemas de producción de energía renovable. Esta hibridación, que es tratada en las referencias [95] y [96], se está convirtiendo en una opción muy interesante hoy en día. La razón estriba en que cuando se utilizan sistemas de producción de energía renovable complementarios, la eficiencia y la duración del suministro del sistema global resulta sensiblemente mejorados. Así, se han analizado los sistemas híbridos siguientes: pilas de combustible + turbina de vapor, pila de combustible + panel solar térmico y pila de combustible + turbina eólica. Mención aparte merecen los sistemas de automoción, de modo que el capítulo finaliza fijando los conceptos de vehículo eléctrico, vehículo híbrido eléctrico y vehículo de pila de combustible.

Capítulo 3. Modelado del Sistema Pila de Combustible – Convertidor DC/DC

Este capítulo está organizado en tres secciones. La primera comienza realizando una revisión del estado del arte sobre el modelado de pilas de combustible. Esta revisión permite apreciar cómo la evolución histórica de los desarrollos teóricos de modelado de pilas de combustible, parte de una idea original de considerar la pila de combustible como un sistema estático, gobernado por la relación que mantiene la tensión y corriente que es capaz de generar e independiente del punto de operación en el que está trabajando. Los trabajos teóricos en este sentido empezaron a desarrollarse hace casi dos décadas. Sin embargo, las carencias de estos modelos matemáticos estáticos se hacen visibles cuando, al realizar pruebas con pilas de combustible prácticas, no quedan reflejados sus comportamientos reales. Esto es, los modelos no capturan la dinámica de la pila de combustible, con lo cual, los cambios en la tensión y corriente disponibles entre los extremos de la pila de combustible no se corresponden con los previstos en los modelos teóricos. Esta deficiencia de los modelos para recorrer los estados de la pila de combustible, hace que no sean aptos para utilizarlos en el diseño de sistemas de control.

Con objeto de solventar los problemas anteriormente mencionados, la comunidad científica empezó a desarrollar hace una década modelos dinámicos de pilas de combustible. Estos modelos estaban basados principalmente en ecuaciones empíricas y/o reacciones electroquímicas dentro de cada celda de la propia pila de combustible. El inconveniente de estos modelos dinámicos semiempíricos, donde se relacionan variables puramente fisico-químicas, es que tienen poco interés desde la óptica de la ingeniería de control. En este sentido, es más útil disponer de un modelo de símil eléctrico o un modelo matemático que permita conocer la

tensión y la corriente que es capaz de suministrar la pila en todo su rango de funcionamiento. Desde el punto de vista de la ingeniería de control, estos modelos deben reflejar las variables de interés, fundamentalmente las que a través de su control permiten recorrer todos los estados dinámicos de la pila de combustible o, al menos, los de interés práctico. Con este propósito, el objetivo de las investigaciones en los últimos años, ha estado centrado en el modelado dinámico de pilas de combustible desde el punto de vista de sus terminales eléctricos. Ya sea en aplicaciones aisladas o de conexión a red, el sistema de control debe decidir qué cantidad de potencia debe suministrar la pila en cada momento. Para ello, el modelo debe reflejar el comportamiento de la pila de combustible frente a cambios en la demanda de potencia, lo cuál permitirá desarrollar distintas técnicas de control para la operación idónea de la pila de combustible.

La primera sección del capítulo se completa con el desarrollo de un modelo de estado de una pila de combustible de tipo PEM. Como aplicación práctica se hace un ajuste de los parámetros que describen el modelo desarrollado para el caso del módulo Nexa de Ballard²⁹. De esta forma se pueden contrastar los resultados teóricos obtenidos y los experimentales. Primero se desarrolla un modelo eléctrico dinámico; a partir de él se obtiene el modelo en ecuaciones de estado y, posteriormente, el modelo linealizado de la pila de combustible para un punto de operación genérico.

Como se ha descrito en el Capítulo 2, debido a que las pilas de combustible generan potencia eléctrica no regulada, cuando éstas se destinan, como suele ser habitual, al abastecimiento eléctrico de cargas, necesitan incorporar en la interfaz pila-carga un convertidor DC/DC encargado del acondicionamiento de la potencia eléctrica generada por la pila de combustible.

Es muy común que los sistemas prácticos basados en pilas de combustible de tipo PEM estén configurados en base a una tensión continua regulada (usualmente en un bus) de 48 V. Puesto que la pila usada para la experimentación genera a su salida una tensión inferior, se necesita una etapa de potencia elevadora (convertidor DC/DC) que garantice la tensión regulada

²⁹ Esta pila de 1,2 kW de potencia, se ha elegido por estar muy introducida en el mercado debido a su calidad, fiabilidad y facilidad de uso. De acuerdo con las características eléctricas de este módulo [31], el valor de tensión en sus terminales de salida, en todo el rango de funcionamiento, no supera el nivel de 43 V. Con esta pila de combustible se van a realizar todas las pruebas experimentales incluidas en la memoria.

necesaria. Entre las topologías elevadoras, la más sencilla, la que emplea un menor número de componentes y la que permite elevar en todo el rango de variación del ciclo de servicio es la topología del convertidor Boost. La segunda sección del capítulo está dedicada al modelado de este convertidor. Primero se obtiene su modelo de estado para, a continuación, linealizarlo para un punto de operación genérico.

Una vez desarrollados los modelos de la pila de combustible y del convertidor Boost, se trata el conjunto pila de combustible-convertidor DC/DC como planta susceptible de ser controlada mediante la señal de control constituida por el ciclo de servicio del convertidor. Por ello, la tercera sección del capítulo está dedicada a estudiar el sistema completo formado por la pila de combustible, el convertidor DC/DC y la carga. Así se desarrolla un modelo apto para el control del conjunto pila de combustible-convertidor DC/DC, el cual se somete a simulación para comprobar, además de que el modelo desarrollado describe el comportamiento real del sistema, algo que ya era fácil de intuir, esto es, que la respuesta dinámica de la pila de combustible es bastante más lenta que la del convertidor DC/DC.

La cuarta y última sección recoge las principales conclusiones de este capítulo y comenta las ideas fundamentales extraídas de las referencias bibliográficas consultadas.

3.1 Sistema Pila de Combustible

3.1.1 Introducción

Si bien los trabajos sobre modelado, tanto estático, [97], [98], como dinámico, [99], [100], de pilas de combustible, se vienen publicando desde los años 90 del siglo pasado, la mayoría de los estudios existentes están basados en ecuaciones empíricas y/o en las reacciones electroquímicas que suceden dentro de la celda. Estos modelos, si bien son muy interesantes en el ámbito de la electroquímica, no lo son tanto en el de la ingeniería eléctrica, electrónica y de control.

En los últimos años, el objetivo de las investigaciones ha estado centrado en el modelado dinámico de pilas de combustible desde el punto de vista de sus terminales eléctricos, [101], [102]. El objetivo es conseguir un mejor aprovechamiento energético de la pila de combustible, para ello, tanto en aplicaciones aisladas como de conexión a red, el sistema de

control debe ser capaz de decidir qué cantidad de potencia ha de suministrar la pila de combustible en cada momento.

El modelo dinámico permite predecir de antemano el comportamiento de la pila de combustible frente a cambios en la demanda de potencia. De esta forma y en base a este modelo, es posible desarrollar distintas técnicas de control para la operación idónea de la pila de combustible. Precisamente, este tema ha sido tratado en varios trabajos recientes. Así, en [103] se presenta un modelo dinámico para una pila de combustible de ácido, tipo SOFC, basado en un circuito eléctrico empleando PSpice. Este circuito se compone básicamente de tres fuentes de tensión no lineales controladas por corriente, más una red RC que representa la dinámica de la pila de combustible. En [104], el modelo eléctrico que se plantea es para una pila de combustible tipo PEM. Este modelo se diferencia del anterior en que se han eliminado las fuentes de tensión controladas y la red RC está formada por dos resistencias y un condensador, añadiéndose también al circuito otra resistencia fuera de la red RC. En [105], el modelo que se propone, también para una pila de combustible de tipo PEM, es prácticamente similar al de [104], con la única diferencia que la red RC está formada ahora por una sola resistencia y un condensador.

El modelo dinámico de una pila de combustible es aquel que, recogiendo la relación estática entre la tensión y la corriente que suministra la propia pila, incluye el efecto capacitivo de doble capa que gobierna la dinámica rápida de la pila de combustible. Esta dinámica rápida se refiere a la respuesta de la pila cuando se producen cambios en la carga en cortos intervalos de tiempo, del orden de segundos. Por otra parte, una pila de combustible, como cualquier sistema de conversión energética, sufre un calentamiento derivado de su funcionamiento. Este aumento de temperatura influye en el comportamiento eléctrico de la pila en una escala de tiempo mayor (del orden de horas) respecto al efecto capacitivo. Esto permite diferenciar la dinámica rápida derivada del efecto capacitivo, de la dinámica lenta originada por el aumento de temperatura. En este capítulo se tendrá en cuenta la dinámica debido al efecto capacitivo de la pila de combustible, ya que el resto de sistemas que intervienen son más rápidos que la propia pila, y los periodos de simulación y prueba van a ser lo suficientemente cortos (del orden de minutos) como para poder despreciar el efecto de la temperatura.

En el caso de una pila de combustible de tipo PEM, a partir del modelo dinámico y del análisis experimental del comportamiento de la misma, se determina que existen ciertos puntos

de operación idóneos, como son el punto de máxima potencia suministrada y de máxima eficiencia de operación [106]. Para conseguir que la pila trabaje de forma opcional en uno de estos puntos de operación, se necesita un sistema de control capaz de decidir la corriente que va a entregar la pila de combustible en cada instante de tiempo. Para ello y desde el punto de vista de la ingeniería de control, es fundamental conocer un modelo de estado de la pila de combustible a controlar. Son escasos los trabajos que aparecen en la literatura donde se desarrolla un modelo en el espacio de estado de una pila de combustible [107], [108] y [109]. En [107] se presenta un modelo en el espacio de estado de una pila de metanol (DMFC) y en [108] y [109], de una pila de óxido sólido (SOFC). En ambos casos, el modelo parte de las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento dinámico de cada pila de combustible. No obstante, en ninguno de estos trabajos, se recoge el desarrollo del modelo en el espacio de estado de un sistema formado por pila de combustible-convertidor DC/DC orientado a buscar la relación entre magnitudes eléctricas del sistema.

Las ecuaciones que describen el comportamiento electroquímico de cada tipo de pila de combustible difieren de una a otra, [97], [110], [111].

3.1.2 Modelos estático y dinámico de una pila de combustible tipo PEM

El comportamiento electroquímico de una pila de combustible tipo PEM se describe en el Capítulo 2, y matemáticamente se recoge en la ecuación (2.18), la cual se repite por comodidad en (3.1). De esta ecuación se conoce que la tensión entre los extremos de una celda de combustible resulta de la suma de la tensión de Nernst (2.12) más la caída de tensión provocada por tres efectos dominantes: pérdidas por activación (2.13), pérdidas óhmicas (2.16) y pérdidas por concentración (2.17). Esto es:

$$V_{celda} = E_{Nernst} + V_{act} + V_{ohm} + V_{conc} \quad (3.1)$$

Para conocer la tensión entre los extremos de una pila de combustible formada por un número N de celdas, basta con multiplicar V_{celda} por N .

El circuito eléctrico equivalente asociado al modelo estático de una celda de este tipo de pila de combustible se muestra en la Figura 3.1. Consiste en tres fuentes de tensión controladas conectadas en serie con una resistencia variable. Las tres fuentes de tensión controladas representan el potencial electroquímico asociado a la ecuación de Nernst E_{Nernst} y las caídas de

tensión debidas a las pérdidas por activación V_{act} y concentración V_{conc} respectivamente. La resistencia variable representa las pérdidas óhmicas V_{ohm} que tienen lugar en la membrana y en los electrodos de la celda.

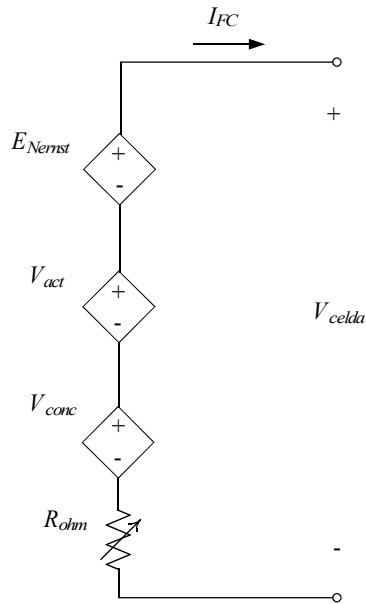


Figura 3.1: Modelo eléctrico estático equivalente de una celda de combustible PEM.

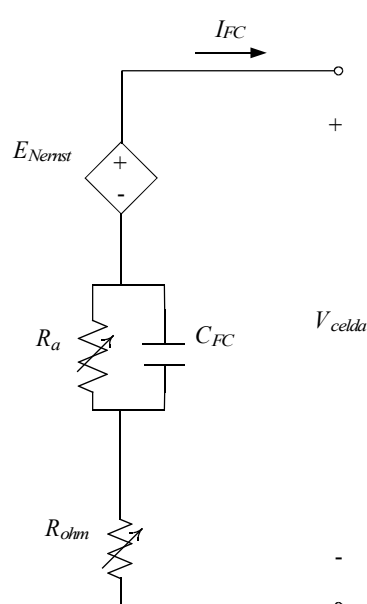


Figura 3.2: Modelo eléctrico dinámico equivalente de una celda de combustible PEM.

Por otra parte, las propiedades dinámicas de una pila de combustible dependen principalmente del denominado efecto de doble capa, [104], [105]. Esto es, cuando dos materiales de distinta carga (electrodo y electrolito en el caso de una celda de combustible) están en contacto, existe una difusión de pares electrón-hueco entre la superficie de contacto. La capa de carga en la interfaz electrodo/electrolito actúa como un almacén de cargas eléctricas y de energía, comportándose como un condensador. Si la corriente disminuye, la subida de tensión sufre un retraso hasta alcanzar el régimen permanente que es cuando la carga de la capacidad asociada a la capa de la interfaz desaparece. Si la corriente aumenta, la caída de tensión vuelve a sufrir un retraso hasta que la capacidad asociada a la capa de interfaz alcanza su nuevo valor de carga. Este retardo afecta a las caídas de tensión de activación y concentración. La caída de tensión debido a las pérdidas resistivas no se ve afectada por el efecto de doble capa, ya que la tensión óhmica depende linealmente de la corriente que entrega la pila de combustible (2.16). El

resultado es que si la corriente cambia instantáneamente, la tensión de operación muestra un cambio inmediato como consecuencia de la resistencia interna de la celda superpuesto a una evolución lenta hacia el valor final de equilibrio.

Teóricamente, para conocer el valor capacitivo de un condensador es necesario disponer de los valores de permeabilidad eléctrica ε , área de los electrodos A y separación entre placas d , calculando así $C = \varepsilon A / d$. En el caso del condensador asociado al efecto de doble capa de una celda de combustible, A es el área de toda la zona de contacto entre electrodo y electrolito que es miles de veces superior al producto “base x altura” de la lámina planar del electrodo. Además d , la separación entre electrodo y electrolito, es muy pequeña, típicamente unos pocos nanómetros, [48]. El resultado es que el valor de la capacidad correspondiente al efecto de doble capa será del orden de unos pocos Faradios.

Según lo anterior, se considera que existe un retardo de primer orden asociado a las tensiones de activación y concentración. La constante de tiempo asociada con este retraso se calcula a partir del producto:

$$\tau = R_a \cdot C_{FC} \quad (3.2)$$

donde C_{FC} representa la capacidad equivalente de la celda y R_a la resistencia equivalente en paralelo con dicha capacidad. La resistencia R_a se conoce a partir de la corriente de salida de la celda I_{FC} y de las caídas de tensión de activación y de concentración obtenidas en el modelo estático, esto es:

$$R_a = \frac{V_{act} + V_{conc}}{I_{FC}} \quad (3.3)$$

Para reflejar el modelo eléctrico dinámico equivalente de la celda, el circuito de la Figura 3.1 es reemplazado por otro en el que el conjunto formado por las fuentes de tensión controladas V_{act} y V_{conc} se sustituye por una red RC (Figura 3.2), donde la resistencia R_a se calcula a partir de la ecuación (3.3). Respecto del valor del condensador C_{FC} , éste se calcula a partir de la ecuación (3.2), una vez que se conoce el retardo de la respuesta de la celda a los cambios en la demanda de potencia.

A continuación se va a describir el procedimiento seguido para ajustar los parámetros del modelo de una pila de combustible tipo PEM al comportamiento real de la pila Nexa de

Ballard³⁰ de 1,2 kW. Para que se puedan contrastar los resultados teóricos con los resultados experimentales, es necesario que el modelo teórico y el montaje del laboratorio describan el mismo sistema.

El procedimiento que se ha seguido para conocer el valor de los parámetros que permiten ajustar el modelo teórico estático al comportamiento experimental de la pila, es el descrito en [105]. Este procedimiento consta de los pasos siguientes:

- i. A partir de la información básica que suministra el fabricante, se obtiene el número de celdas que forman la pila ($N = 47$) y la temperatura de operación cuando la pila entrega la máxima potencia (65 °C). Se elige la presión de suministro de hidrógeno ($P_{H_2} = 3$ atm), y la presión de suministro de oxígeno ($P_{O_2} = 1$ atm).
- ii. A partir de la curva de polarización suministrada por el fabricante, se obtiene la tensión en circuito abierto (46V) y la máxima corriente que es capaz que generar la pila de combustible³¹ (52A).
- iii. A partir de los datos del fabricante se sabe que el grosor de la membrana es de 178 μm y el área activa es $A = 36$ cm^2 .
- iv. En una primera iteración, el valor de los parámetros electroquímicos, ζ_i y φ , ecuaciones (2.13) y (2.15) respectivamente, se consideran los mismos que los empleados para la pila Mark V de Ballard (Tabla 3.1). El parámetro ζ_2 depende de la concentración de hidrógeno en el ánodo C_{H_2} .

³⁰ Como se ha indicado al comienzo de este Capítulo 3, las aplicaciones prácticas se realizarán sobre el módulo de pila de combustible tipo PEM Nexa de Ballard de 1,2 kW.

³¹ Este valor es superior a la máxima corriente que es capaz de suministrar la pila de combustible a una carga. Esto se debe a que parte de la corriente generada, la emplea la pila de combustible para alimentar sus propias cargas auxiliares.

Tabla 3.1: Parámetros de la pila Mark V de Ballard.

Parámetro	Valor
ζ_1	-0,948 (V)
ζ_2	$0,00286 + 0,0002 \ln A + 4,3e-5 \ln C_{H_2}$ (V/K)
ζ_3	$7,6e-5$ (V/K)
ζ_4	$-1,93e-4$ (V/K)
φ	23

- v. La máxima densidad de corriente J_{max} se calcula a partir de la ecuación (3.4), que relaciona la densidad de corriente J con la corriente generada I_{FC} y el área activa de la celda A . Para la máxima corriente (obtenida en el paso ii) y el área activa de la celda (paso iii), resulta un valor de densidad de corriente máxima, $J_{max} = 1,45 \text{ A/cm}^2$.

$$J = \frac{I_{FC}}{A} \quad (3.4)$$

- vi. El paso siguiente consiste en obtener el valor del parámetro B que permite obtener, a partir de la ecuación (2.17), la tensión de concentración V_{conc} . Este valor se ajusta de forma que la curva de polarización correspondiente al modelo teórico, coincida con la curva de polarización obtenida experimentalmente en la zona donde dominan las pérdidas por concentración (valores altos de corrientes). Se parte de un valor inicial de 0,016V (igual al de la pila Mark V de Ballard) y tras varias iteraciones, se consigue el mejor ajuste para $B = 0,05V$.
- vii. El último paso consiste en ajustar los parámetros ζ_i y φ para que la curva de polarización según el modelo teórico, coincida con la curva experimental en la zona de corrientes medias y bajas. Los valores definitivos de estos parámetros para la pila Nexa de Ballard de 1,2 kW, se recogen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Parámetros experimentales de la pila Nexa de Ballard de 1,2 kW.

Parámetro	Valor
ζ_1	-0,858 (V)
ζ_2	$0,00286 + 0,0002 \ln A + 1,3e-5 \ln C_{H_2}$ (V/K)
ζ_3	$7,6e-5$ (V/K)
ζ_4	$-1e-4$ (V/K)
φ	19

Durante las pruebas experimentales realizadas para el ajuste de los parámetros, el suministro de hidrógeno a la pila se ha efectuado mediante una botella de hidrógeno comprimido a 200 atm con una concentración del 99,99%. El valor que se ha tomado para la resistencia de los electrodos R_C durante todo el procedimiento de ajuste de parámetros es de $0,0001 \Omega$.

Una vez que se conoce el valor de los parámetros que ajustan la curva de polarización teórica a la curva experimental, falta por determinar el valor del condensador C_{FC} asociado al retardo de la pila. El fabricante suministra información relativa a la respuesta de la pila de combustible cuando se producen cambios en la demanda de corriente. Además, se han realizado pruebas en el laboratorio en las que, mediante un banco de cargas controlable, se ha ido seleccionando la corriente solicitada por la carga. A partir de la información obtenida, se observa que el tiempo que tarda la pila de combustible en alcanzar un nuevo punto de operación en régimen permanente es de 0,5 segundos aproximadamente. Éste es el valor de la constante de tiempo τ . Para conocer el valor de la capacidad C_{FC} , ecuación (3.2), es necesario calcular previamente el valor de R_a mediante la ecuación (3.3). Esto es inmediato, ya que conocidos los parámetros ζ_i y B , las ecuaciones (2.13) y (2.17) permiten calcular V_{act} y V_{conc} respectivamente. Operando pues se tiene que $C_{FC} = 15$ F. Las Figuras 3.3 y 3.4 muestran, respectivamente, el ajuste de la curva de polarización y la respuesta dinámica calculadas a partir del modelo teórico con los datos experimentales que proporciona el fabricante.

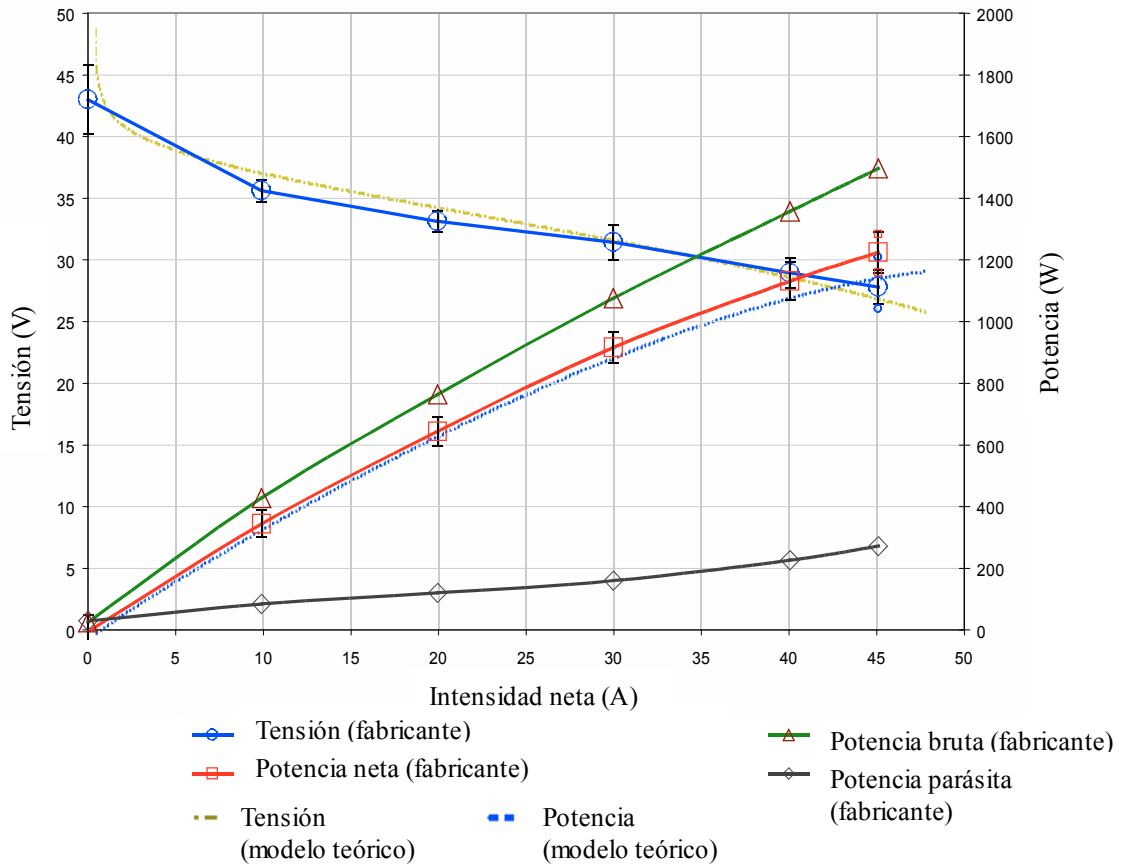


Figura 3.3: Ajuste de la curva de polarización y curva de potencia del modelo teórico.

3.1.3 Modelo de estado de una pila de combustible tipo PEM

En la apartado anterior se ha presentado un circuito eléctrico equivalente (Figura 3.2) junto con un modelo matemático, ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3), para describir el comportamiento dinámico de una pila de combustible tipo PEM genérica. A partir de estos datos se desarrollará el modelo de estado de la pila de combustible.

La tensión de una celda v_{celda}^{32} , resulta de la suma de la diferencia de tensión de Nernst E_{Nernst} , más la tensión entre los extremos del condensador v_{CFC} , y la tensión entre los extremos de

³² Hasta el momento todas las magnitudes han aparecido en letras mayúsculas. A partir de la ecuación (3.5), como consecuencia de que se considera el modelo dinámico de la pila de combustible, las magnitudes que varían con el tiempo aparecen escritas en minúsculas. La letra mayúscula se empleará para hacer referencia al valor de una variable en régimen estacionario, es decir, en un punto de operación determinado.

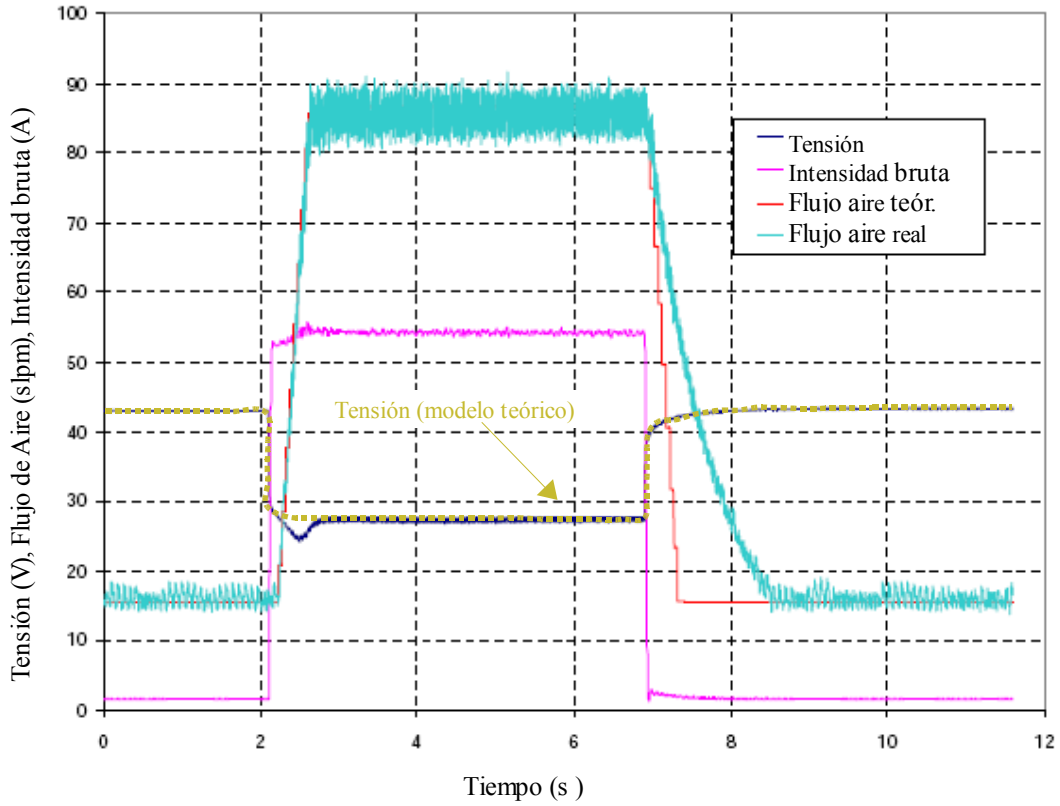


Figura 3.4: Ajuste de la respuesta dinámica teórica y experimental.

la resistencia v_{ohm} , ecuación (3.5).

$$v_{celda} = E_{Nernst} + v_{CFC} + v_{ohm} \quad (3.5)$$

La tensión entre los extremos del condensador se relaciona con la corriente que suministra la celda y la corriente que pasa por la resistencia R_a , i_{R_a} , según (3.6):

$$i_{CFC} = C_{FC} \frac{dv_{CFC}}{dt} = i_{FC} - i_{R_a} \quad (3.6)$$

Para conocer el valor de i_{R_a} , se aplica la ley de Ohm sobre la resistencia R_a , ecuación (3.7). La ecuación (3.3) permite conocer el valor de R_a en el punto de operación en el que esté trabajando la pila de combustible:

$$i_{R_a} = \frac{v_{CFC}}{R_a} \quad (3.7)$$

Reagrupando (3.6), teniendo en cuenta (3.3) y (3.7), se obtiene la ecuación (3.8).

$$\frac{dv_{CFC}}{dt} = \frac{1}{C_{FC}} \cdot \left(1 - \frac{v_{CFC}}{v_{act} + v_{conc}} \right) \quad (3.8)$$

La expresión que permite conocer la tensión entre los extremos de la pila de combustible, sumadas todas sus celdas, es:

$$v_{FC} = N \cdot (E_{Nernst} + v_{CFC} + v_{ohm}) \quad (3.9)$$

La Figura 3.5 muestra el esquema general del modelo de estado de un sistema genérico.

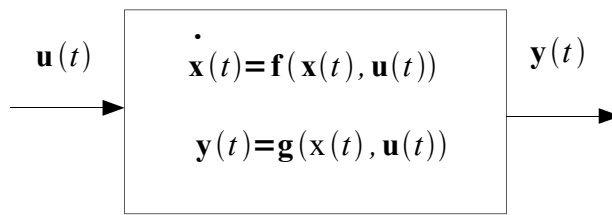


Figura 3.5: Modelo de estado de un sistema genérico.

Particularizando el esquema de la Figura 3.5 para el caso de una pila de combustible, según el modelo eléctrico de la Figura 3.2 y las ecuaciones (3.7) y (3.8), la variable de estado x (si se observa la Figura 3.2, el sistema tiene un único elemento almacenador de energía, por tanto el orden del vector de estado uno), se hace coincidir con la tensión instantánea entre los terminales del condensador v_{CFC} , la variable de entrada u , con la corriente que suministra la pila de combustible i_{FC} , y la variable de salida y , con la tensión que existe entre los extremos de la pila de combustible v_{FC} .

3.1.4 Modelo linealizado de una pila de combustible tipo PEM

Considerando un punto de equilibrio genérico para el funcionamiento de la pila de combustible $(X, U) = (V_{CFC}, I_{FC})$, el modelo que aproxima las variaciones incrementales del sistema no lineal alrededor de este punto de equilibrio, viene descrito por un sistema lineal cuyas ecuaciones de estado y de salida son (3.10) y (3.11), [112].

$$\dot{x}_{\delta}(t) = \mathbf{A}_{\delta}(X, U) x_{\delta}(t) + \mathbf{B}_{\delta}(X, U) u_{\delta}(t) \quad (3.10)$$

$$y_{\delta}(t) = \mathbf{C}_{\delta}(X, U)x_{\delta}(t) + \mathbf{D}_{\delta}(X, U)u_{\delta}(t) \quad (3.11)$$

Donde las matrices \mathbf{A}_{δ} , \mathbf{B}_{δ} , \mathbf{C}_{δ} y \mathbf{D}_{δ} son las matrices Jacobianas que describen la aproximación lineal del sistema no lineal pila de combustible en un punto de operación genérico (X, U) .

Las ecuaciones (3.10) y (3.11), que constituyen el modelo linealizado o modelo de pequeña señal de un sistema genérico, permiten conocer las variaciones incrementales del mismo respecto de un punto de equilibrio. Para conocer el valor real de las variables de interés del sistema en cualquier instante, basta con sumar a sus valores estáticos, las variables incrementales, esto es,

$$\begin{aligned} x &= X + x_{\delta} \\ y &= Y + y_{\delta} \\ u &= U + u_{\delta} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Donde x_{δ} , u_{δ} , y_{δ} representan, respectivamente, las variaciones incrementales de las variables de estado y de la entrada y salida del sistema. Las matrices constantes \mathbf{A}_{δ} , \mathbf{B}_{δ} , \mathbf{C}_{δ} , y \mathbf{D}_{δ} de las ecuaciones (3.10) y (3.11) están dadas por (3.13).

$$\mathbf{A}_{\delta} = \left. \frac{\delta f}{\delta x} \right|_{(X, U)} \quad \mathbf{B}_{\delta} = \left. \frac{\delta f}{\delta u} \right|_{(X, U)} \quad \mathbf{C}_{\delta} = \left. \frac{\delta g}{\delta x} \right|_{(X, U)} \quad \mathbf{D}_{\delta} = \left. \frac{\delta g}{\delta u} \right|_{(X, U)} \quad (3.13)$$

Para facilitar el cálculo de las derivadas parciales, los términos numéricos constantes de las expresiones (2.12), (2.13), (2.16) y (2.17) se van a sustituir por constantes k_i . De esta forma, dichas ecuaciones se pueden volver a escribir del modo siguiente:

Para la ecuación de Nernst, (2.12), se obtiene:

$$E_{Nernst} = k_1 + k_2 T + k_3 T \ln(P_{H_2}) + k_4 T \ln(P_{O_2}) \quad (3.14)$$

Para la tensión de activación v_{act} , (2.13), se obtiene:

$$v_{act} = k_5 + k_6 T + k_7 T \ln(i_{FC}) \quad (3.15)$$

Para la tensión óhmica v_{ohm} , (2.16), se obtiene:

$$v_{ohm} = i_{FC} \left(\frac{k_8 + k_9 i_{FC} + k_{10} T^2 i_{FC}^{2.5}}{(k_{11} - k_{12} i_{FC}) \exp\left(k_{13} + \frac{k_{14}}{T}\right)} + k_{17} \right) \quad (3.16)$$

Para la tensión de concentración v_{conc} , (2.17), se obtiene:

$$v_{conc} = k_{15} \ln(1 - k_{16} i_{FC}) \quad (3.17)$$

Las matrices jacobianas asociadas al modelo lineal aproximado para pequeñas variaciones del sistema no lineal de pila de combustible quedan de la forma:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{FC\delta} &= \frac{-1}{C_{FC}} \left[\frac{I_{FC}}{k_5 + k_6 T + k_7 T \ln(i_{FC}) + k_{15} \ln(1 - k_{16} i_{FC})} \right] \\ \mathbf{B}_{FC\delta} &= \frac{1}{C_{FC}} \left[1 + \frac{V_{CFC}}{k_5 + k_6 T + k_7 T \ln(i_{FC}) + k_{15} \ln(1 - k_{16} i_{FC})} \right] \\ \mathbf{C}_{FC\delta} &= -N \\ \mathbf{D}_{FC\delta} &= -N \left[\frac{N_1}{D_1} + k_{17} + (N_2 + N_3) \left(\frac{I_{FC}}{D_2} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.18)$$

Donde N_1 , N_2 , N_3 , D_1 y D_2 responden a las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned} N_1 &= k_8 + k_9 I_{FC} + k_{10} T^2 i_{FC}^{2,5} \\ N_2 &= (k_9 + 2,5 k_{10} T^2 I_{FC}^{1,5}) (k_{11} - k_{12} I_{FC}) \exp\left(k_{13} + \frac{k_{14}}{T}\right) \\ N_3 &= (k_8 + k_9 I_{FC} + K_{10} T^2 I_{FC}^{2,5}) k_{12} \exp\left(k_{13} + \frac{k_{14}}{T}\right) \\ D_1 &= (k_{11} - k_{12} I_{FC}) \exp\left(k_{13} + \frac{k_{14}}{T}\right) \\ D_2 &= \left((k_{11} - k_{12} I_{FC}) \exp\left(k_{13} + \frac{k_{14}}{T}\right) \right)^2 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Es fácil observar, que todas las matrices jacobianas son escalares, lo cual es lógico ya que el sistema de pila de combustible considerado es un sistema tipo SISO (Single Input, Single Output). La única entrada es i_{FC} , la única salida es v_{FC} y la única variable de estado es v_{CFC} .

El modelo linealizado del sistema pila de combustible alrededor de un punto de equilibrio genérico, $U = I_{FC}$ y $X = V_{CFC}$, se recoge entonces en (3.20):

$$\begin{aligned} \dot{v}_{CFC\delta} &= \mathbf{A}_{FC\delta} v_{CFC\delta} + \mathbf{B}_{FC\delta} i_{FC\delta} \\ v_{FC\delta} &= \mathbf{C}_{FC\delta} v_{CFC\delta} + \mathbf{D}_{FC\delta} i_{FC\delta} \end{aligned} \quad (3.20)$$

La función de transferencia del sistema de pila de combustible, que relaciona la tensión incremental entre los extremos de la pila $v_{FC\delta}(s)$, con la corriente incremental que suministra la

pila $i_{FC\delta}(s)$, alrededor de un punto de operación genérico, se obtiene a partir del modelo linealizado obtenido en (3.20), según:

$$G_{FC\delta}(s) = \frac{v_{FC\delta}(s)}{i_{FC\delta}(s)} = \mathbf{C}_{FC\delta}(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_{FC\delta})^{-1} \mathbf{B}_{FC\delta} + \mathbf{D}_{FC\delta} = \frac{\mathbf{C}_{FC\delta} \mathbf{B}_{FC\delta}}{s - \mathbf{A}_{FC\delta}} + \mathbf{D}_{FC\delta} \quad (3.21)$$

Nótese que la última igualdad es posible debido al carácter escalar de las matrices. Sustituyendo la expresión de las matrices jacobianas, (3.18), en la ecuación que permite calcular la función de transferencia, (3.21), se observa que la función de transferencia $G_{FC\delta}(s)$, queda parametrizada en función del punto de operación ($U = I_{FC}$, $X = V_{CFC}$) y de las condiciones de funcionamiento (temperatura T y presión, P_{H2} y P_{O2}) en la que esté trabajando la pila de combustible.

Analizando la función de transferencia se pueden hacer dos observaciones importantes. Por un lado, se sabe que el sistema en lazo abierto es estable porque el único polo que posee es real y se encuentra en el semiplano izquierdo, $s = \mathbf{A}_{FC\delta} < 0$. Por otra parte, se aprecia que la función de transferencia tiene un término independiente, $\mathbf{D}_{FC\delta}$. Esto indica que cuando se obtenga la respuesta dinámica del sistema pila de combustible a una entrada (escalón, por ejemplo), se van a encontrar dos componentes diferenciadas; una dinámica rápida que sigue instantáneamente los cambios en la entrada, asociada al término independiente, y una dinámica lenta superpuesta a la componente rápida, que supone un retardo asociado al término de primer orden en s .

Con objeto de comprobar teóricamente la validez del modelo linealizado desarrollado, se va a demostrar que el valor de la ganancia estática, en un punto de operación genérico, coincide con el valor de la pendiente de la curva de polarización en dicho punto de operación. Con este objetivo, se elige el punto de operación de máxima potencia³³ sobre la curva de polarización teórica de la pila Nexa de Ballard³⁴. Según la curva de polarización y potencia teórica (Figura 3.6), el punto de máxima potencia es alcanzado cuando la tensión entre los

³³ El proceso que se realiza para comprobar que el valor de $G_{FC\delta}(0)$ coincide con la pendiente de la curva de polarización se puede aplicar a cualquier otro punto de operación de la pila. No obstante, se elige éste por ser uno de los de mayor interés, ya que será uno de los más usados por un sistema práctico la mayor parte del tiempo.

³⁴ En la sección 3.1.2 se hace el ajuste experimental de los parámetros del modelo para que la curva de polarización teórica coincida con la curva de polarización de la pila Nexa de Ballard.

extremos de la pila es $V_{FC} = 26,14 \text{ V}$ y la corriente es $I_{FC} = 45,88 \text{ A}$ y $P_{FC} = 1199 \text{ W}$. Para este punto de funcionamiento, según datos del fabricante, la temperatura de operación es de $65 \text{ }^\circ\text{C}$. La presión de suministro de hidrógeno se fija en 3 atm ³⁵, dentro del rango admitido por la pila Nexa ($0,5 \text{ atm} - 15 \text{ atm}$).

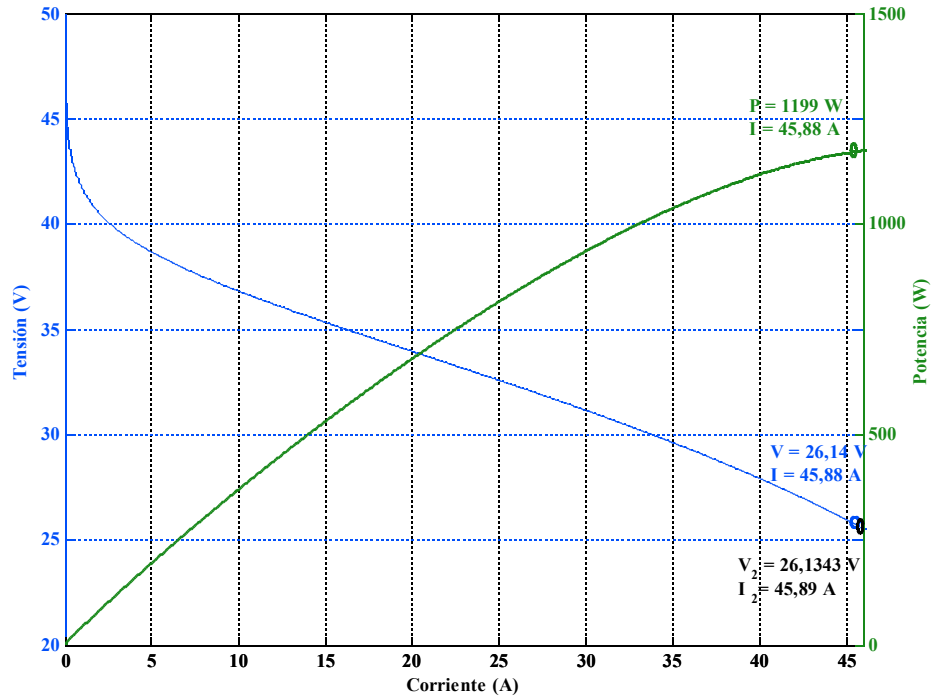


Figura 3.6: Curva de polarización y de potencia para la pila Nexa.

Para el punto de máxima potencia, el fabricante suministra los datos siguientes: $V_{FC} = 26 \text{ V}$, $I_{FC} = 46,15 \text{ A}$ y $P_{FC} = 1200 \text{ W}$. Nótese pues la bondad del ajuste de la Figura 3.6 obtenida en base al modelo realizado en la sección 3.1.2, respecto a los valores nominales experimentales suministrados por el fabricante. Esto permite afirmar que el error cometido por el modelo teórico respecto a los datos suministrados por el fabricante es despreciable.

Una vez que se ha elegido el punto de operación de la pila, para comprobar el modelo linealizado obtenido, se calcula primero la ganancia estática del sistema imponiendo $s = 0$ en la

³⁵ Este mismo valor de presión es el que se selecciona posteriormente en la válvula de entrada de hidrógeno y con él se harán todas las pruebas de laboratorio.

ecuación (3.21). Así se obtiene que $G_{FC\delta}(0) = -0,57 \text{ V/A}$. A continuación, se calcula la pendiente de la curva de polarización en el punto de operación elegido. Si ambos valores coinciden, se verifica que el modelo linealizado del sistema pila de combustible desarrollado se puede emplear para describir las perturbaciones del sistema alrededor de un punto de operación.

Para conocer el valor de la pendiente de la curva de polarización en el punto de operación elegido se pueden emplear algunos de los métodos siguientes:

1. Se halla el cociente entre el valor de la corriente y el valor de la tensión en el punto de operación considerado. Esto es:

$$m = -\left(\frac{V_{FC}}{I_{FC}}\right) = -\left(\frac{26,14 \text{ V}}{45,88 \text{ A}}\right) = -0,57 \text{ V/A}$$

2. Sobre la curva de polarización (Figura 3.6) se toma el punto de operación considerado (V_{FC}, I_{FC}) y el inmediatamente consecutivo³⁶, $V_2 = V_{FC} + \Delta V_{FC}$ e $I_2 = I_{FC} + \Delta I_{FC}$, con $\Delta I_{FC} = 0,01 \text{ A}$.

A continuación se calcula el cociente de la diferencia incremental de las variables, Figura 3.6:

$$m = \frac{\Delta V_{FC}}{\Delta I_{FC}} = \left(\frac{-0,0057 \text{ V}}{0,01 \text{ A}}\right) = -0,57 \text{ V/A}$$

En ambos casos se obtiene el mismo valor. Se concluye pues que el modelo linealizado desarrollado permite conocer la respuesta del sistema no lineal de pila de combustible en régimen estacionario.

Una vez que se ha comprobado que la ganancia estática y la pendiente de la curva de polarización para el punto de operación considerado coinciden, el siguiente paso es analizar la respuesta del sistema a una variación incremental en la entrada en torno a un punto de operación. Se va a comparar la respuesta dinámica del sistema descrito por el modelo no lineal, ecuaciones (3.8) y (3.9), con la respuesta del sistema descrito por el modelo linealizado, ecuaciones (3.10) y (3.11). Si ambas respuestas coinciden, se puede afirmar que el modelo linealizado obtenido, permite conocer la respuesta del sistema no lineal de pila de combustible a

³⁶ El paso incremental que se ha considerado en todas las simulaciones es de $\Delta I_{FC} = 0,01 \text{ A}$.

las variaciones incrementales que se produzcan alrededor de cualquier punto de operación sobre la curva de polarización.

A partir del punto de operación elegido, punto de máxima potencia, se provoca un incremento en la corriente de $\Delta i_{FC} = 0,3 \text{ A}$, de forma que represente una perturbación al sistema. El nuevo valor de la tensión entre los extremos de la pila según la curva de polarización teórica es de $V_{FC} = 25,97 \text{ V}$, en régimen estacionario. Este nuevo valor se alcanza cuando han transcurrido aproximadamente 0,5 segundos. En la Figura 3.7 se muestra la respuesta del sistema pila de combustible a partir del modelo no lineal y la respuesta a partir del modelo linealizado. Las dos respuestas coinciden prácticamente y en los dos casos se aprecia que existe una dinámica rápida que sigue instantáneamente el cambio en la entrada. Esta respuesta rápida está asociada a la componente lineal de la tensión de polarización v_{ohm} , que queda reflejada en el término independiente de la función de transferencia (3.21). Superpuesta a esta dinámica rápida, existe una respuesta lenta asociada a la dinámica interna de la propia pila, que queda reflejada en el término de primer orden dependiente de s .

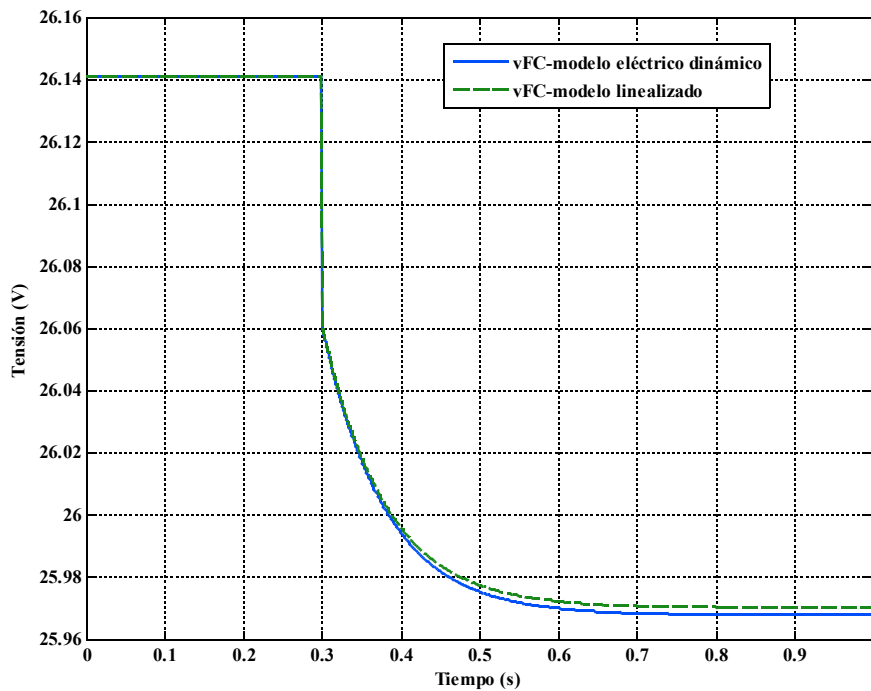


Figura 3.7: Respuesta de los modelos eléctrico dinámico y linealizado a una perturbación en la entrada.

En virtud de las comprobaciones realizadas, se puede afirmar que el modelo linealizado del sistema de pila de combustible desarrollado, describe de forma fiable el comportamiento del sistema frente a pequeñas variaciones en la entrada en torno a un punto de operación genérico.

3.2 Sistema Convertidor DC/DC

Como ya se ha analizado en el Capítulo 2 y comprobado en la sección 3.1 de este capítulo, la pila de combustible genera potencia eléctrica continua no regulada. Además, los puntos de funcionamiento de máxima eficiencia y máxima potencia no coinciden. El primero se alcanza para valores bajos de corriente, mientras que el segundo se alcanza para valores altos de corriente. Dada la diversidad de aplicaciones, pueden existir unas en las que interese trabajar a máxima eficiencia y otras donde interese trabajar a máxima potencia. Es más, para una misma aplicación, puede que haya que trabajar en momentos diferentes a máxima potencia o a máxima eficiencia. A esto se añade la necesidad de disponer de niveles de tensión fijos para alimentar a determinadas cargas. Por todo ello, se hace necesario incorporar a la salida de la pila de combustible un sistema de acondicionamiento de potencia.

La elección del sistema de acondicionamiento de potencia que se conecta a los terminales de la pila depende de la aplicación para la que esté destinado el sistema de pila de combustible (ver sección 2.3.1). En el desarrollo que sigue, son varios los objetivos que se pretenden alcanzar. Por un lado, se va a analizar el comportamiento real de una determinada pila de combustible, la pila Nexa de Ballard, para alimentar a una carga DC. Por otro, se pretende emplear la pila de combustible para alimentar una carga AC. En este caso se empleará un inversor que entrega tensión y corriente en alterna a partir de un valor de tensión constante a su entrada. En las dos aplicaciones (DC y AC), se considera que el punto de conexión eléctrica de la tensión continua va a tener un valor constante de 48 V, un valor de tensión comúnmente utilizado. A partir de la curva de polarización de la pila Nexa de Ballard (Figura 3.3), se sabe que ésta no alcanza en ningún punto de funcionamiento la tensión de salida de 48 V. En consecuencia, es necesario incorporar una etapa de potencia (convertidor DC/DC elevador) en los terminales de la pila de combustible. La configuración más sencilla y con menor número de componentes es la topología del convertidor Boost. Por ello se va a emplear este tipo de convertidor para regular la tensión de salida de la pila de combustible.

A continuación, se demuestra cómo es posible controlar el punto de operación de una fuente de potencia, en este caso una pila de combustible, variando el ciclo de servicio del convertidor Boost. Después se realizan los desarrollos matemáticos para obtener el modelo en el espacio de estado de dicho convertidor. Esta sección finaliza con el modelo linealizado de este convertidor alrededor de un punto de operación.

3.2.1 Control del punto de funcionamiento de la pila de combustible mediante el convertidor Boost

La Figura 3.8 muestra la topología de un convertidor Boost ideal (considerando pérdidas nulas) alimentando a una resistencia de carga R_L a partir de una fuente constante V_i . Existen dos situaciones de funcionamiento: *modo continuo* (toda la energía se transfiere a la carga, sin llegar a que la corriente por la bobina se anule), y *modo discontinuo* (la carga consume menos de lo que el circuito puede entregar en un ciclo, con lo cual la corriente por la bobina cae hasta cero durante parte del ciclo. El análisis del circuito se realiza considerando el modo continuo [113].

El principio básico de funcionamiento de este convertidor consiste en dos estados distintos dependiendo de si el transistor S (interruptor) está conduciendo o no:

- Cuando el transistor está cerrado (estado de conducción), la bobina L almacena la energía suministrada por la fuente. Al mismo tiempo, la carga es alimentada por la energía almacenada en el condensador C , Figura 3.9(a). Considerando T_{on} el tiempo que permanece cerrado el interruptor, al final de este periodo, el cambio en la corriente que pasa por la bobina viene expresado por (3.22):

$$\Delta I = I(T_{on}) - I(0) = \int_0^{T_{on}} (V_i / L) dt = \frac{V_i T_{on}}{L} \quad (3.22)$$

- Cuando el transistor está abierto (estado de no conducción), el único camino para la corriente que proviene de la fuente es a través del diodo D . Después se distribuye entre el condensador (hasta que se carga completamente) y la carga, Figura 3.9(b). Considerando T el periodo del ciclo de conmutación completo (tiempo que permanece el transistor cerrado más el tiempo que permanece abierto), al final de este periodo, el cambio en la corriente que pasa por la bobina viene expresado por (3.23). Considerando que la energía media

almacenada en la bobina es cero, la variación en la corriente de la bobina durante el periodo de no conducción del transistor T_{off} es igual a la variación durante T_{on} pero cambiada de signo.

$$-\Delta I = I(T) - I(T_{on}) = \int_{T_{on}}^T ((V_i - V_o)/L) dt = \frac{(V_i - V_o)(T - T_{on})}{L} \quad (3.23)$$

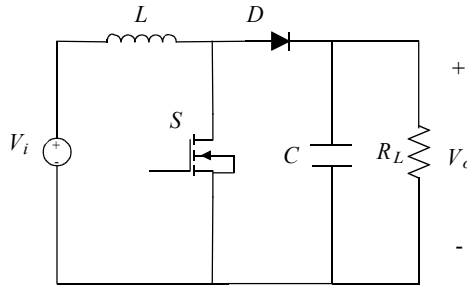


Figura 3.8: Esquema eléctrico de un convertidor Boost ideal.

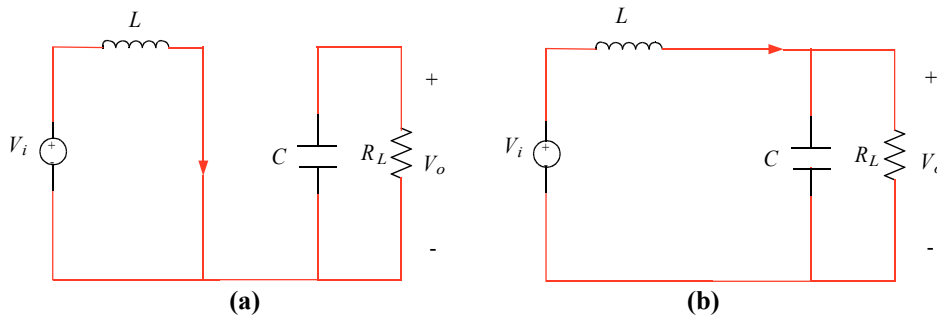


Figura 3.9: Esquema de conexión en conducción (a) y no conducción (b) del convertidor Boost.

Igualando las expresiones (3.22) y (3.23), y sabiendo que $T_{on} = D \cdot T$, donde D es el ciclo de servicio del convertidor, se obtiene la expresión (3.24) que relaciona la tensión a la salida del convertidor con la tensión a la entrada y el ciclo de servicio. El valor del ciclo de servicio varía entre 0 y 1. En todo este rango, la tensión a la salida es igual ($D = 0$) o mayor ($D > 0$) que la tensión a la entrada. Esto es,

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} \quad (3.24)$$

Igualando la potencia a la entrada y a la salida, (3.25), se obtiene la relación entre la corriente a la entrada y a la salida, (3.26) :

$$P_o = V_o I_o = P_i = V_i I_i \quad (3.25)$$

$$I_o = I_i (1 - D) \quad (3.26)$$

Calculando la tensión en la carga a partir de la ecuaciones (3.24) y (3.26):

$$V_o = I_i (1 - D) R_L \quad (3.27)$$

Se tiene que la resistencia equivalente a la entrada del convertidor es (3.28):

$$R_i = (1 - D)^2 \cdot R_L \quad (3.28)$$

En la ecuación (3.28) se observa que para un mismo valor de resistencia de carga, la resistencia equivalente que existe en los extremos de la fuente situada a la entrada del convertidor, depende del ciclo de servicio de éste. Por tanto, si a la entrada del convertidor se coloca una pila de combustible (Figura 3.10), el ciclo de servicio del convertidor permite ubicar el punto de polarización de la pila de combustible, y por ende la potencia suministrada por ésta.

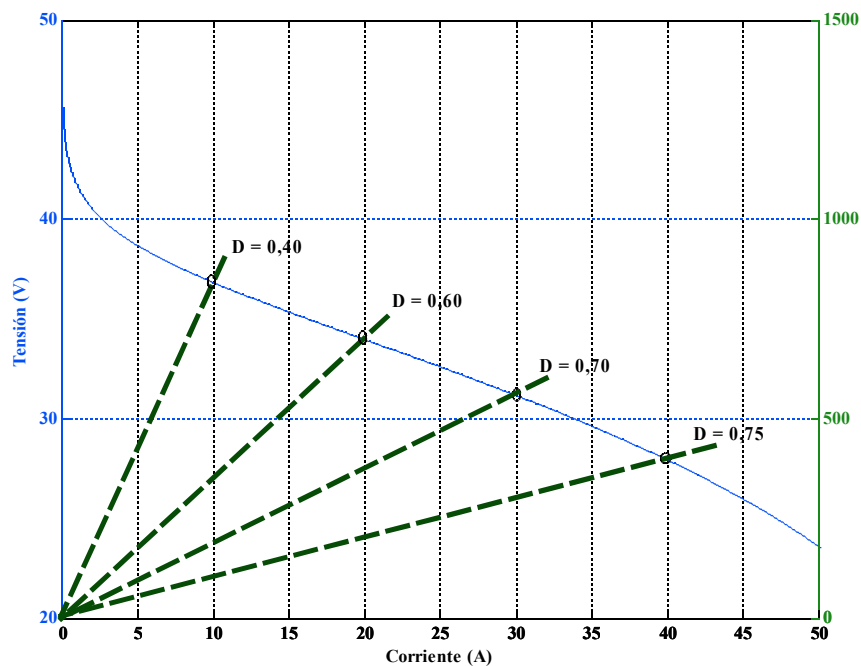


Figura 3.10: Intersección de la curva de polarización de la pila de combustible con la recta de carga, variando el ciclo de servicio del convertidor.

Los límites de la resistencia equivalente a la entrada vienen determinados por los límites del rango de valores que toma el ciclo de servicio.

3.2.2 Modelo de estado del convertidor Boost

En la sección anterior se estudió cómo mediante un convertidor Boost se puede controlar el punto de funcionamiento de una pila de combustible. Para ello se empleó un convertidor ideal; sin embargo, el control formal y preciso de la pila de combustible mediante el convertidor exige disponer de un modelo lo más exacto posible de éste.

En esta sección se obtiene el modelo de estado del convertidor Boost; para ello, se calculan las ecuaciones de la corriente por la bobina y la tensión en el condensador durante el tiempo de conducción y no conducción del transistor, considerando las pérdidas en ambos dispositivos (r_L y r_C en Figura 3.11). De forma más precisa, habría que considerar más elementos para tener en cuenta todas las no idealidades de los componentes del convertidor. Así, entre otros, podría haberse considerado la resistencia interna del transistor y la corriente de fugas del condensador. Sin embargo, aquella es varias veces más pequeña que r_C y aún más que r_L ; mientras que ésta es del orden de una centésima de microamperio. Por tanto, el hecho de considerar sólo r_L y r_C en el modelo se fundamenta en que son los dos elementos más influyentes en el comportamiento no ideal del convertidor. En este análisis, la resistencia de carga R_L se sustituye por una fuente de corriente i_o , cuyo valor es equivalente al consumo de la carga. De esta forma, el análisis del convertidor se extiende a cualquiera de los casos en los que el convertidor se conecta a una resistencia, a un motor de continua, a otro convertidor o inversor, o bien a un bus de continua [114].

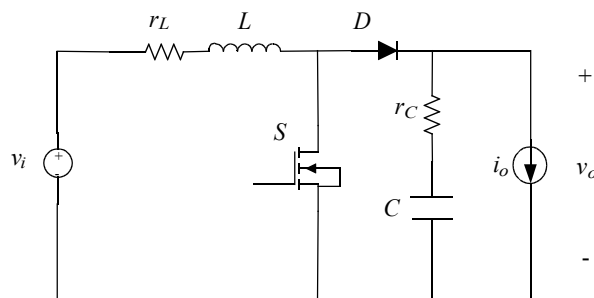


Figura 3.11: Esquema eléctrico de un convertidor Boost con pérdidas en los elementos pasivos.

Cuando el transistor conduce, la tensión de la fuente es igual a la tensión en la resistencia de la bobina más la tensión de la propia bobina. En cuanto al condensador, éste se descarga para alimentar a la carga, según las ecuaciones (3.29):

$$\begin{aligned} v_i &= r_L i_L + L \frac{di_L}{dt} \\ i_o &= -C \frac{dv_C}{dt} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Cuando el transistor no conduce, la tensión de la fuente se reparte entre la resistencia parásita de la bobina y la propia bobina, así como en la resistencia parásita del condensador y el propio condensador. Esto es:

$$\begin{aligned} v_i &= r_L i_L + L \frac{di_L}{dt} + r_C C \frac{dv_C}{dt} + v_C \\ i_L &= C \frac{dv_C}{dt} + i_o \end{aligned} \quad (3.30)$$

Para obtener el modelo de estado se consideran como variables de estado del sistema la corriente por la bobina i_L y la tensión en el condensador v_C , y como variables de entrada la tensión a la entrada del convertidor v_i y la corriente a la salida del convertidor i_o . En consecuencia, las ecuaciones (3.29) y (3.30) se pueden escribir de forma matricial según (3.31) (transistor conduciendo) y (3.32) (transistor cortado) respectivamente.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_L}{L} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ \frac{-1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ v_i \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(r_L+r_C)}{L} & \frac{-1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{r_C}{L} & \frac{1}{L} \\ \frac{-1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ v_i \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

La combinación de las expresiones matriciales (3.31) y (3.32) durante el tiempo de conducción y no conducción genera el modelo de estado del convertidor durante todo el periodo de conmutación, ecuaciones (3.33) y (3.34).

$$\begin{bmatrix} \dot{\cdot} \\ i_L \\ \dot{\cdot} \\ v_C \end{bmatrix} = d \begin{bmatrix} \dot{\cdot} \\ i_L \\ \dot{\cdot} \\ v_C \end{bmatrix}_{ON} + (1-d) \begin{bmatrix} \dot{\cdot} \\ i_L \\ \dot{\cdot} \\ v_C \end{bmatrix}_{OFF} \quad (3.33)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\cdot} \\ i_L \\ \dot{\cdot} \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_L}{L} - \frac{r_C}{L}(1-d) & \frac{-1}{L}(1-d) \\ \frac{1}{C}(1-d) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{r_C}{L}(1-d) & \frac{1}{L} \\ \frac{-1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ v_i \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Este modelo de estado del convertidor Boost proporciona el valor promedio de las variables de estado en un periodo de conmutación para un valor de d comprendido entre $[0,1]$. Este es el modelo conocido como *modelo de variables promedio*, [115]. Para conocer el valor instantáneo de las variables de estado, se considera que d sólo puede tomar dos valores, 0 ó 1, variando de uno a otro a la frecuencia de conmutación del transistor. Éste es el modelo conocido como *modelo de valores instantáneos* presentado en [116]. Para trabajar con una expresión matricial (3.34) más reducida, el término $(1-d)$ se puede sustituir por d' que representa el complemento del ciclo de servicio del convertidor; esto es la fracción del periodo durante la que el transistor no conduce.

3.2.3 Modelo linealizado del convertidor Boost

A partir del modelo de estado promedio desarrollado en la sección 3.2.2 para el convertidor Boost, el modelo linealizado se obtiene suponiendo una variación incremental en las variables de entrada y salida respecto a un punto de operación genérico (tal como se ha hecho en la sección 3.1.4). Las variables de entrada y salida se pueden descomponer en la suma de su valor promedio más una variación incremental, (3.35), [114]:

$$\begin{aligned} i_L &= I_L + i_{L\delta} \\ v_C &= V_C + v_{C\delta} \\ v_i &= V_i + v_{i\delta} \\ i_o &= I_o + i_{o\delta} \\ d' &= D' + d'\delta \end{aligned} \quad (3.35)$$

De esta forma, cada una de las matrices del modelo de estado, (3.34), se pueden descomponer en la suma de una matriz que depende del punto de operación en el que esté trabajando el convertidor más otra matriz que depende de la propia variación, Esto es:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-r_L}{L} - \frac{(r_C D')}{L} & \frac{-D'}{L} \\ \frac{D'}{C} & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{r_C d'_{\delta}}{L} & \frac{-d'_{\delta}}{L} \\ \frac{d'_{\delta}}{C} & 0 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{D'} + \mathbf{A}_{\delta'} \quad (3.36)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{r_C D'}{L} & \frac{1}{L} \\ \frac{-1}{C} & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{r_C d'_{\delta}}{L} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \mathbf{B}_{D'} + \mathbf{B}_{\delta'} \quad (3.37)$$

Si se desarrolla la expresión (3.34) teniendo en cuenta (3.35), (3.36), (3.37) y que en un punto de operación determinado, los valores promedio de las variables de entrada y salida no cambian con el tiempo, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L\delta} \\ \dot{v}_{C\delta} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{D'} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \mathbf{A}_{D'} \begin{bmatrix} i_{L\delta} \\ v_{C\delta} \end{bmatrix} + \mathbf{A}_{\delta'} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \mathbf{A}_{\delta'} \begin{bmatrix} i_{L\delta} \\ v_{C\delta} \end{bmatrix} \\ + \mathbf{B}_{D'} \begin{bmatrix} I_o \\ V_i \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{D'} \begin{bmatrix} i_{o\delta} \\ v_{i\delta} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{\delta'} \begin{bmatrix} I_o \\ V_i \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{\delta'} \begin{bmatrix} i_{o\delta} \\ v_{i\delta} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

En la expresión (3.38) los términos correspondientes al producto de las matrices de estado por el vector de estado en el punto de operación se anulan, ya que, al ser valores estáticos, no contribuyen a la variación del vector de estado con respecto al tiempo. Esto es,

$$\mathbf{A}_{D'} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{D'} \begin{bmatrix} I_o \\ V_i \end{bmatrix} = 0 \quad (3.39)$$

Por otro lado, los productos de los términos que atañen exclusivamente a variaciones incrementales pueden ser despreciados:

$$\mathbf{A}_{\delta'} \begin{bmatrix} i_{L\delta} \\ v_{C\delta} \end{bmatrix} \simeq \mathbf{B}_{\delta'} \begin{bmatrix} i_{o\delta} \\ v_{i\delta} \end{bmatrix} \simeq 0 \quad (3.40)$$

Con lo cual, la ecuación (3.38) puede ser escrita de la forma siguiente:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L\delta} \\ \dot{v}_{C\delta} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{D'} \begin{bmatrix} i_{L\delta} \\ v_{C\delta} \end{bmatrix} + \mathbf{A}_{\delta'} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{D'} \begin{bmatrix} i_{o\delta} \\ v_{i\delta} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{\delta'} \begin{bmatrix} I_o \\ V_i \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Reagrupando las matrices incrementales y sacando factor común d'_{δ} se tiene que:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L\delta} \\ \dot{v}_{C\delta} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{D'} \begin{bmatrix} i_{L\delta} \\ v_{C\delta} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{D'} \begin{bmatrix} i_{o\delta} \\ v_{i\delta} \end{bmatrix} + \left[\frac{\mathbf{A}_{\delta'}}{d'_{\delta}} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \frac{\mathbf{B}_{\delta'}}{d'_{\delta}} \begin{bmatrix} I_o \\ V_i \end{bmatrix} \right] d'_{\delta} \quad (3.42)$$

Para simplificar las expresiones matemáticas, se denominará $\mathbf{B}_{2\delta}$ al último sumando entre corchetes de la ecuación (3.42); esto es,

$$\mathbf{B}_{2\delta} = \frac{\mathbf{A}_{\delta'}}{d'_{\delta}} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \frac{\mathbf{B}_{\delta'}}{d'_{\delta}} \begin{bmatrix} I_o \\ V_i \end{bmatrix}$$

Como se ha visto, las ecuaciones (3.24) y (3.26) relacionan las tensiones y las corrientes a la entrada y salida del convertidor con el ciclo de servicio. Si se considera el convertidor como un sistema aislado, para conocer en base a estas dos ecuaciones el punto de trabajo es necesario fijar tres de las cinco variables, de modo que puedan ser calculadas las otras dos. En el modelo de estado (3.34) se consideran como variables de entrada la tensión a la entrada v_i y la corriente a la salida i_o del convertidor. A estas dos variables de entrada se ha de añadir el elemento de gobierno del convertidor, esto es, su ciclo de trabajo. Por conveniencia, en vez de utilizar el ciclo de trabajo tal cual, se utilizará su complemento $d' = (1 - d)$. En consecuencia, el modelo linealizado del convertidor Boost alrededor de un punto de operación genérico, se puede definir de la forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L\delta} \\ \dot{v}_{C\delta} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{D'} \begin{bmatrix} i_{L\delta} \\ v_{C\delta} \end{bmatrix} + [\mathbf{B}_{D'} | \mathbf{B}_{2\delta}'] \begin{bmatrix} i_{o\delta} \\ v_{i\delta} \\ d'_{\delta} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Donde las matrices $\mathbf{A}_{D'}$, $\mathbf{B}_{D'}$ y $\mathbf{B}_{2\delta}'$ están dadas por:

$$\mathbf{A}_{D'} = \begin{bmatrix} \frac{r_C d'_{\delta}}{L} & \frac{-d'_{\delta}}{L} \\ \frac{d'_{\delta}}{C} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$\mathbf{B}_{D'} = \begin{bmatrix} \frac{r_C D'}{L} & \frac{1}{L} \\ \frac{-1}{C} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_{2\delta}' = \begin{bmatrix} \frac{r_C (I_o - I_L) - V_C}{L} \\ \frac{I_L}{C} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Nótese que para el convertidor Boost, el cálculo de las matrices jacobianas del modelo linealizado se ha realizado suponiendo variaciones incrementales en las variables de estado y en las variables de entrada alrededor de un punto de operación. En cambio, para la pila de combustible, el cálculo de las matrices jacobianas se hizo a partir de las derivadas parciales de las funciones $f(x(t), u(t))$ y $g(x(t), u(t))$, que describían el modelo no lineal de la misma. No se trata de que existan distintas definiciones de las matrices jacobianas, sino que existen diferentes métodos para calcularlas, obteniendo en cualquier caso, el mismo resultado.

Para que en lo sucesivo sea más fácil de identificar las matrices jacobianas del sistema convertidor DC/DC Boost, se va a realizar un cambio en la nomenclatura de estas matrices, de forma que en adelante las matrices $\mathbf{A}_{D'}$ y $[\mathbf{B}_{D'} \mid \mathbf{B}_{2\delta}]$ se denominarán $\mathbf{A}_{BC\delta}$ y $\mathbf{B}_{BC\delta}$ respectivamente.

Si se elige como variable de salida del sistema una de las variables de estado, por ejemplo la corriente que pasa por la bobina $i_{L\delta}$, las matrices asociadas a esta variable de salida serían: $\mathbf{C}_{BC\delta} = [1 \ 0]$ y $\mathbf{D}_{BC\delta} = [0 \ 0 \ 0]$. En consecuencia, la ecuación que relaciona la corriente incremental que pasa por la bobina con las variables de entrada en base a las funciones de transferencia asociadas al modelo linealizado del convertidor Boost, se puede calcular a partir de la expresión (3.46):

$$i_{L\delta}(s) = [\mathbf{C}_{T\delta} [s\mathbf{I} - \mathbf{A}_{T\delta}]^{-1} \mathbf{B}_{T\delta}] \begin{bmatrix} i_{o\delta} \\ v_{i\delta} \\ d'_{\delta} \end{bmatrix} = G_{io\delta}(s) i_{o\delta}(s) + G_{vi\delta}(s) v_{i\delta}(s) + G_{d'\delta}(s) d'_{o\delta}(s) \quad (3.46)$$

3.3 Sistema completo: Pila de combustible - Convertidor DC/DC

En esta sección, una vez que se ha obtenido el modelo linealizado de la pila de combustible y del convertidor Boost, se van a conectar ambos modelos para obtener el modelo linealizado del sistema completo (Figura 3.12).

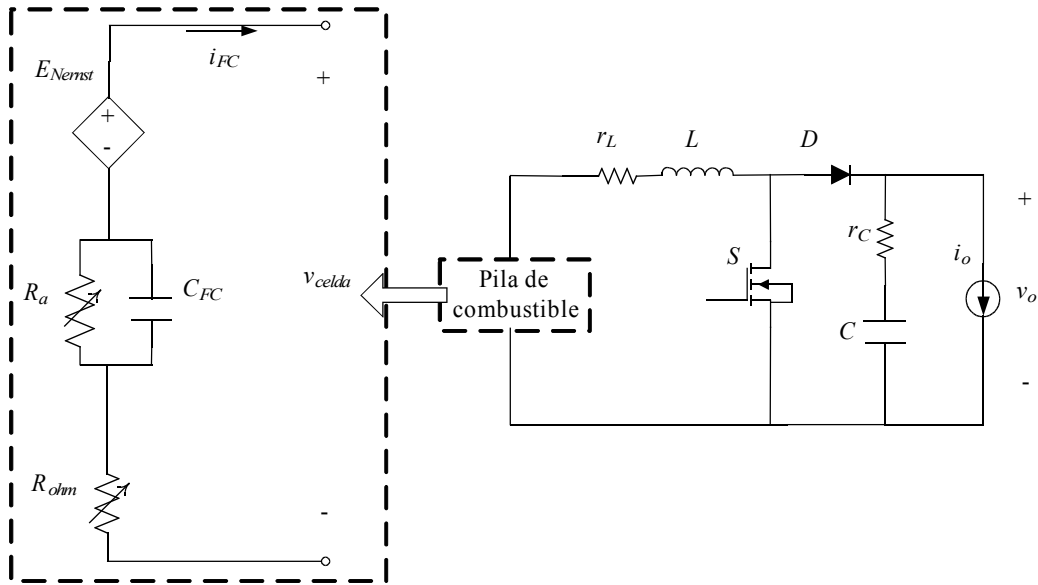


Figura 3.12: Esquema de conexión del sistema: Pila de combustible-convertidor Boost.

3.3.1 Modelo linealizado del sistema completo

Para la pila de combustible, el modelo linealizado alrededor de un punto de operación venía dado por la ecuación (3.20):

$$\begin{aligned} \dot{v}_{FC\delta} &= \mathbf{A}_{FC\delta} v_{FC\delta} + \mathbf{B}_{FC\delta} i_{FC\delta} \\ v_{FC\delta} &= \mathbf{C}_{FC\delta} v_{FC\delta} + \mathbf{D}_{FC\delta} i_{FC\delta} \end{aligned}$$

Para el convertidor Boost, el modelo linealizado alrededor de un punto de operación genérico fue recogido en la ecuación (3.43):

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L\delta} \\ \dot{v}_{C\delta} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{BC\delta} \begin{bmatrix} i_{L\delta} \\ v_{C\delta} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{BC\delta} \begin{bmatrix} i_{o\delta} \\ v_{i\delta} \\ d'_{\delta} \end{bmatrix}$$

Para obtener el modelo linealizado alrededor de un punto de operación genérico del sistema completo, se combinan las ecuaciones (3.20) y (3.43) y se tiene en cuenta que la tensión entre los extremos de la pila de combustible $v_{FC\delta}$, coincide con la tensión a la entrada del convertidor $v_{i\delta}$; de esta forma se obtiene la ecuación (3.47). Esta expresión representa el modelo

linealizado del sistema pila de combustible-convertidor Boost. El vector de estado está formado por la corriente incremental por la bobina $i_{L\delta}$ (que se corresponde con la corriente que suministra la pila de combustible $i_{FC\delta}$), la tensión incremental en el condensador del convertidor $v_{C\delta}$ y la tensión incremental del condensador del modelo eléctrico dinámico de la pila de combustible $v_{CFC\delta}$. El vector de entrada está formado por la variación incremental de la corriente a la salida del convertidor $i_{o\delta}$ y la variación incremental del complemento del ciclo de servicio del convertidor $d'\delta$.

En la expresión (3.47) se pueden identificar las matrices jacobianas de estado y de entrada del modelo del sistema completo (pila de combustible-convertidor Boost), las cuales serán denominadas $\mathbf{A}_{T\delta}$ y $\mathbf{B}_{T\delta}$, respectivamente.

$$\begin{bmatrix} \dot{} \\ \dot{i}_{L\delta} \\ \dot{v}_{C\delta} \\ \dot{v}_{CFC\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{FC\delta} - (r_L + r_C D') & -D' & \mathbf{C}_{FC\delta} \\ L & L & L \\ \frac{D'}{C} & 0 & 0 \\ \mathbf{B}_{FC\delta} & 0 & \mathbf{A}_{FC\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L\delta} \\ v_{C\delta} \\ v_{CFC\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{r_C D'}{L} & \frac{r_C (I_o - I_L) - V_C}{L} \\ \frac{-1}{C} & \frac{I_L}{C} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{o\delta} \\ d'\delta \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Como variable de salida se puede elegir alguna de las variables de estado. Si se elige como variable de salida la corriente que pasa por la bobina; se puede realizar una gestión del reparto de potencia controlando la potencia que entrega la pila en cada momento. Definiendo la corriente de salida del convertidor en base a la demanda de la carga, se puede actuar sobre el ciclo de servicio del convertidor para decidir la corriente que debe entregar la fuente, que en este caso es la corriente que suministra la pila de combustible. De esta forma, las matrices jacobianas para esta variable de salida, que coincide con una variable de estado, resultan entonces de la forma: $\mathbf{C}_{T\delta} = [1 \ 0 \ 0]$ y $\mathbf{D}_{T\delta} = [0 \ 0]$.

Esto permite escribir la expresión que refleja la ecuación de estado del sistema completo y la ecuación de salida del modelo de estado de la forma (3.48).

$$\begin{bmatrix} \dot{} \\ i_{L\delta} \\ \dot{} \\ v_{C\delta} \\ \dot{} \\ v_{CFC\delta} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{T\delta} \begin{bmatrix} i_{L\delta} \\ v_{C\delta} \\ v_{CFC\delta} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{T\delta} \begin{bmatrix} i_{o\delta} \\ d'_{\delta} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

$$i_{L\delta} = \mathbf{C}_{T\delta} \begin{bmatrix} i_{L\delta} \\ v_{C\delta} \\ v_{CFC\delta} \end{bmatrix} + \mathbf{D}_{T\delta} \begin{bmatrix} i_{o\delta} \\ d'_{\delta} \end{bmatrix}$$

A partir de la ecuación (3.48), es posible conocer la función de transferencia del sistema pila de combustible-convertidor Boost que relaciona la corriente que suministra la pila de combustible con el ciclo de servicio, (3.49):

$$G_{T\delta}(s) = \frac{i_{L\delta}(s)}{d'_{\delta}(s)} = \mathbf{C}_{T\delta} [s\mathbf{I} - \mathbf{A}_{T\delta}]^{-1} \mathbf{B}_{T\delta} + \mathbf{D}_{T\delta} \quad (3.49)$$

El cálculo de la matriz inversa da como resultado:

$$\frac{1}{|P|} \begin{bmatrix} s(s - \mathbf{A}_{FC\delta}) & \frac{-D'(s - \mathbf{A}_{FC\delta})}{L} & \frac{Cs}{L} \\ \frac{D'(s - \mathbf{A}_{FC\delta})}{C} & \frac{(Ls - \mathbf{D}_{FC\delta} - r_L - r_c D')(s - \mathbf{A}_{FC\delta}) - \mathbf{B}_{FC\delta} \mathbf{C}_{FC\delta}}{L} & \frac{\mathbf{C}_{FC\delta} D'}{LC} \\ \mathbf{B}_{FC\delta} s & \frac{-\mathbf{B}_{FC\delta} D'}{L} & s^2 - \frac{(\mathbf{D}_{FC\delta} - r_L - r_c D')s}{L} + \frac{D'^2}{LC} \end{bmatrix} [s\mathbf{I} - \mathbf{A}_{T\delta}]^{-1} = \quad (3.50)$$

Donde $|P|$ es el determinante de la matriz $[s\mathbf{I} - \mathbf{A}_{T\delta}]$ dado por:

$$|P| = s^3 - \left(\mathbf{A}_{FC\delta} + \frac{\mathbf{D}_{FC\delta} - r_L - r_c D'}{L} \right) s^2 + \left(\mathbf{A}_{FC\delta} \frac{\mathbf{D}_{FC\delta} - r_L - r_c D'}{L} + \frac{D'^2}{LC} - \frac{\mathbf{B}_{FC\delta} \mathbf{C}_{FC\delta}}{L} \right) s - \frac{\mathbf{A}_{FC\delta} D'^2}{LC} \quad (3.51)$$

En consecuencia, el cálculo de la función de transferencia obtenida a partir del modelo linealizado del sistema pila de combustible-convertidor Boost, que relaciona las variaciones

incrementales en la corriente a la salida de la pila de combustible con las correspondientes en el complemento del ciclo de servicio del convertidor, da como resultado la ecuación siguiente:

$$G_{T\delta}(s) = \frac{\frac{1}{L}(r_c(I_o - I_L) - V_c) \left(s - \frac{D' I_L}{C(r_c(I_o - I_L) - V_c)} \right) (s - \mathbf{A}_{FC\delta})}{s^3 - \left(\mathbf{A}_{FC\delta} + \frac{\mathbf{D}_{FC\delta} - r_L - r_c D'}{L} \right) s^2 + \left(\mathbf{A}_{FC\delta} \frac{\mathbf{D}_{FC\delta} - r_L - r_c D'}{L} + \frac{D'^2}{LC} - \frac{\mathbf{B}_{FC\delta} \mathbf{C}_{FC\delta}}{L} \right) s - \frac{\mathbf{A}_{FC\delta} D'^2}{LC}} \quad (3.52)$$

La función de transferencia del sistema pila de combustible-convertidor Boost queda parametrizada en base a los valores que alcanzan las variables de estado y entrada en el punto de operación que se haya definido, junto con los parámetros que describen el modelo de la pila de combustible (sección 3.1).

A continuación, se va a demostrar que la función de transferencia en el origen coincide con la pendiente de la curva que relaciona la corriente que pasa por la bobina I_L , la corriente que consume la carga I_o , y el complemento del ciclo de servicio del convertidor D' , en el punto de operación, (3.53).

$$G_{T\delta}(0) = \frac{-D' I_L}{D'^2} = \frac{-I_o}{D'^2} \quad (3.53)$$

Por otro lado, de la ecuación (3.26) se obtiene que la derivada de I_L con respecto a D' es (3.54), que coincide con la expresión (3.53):

$$\frac{d(I_L)}{d(D')} = \frac{-I_o}{D'^2} = G_{T\delta}(0) \quad (3.54)$$

Otra forma de obtener la función de transferencia del sistema completo es a partir de las funciones de transferencia de los dos sistemas que lo integran: pila de combustible y convertidor Boost. De la ecuación (3.21) y (3.46) se tiene, respectivamente:

$$\begin{aligned} v_{FC\delta}(s) &= G_{FC\delta}(s) i_{FC\delta}(s) = v_{i\delta}(s) \\ i_{L\delta}(s) &= G_{io\delta}(s) i_{o\delta}(s) + G_{vi\delta}(s) v_{i\delta}(s) + G_{d'\delta}(s) d'_{o\delta}(s) \end{aligned}$$

En consecuencia, es posible calcular la expresión que relaciona la variable de salida con las variables de entrada en base a las funciones de transferencia, a partir de la expresión siguiente:

$$i_{L\delta}(s) = \frac{G_{io\delta}(s)}{1 - G_{vi\delta} G_{FC\delta}} i_{o\delta}(s) + \frac{G_{d'\delta}(s)}{1 - G_{vi\delta} G_{FC\delta}} d'_{o\delta}(s) \quad (3.55)$$

3.3.2 Simulaciones

Esta sección de simulaciones tiene por objeto comprobar el correcto funcionamiento de los modelos teóricos desarrollados para el conjunto pila de combustible + convertidor Boost. Así una vez que se ha obtenido el modelo linealizado del sistema completo, se va a elegir un punto de operación y se va a suponer que existen pequeñas variaciones alrededor de éste. Se van a analizar y comparar los resultados obtenidos a partir del modelo de estado no lineal y modelo linealizado.

Para la pila de combustible se van a fijar las siguientes condiciones de funcionamiento: temperatura de operación 65 °C (es la temperatura de funcionamiento en el punto de máxima potencia de la pila Nexa de Ballard según los datos del fabricante), presión de suministro de hidrógeno 3 atmósferas (el rango válido permitido es de 0,5 atmósferas a 15 atmósferas). Se considera que la pila de combustible trabaja en el punto de máxima potencia, que, de acuerdo al modelo teórico parametrizado desarrollado en la sección 3.1 (Figura 3.6), la pila puede llegar a suministrar una potencia máxima de 1199 W. Esta potencia se corresponde con un punto de operación equivalente a una corriente $I_{FC} = 45,88$ A y tensión $V_{FC} = 26,14$ V. Estos son pues los valores que se van a considerar para el punto de operación de la pila de combustible durante las simulaciones.

Considerando que la tensión a la salida del convertidor Boost se fija a 48 V, y que la pila de combustible va a trabajar en el punto de máxima potencia, el consumo en corriente de la carga va a ser de 25 A. Considerando un convertidor ideal³⁷, ecuación (3.26), el ciclo de servicio del mismo ha a ser $D = 0,45$.

Para el dimensionado del convertidor Boost, se considera una frecuencia de conmutación de 30kHz. Se elige esta frecuencia para que las pérdidas por conmutación en el transistor no sean significativas, y para conseguir rizados en la corriente y en la tensión pequeños con valores prácticos de inductancia y capacidad. Si se elige una frecuencia de conmutación demasiado alta (superiores a 50 kHz), las pérdidas por conmutación son demasiado elevadas y el transistor se

³⁷ En el Capítulo 4, sección 4.3, se verá que cuando el convertidor trabaja a potencia nominal su rendimiento es superior al 90%.

aleja de su comportamiento ideal. Por otra parte, si se eligen frecuencias de conmutación bajas, pero fuera del rango audible (del orden de 25 kHz), serían necesarios valores de inductancia y de capacidad demasiado elevados (del orden de una milésima de henrio y faradio respectivamente), con el inconveniente de que 1) la implementación práctica se ve dificultada, y 2) las pérdidas aumentan.

Con respecto al rizado de corriente y tensión, se exige un rizado del orden del 7 % en la corriente que pasa por la bobina y de aproximadamente el 2 % en la tensión del condensador³⁸. Las ecuaciones que permiten calcular los valores de inductancia y capacidad a partir del punto de funcionamiento elegido y el rizado exigido son respectivamente (3.56) y (3.57):

$$L = \frac{V_i D}{\Delta i_L f} \quad (3.56)$$

$$C = \frac{I_o D}{\Delta V_C f} \quad (3.57)$$

El valor de inductancia que resulta es $L = 126,48 \mu\text{H}$. Para conocer las pérdidas resistivas de la bobina se consultan los datos de diferentes fabricantes, de donde se obtiene que un valor típico de la resistencia para bobinas de este valor es $r_L = 0,065 \Omega$. Para el condensador, se obtiene que debe tener el valor $C = 657,89 \mu\text{F}$. De la misma forma que se ha hecho para conocer el valor de la resistencia de la bobina, se obtiene que la resistencia interna del condensador es $r_C = 0,036\Omega$.

Las simulaciones que se van a realizar son las siguientes. La primera simulación ha de permitir comprobar que efectivamente el sistema pila de combustible-convertidor Boost trabaja en el punto de operación tal que la pila de combustible esté funcionando sobre el punto de máxima potencia. La segunda simulación consiste en provocar una variación incremental en la variable de entrada del sistema (ciclo de servicio del convertidor) y comparar el comportamiento del sistema según el modelo no lineal y el modelo linealizado de pequeña señal desarrollados.

A) Comprobación del punto de funcionamiento del sistema

³⁸ El rizado de la tensión en el condensador es más restrictivo para asegurar que la tensión a la salida del convertidor sea prácticamente constante. De esta forma, a la hora de conectar otros dispositivos a la salida del convertidor, se garantiza un bus de continua con una tensión prácticamente constante.

En este caso, se va a realizar una simulación con el modelo no lineal del sistema formado por el modelo de estado de la pila de combustible y del convertidor Boost. La Figura 3.13 muestra el esquema conceptual del sistema completo mediante la conexión de los dos modelos. Para comparar los resultados obtenidos en valores medios e instantáneos, se hace variar el valor del ciclo de servicio en el rango $[0, 1]$ para valores medios, y entre sólo los valores 0 ó 1 a la frecuencia de conmutación, para valores instantáneos. En la Figura 3.14 se muestran los valores medios (modelo promedio) e instantáneos (modelo de valores instantáneos) de la corriente que pasa por la bobina y de la tensión en el condensador del convertidor.

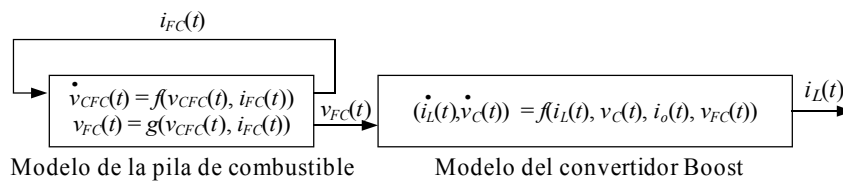


Figura 3.13: Esquema de conexión del modelo de estado del sistema pila-convertidor.

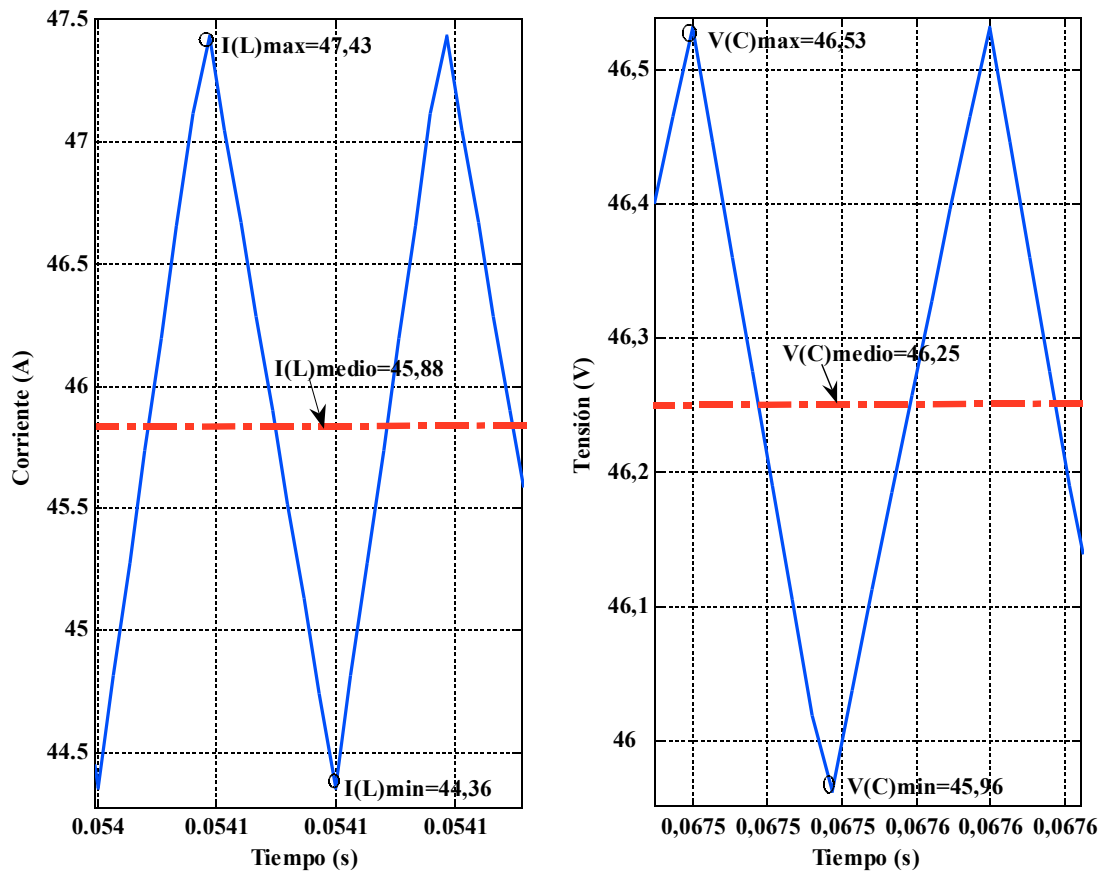


Figura 3.14: Valores medio e instantáneo de la corriente en la bobina y la tensión en el condensador.

El valor medio de la corriente es $I_L = 45,88$ A, que coincide con el valor de la corriente de la pila de combustible (según el modelo eléctrico parametrizado desarrollado) en el punto de funcionamiento considerado. El rizado es de $\Delta I_L = I_{Lm\acute{a}x} - I_{Lm\acute{i}n} = 47,43$ A $-$ $44,36$ A = $3,07$ A. Este rizado corresponde con la exigencia del 7 % de rizado que se había considerando en el diseño del convertidor. El valor medio de la tensión en el condensador es $V_C = 46,25$ V y el rizado $\Delta V_C = V_{Cm\acute{a}x} - V_{Cm\acute{i}n} = 46,53$ V $-$ $45,96$ V = $0,57$ V. El rizado en la tensión de salida del convertidor es pues inferior al exigido del 2 %.

B) Comportamiento del sistema frente a una variación incremental en la entrada

A continuación se va a considerar una pequeña variación en el ciclo de servicio del convertidor. En el punto de operación de máxima potencia de la pila de combustible, se conoce que la corriente que consume la carga es $I_o = 25$ A, la tensión a la salida del convertidor está fijada a $V_o = 48$ V, la corriente que pasa por la bobina (corriente que suministra la pila de combustible) es $I_L = 45,88$ A, la tensión en los extremos de la pila de combustible es $V_{FC} = 26,14$ V y, en consecuencia, el ciclo de servicio promedio (ver sección 3.2.3) es $D = 0,45$. Se va a considerar una variación incremental en el ciclo de servicio tal que $d_\delta = -0,01$. Esto equivale al mismo valor de variación (en valor absoluto) en la variable de entrada del modelo de estado del sistema, expresión (3.48), correspondiente al complemento del ciclo de servicio, $d'_\delta = +0,01$. Esta variación en la entrada, considerando que no existen cambios en el consumo de la carga ($i_{o\delta} = 0$ A), provoca un cambio en el punto de funcionamiento de la pila de combustible. En la Figura 3.15 se realiza una conexión de los modelos no lineal y linealizado del sistema pila de combustible-convertidor Boost con objeto de analizar y comparar su comportamiento respecto de la variación en el ciclo de servicio del convertidor.

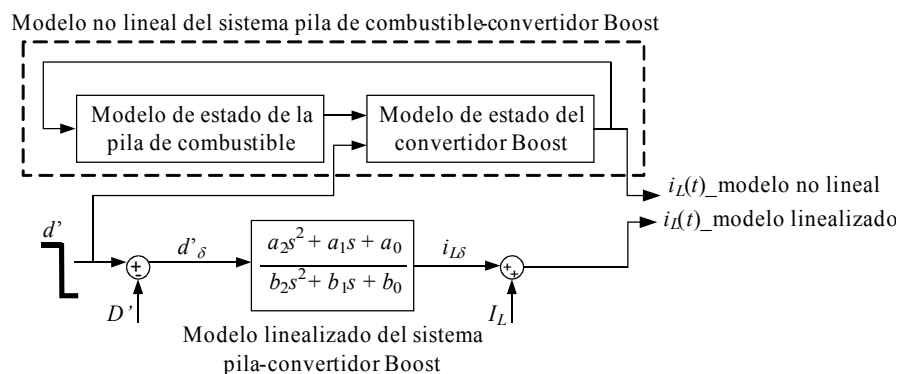


Figura 3.15: Esquema para comparación de modelo lineal y no lineal del sistema pila de combustible-convertidor Boost.

Para conocer el punto de operación que alcanza la pila de combustible después de la variación incremental en la entrada del sistema, se utiliza el nuevo valor que toma el ciclo de servicio, como consecuencia de aplicarle la variación incremental, resultando así $d = D + d_s = 0,44$. Por otra parte, se ha comentado anteriormente que no se van a considerar variaciones incrementales en la corriente a la salida del convertidor, luego a partir de la ecuación (3.26) y teniendo en cuenta que $I_o = 25$ A, se conoce que el valor de la corriente por la bobina del convertidor cuando se alcanza el régimen estacionario es $I_L = 44,88$ A . Llevando este valor sobre la curva de polarización de la pila de combustible (Figura 3.3) se obtiene que $v_{FC} = V_{FC} + v_{FC\delta} = 26,68$ V. La Figura 3.16 muestra la evolución temporal de la corriente que pasa por la bobina i_L , que se obtiene a partir del modelo no lineal del sistema completo y a partir del modelo linealizado, como consecuencia de la variación incremental en la entrada d' . En dicha figura, se observa que en el punto de operación inicial, el de máxima potencia, la corriente que entrega la pila de combustible es, en efecto, $I_L = 44,88$ A.

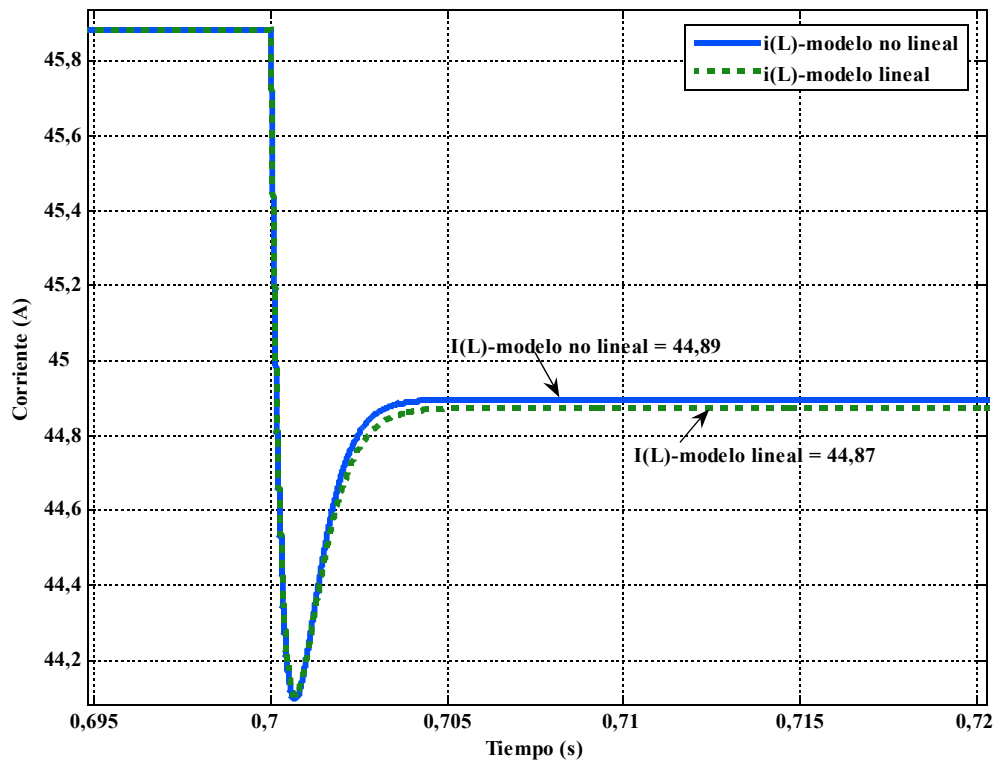


Figura 3.16: Evolución temporal de la corriente en la bobina según el modelo promedio y lineal para una perturbación positiva en la entrada.

Nótese cómo al producirse la variación incremental en la entrada $d'_s = 0,01$, la corriente i_L , después de un corto transitorio, alcanza, tanto con el modelo no lineal como con el linealizado para este punto de trabajo, valores prácticamente iguales al teórico esperado de 44,88A. Se puede afirmar pues que tanto el modelo no lineal como y el modelo linealizado, permiten describir, en el entorno de un punto de funcionamiento, el comportamiento del sistema completo cuando ocurre una pequeña variación en la entrada.

Una vez que se ha comprobado la concordancia de los resultados en los modelos no lineal promedio y linealizado, se procede de igual forma para comparar los resultados del modelo no lineal promedio y no lineal de valores instantáneos del sistema. Para esto, el ciclo de servicio del convertidor conmuta al valor 0 ó al 1 a la frecuencia de conmutación. La Figura 3.17 muestra la evolución de la corriente por la bobina obtenida a partir del modelo promedio y del modelo de valores instantáneos del sistema.

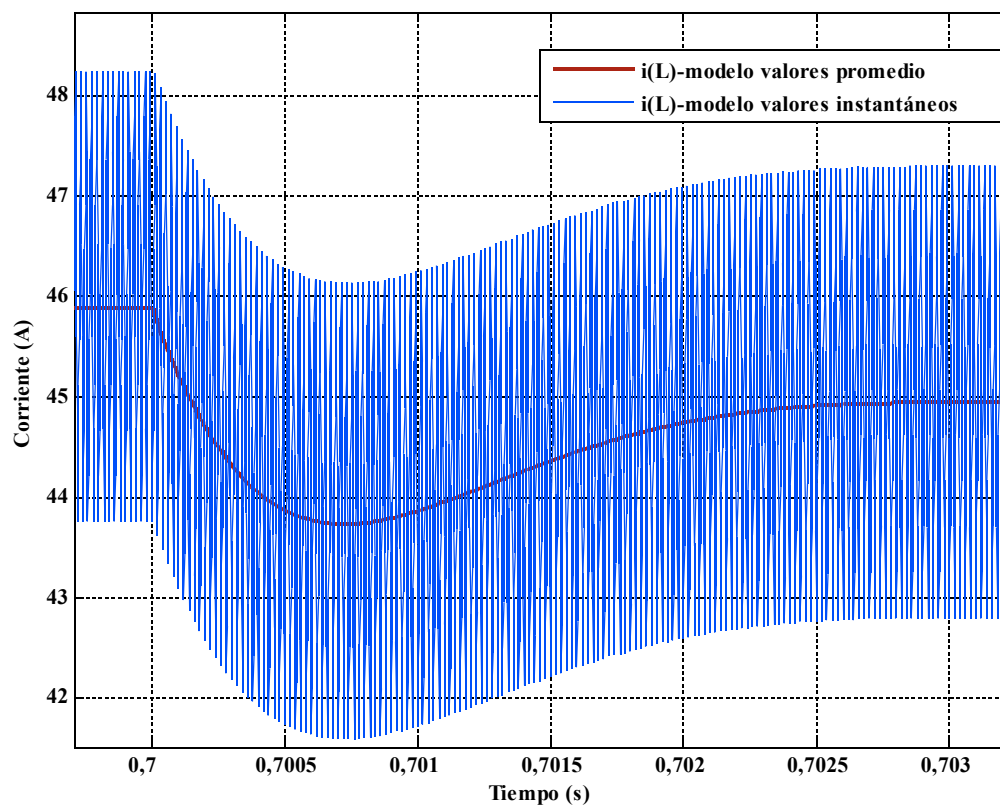


Figura 3.17: Evolución temporal de la corriente en la bobina según el modelo de valores promedio y el modelo de valores instantáneos para una variación incremental positiva en la entrada ($d'_s = 0,01$).

Se observa que efectivamente, el valor medio de la corriente según el modelo de valores instantáneos coincide con el valor de la corriente según el modelo de valores medios. Se comprueba pues que el modelo de valores instantáneos también describe el comportamiento del sistema cuando existen variaciones incrementales en la entrada.

En la Figura 3.18 se muestra la evolución temporal de la tensión en los extremos de la pila de combustible, que coincide con la variable de salida del modelo no lineal del sistema pila de combustible v_{FC} , ver ecuación (3.20) y Figura 3.13, como consecuencia de la variación incremental $d'\delta = 0,01$ en la entrada. Esta respuesta se obtiene a partir del modelo promedio del sistema.

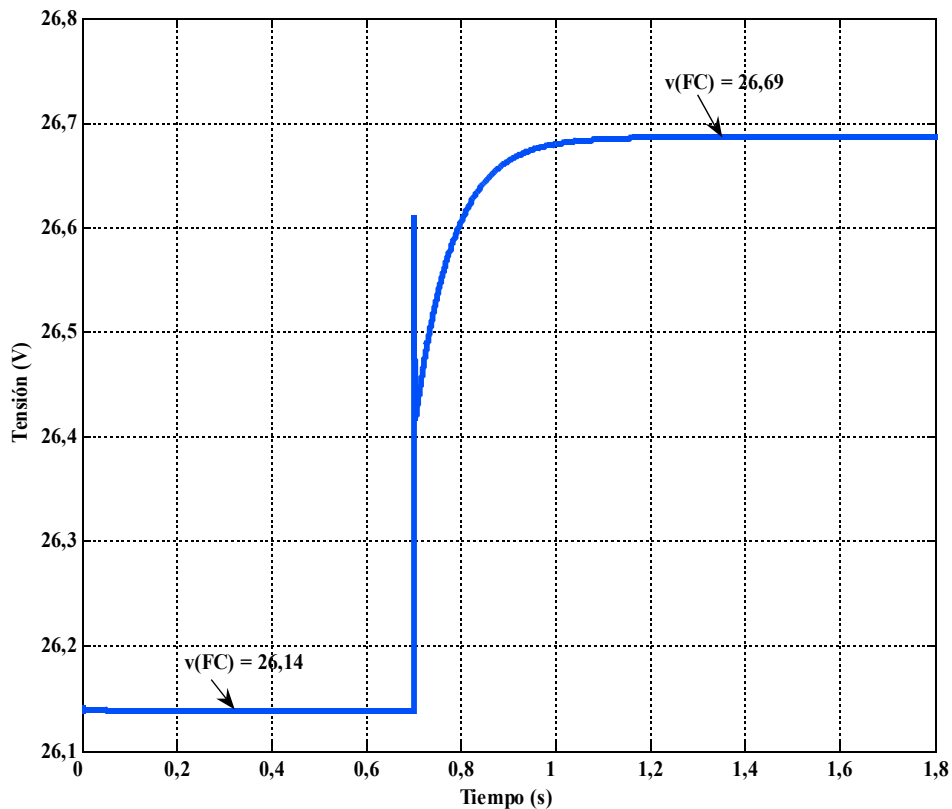


Figura 3.18: Respuesta de la tensión en los extremos de la pila de combustible a una variación incremental positiva en la entrada ($d'\delta = 0,01$).

En el punto de operación inicial, punto de máxima potencia, la tensión de la pila de combustible es, como se sabe, $V_{FC} = 26,14$ V. A partir de este valor (véase la Figura 3.18) se

provoca la variación incremental en la entrada $d'\delta = 0,01$. Esto origina que la tensión V_{FC} , después de un transitorio de aproximadamente 0,5 segundos (recuérdese el retardo de primer orden contemplado en el modelo no lineal), alcance un valor prácticamente igual al teórico esperado de 26,68 V.

En función del análisis realizado, se comprueba pues que el modelo promedio describe el comportamiento del sistema completo cuando ocurre una variación incremental en la entrada, incluyendo la dinámica del sistema más lento, es decir, el sistema de pila de combustible.

3.4 Conclusiones y comentarios bibliográficos

Este capítulo ha tenido como objetivo fundamental el desarrollo de un modelo apto para control de la planta integrada por el sistema pila de combustible-convertidor DC/DC. Para ello se ha seguido un desarrollo por pasos que ha permitido afrontar los sistemas de pila de combustible y convertidor DC/DC por separado, para luego integrarlos bajo el concepto de la ingeniería de control de planta a controlar. La evolución histórica de los modelos de pilas de combustible parte de una idea original de pila de combustible como un sistema estático, gobernado por la relación que mantiene la tensión y corriente que es capaz de generar e independiente del punto de operación en el que está trabajando. Los trabajos científicos en este sentido comenzaron a publicarse hace más de una década [97], [98]. Sin embargo, cuando se ha procedido a realizar pruebas experimentales con pilas de combustible reales, se han notado las carencias de estos modelos, ya que no reflejaban el comportamiento real de la pila de combustible. En concreto, los cambios en la tensión disponible entre los extremos de la pila de combustible no se correspondían con los previstos en estos modelos teóricos.

Prácticamente de forma coetánea a las referencias bibliográficas citadas más arriba, la comunidad científica empezó a plantearse el desarrollo de modelos dinámicos de pilas de combustible, basados principalmente en ecuaciones empíricas y/o reacciones electroquímicas dentro de cada celda de la pila, [99], [100]. El inconveniente de estos modelos dinámicos semiempíricos, donde se relacionan variables puramente fisico-químicas, era que, aunque resultaban muy útiles desde el punto de vista de la electroquímica, carecían de gran interés desde el punto de la ingeniería eléctrica, electrónica y de control. En este sentido, disponer de un modelo eléctrico o matemático en base al que se pudiese conocer la tensión y la corriente que

es capaz de suministrar la propia pila en todo su rango de trabajo permitía optimizar el funcionamiento de la pila de combustible, así como los desarrollos experimentales que con ella se hagan en lo referente a las etapas de acondicionamiento de potencia.

Con este propósito y con idea de conseguir un mejor aprovechamiento energético de la pila de combustible, en los últimos años, el objetivo de las investigaciones ha estado centrado en el modelado dinámico de pilas de combustible desde el punto de vista de sus terminales eléctricos [101], [102]. Ya sea en aplicaciones aisladas o de conexión a red, el sistema de control debe decidir qué cantidad de potencia debe suministrar la pila en cada momento. Para ello, era necesario conocer de antemano el comportamiento de la pila de combustible frente a cambios en la demanda de potencia en estas situaciones comunes. De esta forma, es posible desarrollar distintas técnicas de control para la operación idónea de la pila.

La búsqueda de un modelo que describa el comportamiento eléctrico de una pila de combustible ha quedado justificado porque estos sistemas pueden trabajar en diferentes puntos de funcionamiento que se corresponden con puntos de máxima eficiencia o puntos de máxima potencia, como se comenta en [106]. En definitiva, con un modelo eléctrico preciso de una pila de combustible es posible mejorar el aprovechamiento energético de la pila de combustible. Para el caso concreto de determinados tipos de pilas de combustible (SOFC o PEM) se pueden consultar las referencias [103]-[105].

Se ha realizado un ajuste paramétrico de forma que el modelo dinámico eléctrico del que se parte pueda ser utilizado para describir el comportamiento experimental de una determinada pila de combustible de tipo PEM, el módulo Nexa de Ballard. Para ello se ha empleado el modelo eléctrico y el procedimiento para el ajuste de los parámetros de dicho modelo que se recoge en [104] y [105]. El ajuste de los parámetros se ha realizado para el módulo Nexa porque es el sistema real con el que se van a realizar las pruebas de laboratorio (Capítulos 4 y 5). No obstante, el modelo eléctrico ha quedado expresado en base a los parámetros asociados a cada una de las diferencias de tensión que contribuyen a la caída de tensión total entre los extremos de la pila de combustible. Es decir, el modelo desarrollado puede ser considerado genérico y válido, por tanto, para describir el comportamiento real de cualquier pila de combustible de tipo PEM, que se ha particularizado en este caso para el módulo Nexa. De esta forma se consiguió generalizar un modelo eléctrico que puede ser utilizado para otro tipo de pila

de combustible. Para ello, basta con volver a realizar, simplemente, un ajuste de los parámetros de acuerdo al procedimiento descrito.

A partir del modelo eléctrico dinámico, las referencias [107]-[109] pueden ser consultadas para analizar los primeros trabajos, todos muy recientes, sobre modelos de estado de pilas de combustible. En estos trabajos se han desarrollado modelos en el espacio de estado para diferentes tipos de pilas de combustible (SOFC y DMFC). Para el caso concreto de una pila de combustible de tipo PEM, no se pueden utilizar estos modelos directamente porque las ecuaciones electroquímicas varían de un tipo de pila a otro. Sobre este tema se puede profundizar en [110] y [111]. La referencia [112] ofrece una extensa fundamentación matemática útil para desarrollar el modelo de estado y el modelo de pequeña señal de una planta genérica. A modo de comprobación de que los modelos de estado y de pequeña señal desarrollados eran correctos, se particularizó para el caso del módulo Nexa. Se ha comprobado que en efecto, una vez elegido un punto de operación de la pila, el valor de la función de transferencia en el origen (obtenida a partir del modelo de pequeña señal) se corresponde con el valor de la pendiente de la curva de polarización en el punto de operación elegido. También se realizó una simulación para comprobar que, cuando se produce una variación incremental en la entrada, la respuesta del sistema pila de combustible obtenida a partir del modelo en el espacio de estado se corresponde con la respuesta obtenida a partir del modelo linealizado.

La primera sección del capítulo ha desarrollado un modelo en el espacio de estado que describe el comportamiento eléctrico real de una pila de combustible de tipo PEM, y a partir de él, el modelo linealizado que describe el comportamiento del sistema frente a pequeñas variaciones en la entrada alrededor de un punto de funcionamiento genérico.

La segunda sección del capítulo, siguiendo con un procedimiento similar a la primera, ha desarrollado el modelo en el espacio de estado para el sistema de acondicionamiento de potencia que acompaña al sistema pila de combustible. La sección comenzó justificando la necesidad de una etapa de regulación de potencia a la salida de la pila de combustible. A partir del caso considerado de trabajar conectado a un bus de 48 V, y de las características eléctricas del tipo de pila de combustible real con la que se ha trabajado (módulo Nexa de Ballard), era necesario que el sistema de acondicionamiento fuese una etapa elevadora. De las diferentes topologías de convertidores, por su simple estructura y reducido número de componentes, se eligió el convertidor Boost. La referencia [113] realiza un didáctico análisis de éste y otros tipos

de convertidores que permite establecer los criterios relativos al dimensionado de los componentes del convertidor.

Los modelos de estado y de pequeña señal del convertidor Boost se han obtenido considerando como una de las variables de entrada la corriente que entrega el convertidor. De esta forma y como ya se apunta en [114], el modelo desarrollado se puede extender a diferentes tipos de cargas (carga resistiva, motor, bus de continua o etapa de potencia: convertidor o inversor), no quedando limitado a un tipo concreto.

Las referencias [115] y [116] hacen un estudio muy interesante de los modelos de estado bajo el concepto de variables promedio la primera, y de valores instantáneos la segunda. Esto ha sido utilizado en el capítulo del modo siguiente: si el ciclo de servicio sólo toma los valores 0 ó 1 variando a la misma frecuencia de conmutación del convertidor, lo que se obtiene es el comportamiento del sistema en base a los valores instantáneos de las variables de estado (modelo de valores instantáneos). En cambio, si el ciclo de servicio toma cualquier valor comprendido en el rango $[0,1]$, lo que se obtiene es el comportamiento del convertidor en base a los valores medios de las variables de estado (modelo de valores promedio).

La tercera sección del capítulo ha afrontado el modelo completo de la planta formada por el sistema de pila de combustible y convertidor DC/DC. Para ello, se integraron las ecuaciones de los modelos de estado para cada sistema obtenidas en las secciones 1 y 2.

El modelo linealizado y la función de transferencia del sistema completo pueden ser obtenidos de dos formas. Una de ellas consiste en aplicar técnicas de linealización sobre el modelo de estado del sistema completo. Para la otra alternativa, basta con tener en cuenta simplemente que el sistema completo resulta de la conexión serie de los dos subsistemas. Por lo tanto, la función de transferencia del sistema completo se calcula multiplicando la función de transferencia de cada uno de los subsistemas. El interés de disponer de una función de transferencia del sistema completo, estriba en la posibilidad de diseñar sistemas de control aplicados a sistemas lineales que permiten la gestión del reparto de potencia y la elección del funcionamiento idóneo de la pila de combustible.

Las simulaciones que se han realizado al final del capítulo muestran que si se provoca una pequeña variación en la variable de entrada asociada al ciclo de servicio, la evolución temporal de la variable de salida correspondiente a la corriente que pasa por la bobina del convertidor

(corriente que suministra la pila de combustible), obtenida a partir del modelo no lineal del sistema completo, coincide con la obtenida a partir de su modelo linealizado. Es decir, ambos modelos describen el comportamiento del sistema alrededor de un punto de operación genérico.

Capítulo 4. Sistema Híbrido de Pila de Combustible: Implementación y Testeo

En este capítulo se describe la implementación física y posterior testeo de un sistema híbrido de pila de combustible diseñado y dimensionado para alimentar una carga que presenta un perfil típico de un sistema de telecomunicaciones. Ciertamente se podría haber optado por otro perfil o incluso por ninguno en concreto. Sin embargo, se ha preferido trabajar con requerimientos reales de sistemas donde las aplicaciones de los sistemas híbridos de pilas de combustible están comenzando a ser una alternativa a los sistemas de alimentación tradicionales: grupo electrógeno + baterías. Con objeto de hacer el sistema más versátil, éste se configura con dos salidas diferentes, una de alterna monofásica de 230 V y otra de continua de 12 V. De esta forma, las aplicaciones del sistema se pueden extender hasta otros sectores como Unidad de Potencia Auxiliar (APU). Para poder realizar el correcto chequeo del comportamiento del sistema y comprobar que efectivamente es capaz de abastecer el perfil de carga requerido, se diseña e implementa físicamente un banco de cargas resistivas capaz de ser controlado electrónicamente. Mediante este banco de cargas y a través de las órdenes que se envían desde un ordenador, es posible simular tanto el perfil de carga considerado como cualquier otro, aportando así mayor versatilidad al sistema. Además, esto permite seleccionar determinados puntos de funcionamiento que impliquen que el módulo de pila de combustible esté trabajando en zonas de máxima eficiencia o máxima potencia.

La organización del capítulo se hace en base a cuatro secciones principales. En la primera sección se presenta el esquema conceptual asociado al sistema híbrido de pila de combustible que se va a implementar físicamente. También se introduce el perfil de carga para el que se dimensionan cada uno de los componentes del sistema híbrido, y finaliza con una revisión bibliográfica sobre los trabajos relacionados con cargas electrónicas programables. De esta

revisión se puede conocer que las soluciones comerciales para este tipo de cargas presentan un coste elevado, y poseen un rango de potencia de funcionamiento muy reducido con respecto a los niveles de potencia que se pretenden alcanzar con el sistema desarrollado en este capítulo. Esto justifica la necesidad de diseñar y construir un banco de cargas que permita testear fácilmente el funcionamiento del sistema.

En la segunda sección se tienen en cuenta las consideraciones y restricciones para llevar a cabo el diseño del sistema completo. Se deciden los sistemas que están en funcionamiento en cada tramo del perfil de carga junto con sus potencias mínima y nominal. A continuación, se describen los dispositivos que integran el sistema completo: módulo de pila de combustible, banco de baterías, sistemas de acondicionamiento de potencia y banco de cargas. En el caso particular del convertidor DC/DC que se conecta a la salida del módulo de pila de combustible, su dimensionado se realiza atendiendo además de a los niveles de tensión y corriente que debe soportar, a las restricciones de rizado en tensión y corriente que impone el propio módulo de pila de combustible.

Los resultados experimentales que muestran el comportamiento real del sistema se recogen en la tercera sección. A partir de los resultados experimentales se demuestra el correcto funcionamiento del sistema, los cuales están acordes con los resultados que cabría esperar en función de las características técnicas del sistema de combustible y del modelado de los sistemas intervinientes que se realizó en el Capítulo 3.

La cuarta y última sección recoge las principales conclusiones del capítulo y comenta las ideas fundamentales extraídas de las referencias bibliográficas consultadas.

4.1 Introducción

El objetivo principal de este capítulo es diseñar, construir y testear el comportamiento real de un sistema híbrido de pila de combustible integrado por dos tipos diferentes de fuentes de potencia: Pila de combustible y Batería (Figura 4.1³⁹).

³⁹ El esquema muestra un sistema con dos pilas. Esto se debe a que como se justificará en la sección 4.2, los requerimientos de la carga y la disponibilidad comercial de las pilas de combustible aconsejan dimensionar el sistema con dos módulos de pilas de combustible y un banco de baterías. Hay que señalar también que el sistema dispone de salida en continua y alterna, lo cual le dota de mayor versatilidad.

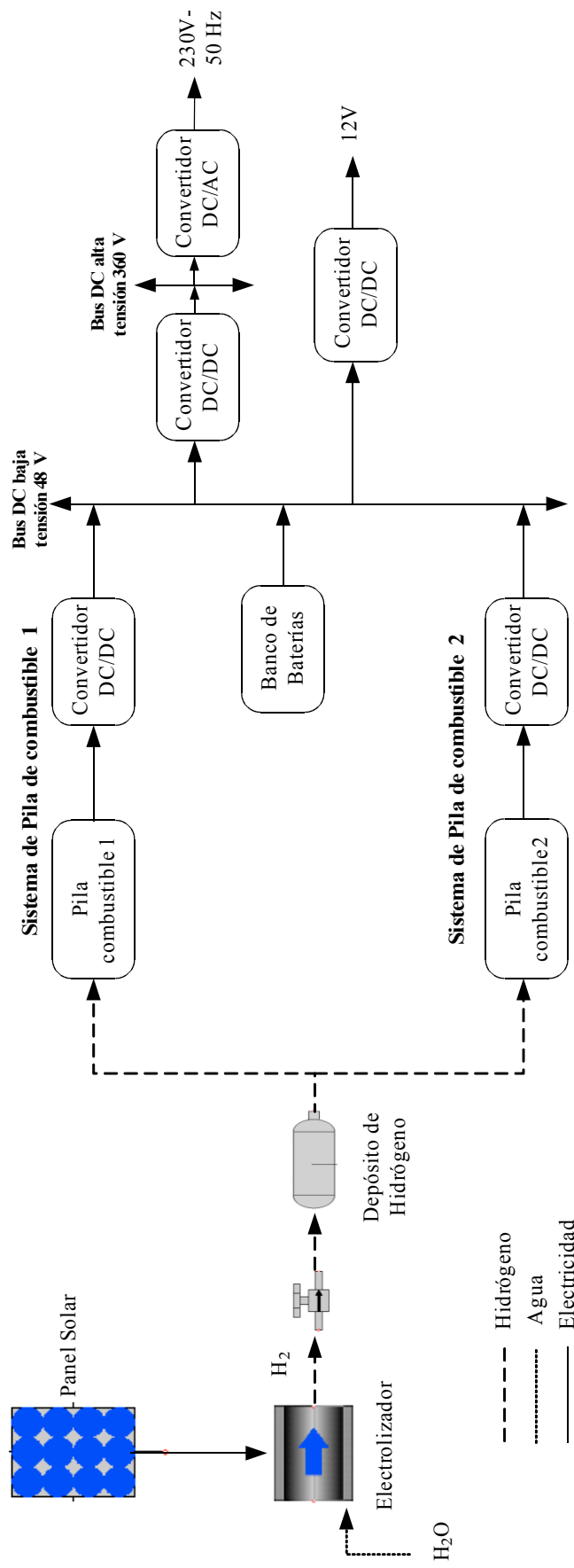


Figura 4.1: Esquema del sistema híbrido con pila de combustible a construir en el laboratorio.

Las aplicaciones de este sistema son múltiples y variadas (en el Capítulo 2, sección 2.2.6, se hizo una revisión bibliográfica de las aplicaciones y disponibilidad comercial de los sistemas basados en pilas de combustible). Por ejemplo, el sistema puede estar trabajando de una forma completamente autónoma y aislada para garantizar el abastecimiento energético en emplazamientos geográficamente inaccesibles, sin conexión a la red eléctrica general. Otra opción es que actúe como Unidad de Potencia Auxiliar (APU) para el abastecimiento energético en aplicaciones de automoción u otras. Por ejemplo, para el suministro de potencia auxiliar al motor en vehículos híbridos o para el suministro de la carga eléctrica de camiones de largo recorrido durante el periodo de descanso del conductor. También cabe la posibilidad de emplear este sistema como Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI). En este caso, cuando la carga para la que ha sido diseñado sufre un corte de red, el SAI entraría en funcionamiento inmediatamente, de forma que la carga no quedase desabastecida en ningún momento. Hospitales, colegios, hoteles, aeropuertos son ejemplos claros en los que un corte en el suministro energético acarrearía graves consecuencias. Las principales ventajas de los SAIs basados en pilas de combustible son la eliminación de emisiones de gases contaminantes, la reducción del ruido generado y la independencia de la conexión a red para posibles recargas.

Conocida la amplia gama de posibles aplicaciones, y con objeto de afrontar una implementación física, el sistema se va a dimensionar para cubrir una aplicación típica: alimentar una estación de telecomunicaciones localizada en un lugar remoto sin conexión cercana a la red eléctrica. Un perfil de carga típico de este tipo de instalaciones se muestra en la Figura 4.2.

Los pasos de diseño que se van a seguir en este capítulo pueden ser extrapolados para dimensionar cualquier otro tipo de perfil de carga. Es más, el propio sistema para abastecer el perfil de carga de la Figura 4.2 puede ser empleado para otro tipo de aplicaciones además de la de alimentar una estación de telecomunicaciones.

Las principales fuentes de potencia del sistema a considerar son dos módulos de pila de combustible y un banco de baterías. Con objeto de hacer el sistema autónomo, el hidrógeno consumido por las pilas de combustible va a ser producido por un electrolizador y almacenado en botellas de hidruros metálicos. El electrolizador es alimentado aprovechando la energía generada por un conjunto de paneles solares.

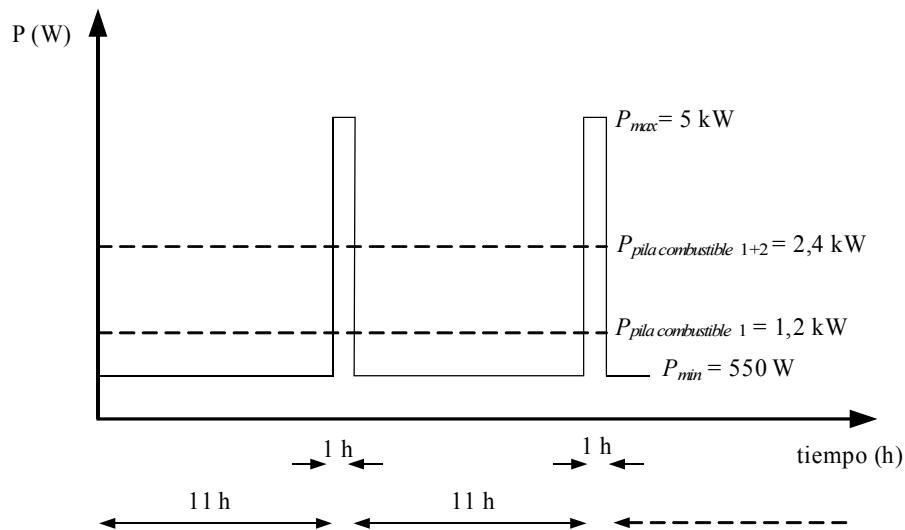


Figura 4.2: Perfil de carga típico de un sistema de telecomunicaciones.

No obstante, la parte del sistema correspondiente a la generación y almacenamiento de hidrógeno no va a ser objeto de este capítulo en particular, ni de esta memoria en general⁴⁰. En concreto, este capítulo está dedicado a la parte del sistema que comienza con la producción de energía eléctrica de forma no regulada a partir de hidrógeno (pila de combustible), y finaliza en el aprovechamiento de la potencia eléctrica generada y ya sí, regulada.

El esquema que se recoge en la Figura 4.1 corresponde con el diagrama de bloques de la Figura 2.21 que se presentaba en la sección 2.3 del Capítulo 2. En esta figura se recogía la interrelación entre los diferentes componentes del sistema de pila de combustible que alimenta una carga aislada, como es el caso del sistema que se está considerando. De las posibles topologías que se proponían (ver Figura 2.22 a Figura 2.24), el sistema con el que se va a trabajar en este capítulo corresponde a la topología presentada en la Figura 2.23).

El sistema de pila de combustible se conecta a través de un convertidor DC/DC a un bus de continua de baja tensión (48 V). La batería (o grupo de ellas) se conecta directamente al bus de continua para ayudar a la pila de combustible en el arranque de ésta y, además, entregar la energía demandada durante los transitorios en la carga. Una vez que se garantizan los 48 V en el bus de continua, la salida de 230 V – 50 Hz alterna se consigue intercalando un convertidor

⁴⁰ El estudio del sistema de producción y almacenamiento de hidrógeno se hace en la tesis realizada por D. Manuel J. Vasallo Vázquez y dirigida por el Dr. José M. Andújar Márquez, en el Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática de la Universidad de Huelva.

DC/DC con transformador de alta frecuencia más un inversor⁴¹. A su vez, la salida de 12 V-DC se obtiene añadiendo un convertidor DC/DC con topología reductora.

Para garantizar los niveles de tensión en cada uno de los puntos se actúa sobre el ciclo de servicio de los distintos convertidores DC/DC. Un sistema de control será el que decida, en base a la medida del error entre el valor real y la referencia, el valor de la señal de control, esto es, el ciclo de servicio de los convertidores.

Respecto a las baterías, durante todas las pruebas del prototipo que se diseña en este capítulo, la recarga se ha realizado de forma externa mediante un cargador comercial. El estudio e implementación de los procesos de recarga de las baterías en un sistema como éste no es algo ni mucho menos trivial, ya que es necesario añadir un nuevo convertidor DC/DC intercalado entre la batería y el bus de continua. Este convertidor requiere una estrategia de control específica que, entre otros requerimientos, ha de tener en cuenta el estado de carga de las baterías y las solicitudes de la carga y pila de combustible.

Como ya se ha visto en el Capítulo 2, las pilas de combustible están lo suficientemente reconocidas como una de las tecnologías más prometedoras para alcanzar los requerimientos futuros referentes a la generación de potencia, respondiendo además a los objetivos de reducir el consumo de combustibles derivados del petróleo y las emisiones nocivas de CO₂, [117], [118]. Una de las ventajas de las pilas de combustible es su modularidad, ya que pueden ser configuradas para trabajar dentro de un amplio rango de generación de potencia desde 0,025 W a 50 MW. Sin embargo, la dinámica de un módulo de pila de combustible está limitada por el sistema de suministro de hidrógeno/oxígeno. Por lo tanto se hace necesaria una fuente auxiliar de potencia para el arranque de la pila de combustible y para compensar la dinámica lenta de la misma ante las súbitas demandas de la carga. Una combinación integrada por un módulo de pila de combustible y un banco de baterías puede formar un sistema híbrido completo e independiente para muchas aplicaciones [119].

Una de las características de las pilas de combustible de tipo PEM es que los puntos de funcionamiento a máxima eficiencia no corresponden con los puntos de funcionamiento a máxima potencia. Los valores más altos de eficiencia se alcanzan cuando la corriente

⁴¹ El estudio e implementación física de los componentes eléctricos y electrónicos relativos a la salida de alterna (convertidor DC/DC e inversor) son objeto de la tesis doctoral realizada por D. Eladio Durán Aranda y dirigida por el Dr. José M. Andújar Márquez, en el Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática de la Universidad de Huelva.

suministrada por la pila de combustible es baja, mientras que los de máxima potencia son posibles cuando la pila está entregando valores altos de corriente [120]. Por lo tanto, de acuerdo al sistema híbrido mostrado en la Figura 4.1 y el perfil de carga considerado en la Figura 4.2, es interesante evaluar diferentes formas de funcionamiento de las tres fuentes de potencia de forma simultánea. Diferentes opciones pueden ser que uno de los módulos de pila de combustible trabaje a alta eficiencia y el otro a alta potencia, o bien que ambos módulos estén trabajando a máxima eficiencia o que estén trabajando a máxima potencia al mismo tiempo.

Con el objetivo de evaluar el funcionamiento del sistema ante diferentes demandas de potencia, se ha implementado un banco de cargas resistivas controladas electrónicamente desde un PC. Mediante este banco de cargas, se pueden obtener resultados experimentales que reflejen el comportamiento real del sistema cuando está generando la potencia demandada por distintos perfiles de cargas. La elección de los distintos puntos de funcionamiento se puede realizar con sólo seleccionar alguno de los relés de estado sólido que permiten conectar diferentes cargas al sistema completo. Esta selección de relés se hace empleando un instrumento virtual (VI) basado en NI Labview[®] que ha sido diseñado para este propósito. Hay que resaltar que la implementación del banco de cargas surge como una necesidad para emular de forma real los requerimientos de potencia del perfil de carga considerado.

Cabe preguntarse en este punto porqué se ha diseñado y construido un banco de cargas en vez de utilizar una carga electrónica. En [121] se propone una carga DC programable que consiste en controlar el ciclo de servicio de un convertidor DC/DC. La relación entre la resistencia de entrada y de salida para las distintas topologías de convertidores conmutados DC/DC es de sobra conocida [122], [123]. Sin embargo, esta opción no se puede extender al sistema objeto de este capítulo por dos razones principales: 1) En nuestro caso existen tres fuentes de potencia trabajando en paralelo (dos pilas de combustible y un banco de baterías), donde cada pila de combustible está conectada a su propio convertidor DC/DC y cada pila de combustible puede trabajar en un punto de operación diferente, y 2) en esta aplicación, la acción sobre el ciclo de servicio del convertidor no se realiza para variar la resistencia equivalente a la entrada, sino para controlar la tensión en el bus de continua y/o la corriente que suministra cada una de las pilas de combustible.

En [124] se muestra una carga electrónica que permite realizar medidas de la resistencia equivalente interna de la pila de combustible. Pero, de nuevo, sigue sin ser éste el objetivo de

este capítulo. En este caso, lo que se pretende es evaluar la interacción entre diferentes fuentes de potencia de acuerdo al perfil de carga considerado.

Comercialmente existen múltiples soluciones [125], [126] y [127] para cargas electrónicas programables. En concreto en [126] y [127] se pueden consultar cargas electrónicas programables específicas para pilas de combustible⁴². Sin embargo, las principales desventajas en estas recientes propuestas son su alto coste y la incapacidad de trabajar en un rango demasiado amplio de potencia (más de 3000 euros para una carga de 1500 W), además de sus reducidas prestaciones y su escasa accesibilidad, ya que en la mayoría de los casos son equipos cerrados en los que el usuario sólo puede decidir el valor de potencia que va a demandar la carga. En consecuencia, para el caso del sistema objeto de estudio de este capítulo, una vez fijados los niveles de potencia demandada a partir del perfil de carga considerado, se necesitaría un número elevado de módulos de cargas programables, lo que supone una complejidad y costes difícilmente asumibles.

Respecto de la estrategia de control del sistema, ésta se complica lógicamente cuanto más fuentes de potencia intervienen y más exigente es el perfil de carga demandado. En la literatura reciente, existen ya trabajos sobre el análisis de sistemas híbridos contruidos en base a módulos de pilas de combustible. Así por ejemplo, se pueden encontrar sistemas con turbina eólica y pila de combustible, [128], sistemas formados sólo por pilas de combustible, [129], [130], [131] o sistemas con pila de combustible y baterías o ultracondensadores [132], [133], [134]. No obstante, el sistema objeto de estudio tiene una complejidad adicional, ya que consta de dos módulos de pila de combustible y, en consecuencia, la estrategia de control ha de ser más compleja porque se tiene que decidir el punto de funcionamiento de cada pila de combustible. Como ya se puede intuir por lo comentado son varias las opciones: 1) una pila de combustible trabajando a alta eficiencia y la otra trabajando a alta potencia, 2) ambas pilas trabajando a alta eficiencia, 3) ambas pilas trabajando a alta potencia, y 4) ambas pilas trabajando a eficiencia y potencia medias.

Las pruebas experimentales que se llevan a cabo en este capítulo se separan en dos grupos. En primer lugar se muestran los resultados cuando el banco de cargas se conecta directamente al bus de continua de baja tensión. El objetivo es comprobar que el conjunto de las fuentes es capaz de suministrar la potencia demandada por la carga, a la vez que la tensión en el bus se

⁴² En los dos casos se ofrecen cargas electrónicas programables de potencia no superiores a 1500 W.

mantiene al valor fijado de 48 V a pesar de los cambios en la demanda de la carga. En segundo lugar, se muestran los resultados cuando el banco de cargas se conecta a la salida de 12 V. En este caso, se demuestra que se mantienen los niveles de tensión en cada punto del sistema independientemente de las variaciones en la demanda de potencia de la carga.

La organización del capítulo es la siguiente. En la segunda sección se estudian las consideraciones de diseño que se van a tener en cuenta para realizar el dimensionado e implementación física del sistema completo. Teniendo en cuenta el perfil de carga considerado, el empleo de pilas de combustible queda justificado de acuerdo a criterios relacionados con la capacidad de almacenamiento, el peso, la flexibilidad, el consumo y la autonomía. En la tercera sección se muestran los resultados experimentales obtenidos a partir de las pruebas realizadas con el sistema real. Se realizan pruebas conectando el banco de cargas directamente al bus DC de baja tensión y a la salida de 12 V-DC. La última sección recoge las principales conclusiones extraídas del trabajo desarrollado y los resultados obtenidos, así como algunos comentarios bibliográficos.

4.2 Consideraciones de diseño

Para comenzar con la tarea de diseño, el primer aspecto que se debe tener en cuenta es el perfil de carga (ver Figura 4.2) para el que se van a dimensionar cada uno de los componentes que integran el sistema completo (ver Figura 4.1). En consecuencia, la generación de potencia horaria que se va a considerar para la pila de combustible es la siguiente:

1. Durante el periodo de tiempo anterior al primer pico de potencia, la potencia que suministra la pila de combustible P_{FC} debe ser similar a la potencia mínima del perfil P_{min} , teniendo en cuenta la eficiencia del convertidor más la del inversor $\eta_{conv+inv}$, (4.1):

$$P_{FC} = \frac{P_{min}}{\eta_{conv+inv}} \quad (4.1)$$

2. Durante los periodos de tiempo correspondientes a los picos de potencia, la pila de combustible debe suministrar su potencia neta o máxima. Teniendo en cuenta que los intervalos de demanda de potencia máxima P_{max} son pequeños en comparación con los de potencia mínima P_{min} , es más económico y eficiente

completar la demanda de P_{max} con el banco de baterías que cubrir toda la demanda con pilas de combustible [130].

3. Durante los periodos de tiempo que transcurren entre dos picos de potencia, la pila de combustible suministra la potencia que demanda la carga más la potencia necesaria para la recarga de la batería. Las baterías se descargarán parcialmente (el sistema ha de estar diseñado para evitar una descarga excesiva que nunca debe ser total) durante el primer pico de potencia, lo que implica que para que el sistema completo sea capaz de afrontar la demanda del segundo pico de potencia, las baterías deben ser recargadas durante este periodo de tiempo previo al segundo pico.

Entonces, si el valor de potencia máxima de la pila de combustible se conoce, se puede establecer el reparto de potencia en el sistema completo. De forma genérica, el dimensionamiento de la pila de combustible se debe realizar de acuerdo a las consideraciones siguientes:

1. La potencia máxima de la pila de combustible P_{FCmax} debe ser mayor que el valor medio de la potencia demandada en el intervalo de tiempo considerado ($t = 24$ horas).

$$P_{FCmax} > \frac{P_{min} \cdot t_{P_{min}} + P_{max} \cdot t_{P_{max}}}{t} = 920 \text{ W}$$

2. La potencia mínima de la pila de combustible P_{FCmin} , de acuerdo a las recomendaciones de los fabricantes, por las bajas eficiencias que tienen para valores muy bajos de potencia, debe ser inferior al valor mínimo de la potencia demandada P_{min} .
3. Para una potencia a suministrar dada, cuanto más se cubra con la pila de combustible menor será el banco de baterías necesario. Sin embargo, es inevitable un justo compromiso, ya que el coste de la pila es mucho más elevado.

Por tanto, la elección de un tamaño óptimo de una pila de combustible permite minimizar los costes del sistema. En [130] se desarrolla un análisis de coste y dimensionado aplicado a un

sistema híbrido de pila de combustible, diseñado para alimentar a una carga con un perfil similar al que se muestra en la Figura 4.2. De los resultados de este estudio se recoge que la mejor solución corresponde a un sistema integrado por una pila de combustible de 2 kW más un banco de baterías de 2,16 kWh. Al trasladar esta solución a la práctica, y atendiendo a la disponibilidad comercial de pilas de combustible y de baterías, el sistema híbrido considerado va a estar formado por dos módulos de pila de combustible Nexa de Ballard, que como ya se comentó en el Capítulo 2, cada módulo tiene una potencia máxima de 1,2 kW. De esta forma se consigue lo siguiente: 1) Garantizar la primera de las consideraciones de diseño mencionadas anteriormente para el dimensionado de la pila de combustible, 2) Cumplir con la mejor solución obtenida tras el análisis de coste y dimensionado realizado y 3) Reducir el tiempo de utilización de una de las pilas de combustible, es decir, aumentar su tiempo de vida. Esto es gracias a que durante los periodos de potencia mínima, la demanda de potencia puede ser cubierta por un sólo módulo. El otro módulo interviene en los periodos de potencia máxima o de recarga de las baterías. Por otra parte, el banco de baterías va a estar formado por baterías modelo GF 12 094 Y VRLA de Exide. Cada una de estas baterías tiene una capacidad de 69,1 Ah y 12 V de tensión, por lo que con tres unidades se cubrirían las exigencias de capacidad, pero entonces, la tensión máxima disponible sería de 36 V (baterías conectadas en serie). Como el banco de baterías está conectado directamente al bus de 48 V, son necesarias cuatro baterías conectadas en serie. El empleo de una batería más resulta más rentable que construir un convertidor elevador 36 V-48 V capaz de manejar toda la potencia suministrada por el banco de baterías. Estos resultados justifican el sistema que se ha presentado en la Figura 4.1.

Para poder evaluar y testear el comportamiento real del sistema, se necesita una carga que permita emular el perfil de consumo considerado. Debido a los valores tan altos de potencia que se deben alcanzar (hasta 5 kW), el amplio rango comprendido entre el nivel inferior y el superior (desde 550 W hasta 5 kW) y el alto coste de las cargas electrónicas comerciales, ha sido necesario diseñar y construir un banco de cargas que permite emular el perfil de carga requerido (ver Figura 4.2). El banco de cargas ha sido pues una tarea más en la realización del sistema de la Figura 4.1 objeto del capítulo.

A continuación, se describen las principales características de diseño y funcionamiento de cada uno de los componentes.

4.2.1 Módulo de potencia de pila de combustible PEM tipo Nexa de Ballard

Aunque las características principales del módulo de pila de combustible Nexa de Ballard ya se han visto en el Capítulo 3, se van a recordar en esta sección los aspectos más relevantes, ya que condicionan la elección del resto de componentes.

El módulo Nexa de Ballard (Figura 4.3) es capaz de proporcionar una potencia DC no regulada de hasta 1,2 kW [31]. La tensión que existe entre sus terminales de salida varía desde 42 V en vacío hasta aproximadamente 26 V a plena carga. Consta de un total de 47 celdas conectadas en serie. La temperatura de operación alcanza los 65 °C a plena carga. Como combustible, necesita hidrógeno gas al 99,99% de pureza. El oxígeno se toma del aire ambiental mediante la acción de un compresor contenido en el propio módulo. La velocidad del compresor es ajustada por un controlador interno, de forma que la pila de combustible tenga la cantidad de oxígeno suficiente como para entregar la potencia que la carga le esté demandando en cada momento. El aire es humidificado para mantener los niveles de humedad necesarios para el correcto funcionamiento de la membrana de intercambio protónico y prolongar el tiempo de vida de la misma. El proceso de humidificación se realiza a través de un intercambiador de humedad que también está implementado en el propio módulo. El funcionamiento interno de la pila de combustible es regulado por un microprocesador, el cual ejecuta las secuencias de arranque y parada, emite los mensajes de alarma y, en definitiva, se encarga de que la pila de combustible trabaje de forma segura. A través de un puerto serie incorporado, los datos relativos al funcionamiento de la pila de combustible (temperatura, presión de suministros de reactivos, tensión, corriente, etc) pueden ser enviados a un PC y, mediante una aplicación software, mostrados en pantalla, de forma que pueden ser interpretados por el usuario. La Figura 3.3 del capítulo anterior muestra las curvas de polarización y de potencia dadas por el fabricante para este módulo.

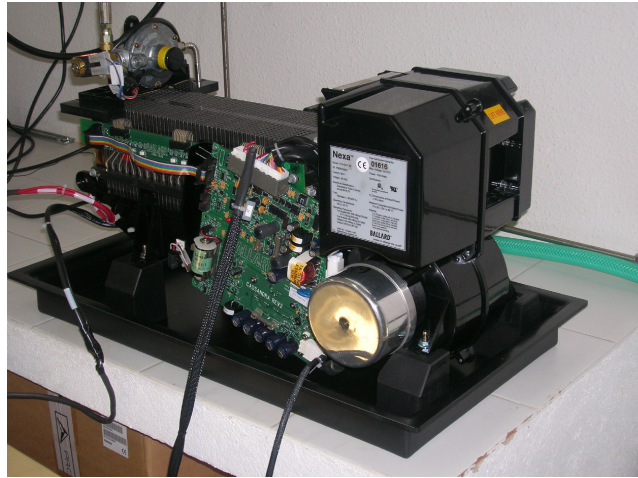


Figura 4.3: Módulo de Pila de Combustible Nexa de Ballard.

4.2.2 Convertidor DC/DC elevador Boost

El convertidor DC/DC conectado a la pila de combustible (ver Figura 4.1) permite que su salida DC no regulada, que varía entre 42 V cuando trabaja en vacío y 26 V a plena carga, pueda ser conectada al bus DC de 48 V. Dado el rango de funcionamiento del módulo de pila de combustible, siempre inferior al valor de tensión del bus, el convertidor DC/DC debe tener una topología elevadora. De las diferentes topologías elevadoras, [89], [90], se elige la correspondiente al convertidor Boost por su sencillez y porque requiere de un menor número de componentes.

En la sección 3.2 se realizó un estudio de este convertidor (ver Figura 3.8), se dedujeron las ecuaciones que describen la evolución temporal de la corriente y la tensión en la bobina y el condensador respectivamente, (3.34), la relación entre el valor de la inductancia con el rizado en la corriente de entrada, y el valor del condensador con el rizado en la tensión de salida, (3.56) y (3.57). La Tabla 4.1 recoge las características eléctricas de todos los componentes que se han utilizado para implementar el convertidor. El valor de la bobina se ha elegido para no superar el 10% de rizado en corriente respecto a los 46 A que puede entregar la pila de combustible cuando trabaja a la potencia máxima (1,2 kW). El valor del condensador se elige para garantizar que el rizado en tensión sea inferior al 3% respecto a los 48 V que se exigen a la salida del convertidor.

La frecuencia de conmutación del convertidor se fija en 30 kHz. A este respecto hay que notar que el rango de frecuencias de conmutación recomendable para los transistores va de 20 a 50 kHz. Por debajo de 20 kHz, los componentes pasivos requeridos para alcanzar los requisitos de rizado son de gran tamaño. Por encima de 50 kHz, las pérdidas por conmutación son muy elevadas. Respecto del esquema de la Figura 3.8, se han empleado dos transistores en vez de uno, con objeto de reducir la pérdidas que se producen durante la conducción, y también, para evitar que toda la corriente que suministra la pila de combustible circule por un solo transistor. Se han empleado dos diodos en serie en vez de uno para asegurar la diferencia de tensión entre la entrada y la salida del convertidor. Por último, de acuerdo a la disponibilidad comercial, la inductancia del convertidor se implementa en base a seis bobinas conectadas en paralelo y, por la misma razón, para implementar el condensador se emplean dos unidades conectadas en paralelo.

Por otra parte, para convertir la salida no regulada de la pila de combustible a una tensión fija de 48 V, independientemente de la demanda de la carga, es necesario diseñar y construir un sistema de control que se encargue de actuar sobre el ciclo de servicio del convertidor, en base a la medida del error que exista entre el valor sensado de la tensión a la salida del convertidor V_{sens} y el valor de la referencia a seguir V_{ref} (Figura 4.4). Para realizar este lazo de control de tensión se utiliza el circuito integrado IC TL494 (Figura 4.5). Este circuito genera un pulso que se emplea como señal de ciclo de servicio, en base a la técnica de modulación por anchura de pulso (PWM). La señal de error entre la medida real de tensión a la salida del convertidor y la de referencia se compara con una señal de diente de sierra. La anchura del pulso generado por el IC TL494, es decir, la señal que se utiliza para la conmutación del transistor del convertidor, depende de la magnitud del error respecto a la señal de diente de sierra. El divisor de tensión formado por el potenciómetro POT_1 y R_1 permite acondicionar el valor de la tensión real a la salida del convertidor al valor de la referencia utilizada, que corresponde con la salida VREF (+5V) que proporciona el mismo IC TL494. El diente de sierra es generado en base al condensador C_3 y el potenciómetro POT_2 que permite variar la frecuencia de la señal PWM. Las resistencias R_2 y R_3 junto con el condensador C_2 forman una red de compensación en la realimentación. El driver TC4452 conectado a la salida del TL494 permite garantizar que la base del transistor del convertidor se ataca con los niveles de tensión y corriente suficientes para el disparo del mismo.

Las Figuras 4.6 y 4.7 recogen una fotografía de la placa de circuito impreso correspondiente al convertidor DC/DC Boost y su placa de control de tensión asociada.

Tabla 4.1: Parámetros eléctricos de los componentes del convertidor Boost.

Componente	Tipo	Características
IGBT-canal N	G40N60B3	2 600V-70A, 1.3V a 25°C
Diodo	MBR6045WT	2 serie 45V-60A, 0.75V a 25°C
Bobina	PCV-2-568-08	6 568μH, 8A, 90mΩ
Condensador	TSHA 160V-2200μF	2 2200μF, 160V

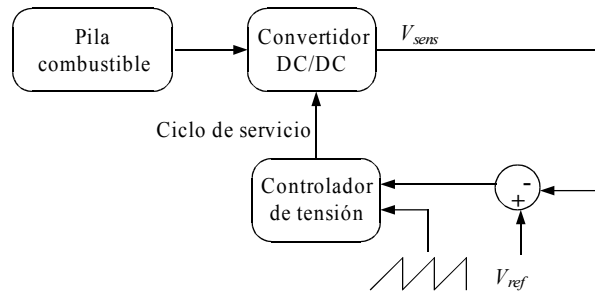


Figura 4.4: Esquema de control de tensión por PWM del sistema de pila de combustible.

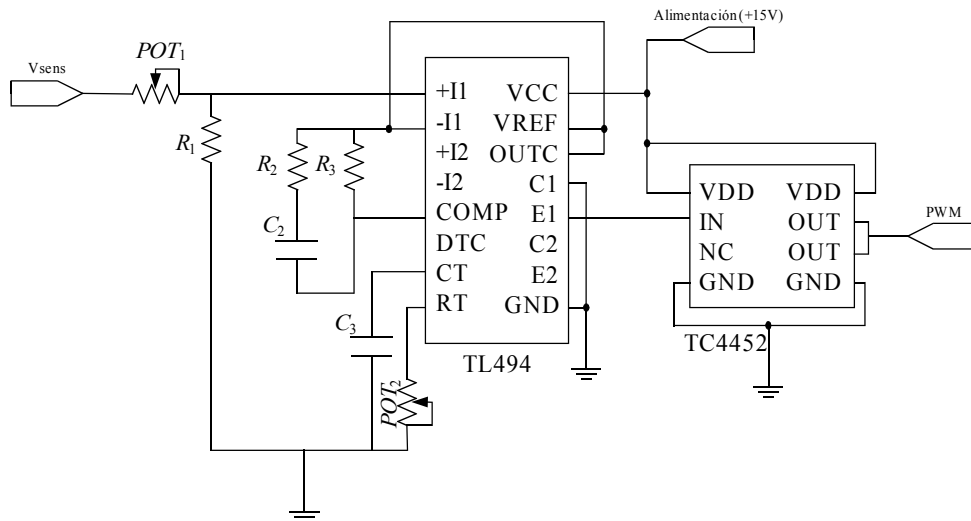


Figura 4.5: Esquema eléctrico del circuito de control de tensión del convertidor Boost.

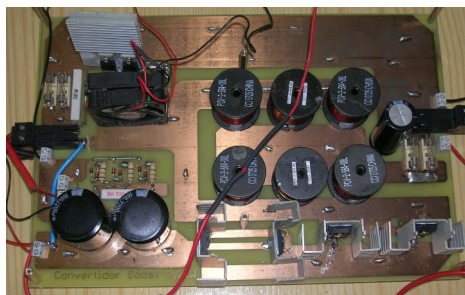


Figura 4.6: Fotografía del convertidor Boost construido.

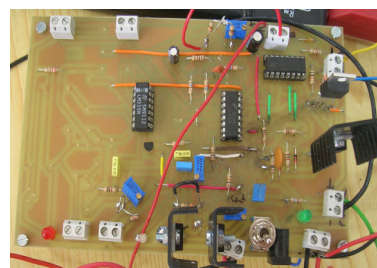


Figura 4.7: Fotografía de la placa de control de tensión del convertidor Boost.

4.2.3 Banco de baterías

El banco de baterías, como ya se ha comentado al principio de esta sección, está formado por cuatro baterías modelo GF 12 094 Y VRLA de Exide [135]. En la Figura 4.8 se recogen los datos del fabricante relativos a los ciclos de carga y de descarga. Para la carga existen dos periodos principales correspondientes a la carga a corriente constante y a tensión constante. La carga comienza con un periodo a corriente constante que puede ser de 12 a 18 A, con una duración máxima de 9 horas. Cuando la tensión de la batería alcanza aproximadamente 2,35 V/elemento, se pasa al proceso de recarga a tensión constante, que puede durar como máximo 3 horas. El tercer periodo vuelve a ser de carga a corriente constante, con un valor comprendido entre 1,1 A y 1,6 A y una duración máxima de 4 horas. La carga de igualación o autobalance se realiza después de descargas profundas y/o cargas inadecuadas, o si las tensiones individuales de los elementos o monobloques están fuera de los límites estipulados. Este periodo de autobalance consiste en someter a la batería a 60 pulsos de corriente de 15 minutos de duración cada pulso, dejando 15 minutos entre pulso y pulso.

En cuanto a la descarga de las baterías, en [130] se realiza un estudio de dimensionado con distintas opciones, donde se concluye que para el perfil de carga considerado y el sistema propuesto, se necesita un banco de cinco baterías de 2,16 kWh. Sin embargo, a partir de los datos facilitados por el fabricante para el modelo de baterías elegido, se observa que para una duración de descarga de una hora (tiempo de duración de los picos de potencia, ver Figura 4.2) la capacidad de las cuatro baterías es de $4 \times 12 \times 69,1 \text{ Ah} = 3,3 \text{ kWh}$. De ahí que para el perfil de carga a satisfacer, sea suficiente con cuatro baterías del modelo elegido.

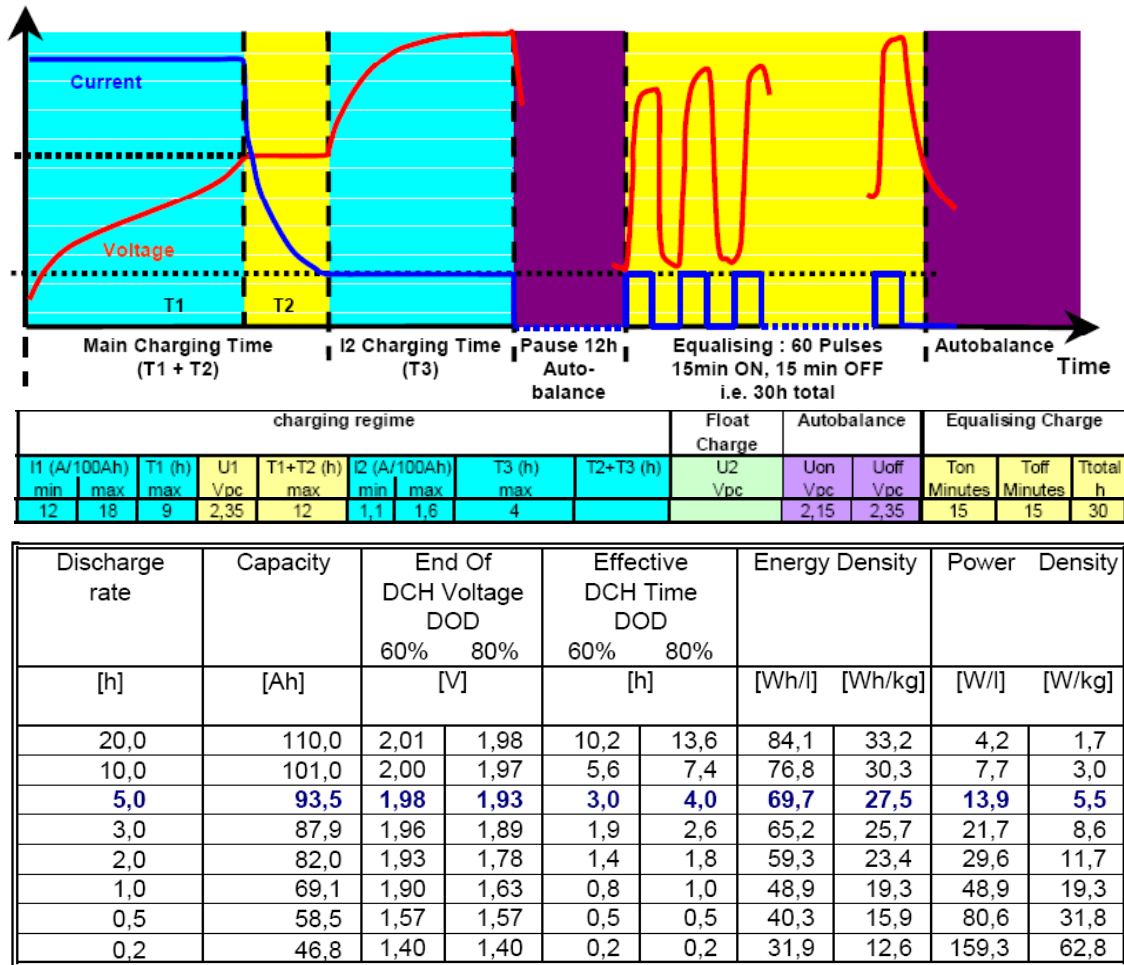


Figura 4.8: Características de los periodos de carga y de descarga de la batería GF 12 094 Y VRLA.

4.2.4 Banco de cargas

El objetivo que se pretende con el banco de cargas es disponer de un sistema que permita realizar pruebas experimentales con cualquiera de las fuentes de potencia: módulo de pila de combustible o banco de baterías. El banco de cargas se ha diseñado para poder emular el perfil de consumo (ver Figura 4.2) para el que se ha dimensionado el sistema. Por esto, el diseño del banco de cargas se ha realizado teniendo en cuenta las consideraciones siguientes:

1. La demanda de potencia del banco de cargas debe alcanzar los valores P_{min} y P_{max} siguiendo el perfil de consumo para el que se ha diseñado el sistema,

teniendo en cuenta la eficiencia del convertidor DC/DC y del inversor que conectan el bus DC de 48 V con la salida AC. De esta forma, se puede conocer cómo actúan las distintas fuentes y si se garantiza el control de tensión en el bus DC cuando en las salidas AC y/o DC se realizan demandas de potencia equivalentes a las del perfil de carga. Esto se consigue conectando el banco de cargas directamente al bus de continua, sin necesidad de tener conectado el sistema completo. Esto es, el bus DC de 48 V actúa como punto intermedio desde donde se pueden realizar pruebas para, mediante la conexión a él del banco de cargas, estudiar el comportamiento de las distintas fuentes de potencia actuantes.

2. Para dar mayor versatilidad, emular otros perfiles de carga o implementar diferentes estrategias de control (criterios de máxima eficiencia o máxima potencia), el banco de cargas debe ser capaz de solicitar otros valores de potencia diferentes a los de P_{min} y P_{max} .
3. La elección de las resistencias unitarias que conforman el banco de cargas viene condicionada por la potencia máxima que se va a suponer que debe soportar cada resistencia unitaria. Como la tensión en el bus DC es de 48 V, la potencia máxima determina la corriente máxima que debe absorber cada resistencia unitaria.
4. Para aumentar la seguridad y que el usuario no tenga que manipular ningún interruptor para la selección de los niveles de potencia demandados, se van a emplear relés de estado sólido controlables mediante señales TTL. De esta forma, el usuario envía las órdenes desde un PC, donde, mediante un instrumento virtual desarrollado en Labview (ver Figura 4.9), se mandan las órdenes a una placa de control. Esta placa de control convierte las órdenes recibidas en señales que actúan sobre los relés dejándolos abiertos o cerrados, según sea su valor. La selección de uno u otro relé equivale a conectar un conjunto de resistencias que demandan un nivel de potencia determinado.

Con estas cuatro consideraciones, se procede a construir el banco de cargas en base a varios grupos de cargas resistivas. Cada grupo tiene el suficiente número de cargas resistivas como

para alcanzar un valor de potencia determinado. Estos valores de potencia corresponden con puntos concretos sobre la curva de polarización de los módulos de pila de combustible donde trabajan a máxima eficiencia o a máxima potencia. Es decir, además de los valores específicos de potencia del perfil de carga, el banco de cargas puede hacer trabajar a los módulos de pila de combustible en puntos concretos dentro de su rango de funcionamiento (Figuras 4.10 y 4.11).

La Figura 4.12 muestra cómo conceptualmente se ha diseñado el banco de cargas. El banco está formado por un total de siete grupos de resistencias, cada grupo con un determinado número de resistencias para alcanzar valores concretos de potencia. La resistencia unitaria con la que se construye el banco es una resistencia de $10\ \Omega$ - 300 W de Arcol. El valor teórico mínimo de potencia demandada al bus de 48 V con una sola resistencia es pues de 230,4 W, pero como consecuencia del calentamiento que sufren las resistencias dentro del margen tolerado, al circular corriente por ellas, la potencia nominal unitaria es de 240 W. Cada grupo de resistencias se conecta al bus DC de 48 V a través de un relé de estado sólido. La activación de estos relés se hace en base a un instrumento virtual donde el usuario decide la potencia demandada seleccionando el relé que conecta con el grupo de resistencias determinado. Desde el instrumento virtual se mandan las órdenes a una placa de control a través de un puerto serie. En la placa de control (ver esquema eléctrico en la Figura 4.13) el circuito integrado MAX232 convierte las órdenes recibidas desde el terminal RS-232 que conecta con el PC a niveles TTL. Estas señales en lógica TTL se mandan a un microcontrolador PIC 16F877A, que a su vez manda las órdenes a los relés de estado sólido a través de un optoacoplador darlington TL532-4. Este optoacoplador permite aislar la parte de comunicación con el PC de la parte del circuito de potencia. Las Figuras 4.14 y 4.15 muestran, respectivamente, una fotografía del montaje final del banco de carga conectado a las baterías y pila de combustible y de la placa de control que se utiliza para activar los relés de estado sólido a través del PC.

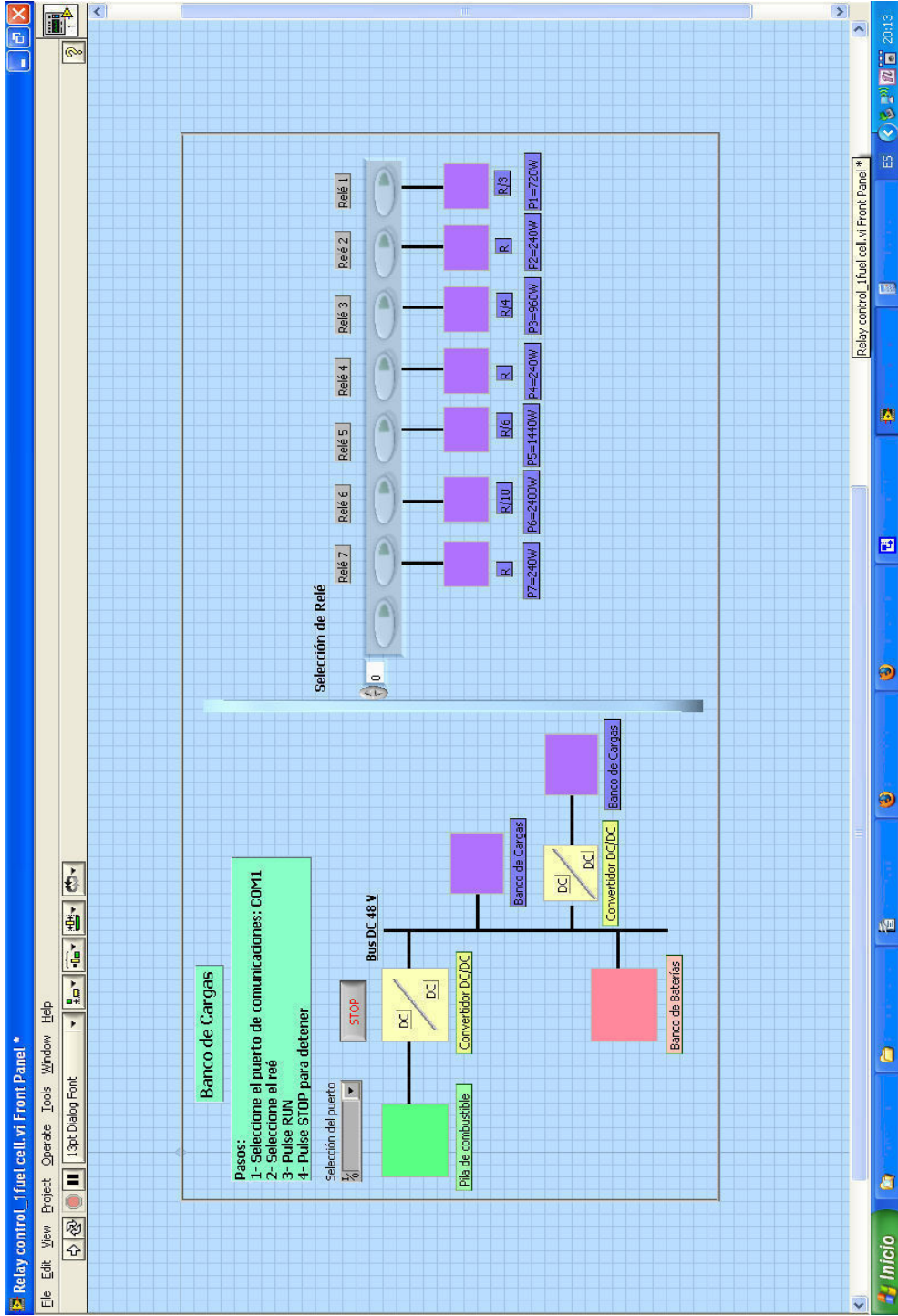


Figura 4.9: Detalle del panel de control de relés implementado en Labview.

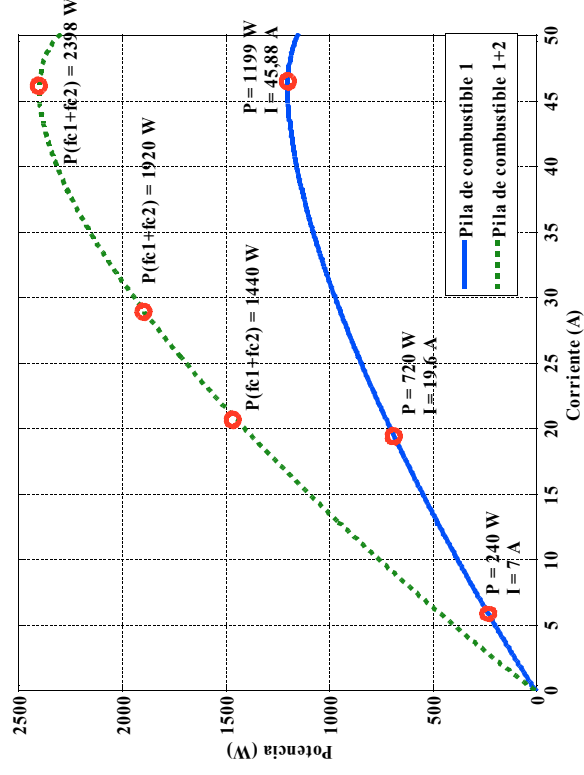
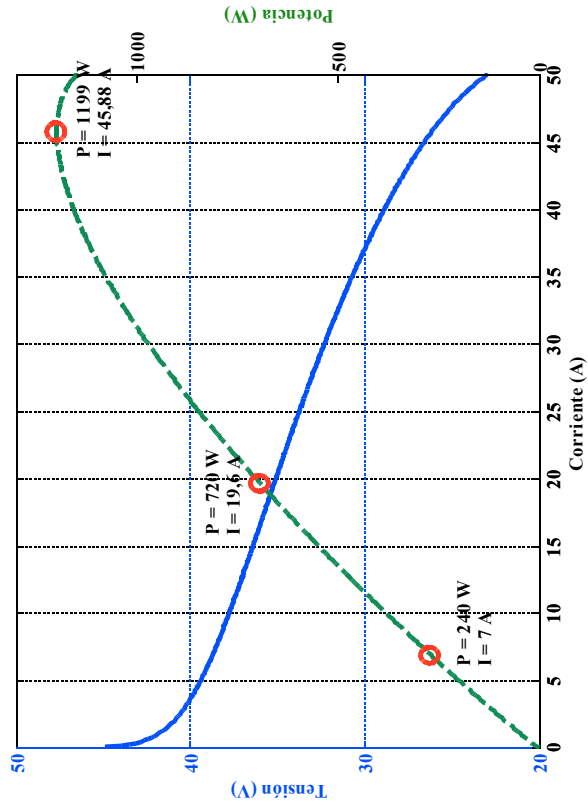


Figura 4.10: Puntos de operación alcanzados con el banco de cargas conectado a las pilas de combustible.

Figura 4.11: Puntos de operación alcanzados con el banco de cargas conectado a las dos pilas de combustible.

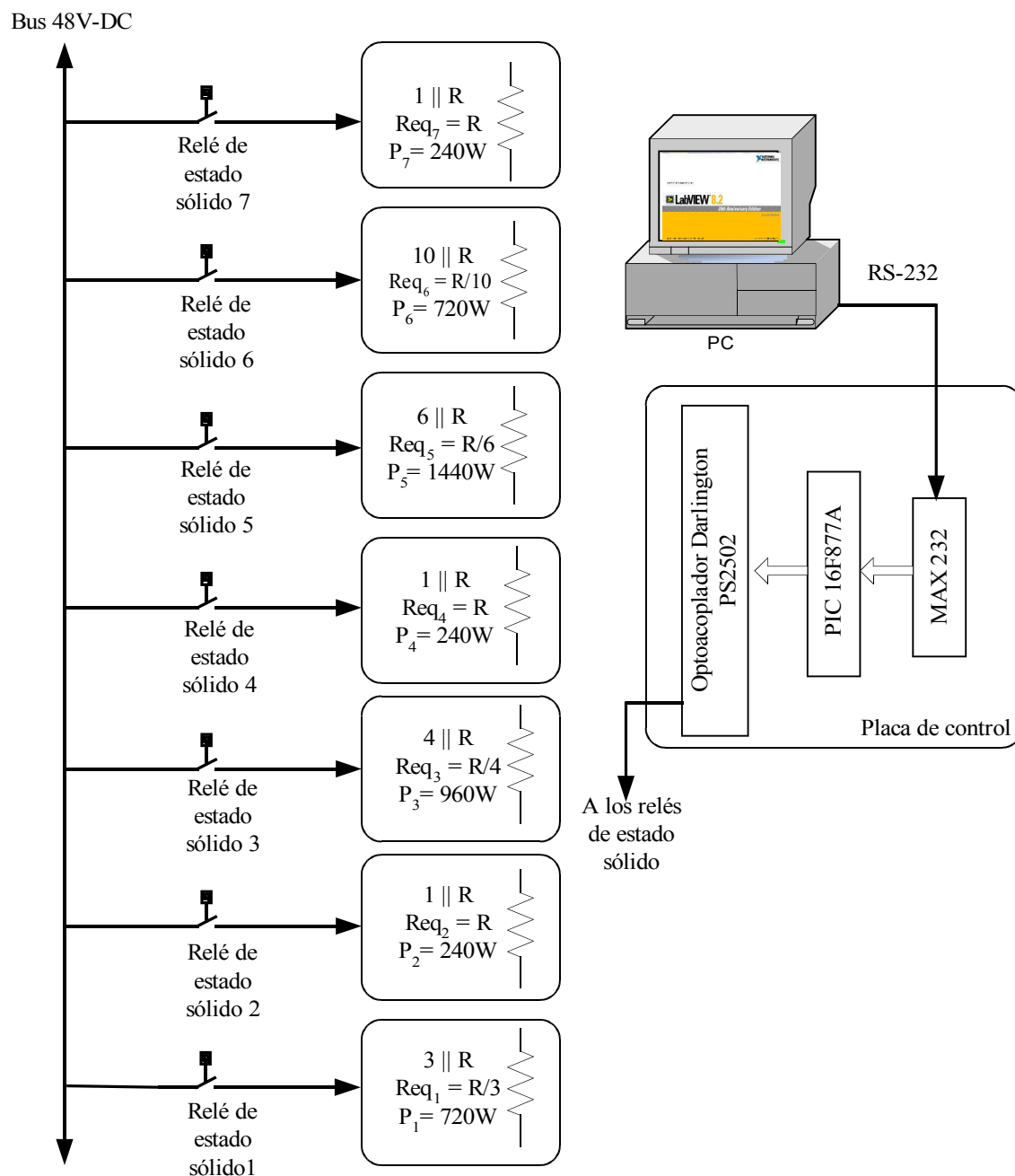


Figura 4.12: Esquema conceptual del banco de cargas construido: comunicación con el PC, número de resistencias por grupo y niveles de potencia alcanzables.

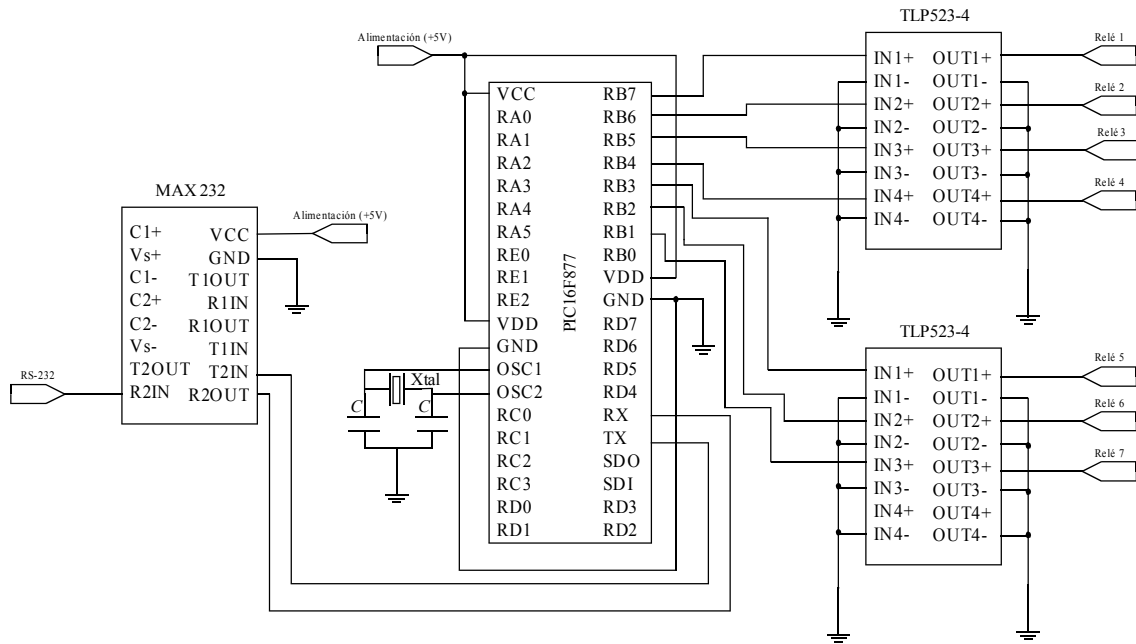


Figura 4.13: Esquema eléctrico de la placa de control de relés de estado sólido.

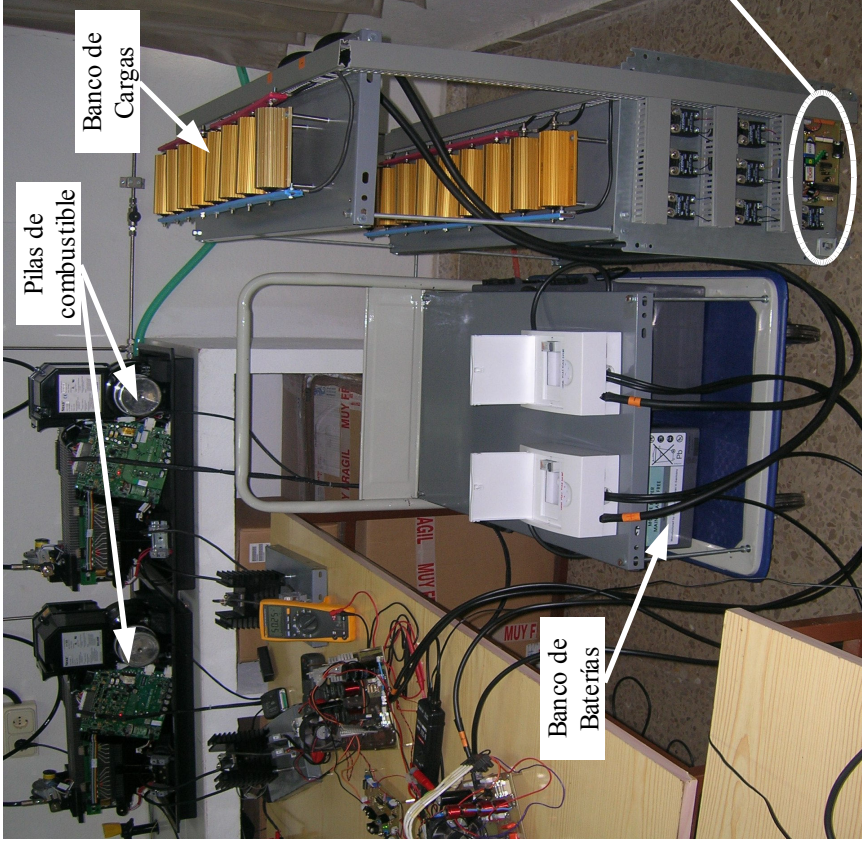


Figura 4.14: Fotografía del banco de cargas construido, conectado al banco de baterías y a las pilas de combustible.

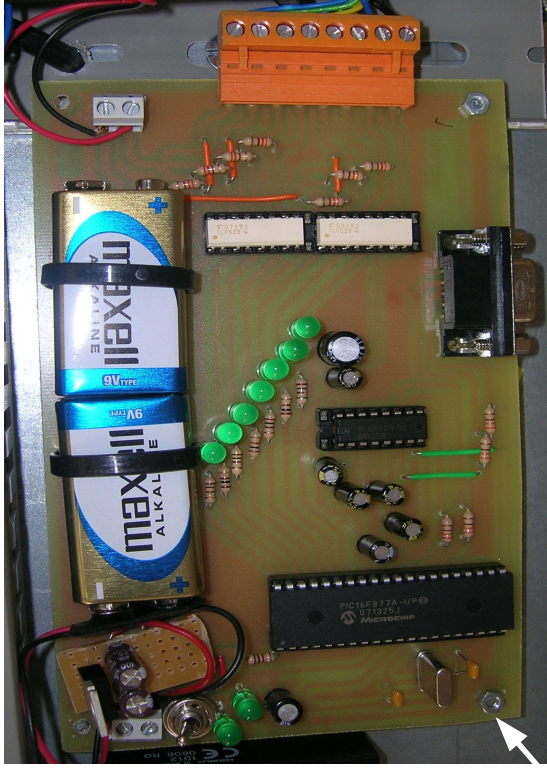


Figura 4.15: Detalle de la placa de control del banco de cargas.

4.2.5 Convertidor DC/DC reductor

Para convertir la tensión regulada de 48 V-DC del bus de baja tensión a 12 V-DC en la salida (ver Figura 4.1), se necesita un convertidor reductor. Las ventajas y desventajas de las topologías reductoras son ampliamente conocidas [136]. Por ejemplo, el convertidor Sepic (Figura 4.16) se caracteriza por exhibir una corriente de entrada continua, lo cual es una ventaja sobre la topología Buck (Figura 4.20), y además la tensión de salida no está invertida (ventaja sobre la topología Cuk). Otra ventaja es la facilidad de implementar el disparo del transistor porque su terminal de fuente es común. El inconveniente de la topología Sepic es que emplea un mayor número de componentes que la del convertidor Buck.

En este caso, se van a implementar las dos topologías, Sepic y Buck, para construir el convertidor que se encarga de transformar los 48 V del bus a los 12 V de la salida DC. La razón de implementar ambas topologías para el mismo fin estriba en poder comparar el funcionamiento real de ambos convertidores, así como hacer una valoración respecto de los costes de realización.

- **Convertidor SEPIC:** El dimensionado del convertidor Sepic se ha realizado considerando que la potencia máxima con la que va a trabajar es de 250 W ($P_{max}/20$). Es decir, se ha fijado como criterio de diseño que la potencia disponible en la salida AC (5 kW) y la potencia disponible en la salida DC (250 W) mantienen prácticamente la misma proporción que la magnitud de la tensión en la salida AC (230 V) y la magnitud de la tensión en la salida DC (12 V). Esta consideración se ha hecho porque si se exigiese que la salida DC soportara niveles de potencia similares a los del perfil de carga considerado, los valores de corriente con los que habría que trabajar en la salida de 12 V serían extremadamente elevados, con el consiguiente peligro que esto supone. Además de la razón anterior, la exigencia de obtener potencias elevadas a 12 V no suele ser práctico, ya que sólo se da para aplicaciones muy concretas, como en el arranque del motor de un vehículo (diesel o gasolina) por ejemplo.

Para estudiar el rizado permitido en las tensiones y corrientes respecto del valor de las bobinas y los condensadores, se realiza el estudio del comportamiento del convertidor durante los periodos de conducción, Figura 4.17(a), y no conducción, Figura 4.17(b).

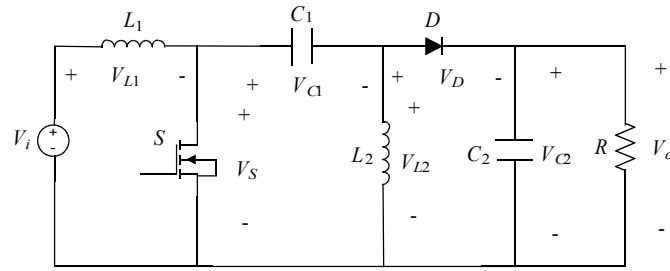


Figura 4.16: Esquema eléctrico de un convertidor Sepic sin pérdidas.

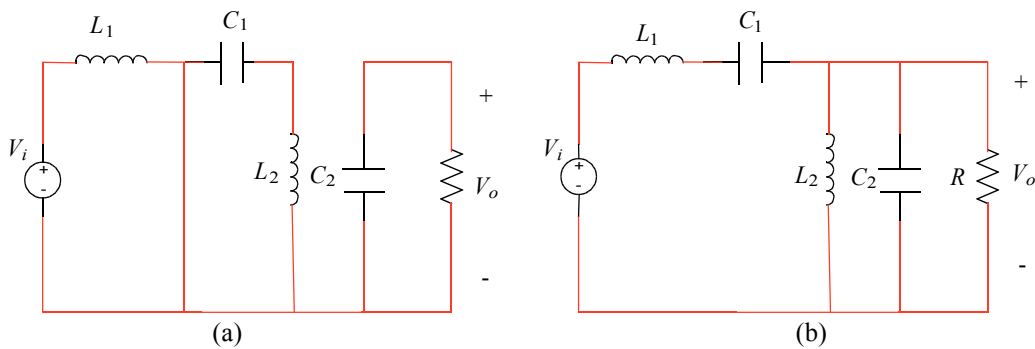


Figura 4.17: Esquema de conexión del convertidor Sepic en periodo de conducción (a) y no conducción (b).

La placa de control que se encarga de generar el ciclo de servicio necesario para que la salida del convertidor se mantenga a 12 V independientemente de la demanda de la carga es similar a la que se ha empleado para el convertidor Boost, con la diferencia de que ahora la referencia es de 12 V.

Cuando el interruptor S está cerrado (estado de conducción), la bobina L_1 almacena la energía suministrada por la fuente. Al mismo tiempo, la bobina L_2 almacena energía debido a la tensión en el condensador C_1 . El diodo D queda polarizado inversamente debido a la tensión en C_1 y C_2 . La carga se alimenta a través del condensador C_2 a la tensión de salida V_o . El rizado de corriente en la bobina L_1 viene expresado por (4.2):

$$\Delta I_{L_1} = I_{L_1}(T_{on}) - I_{L_1}(0) = \int_0^{T_{on}} (V_i / L_1) dt = \frac{V_i T_{on}}{L_1} \quad (4.2)$$

Para conocer el rizado de corriente en la bobina L_2 hay que considerar que la tensión media en el condensador C_1 coincide con el valor de la tensión a la entrada. En consecuencia, el rizado de corriente en la bobina L_2 se conoce a partir de (4.3):

$$\Delta I_{L_2} = I_{L_2}(T_{on}) - I_{L_2}(0) = \int_0^{T_{on}} (V_i / L_2) dt = \frac{V_i T_{on}}{L_2} \quad (4.3)$$

Para conocer el rizado de tensión en el condensador C_1 se necesita el valor de la corriente del condensador en alguno de los dos periodos. Por ejemplo, durante el periodo de conducción, la corriente en el condensador C_1 coincide con la corriente en la bobina L_2 . A su vez, la corriente en la bobina L_2 en el periodo de conducción, depende linealmente con el tiempo según (4.3). Entonces, la ecuación que permite conocer el rizado de tensión en el condensador C_1 es (4.4):

$$\Delta V_{C_1} = V_{C_1}(T_{on}) - V_{C_1}(0) = \int_0^{T_{on}} (i_{L_2} / C_1) dt = \int_0^{T_{on}} (V_i / C_1 L_2) t dt = \frac{V_i T_{on}^2}{2 C_1 L_2} \quad (4.4)$$

El rizado de tensión en el condensador C_2 , de la misma forma que sucede con el convertidor Boost, depende directamente de la tensión en la salida y del valor de la resistencia de carga, de acuerdo a (4.5). En el periodo en el que el transistor está conduciendo, la corriente media por la carga es igual a la corriente de descarga del condensador:

$$\Delta V_{C_2} = V_{C_2}(T_{on}) - V_{C_2}(0) = \int_0^{T_{on}} (i_{C_2} / C_2) dt = \int_0^{T_{on}} (V_o / R C_2) dt = \frac{V_o T_{on}}{R C_2} \quad (4.5)$$

A partir de las ecuaciones (4.2) y (4.3), los valores de las bobinas se calculan para no superar el 10% de rizado en corriente respecto a los 5 A aproximadamente que deben estar disponibles a la entrada del convertidor Sepic cuando trabaja a la potencia máxima (250 W). A partir de las ecuaciones (4.4) y (4.5), los valores de los condensadores se calculan para garantizar que el rizado en tensión sea inferior al 3% respecto a los 12 V que se exigen a la salida del convertidor. Por las mismas razones que en el diseño del convertidor Boost, la frecuencia de conmutación del convertidor se fija a 30 kHz.

El esquema eléctrico correspondiente a la placa de control de tensión del convertidor Sepic es similar al de la Figura 4.5. Las Figuras 4.18 y 4.19 muestran una fotografía del convertidor Sepic y su placa de control asociada. Los parámetros eléctricos de los componentes del convertidor se especifican en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Parámetros eléctricos de los componentes del convertidor Sepic.

Componente	Tipo	Características
IGBT-canal N	G40N60B3	600 V, 70 A, 1.4V a 25°C
Diodo	MBR6045WT	3 45V-60A, 0.75V a 25°C
Bobina (L1)	CH 820045	4 820μH , 4.5A 110 mΩ
Bobina (L2)	CH 220045	4 220μH, 4.5A 42 mΩ
Condensador (C1)	TSHA 400V-330uF	330μF, 400V
Condensador (C2)	TSHA 400V-470uF	470μF, 400V

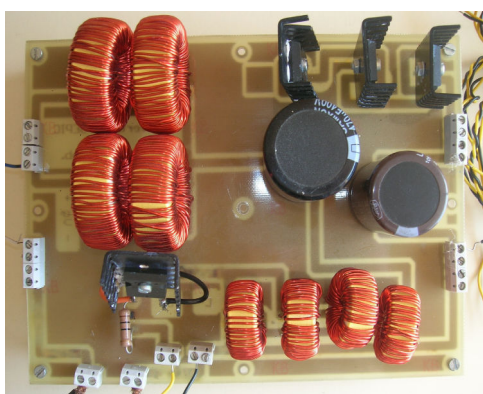


Figura 4.18: Fotografía del convertidor Sepic construido.

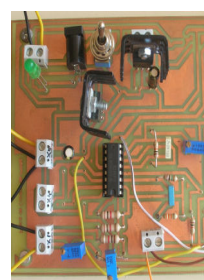


Figura 4.19: Fotografía de la placa de control de tensión por PWM del convertidor Sepic.

- **Convertidor Buck:** Esta topología se caracteriza por su simplicidad ya que requiere un número menor de componentes. La principal desventaja de este convertidor es que la corriente de entrada en el mismo es siempre discontinua. Esto se debe a que el transistor está situado en serie con la fuente de entrada, Figura 4.20; con lo cual se genera una mayor cantidad de armónicos en la corriente de entrada, la que suministra la fuente, y se produce un rizado alto en corriente y problemas significativos de ruido. Además, el convertidor Buck presenta más dificultades a la hora de implementar el disparo del transistor porque el terminal de fuente no esta conectado a masa.

El dimensionado de los componentes de este convertidor se realiza en base a las ecuaciones que relacionan los rizados permitidos en la tensión y corriente con el valor de la bobina y el condensador. Estas ecuaciones se obtienen a partir del estudio del comportamiento del convertidor durante los periodos de conducción, Figura 4.21(a), y no conducción, Figura 4.21(b).

El circuito de control que se encarga de generar el ciclo de servicio necesario para que la salida del convertidor se mantenga a 12 V independientemente de la demanda de la carga, es muy similar al utilizado para los convertidores anteriores con una diferencia: la salida PWM del IC TL494 debe estar ahora referenciada a un nivel de tensión flotante, de forma que la señal PWM modificada pueda atacar los terminales de puerta y de fuente del transistor.

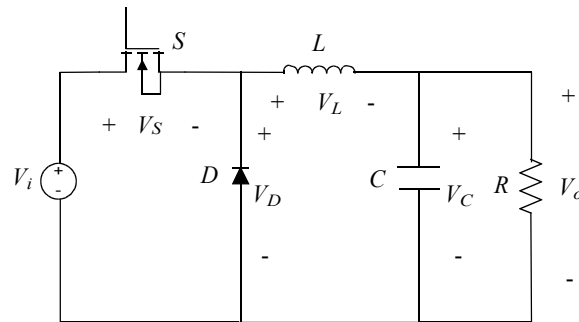


Figura 4.20: Esquema eléctrico de un convertidor Buck sin pérdidas.

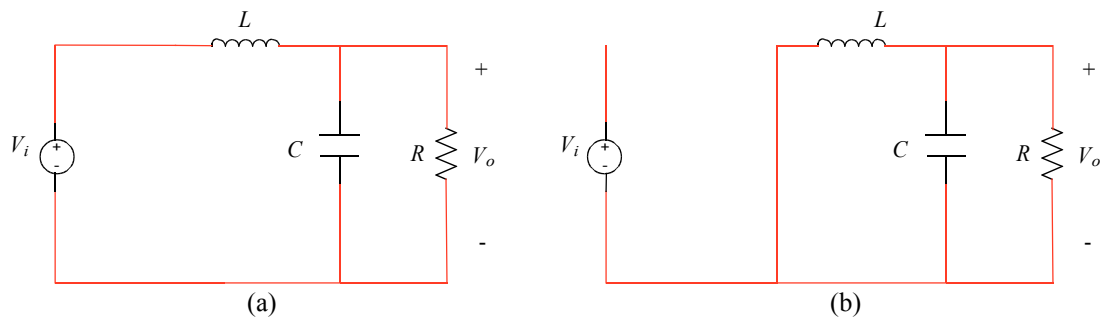


Figura 4.21: Esquema de conexión del convertidor Buck en periodo de conducción (a) y no conducción (b).

Respecto del funcionamiento del convertidor Buck (ver Figuras 4.20 y 4.21), cuando el interruptor S está cerrado (estado de conducción), la bobina L almacena la energía suministrada por la fuente. El diodo queda polarizado inversamente debido a la tensión de entrada V_i . La carga se alimenta a través del condensador C a la tensión de salida V_o . El rizado de corriente en la bobina L viene expresado por (4.6):

$$\Delta I_L = I_L(T_{on}) - I_L(0) = \int_0^{T_{on}} ((V_i - V_o)/L) dt = \frac{(V_i - V_o)T_{on}}{L} \quad (4.6)$$

A partir de la ecuación (4.6), el valor de la bobina se calcula para no superar el 10% del rizado en corriente.

Para conocer el rizado de tensión en el condensador C se deben considerar las gráficas que reflejan el comportamiento de la corriente por la bobina y la tensión en el condensador (Figura 4.22), y las ecuaciones que relacionan la capacidad con la carga y la tensión del condensador, (4.7) y (4.8). La variación de la carga en el condensador equivale al área encerrada por la corriente suministrada por la bobina durante un semiperiodo.

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V_C} \quad (4.7)$$

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \frac{T}{2} \frac{\Delta I_L}{2} \quad (4.8)$$

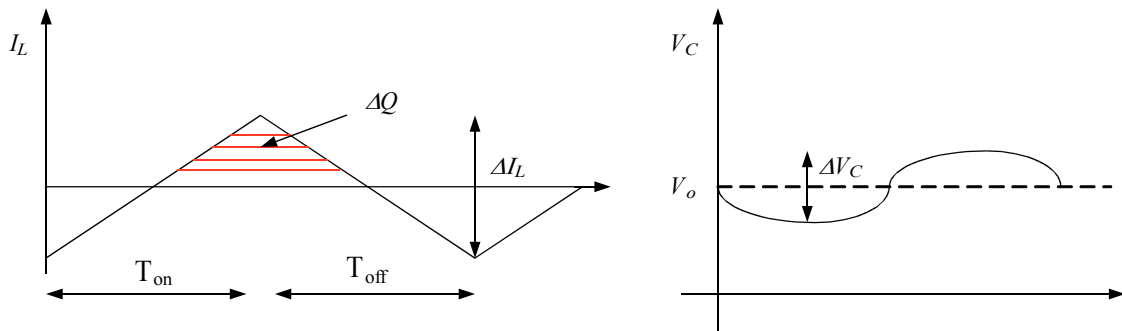


Figura 4.22: Evolución de la corriente por la bobina y la tensión en el condensador del convertidor Buck.

A su vez, el rizado en la corriente ΔI_L ya se conoce a partir (4.6). Luego el rizado de tensión en el condensador viene expresado por la ecuación (4.9):

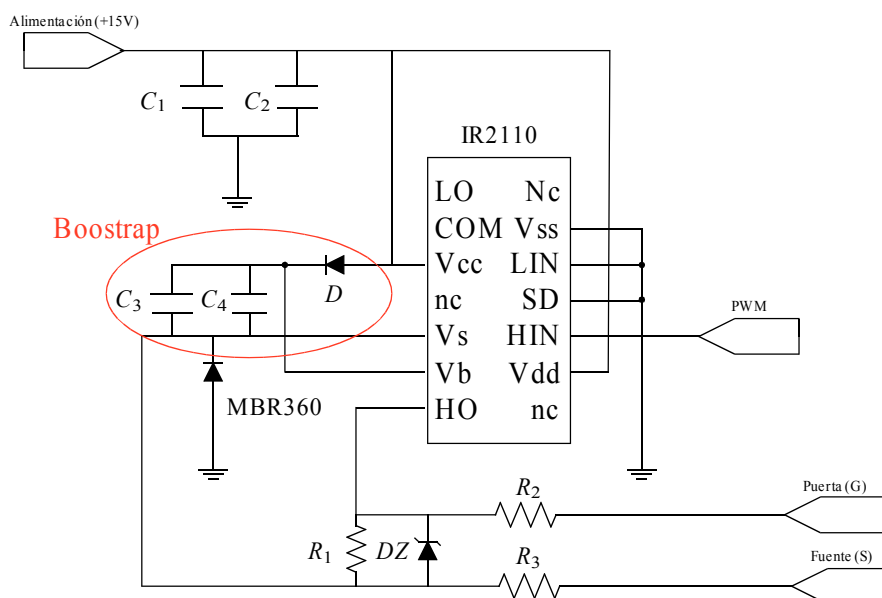
$$\Delta V_C = \frac{(V_i - V_o)DT^2}{8LC} \quad (4.9)$$

A partir de la ecuación (4.9), el valor del condensador se calcula para garantizar que el rizado en tensión sea inferior al 3%. La frecuencia de conmutación del convertidor se fija, por las mismas razones que en el diseño de los convertidores anteriores, a 30 kHz. Los parámetros eléctricos de los componentes del convertidor se especifican en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Parámetros eléctricos de los componentes del convertidor Buck.

Componente	Tipo	Características
Mosfet-canal N	STP80NF10	100V-80A, 1.3V a 25°C
Diodo	MBR6045WT	2 45V-60A, 0.75V a 25°C
Bobina	PCV-2-568-08	5 568μH, 8A, 90mΩ
Condensador	YXF 63V-1000 μF	2 1000μF, 63V

El esquema eléctrico de control de tensión del convertidor es similar al de la Figura 4.5. A este esquema se le añade una etapa de acondicionamiento de la señal PWM para que pueda atacar el terminal de fuente flotante del transistor del convertidor Buck. Para ello se utiliza el driver IC IR2110. Este circuito integrado permite generar, en base a una señal PWM a su entrada, la misma señal PWM pero referenciada a un punto de tensión flotante. De esta forma es posible conseguir la conmutación del transistor. La Figura 4.23 muestra el esquema de conexión de la señal PWM generada por el controlador (Figura 4.5) y el driver IR2110. Para que el transistor pueda realizar la conmutación, se debe suministrar a su terminal de puerta la corriente necesaria. Para realizar dicho propósito, se conecta al integrado un circuito exterior de activación formado por el diodo D y los condensador C_3 y C_4 denominado *Bootstrap*.

**Figura 4.23:** Esquema de conexión del driver IR2110 para generar la señal PWM de conmutación del convertidor Buck.

El diodo D utilizado es el diodo 1N4148 por su bajo coste y su rápida respuesta a la conmutación. El condensador formado por C_3 y C_4 se elige en base a la ecuación (4.10):

$$C_{BS} = \frac{Q_G}{V_{BS2} - V_{BS1}} \quad (4.10)$$

Donde Q_G es la carga transferida a la puerta del transistor durante la activación. Consultando la hoja de características que facilita el fabricante del transistor STP80NF10, el valor máximo de Q_G es 189 nC. V_{BS2} es la tensión del condensador de activación (*bootstrap*) justo después del refresco (12 V) y V_{BS1} es la tensión del condensador de activación inmediatamente después de la inicialización (11 V). En consecuencia, el valor que resulta para C_{BS} es 189 nF. Para la implementación física se han elegido dos condensadores (C_3 y C_4) de 100 nF cada uno.

Las resistencias R_2 y R_3 atenúan el ruido de las transiciones de la señal de salida; para ello deben ser de un valor pequeño para que no atenúen en exceso la señal, del orden de 8 ó 12 ohmios. El diodo zener DZ y la resistencia en paralelo R_1 sirven para adaptar la señal a las exigencias del transistor. En este caso se ha optado por un diodo zener de 15 V. El diodo MBR360 es un elemento de protección del driver en el caso de que se produzca retorno de corriente.

Las Figuras 4.24 y 4.25 muestran, respectivamente, una fotografía del convertidor Buck y su placa de control asociada.

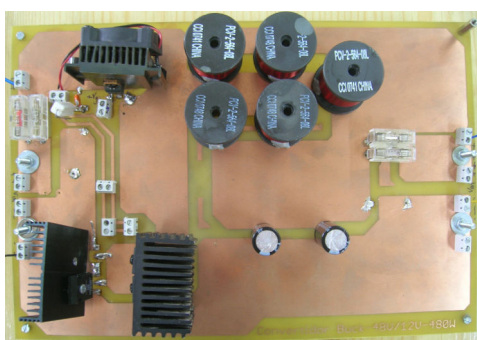


Figura 4.24: Fotografía del convertidor Buck construido.

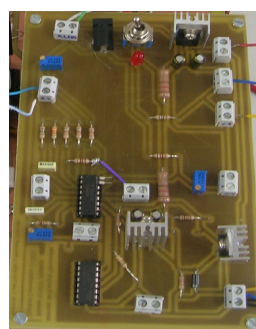


Figura 4.25: Fotografía de la placa de control en tensión para el convertidor Buck.

4.3 Resultados experimentales

En base a la implementación física que se ha realizado teniendo en cuenta las consideraciones de diseño descritas en la sección anterior, los resultados experimentales están destinados a reflejar el comportamiento real de los componentes del sistema, y especialmente a demostrar que se cumplen los requisitos de niveles de tensión exigidos en los distintos puntos de conexión del esquema mostrado en la Figura 4.1. Para ello esta sección se ha dividido en dos apartados. El primero muestra los resultados experimentales obtenidos al conectar el banco de cargas al bus DC de 48 V. En este caso se van a presentar los resultados que se obtienen de tres conexiones distintas: la primera, cuando la potencia demandada por el banco de cargas es suministrada únicamente por el banco de baterías, la segunda cuando el banco de cargas es alimentado únicamente por el sistema de pila de combustible, y la tercera cuando el sistema de pila de combustible y el banco de baterías están trabajando simultáneamente para alimentar al banco de cargas. Como se verá, el sistema de pila de combustible mantiene los 48 V en el bus incluso cuando se producen cambios bruscos en la demanda de potencia. También se comprobará cómo el sistema de baterías ayuda al sistema de pila de combustible a suministrar la corriente demandada por la carga, especialmente en el instante en que tiene lugar un cambio en la demanda, donde la dinámica lenta de la pila de combustible limita sus posibilidades de seguir instantáneamente a los cambios en la carga.

El segundo grupo de pruebas experimentales consiste en conectar el banco de cargas a la salida DC de 12 V. Como se ha comentado en la sección anterior, se han utilizado dos topologías diferentes de convertidor para obtener la salida DC de 12 V. Los resultados experimentales mostrarán cómo con ambas topologías se consiguen los requisitos de niveles de tensión exigidos. Las diferencias entre ambos convertidores estriba en el número de componentes necesarios y en la facilidad en la generación de la señal PWM para cada caso.

4.3.1 Banco de cargas conectado al Bus DC de 48 V

En este caso, el banco de cargas se conecta al bus DC de 48 V. Las dos posibles fuentes que van a inyectar potencia al bus son el sistema de pila de combustible y el banco de baterías.

- **Conexión 1 - Banco de cargas alimentado por el banco de baterías:** La primera conexión que se hace es la más sencilla. Se conecta el banco de cargas al banco de baterías. A

medida que se vayan activando los distintos relés, como los grupos de resistencia están conectados en paralelo, la resistencia equivalente R_{eq} disminuye y en consecuencia, la potencia demandada al banco de baterías es mayor: $P = (48 \text{ V})^2 / R_{eq}$. La Figura 4.26 muestra la corriente suministrada por el banco de baterías cuando se van abriendo secuencialmente los relés desde el 1 hasta el 7 (ver Figura 4.12). Basta con aplicar la ley de Ohm para comprobar que la tensión en el bus se mantiene constante e igual a 48 V. Esta primera prueba permite garantizar la capacidad de suministro energético de las baterías y el correcto funcionamiento del banco de cargas construido.

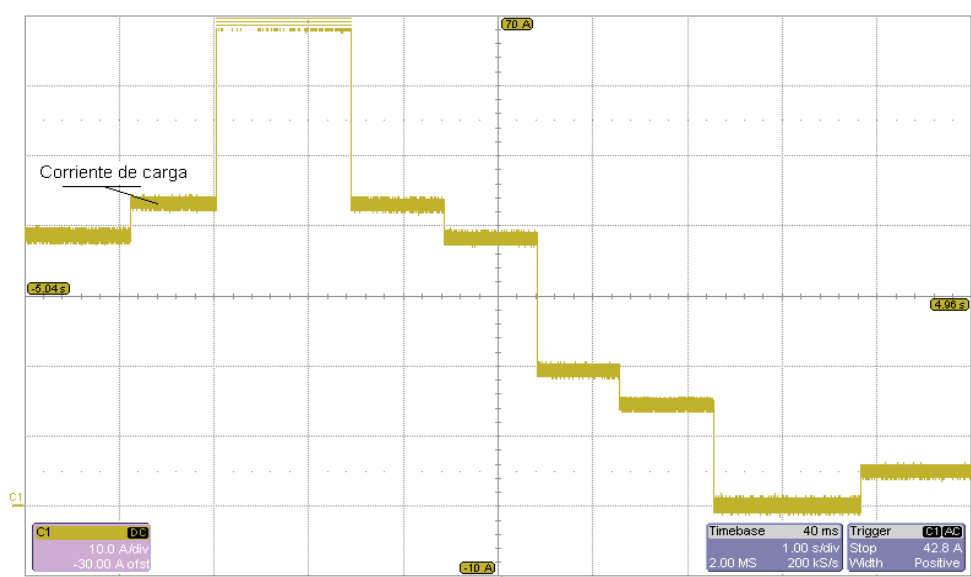


Figura 4.26: Resultados experimentales cuando el banco de cargas es alimentado por el banco de baterías: Corriente de carga (Canal C1: 10 A/div, 500 ms/div). Osciloscopio: LeCroy 500 MHz.

- Conexión 2 - Banco de cargas alimentado por el sistema de pila de combustible:

Cuando el banco de cargas se conecta a los terminales de uno de los sistemas de pila de combustible, la tensión del bus es controlada por la placa de control del convertidor Boost. El sistema de pila de combustible, por sí solo, tiene que suministrar la potencia demandada por la carga. El valor máximo de potencia de carga se fija en 500 W, esto es, la pila de combustible va a trabajar a media carga aproximadamente. En cualquier punto de operación, la resistencia equivalente que existe entre los extremos de la pila de combustible, es decir, la resistencia a la entrada del convertidor Boost, depende de la resistencia de carga y del ciclo de servicio del

convertidor, sección 3.2, ecuación (3.28). A su vez, el ciclo de servicio del convertidor depende de la diferencia que existe entre el valor real de la tensión en el bus y la referencia de 48 V. Con esta conexión se pretende ver que el comportamiento que se había previsto en la sección 3.1, en base al modelo teórico desarrollado para la pila de combustible, se corresponde con su comportamiento real. Este modelo permite conocer el punto de operación de la pila de combustible en régimen estacionario (valores de tensión-corriente sobre la curva de polarización) y transitorio (retardo de 0,5 segundos como consecuencia del no inmediato suministro de flujo de aire). Además, se pretende comprobar que la placa de control del convertidor Boost cumple el objetivo de garantizar los 48 V de tensión en el bus, independientemente de los cambios en la demanda de potencia. La Figura 4.27(a) muestra la respuesta de la pila de combustible cuando pasa de trabajar desde vacío hasta media carga (tensión y corriente de pila de combustible 32 V - 15 A y retardo de 0,5 segundos). En la Figura 4.27(b) se comprueba que a pesar de los cambios en la carga, la tensión en el bus permanece fija en 48 V.

- **Conexión 3 - Banco de cargas alimentado por el sistema de pila de combustible + banco de baterías:** La tercera y última prueba que se hace dentro de este primer grupo corresponde a la conexión del banco de cargas con el bus DC de 48 V, a través del cual el sistema de pila de combustible y el banco de baterías van a suministrar, de forma conjunta, potencia a la carga. La Figura 4.28 muestra un esquema ilustrativo para esta tercera conexión. En este caso, teniendo en cuenta que están conectadas dos de las tres fuentes de potencia del sistema completo, el perfil de carga demandado será similar al de la Figura 4.2 pero escalado⁴³ (ver Figura 4.29). Se insiste en que el principal objetivo de esta sección no es hacer un reparto de potencia entre las distintas fuentes⁴⁴, sino demostrar que se garantizan los niveles de tensión exigidos en los distintos puntos de interconexión y el correcto funcionamiento de las diferentes fuentes de potencia trabajando simultáneamente.

Los resultados experimentales de esta tercera conexión muestran lo siguiente (Figura 4.30): Cuando la carga demanda baja potencia (P_{min} en la Figura 4.29), la corriente de carga es de 5 A, la tensión en el bus DC está fijada a 48 V y la tensión entre los terminales del módulo de pila de

⁴³ La selección de cargas en el banco proporciona una demanda de potencia de 1440 W.

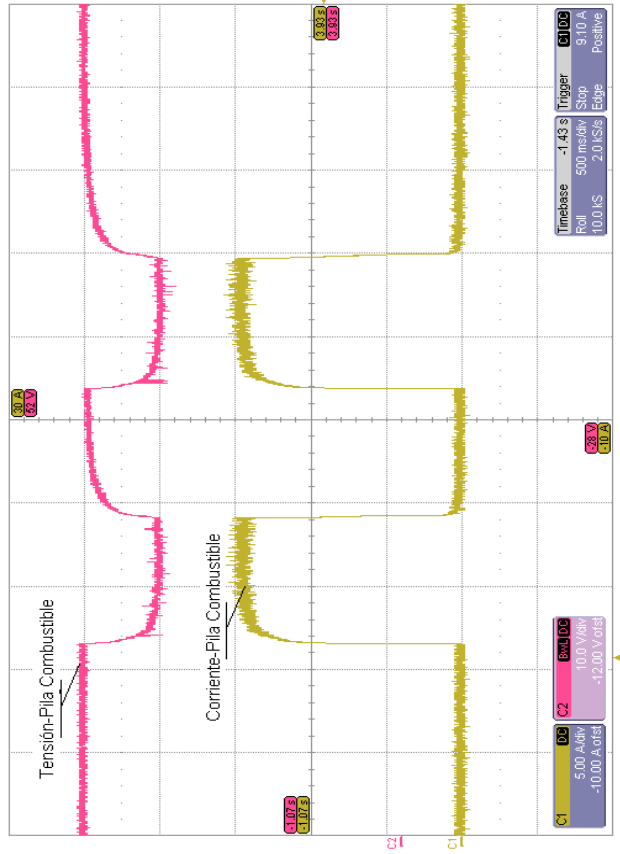
⁴⁴ El capítulo 5 estará centrado en el estudio de las técnicas de control en corriente que permiten hacer un reparto de potencia en sistemas integrados por varias fuentes de energía.

combustible es de 34,6 V. Esto implica que la relación V_i/V_o en el convertidor es $34,6 \text{ V}/48 \text{ V} = 0,72$, lo cual, según la ecuación (3.24), indica que el convertidor está trabajando al ciclo de servicio $D = 0,28$. Considerando que el convertidor no tiene pérdidas, la relación entre las corrientes de entrada y salida del convertidor será análoga a las tensiones, sólo que invertida; esto es $I_o/I_i = 0,72$. Por tanto, a partir de la ecuación (3.26) se tiene que $I_i = 6,94 \text{ A}$. Objetivamente, al tratarse de un sistema real, el convertidor tendrá pérdidas, más aún en este caso, cuando está trabajando a una potencia muy inferior de su valor nominal de 1,2 kW. Por ello, la corriente real de entrada medida es de 7,5 A, lo cual proporciona un rendimiento para el convertidor de $\eta = 0,92$. El par de valores (34,6 V, 7,5 A) llevados a la Figura 3.3 permite comprobar que la potencia de trabajo de la pila de combustible está en el entorno de los 240 W (según la curva en trazo rojo continuo), y la tensión (trazo azul continuo) en el entorno de los 34,6 V⁴⁵. Se comprueba pues, experimentalmente, que el sistema funciona tal como se había previsto en el diseño. Esto es, durante el periodo en el que la potencia demandada por la carga corresponde al valor mínimo, la pila de combustible es la única fuente que alimenta a la carga.

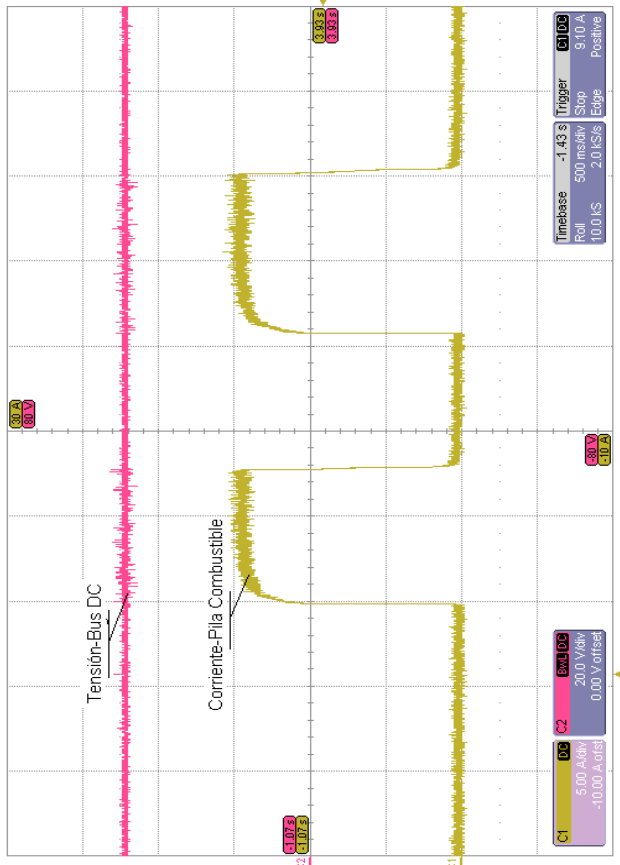
Cuando el valor de potencia demandada por la carga alcanza su valor máximo (P_{max} en la Figura 4.29), la corriente de la carga es de 30 A, la tensión en el bus es mantenida en 48 V, la tensión en la pila de combustible es de 26,5 V, la corriente de salida de la pila de combustible es de 46 A y la corriente de salida del convertidor es de 24,5 A. Por tanto, el rendimiento del convertidor es ahora de $\eta = 0,96$ y la potencia disponible a su salida es de 1176 W. El par de valores (26,5 V, 46 A) permite comprobar en la Figura 3.3 que la pila de combustible está trabajando a máxima potencia.. El banco de baterías es el encargado de suministrar la diferencia entre la potencia máxima de la carga y la potencia entregada por la pila de combustible. Esto es, el banco de baterías suministra 264 W.

Además, el banco de baterías también es el encargado de entregar la potencia que demanda la carga en el mismo instante en que tiene lugar el cambio, ya que la pila de combustible tiene una respuesta dinámica lenta. Este test demuestra el adecuado funcionamiento del sistema híbrido, en el que la batería y la pila de combustible trabajan de forma conjunta para conseguir unos objetivos que ninguno de los elementos puede alcanzar por separado.

⁴⁵ La pila de combustible, con las horas de funcionamiento, sufre una degradación que provoca un pequeño desplazamiento de su curva de polarización inicial al salir de fábrica.



(a)



(b)

Figura 4.27: Resultados experimentales cuando el banco de cargas es alimentado exclusivamente por el sistema de Pila de Combustible: Corriente-Pila de Combustible (Canal 1: 5 A/div, 500 ms/div), Tensión-Pila de combustible (Canal 2: 10 V/div, 500 ms/div), Tensión-Bus DC (Canal C2: 10 V/div, 500 ms/div). Osciloscopio LeCroy 500 MHz.

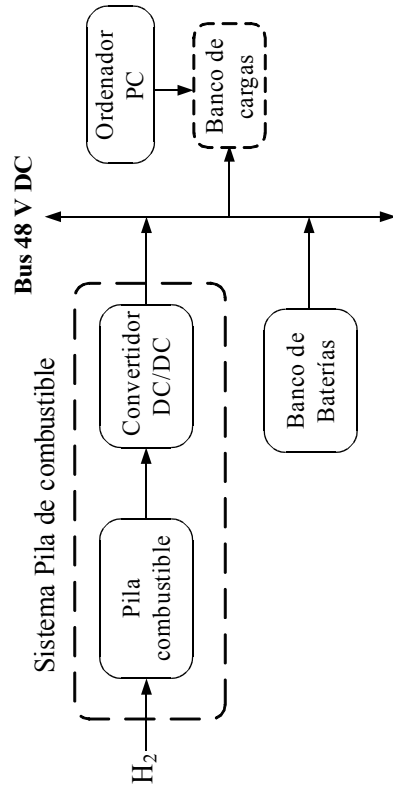


Figura 4.28: Esquema ilustrativo para la conexión 3.

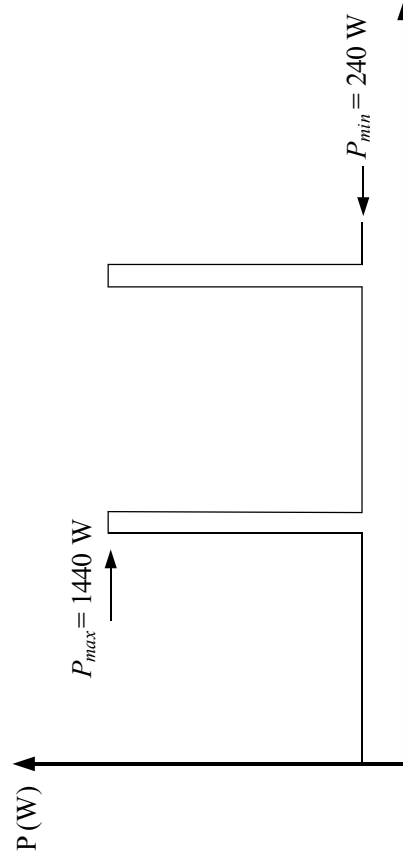


Figura 4.29: Perfil de carga demandado para la conexión 3.

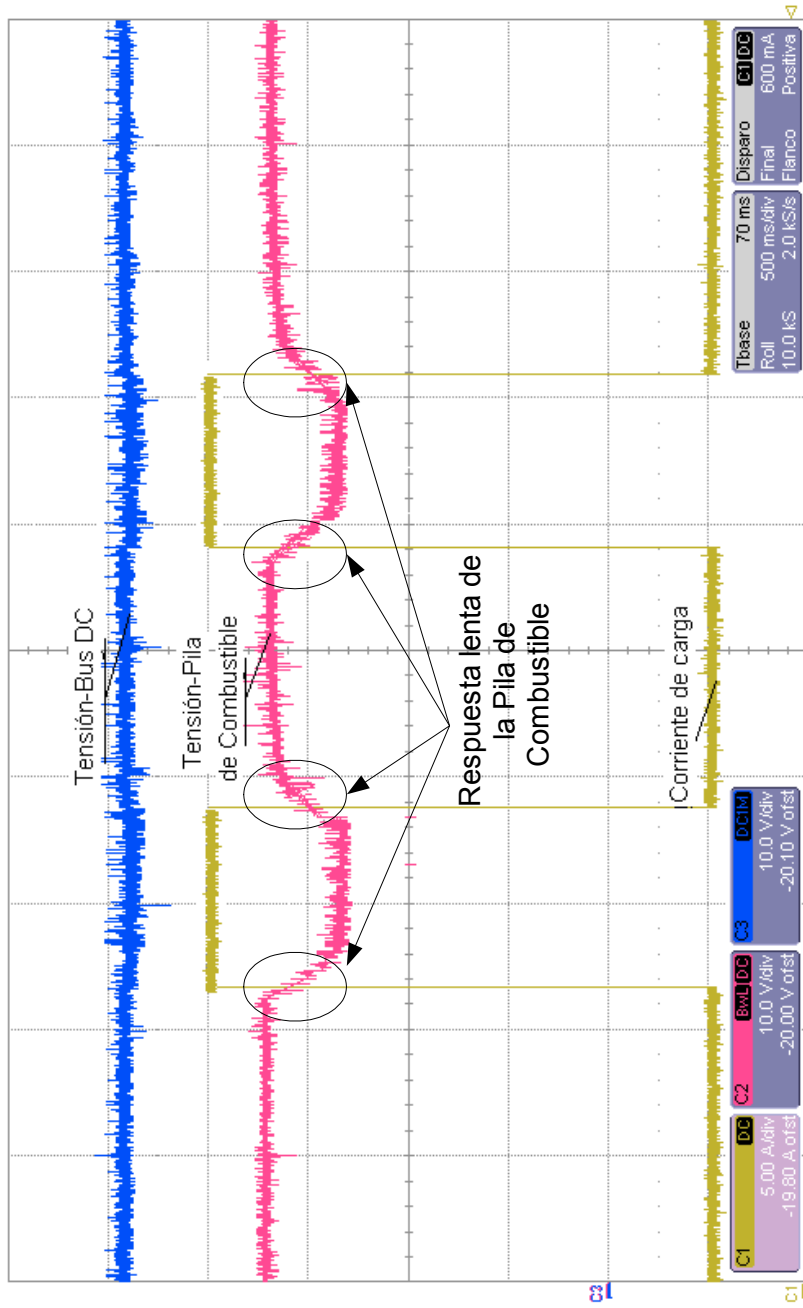


Figura 4.30: Resultados experimentales cuando el banco de cargas es alimentado por pila de combustible + banco de baterías: Corriente de carga (Canal C1: 5 A/div, 500 ms/div), Tensión-Pila de Combustible (Canal C2: 10 V/div, 500 ms/div), Tensión-Bus DC (Canal C3: 10 V/div, 500 ms/div). Osciloscopio: LeCroy 500 MHz.

4.3.2 Banco de cargas conectado a la salida de 12 V-DC

En este caso, el banco de cargas se conecta a la salida DC de 12 V. Como ya se ha comentado anteriormente, los resultados experimentales se han obtenido en base a dos topologías reductoras (Sepic y Buck). Dado el bajo nivel de tensión en la salida DC y con objeto de trabajar con niveles de corriente seguros, las pruebas experimentales se han realizado seleccionando niveles de potencia no superiores a 250 W. En consecuencia, la pila de combustible es la única fuente que alimenta a la carga. La Figura 4.31 muestra el esquema de conexión considerado para este segundo grupo de resultados experimentales.

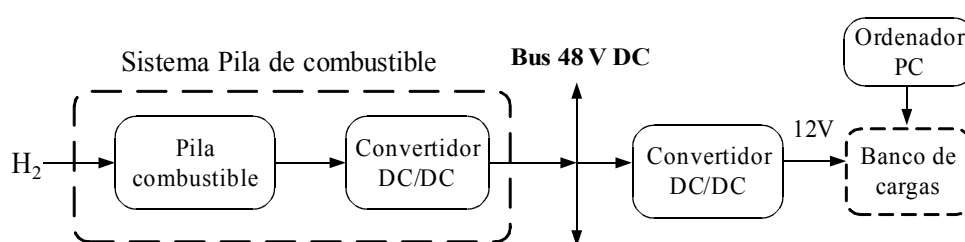


Figura 4.31: Esquema de conexión del banco de cargas a la salida de 12 V-DC.

- **Conexión 4 - Banco de cargas conectado a la salida 12 V-DC mediante convertidor Sepic:** En este caso, cuando la demanda de potencia de la carga alcanza los 250 W, la corriente que debe entregar el convertidor es de 20 A, a la vez que la tarjeta de control debe ajustar el ciclo de servicio del mismo para mantener la tensión a la salida en 12 V. La Figura 4.32 muestra los resultados experimentales obtenidos para esta conexión. Se puede comprobar que la tensión en la bobina L_1 (Figura 4.16) alcanza los 48 V cuando el transistor está conduciendo y que la tensión en la bobina L_2 alcanza los 12 V cuando el transistor no conduce. Esto demuestra el correcto funcionamiento del convertidor y de la placa de control que lo gobierna.

- **Conexión 5 - Banco de cargas conectado a la salida 12 V-DC mediante convertidor Buck:** En esta última conexión la corriente de carga no alcanza valores elevados (1 A y 3,2 A). Se comprueba que con el convertidor Buck se alcanzan los mismos requisitos que con el convertidor Sepic, Figuras 4.33 y 4.34. La tarjeta de control garantiza los 12 V a la salida del convertidor Buck. La tensión en la pila de combustible no sufre grandes variaciones por el reducido escalón en la corriente, y la tensión en el bus DC queda fijada al valor de 48V.

Como ya se ha comentado, la topología Sepic supone un aumento del coste de implementación del convertidor. Bajo las mismas restricciones de rizado en tensión y corriente y empleando los mismos componentes, el convertidor Sepic necesita una bobina y un condensador más. Pero para esta aplicación, el aumento de coste no es desproporcionado, ya que los niveles de potencia que deben manejarse son relativamente bajos (no superiores a 250 W), por lo que el coste de los componentes no es elevado.

Por otra parte, de los resultados obtenidos de la conexión 4 y 5 se observa que el rizado de corriente a la salida del convertidor es menor en el caso del convertidor Sepic. Además, la presencia de un filtro a la entrada del convertidor Sepic formado por una bobina y un condensador (ver Figura 4.16) reduce el rizado en la corriente de entrada, es decir, el bus DC de 48 V se mantiene más estable y se evita que el ruido en corriente se pueda extender hacia las fuentes de potencia del sistema o la rama de AC. Por último, el convertidor Sepic, por su carácter reductor-elevador, añade mayor versatilidad al sistema, con lo cual podría cambiarse la tensión DC de salida a un valor superior a 48 V sin necesidad de cambiar de convertidor.

En virtud del análisis y las pruebas experimentales realizadas, se opta por emplear el convertidor Sepic para configurar la salida 12 V-DC del sistema.

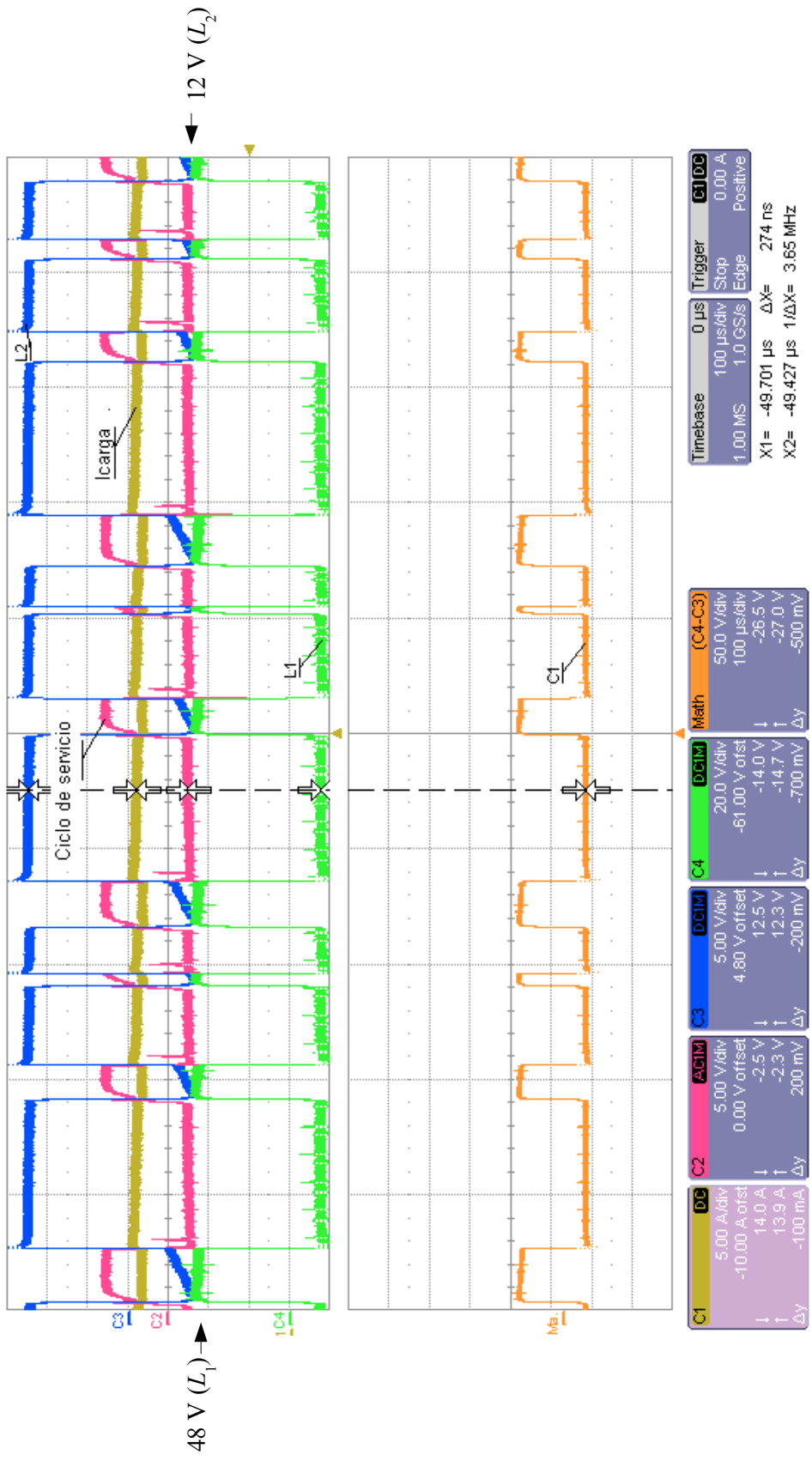


Figura 4.32: Resultados experimentales cuando el banco de cargas se conecta a la salida 12 V-DC mediante convertidor Sepic: Corriente de carga (Canal C1: 5 A/div, 500 ms/div), Ciclo de servicio (Canal C2: 5 V/div, 500 ms/div), Tensión (L_1) (Canal C4: 20 V/div, 500 ms/div), Tensión (L_2) (Canal C3: 5 V/div, 500 ms/div), Tensión (C1) (Canal C4-C3: 50 A/div, 500 ms/div). Osciloscopio LeCroy 500 MHz.

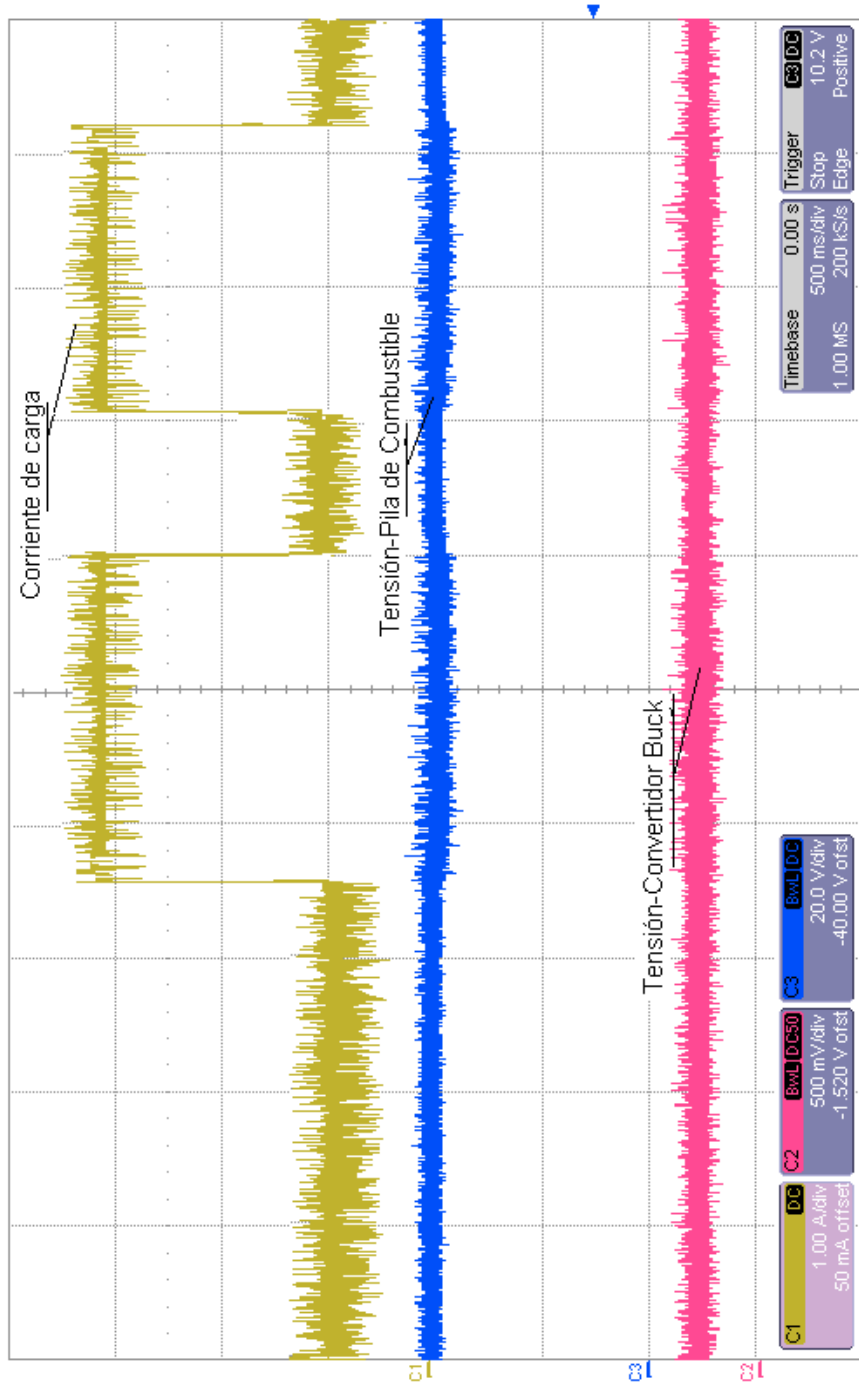


Figura 4.33: Resultados experimentales cuando el banco de cargas se conecta a la salida 12 V-DC mediante el convertidor Buck: Corriente de carga (Canal C1: 1 A/div, 500 ms/div), Tensión-Convertidor Buck (Canal C2: 500 mV/div, 500 ms/div, sonda x20), Tensión-Pila de Combustible (Canal C3: 20 V/div, 500 ms/div). Osciloscopio LeCroy 500 MHz.

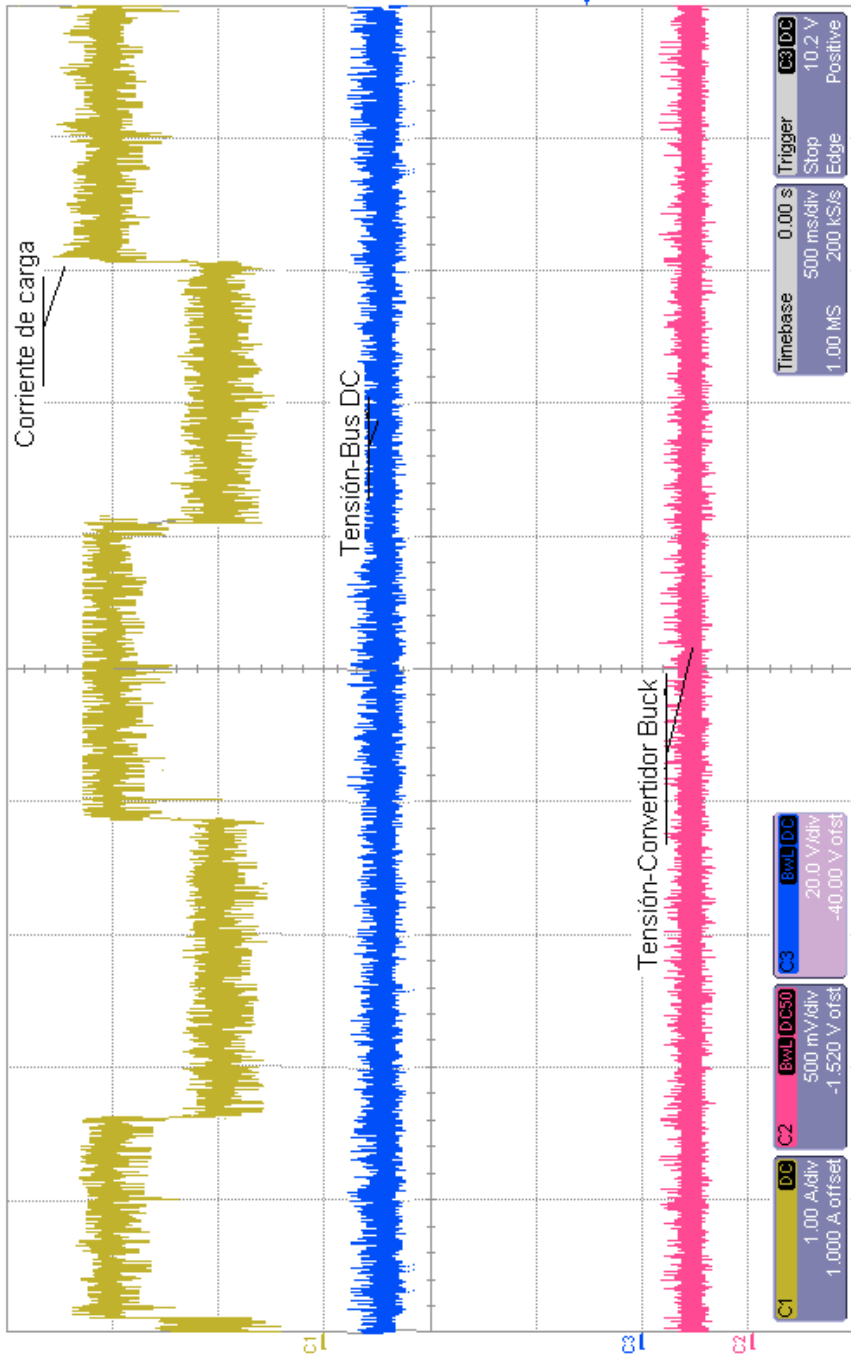


Figura 4.34: Resultados experimentales cuando el banco de cargas se conecta a la salida 12 V-DC mediante el convertidor Buck: Corriente de carga (Canal C1: 1 A/div, 500 ms/div), Tensión-Convertidor Buck (Canal C2: 500 mV/div, 500 ms/div, sonda x20), Tensión-Bus DC (Canal C3: 20 V/div, 500 ms/div). Osciloscopio LeCroy 500 MHz.

4.4 Conclusiones y comentarios bibliográficos

Este capítulo está caracterizado por su alto contenido experimental. La implementación real de un sistema híbrido de pila de combustible conlleva realizar un estudio minucioso de todos los elementos que componen el sistema y la interrelación entre ellos. Además, hay que tener en cuenta que los sistemas de pila de combustible no tienen aún una gran implantación en el mercado y, por tanto, la disponibilidad comercial es limitada. Por otro lado, las características físicas y de funcionamiento de este tipo de sistemas exigen unos requerimientos adicionales en los sistemas de acondicionamiento de potencia y fuentes auxiliares.

Quizás, el mayor valor que aportan los sistemas de pila de combustible es su efecto inocuo sobre el medio ambiente. Las referencias [117] y [118] pueden ser consultadas para tomar conciencia de los efectos nocivos de las emisiones de CO₂ derivadas de los sistemas de generación de energía basados en fuentes de origen contaminante y no renovable. El efecto invernadero, el calentamiento global, la dependencia energética de otros países, muchos de ellos política y socialmente inestables y el agotamiento de los recursos energéticos de origen fósil, son algunas de las preocupantes razones por las que la apuesta de sectores como la industria y el transporte por las fuentes de energía no contaminantes empieza a ser clara y definida.

La referencia [119] trata el concepto de hibridación en sistemas de pilas de combustible. Debido a las limitaciones de las pilas de combustible (no pueden suministrar instantáneamente la potencia demandada por la carga), es necesario hibridarlas con una fuente de potencia (por ejemplo un banco de baterías o de ultracondensadores). De ahí la concepción del capítulo como sistema híbrido. Realmente, a día de hoy las pilas de combustible se están hibridando también, dependiendo de las aplicaciones y de la disponibilidad de fuentes de energía renovable, con sistemas fotovoltaicos, eólicos, etc.

El testeo del prototipo experimental desarrollado en este capítulo requiere disponer de una carga variable que permita configurar todos los escenarios de demanda. Las referencias [120] a [127] hacen un recorrido por las diferentes propuestas que al respecto hacen los últimos trabajos bibliográficos publicados. Las referencias [121] a [123] recogen una de las soluciones caracterizadas por su bajo coste, consistente en la implementación de una carga variable basada en el control del ciclo de servicio de un convertidor conectado a la pila de combustible. Sin embargo, como se ha demostrado, para el caso concreto del sistema tratado en este capítulo, esta

solución no es útil.

Una solución alternativa podría ser el uso de cargas electrónicas comerciales, las cuales se analizan en profundidad en [125] a [127]. El principal inconveniente es su elevado coste y el reducido rango de operación que poseen. Para un sistema de pila de combustible diseñado para suministrar niveles de potencia de hasta 5 kW como el de este capítulo, serían necesarios varios módulos de cargas electrónicas comerciales de los que han aparecido recientemente específicos para pilas de combustible. En consecuencia se ha optado por la construcción de un banco de cargas controlable desde un PC capaz de alcanzar diferentes niveles de potencia. Esto ha permitido que en el sistema de generación eléctrica construido se pueda alternar el funcionamiento de las distintas fuentes de potencia, así como hacerlas trabajar de forma conjunta.

Las referencias [128] a [134] enseñan las diferentes topologías asociadas a sistemas híbridos de pilas de combustible. La configuración del sistema implementado, como ya se estudió en el Capítulo 2, sección 2.3, corresponde al esquema eléctrico característico de un sistema híbrido de pila de combustible que alimenta una carga aislada, como es precisamente este caso.

La referencia [136] es un excelente libro de consulta para entender las tareas de diseño y dimensionamiento de toda la electrónica de potencia descrita y testada en las secciones 4.2 y 4.3.

En la segunda sección de este capítulo se ha hecho hincapié en el perfil de carga, ya que constituye el principal condicionante a la hora de elegir cada una de las fuentes de energía del sistema completo. El valor mínimo del perfil de carga determina el valor de potencia de la pila de combustible por debajo del que, según el fabricante, la pila deja de funcionar de forma eficiente. La potencia media demandada por la carga condiciona el valor mínimo de la potencia nominal de la pila de combustible que facilita el fabricante.

Una vez dimensionados cada uno de los componentes del sistema y construido el prototipo de laboratorio, la tercera sección del capítulo ha estado dedicada a obtener resultados experimentales mediante diferentes conexiones en determinados puntos de interconexión. Así por ejemplo, se ha demostrado que la tensión en el bus DC queda fijada a 48 V, independientemente de la fuente de potencia actuante (sólo pila o pila + banco de baterías) y de la demanda de la carga. De la misma forma, la salida de 12 V-DC también queda fijada para

4.4 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS BIBLIOGRÁFICOS

cualquier condición y con cualquiera de las dos topologías de convertidores reductores implementados (convertidor Sepic y Buck). A este respecto, se ha demostrado por último, de forma experimental, las bondades del convertidor Sepic, respecto del Buck, para esta aplicación.

Capítulo 5. Control en Corriente del Sistema Híbrido de Pila de Combustible

El empleo de sistemas de acondicionamiento de potencia lleva intrínseca la necesidad del control del flujo de energía. Una de las ventajas más significativas de los convertidores conmutados es que soportan acciones de control automatizadas. Esto es esencial para una operación adecuada en la mayoría de los sistemas de electrónica de potencia. Sin control, un convertidor no puede garantizar el correcto funcionamiento de cargas que requieren una regulación muy precisa de la tensión de suministro. El ajuste de la conmutación de los convertidores debe garantizar un funcionamiento adecuado independientemente del punto de operación del convertidor.

El circuito de control del convertidor requiere la medida de tensión y/o corriente en el mismo, de modo que por comparación con valores de referencia, se puedan generar las señales de error a partir de las cuales se conforma la ley de control del convertidor.

Mientras que en el capítulo anterior se estudió e implementó el control en tensión, asegurando con ello los valores establecidos en cada punto de conexión, en este capítulo se aborda el control de corriente. El control de corriente de la pila de combustible es necesario porque permite gestionar la potencia entregada por ésta independientemente de la demanda de la carga. Esto es posible porque el sistema híbrido de pila de combustible objeto de esta Tesis va conectado a un bus DC cuya tensión está fijada por un banco de baterías.

Este capítulo analiza en profundidad el control de corriente de convertidores DC/DC. La primera sección sienta las bases del esquema de control necesario para regular la corriente a la salida del convertidor, y la segunda sección realiza un análisis exhaustivo de todos los métodos de control analógico de corriente de convertidores encontrados en la literatura. Así, se presenta la fundamentación teórica de cada método y se analizan sus prestaciones desde un punto de

vista crítico, ya que el estudio realizado en la segunda sección de este capítulo debe servir de justificación respecto de la decisión a tomar, sobre el control de corriente a desarrollar para el prototipo experimental objeto de esta Tesis.

En la tercera sección se describe y justifica la implementación física de la técnica de control de corriente decidida: *control de corriente media*. Se desarrolla paso a paso toda la circuitería hasta el esquema final del controlador con todos sus componentes comerciales. Por último, una vez realizado el montaje físico del prototipo, se aportan los resultados experimentales obtenidos que acreditan el correcto funcionamiento del mismo, esto es, del sistema híbrido integrado por un sistema de pila de combustible (pila de combustible + convertidor) y un banco de baterías.

La cuarta y última sección recoge las principales conclusiones del capítulo y comenta las ideas fundamentales extraídas de las referencias bibliográficas consultadas.

5.1 Introducción

A menudo, como es el caso de la pila de combustible, la entrada a los convertidores no es regulada, por lo que se hace necesario emplear técnicas de control de convertidores de modo que su salida sí esté regulada. Existen numerosos métodos de control analógico y digital para convertidores DC/DC, muchos de los cuales han sido adoptados por la industria.

De las técnicas de control analógico comúnmente empleadas en etapas de acondicionamiento, cabe distinguir el control en modo tensión y el control en modo corriente. El control en modo tensión (ver Figura 5.1), también llamado control de ciclo de servicio [137], [138], contiene un único lazo de realimentación y ajusta directamente el ciclo de servicio en respuesta a los cambios de la tensión de salida. En el Capítulo 4 se puede consultar un ejemplo de aplicación e implementación de esta técnica de control.

El control en modo corriente, Figura 5.2, conocido como control por corriente programada (*current-programmed control*) o por corriente inyectada (*current-injected control*), es un método de control que contiene dos lazos [137], [138]: uno interno (no conectado a un terminal de salida) en corriente y otro externo en tensión. El objetivo de control es que la corriente sensada i_s siga una corriente de control i_c . Para ello, el controlador lleva al transistor del convertidor a

correspondiente a la corriente de referencia. Este control se realiza mediante el ciclo de corte y conducción, en función del error entre ambos niveles de corriente. Nótese que a diferencia de lo que sucede en el control en modo tensión, en el control de corriente, dependiendo del dispositivo sobre el que se realice el sensado de corriente y la topología del convertidor, el ciclo de servicio del convertidor puede mantener o no una relación directa con la señal a controlar. Esto se verá con más detalle en la sección 5.2.

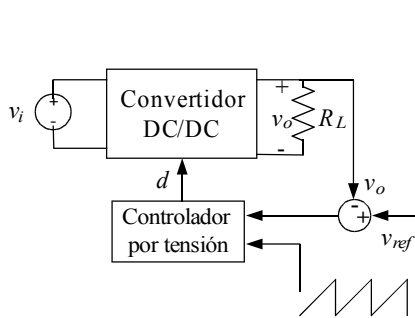


Figura 5.1: Esquema básico del control de tensión para un convertidor DC/DC.

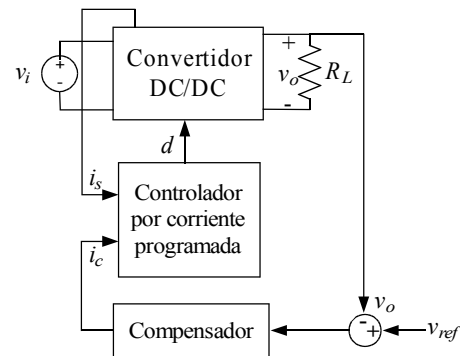


Figura 5.2: Esquema básico del control de corriente para un convertidor DC/DC.

El sensado de corriente para la medida de i_s suele hacerse en la bobina del convertidor ya que, en función de la topología, soporta la corriente entregada por la fuente y/o la corriente por el interruptor (ver Figura 5.3). Así, en el caso del convertidor Boost por ejemplo (Figura 3.8), la corriente por la bobina coincide con la corriente suministrada por la fuente de entrada al convertidor; por lo tanto, un control sobre la corriente por la bobina del convertidor equivale a controlar la corriente suministrada por la fuente. Por otro lado, la corriente a la entrada del convertidor está relacionada mediante el ciclo de servicio con la corriente suministrada a la carga, (3.26), por lo que en definitiva, el control de la corriente por la bobina permite controlar la corriente suministrada a la carga. En el caso del convertidor Buck (Figura 4.20), la corriente por la bobina es igual a la corriente entregada a la carga, pudiéndose controlar directamente la corriente suministrada a esta última.

Respecto del funcionamiento de los dos lazos de la Figura 5.2, el lazo interno de corriente ajusta inicialmente el ciclo de servicio del convertidor, en respuesta a los cambios en la corriente sensada, y el lazo externo de tensión genera la corriente de referencia para el controlador, en respuesta a los cambios en la tensión de salida del convertidor. El ciclo de servicio se determina por los instantes de tiempo en los que la corriente sensada alcanza el

umbral establecido por la señal de control. La ventaja principal del control de corriente es que el lazo interno convierte al dispositivo sobre el que se realiza el sensado de corriente, en una fuente de corriente dependiente de la tensión a frecuencias inferiores a la frecuencia de cruce de ganancia⁴⁶ del lazo de corriente.

Se conocen hasta siete tipos de métodos de control en modo corriente según la bibliografía [137]. Estos, a su vez, se agrupan en dos categorías: control a frecuencia constante y a frecuencia variable. En el primer grupo se encuentran el control de corriente de pico (*peak-current-mode control*), el control de corriente de valle (*valley-current-mode control*), el control de corriente media (*average-current-mode control*) y el control por conductancia (*PWM-conductance control*). En el segundo grupo están incluidos el control por histéresis (*hysteretic control*), el control por tiempo de conducción constante (*constant on-time*) y el control por tiempo de no conducción constante (*constant off-time*).

En comparación con el control de tensión, las técnicas de control de corriente aportan las ventajas siguientes: 1) mejora la respuesta transitoria, ya que el convertidor se reduce a un sistema de primer orden; 2) mejora la regulación de línea; 3) son idóneas para convertidores funcionando en paralelo y 4) protegen de sobre-corrientes. Sin embargo, los mayores inconvenientes del control de modo corriente son su inestabilidad y la existencia de oscilaciones subarmónicas.

Cualquiera de las dos técnicas de control (tensión y corriente) pueden ser implementadas en modo analógico o digital; sin embargo, el control analógico presenta algunas ventajas respecto al control digital [139], [140]: 1) simplicidad, 2) bajo coste de implementación, 3) amplio ancho de banda, 4) retraso reducido en la relación causa-efecto y 5) buena resolución en tiempo y amplitud. Por contra, tiene también algunas desventajas: 1) funcionalidad limitada, 2) susceptibilidad al ruido y envejecimiento y 3) mayor número de componentes.

Respecto al control digital de convertidores DC/DC, éste ha experimentado un gran avance en los últimos años y, como en el caso analógico, tiene sus ventajas e inconvenientes. Entre las ventajas pueden ser citadas las siguientes: 1) posibilidad de programación; los algoritmos de control se realizan mediante software, lo que permite programar diferentes algoritmos de control sobre el mismo sistema. 2) Alta flexibilidad, ya que los circuitos de comunicación, protección,

⁴⁶ **Frecuencia de cruce de ganancia** es la frecuencia en la que el diagrama de bode de la magnitud correspondiente a la función de transferencia representada cruza el eje de 0 dB.

prevención y monitorización pueden ser construidos con mayor facilidad que en el caso analógico. Por contra, el control digital tiene los inconvenientes siguientes: 1) tarea de desarrollo de software tediosa y proclive al error, 2) los microprocesadores y DSPs son susceptibles a las interferencias y ruidos, 3) las tareas de muestreo implican limitar la resolución en tiempo y en amplitud, y 4) debido a la naturaleza tipo serie de los dispositivos digitales empleados, todas las tareas realizadas por los microprocesadores implican el empleo de una porción de tiempo proporcional a la señal de reloj que gobierna su comportamiento.

A partir del análisis anterior, se ha optado por un control analógico de corriente para implementar el controlador de los convertidores en el sistema híbrido de pila de combustible (Figura 4.1). Tomada esta decisión, se analizan en la sección siguiente las diferentes opciones disponibles.

5.2 Control analógico de corriente

En esta sección se realiza un análisis detallado de las diferentes técnicas presentes en la literatura que permiten realizar el control analógico de corriente en convertidores DC/DC. El objetivo es valorar los pros y los contras de cada técnica. Este estudio debe desembocar en una justificación de la decisión que se tome, respecto del diseño final, para el controlador del prototipo experimental objeto de esta Tesis.

5.2.1 Control de corriente de pico y de corriente de valle

La Figura 5.3 muestra el esquema eléctrico básico asociado al circuito de control de corriente de pico para un convertidor Boost. El circuito contiene dos lazos: un lazo interno de corriente y otro externo de tensión. El lazo interno está formado por un comparador de error, un biestable SR, una señal de reloj y un sensor de corriente que puede estar situado en serie con la bobina L o con el transistor de conmutación S , [137].

La señal de reloj conectada a la entrada S (Set) del biestable activa o pone a nivel “1” lógico su salida Q. La entrada R (Reset) resetea la salida Q, asignándole un valor de “0” lógico. A la entrada negada del comparador se aplica la tensión asociada a la señal de corriente de control v_{ic} ; esta señal viene establecida por el lazo externo de control de tensión, el cual, en base al error entre la tensión a la salida del convertidor y la tensión de referencia V_{ref} , determina la

tensión v_{ic} asociada a la corriente de control a seguir i_c . La corriente sensada i_s a través del circuito de acondicionamiento de señal es transformada en un nivel de tensión v_{is} conectado a la entrada positiva del comparador. La salida del comparador es conectada a la entrada R del biestable, de forma que el ciclo de servicio del transistor viene determinado por el error entre la corriente sensada y la de control. El reloj genera pulsos de tensión a una frecuencia constante f_s igual a la frecuencia de conmutación.

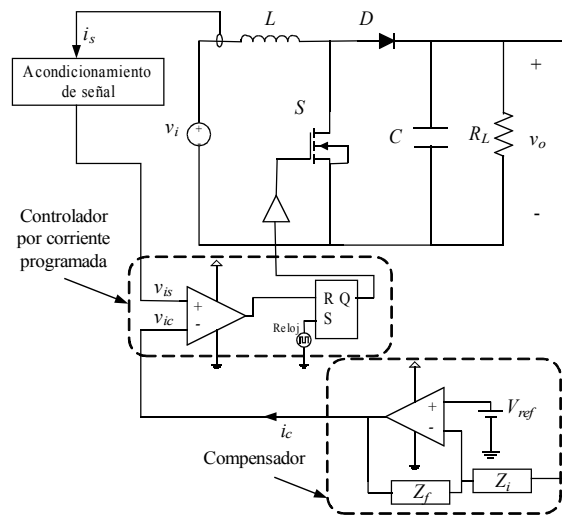


Figura 5.3: Circuito de control de corriente de pico para un convertidor Boost.

Cuando la señal de reloj está a nivel alto, la salida del biestable se activa y se pone a nivel “1” lógico y, por lo tanto, la tensión puerta-fuente del transistor está a un nivel alto, haciendo que empiece a conducir y comience el ciclo de conmutación. Puesto que la tensión de puerta-fuente está gobernada por la señal de reloj periódica, el modo de operación del convertidor es de conmutación a frecuencia constante. Mientras que el transistor esté conduciendo, la corriente por la bobina aumenta linealmente con el tiempo. Entonces, durante el tiempo que i_s sea menor que la corriente de control i_c , la salida del comparador permanece a nivel bajo y el biestable no se resetea, con lo cual, su salida permanece al valor que tenía inicialmente ($V_Q = “1”$). Por contra, cuando i_s alcanza el valor de la corriente de control, la salida del comparador pasa a nivel alto, lo que provoca el reset de la salida del biestable ($V_Q = “0”$) y, en consecuencia, la tensión puerta-fuente del transistor cae a nivel bajo, provocando que éste deje de conducir.

Nótese que a la salida del biestable hay conectado un driver para gobernar la puerta del transistor. Ello es necesario porque el biestable no es capaz de hacerlo directamente. El driver adecua los niveles de tensión y corriente a la salida del biestable para que la señal PWM generada pueda hacer conmutar al transistor del convertidor.

Como se puede observar, el lazo de corriente hace que la bobina se comporte como una fuente de corriente controlada por tensión.

La Figura 5.4 muestra las formas de onda en los diferentes puntos de conexión del circuito, y explica su modo de operación.

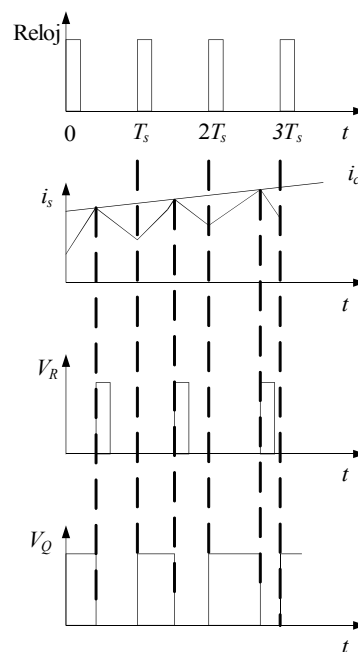


Figura 5.4: Formas de onda para el control de corriente de pico.

Nótese en la Figura 5.3 que el reloj activa el biestable y consigue que el transistor empiece a conducir al principio del ciclo T_s . El comparador resetea el biestable y causa la conmutación al estado de no conducción del transistor cuando la corriente por la bobina alcanza el valor de la señal de control. En consecuencia, la corriente máxima o corriente de pico en la bobina intenta seguir la señal de control. Como puede apreciarse en la Figura 5.4, el comparador

de error, el biestable SR y la señal de reloj se encargan de hacer una modulación en amplitud de la corriente por la bobina, donde la señal de control i_c es la señal moduladora.

Como se ha visto, la corriente de pico sensada es controlada directamente; por ello, este método recibe el nombre de control de corriente de pico. El lazo interno de corriente es capaz de responder rápidamente a los cambios en la corriente de control ciclo a ciclo o pulso a pulso. Este método es también conocido como control de corriente de pico por modulación de seguimiento de flanco a frecuencia constante (*constant-frequency trailing-edge modulation peak-current-mode control*) o control de la conmutación a conducción a partir de la corriente de pico a frecuencia constante (*constant-frequency peak-current-mode on-time control*). La denominación se debe a que se emplea una señal de reloj de frecuencia constante para iniciar la conducción del transistor, y la intersección de la corriente medida con la de control se usa para cortar el transistor. En otras palabras, el reloj inicia la conducción y la señal de control inicia el intervalo de no conducción. Por tanto, el paso a conducción del transistor es controlado a frecuencia constante.

Para el caso particular del convertidor Boost, la corriente que entrega la fuente a la entrada del convertidor coincide con la corriente por la bobina. Entonces, el sensado de corriente por la bobina permite conocer y controlar la corriente entregada por la fuente.

Atendiendo a la ecuación (3.22), la mitad del rizado de la corriente por la bobina corresponde con la diferencia entre el valor máximo que ésta alcanza (I_{lpico}) y su valor medio, que coincide con el valor medio de la corriente entregada por la fuente, es decir, el valor medio de la corriente sensada I_s será, (5.1).

$$I_s = I_{Lpico} - \frac{\Delta I_L}{2} \quad (5.1)$$

En consecuencia, mediante el control de corriente de pico, la corriente media a la entrada se controla indirectamente.

Una estrategia de modulación dual, usando una señal de reloj a frecuencia constante para iniciar el cambio a no conducción del transistor, y la intersección de la corriente por la bobina con una señal de control para activar la conmutación del transistor, se emplea para el caso del control de corriente de valle. En este caso, la señal de reloj controla el paso a no conducción del transistor. Cuando la corriente sensada coincide con la señal de control, se activa

el paso a conducción del mismo. De acuerdo a la Figura 5.4, en el control de corriente de valle, la señal de control de corriente es inferior al valor medio de la corriente sensada, por tanto, se realiza el control sobre el punto de intersección del valor mínimo de la corriente sensada con la señal de control, dando así nombre al control de corriente de valle.

En el método de control de corriente de valle, la conmutación a no conducción del transistor es controlada a frecuencia constante. Este método de control es conocido igualmente como control de corriente de valle por modulación de flanco principal a frecuencia constante (*constant-frequency leading-edge modulation peak-current-mode control*), o control de la conmutación a no conducción a partir de la corriente de valle a frecuencia constante (*constant-frequency valley-current-mode ooff-time control*).

En general, los convertidores conmutados básicos (Boost, Buck, Buck-Boost y sus variantes), como se ha visto de forma particular para el convertidor Boost en el Capítulo 3, son sistemas de segundo orden (o superior para algunas variantes del Buck-Boost) en los que las variables de estado son la corriente por la bobina y la tensión en el condensador (que es aproximadamente la tensión a la salida del convertidor). Cuando se emplea el control en modo corriente, la señal de referencia para el lazo interno depende de la tensión de salida del convertidor, es decir, que una variable controla a la otra. En consecuencia, realmente sólo existe una variable de estado, resultando un sistema que se comporta aproximadamente como un sistema de primer orden.

El control en modo corriente presenta determinadas ventajas sobre el control en tensión, [137], [138]. Por ejemplo, en modo corriente, el transistor pasa a no conducción siempre que la corriente llegue a alcanzar valores demasiado elevados. Por tanto, los fallos en el transistor y diodo debidos a corrientes excesivas se pueden prevenir y la corriente de carga se puede mantener por debajo de un determinado nivel. Es decir, el control de corriente proporciona inherentemente una rápida protección frente a cortocircuitos y sobrecorrientes, mejorando así la fiabilidad del convertidor. En segundo lugar, es fácil conectar en paralelo convertidores de potencia con control de corriente, en base a aumentar la capacidad de corriente, sin problemas de reparto de carga gracias a que la corriente de salida de cada unidad es determinada por la señal de control. En tercer y último lugar, el control de corriente es una solución muy adecuada para resolver problemas de balanceo en convertidores como el de puente completo o el Push-Pull.

El control de corriente de pico exhibe una ventaja adicional, [137]. Cuando la tensión a la entrada del convertidor v_i aumenta (Figura 5.3), la pendiente en la corriente por la bobina también aumenta, provocando el paso a no conducción más rápidamente, desencadenando así un autobalance y haciendo que la tensión a la salida del convertidor v_o sea menos dependiente de la tensión a la entrada.

Pero el control de corriente de pico también presenta desventajas. Una de ellas es la inestabilidad del lazo de corriente cuando el ciclo de servicio es superior a 0,5, apareciendo oscilaciones subarmónicas. Para un ciclo de servicio mayor que 0,5 es necesaria una red de compensación de rampa (*slope compensation*). Además, el control por corriente de pico es susceptible al ruido, especialmente cuando el rizado en corriente es pequeño. El ruido puede afectar a la tensión de control o la corriente por la bobina, generando una señal falsa en la entrada positiva del comparador. Los picos de corriente durante la recuperación inversa del diodo pueden tener un efecto perjudicial. Además, si la corriente por la bobina es sensada mediante una resistencia en serie, esto provoca pérdidas en potencia. Si la resistencia se coloca en serie con el terminal de fuente del transistor, esto causa degradación en la capacidad de corriente del transistor y puede ser necesario un transistor de mayor tamaño.

Se verá ahora en detalle los inconvenientes que presenta el control de corriente de pico.

- **Inestabilidad del lazo de control en corriente:** Para entender el problema de inestabilidad que existe en el método de control de corriente de pico, se va a considerar un convertidor Boost trabajando en modo de conducción continuo (CCM). Se asume que existe una pequeña perturbación en la corriente por la bobina en el instante inicial de conducción del transistor, respecto de un punto de funcionamiento en régimen estacionario. La Figura 5.5 muestra la forma de onda para la corriente en estado estacionario y para la corriente después de la perturbación. La perturbación provoca una sucesión de cambios en la corriente por la bobina en los ciclos siguientes en forma de progresión geométrica con un factor de proporción común.

Para un convertidor Boost, una vez que ha alcanzado el régimen estacionario, las pendientes de la corriente por la bobina durante el tiempo de conducción (DT_s^{47}) y no conducción (considerando sólo su valor absoluto), pueden ser calculadas a partir de las ecuaciones (3.22) y

⁴⁷ Siguiendo con la notación empleada a partir del Capítulo 3 para especificar valores instantáneos, en equilibrio y variaciones incrementales, se emplean letras en minúscula para los primeros, mayúsculas para los segundos y el subíndice δ para los últimos.

(3.23). A partir de ellas se obtienen las pendientes dadas por las ecuaciones (5.2) para el tiempo de conducción y (5.3) para el de no conducción (véase Figura 5.5).

$$M_1 = \frac{\Delta I_L}{DT_s} = \frac{V_i - V_o}{L} \quad (5.2)$$

$$M_2 = \frac{\Delta I_L}{(1-D)T_s} = \frac{V_o}{L} \quad (5.3)$$

La relación entre las pendientes tiene la forma (5.4):

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{D}{1-D} \quad (5.4)$$

De donde se concluye que la pendiente de la corriente por la bobina durante el tiempo de conducción M_1 , es igual a la pendiente de la corriente durante el tiempo de no conducción M_2 , cuando el ciclo de servicio alcanza el valor $D = 0,5$. En cambio, $M_1 > M_2$ si el ciclo de servicio es $D < 0,5$; y $M_1 < M_2$ si el ciclo de servicio es $D > 0,5$.

Considerando ahora variaciones incrementales en la corriente por la bobina y asumiendo que las tensiones a la entrada y la salida del convertidor se mantienen constantes, las pendientes m_1 y m_2 pueden ser obtenidas a partir de consideraciones geométricas sobre la Figura 5.5, de acuerdo a las expresiones (5.5) y (5.6):

$$m_1 = \frac{\Delta i_{L0}}{dT_s} = \frac{v_i - v_o}{L} \quad (5.5)$$

$$m_2 = \frac{\Delta i_{L1}}{(1-d)T_s} = \frac{v_o}{L} \quad (5.6)$$

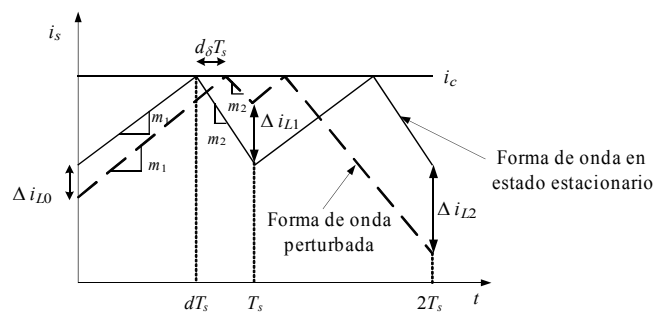


Figura 5.5: Formas de onda de la corriente por la bobina en estado estacionario y perturbada para el convertidor Boost.

Entonces, las variaciones incrementales de la corriente por la bobina al principio y final del primer ciclo mantienen la misma relación que las pendientes, (5.7):

$$a_1 = \frac{\Delta i_{L1}}{\Delta i_{L0}} = \frac{m_2}{m_1} = \frac{d}{1-d} \quad (5.7)$$

Después del segundo ciclo, la relación entre la variación incremental de la corriente al final del segundo ciclo y al comienzo del primer ciclo es (5.8):

$$a_2 = \frac{\Delta i_{L2}}{\Delta i_{L0}} = \frac{\Delta i_{L2}}{\Delta i_{L1}} \times \frac{\Delta i_{L1}}{\Delta i_{L0}} = \left(\frac{m_2}{m_1}\right)^2 = \left(\frac{d}{1-d}\right)^2 \quad (5.8)$$

Después de n ciclos, la relación entre la variación incremental al final del ciclo n -ésimo y la variación incremental al comienzo del primer ciclo, (5.9), describe, como ya se ha comentado, una progresión geométrica con un factor de progresión igual a a_1 .

$$a_n = \frac{\Delta i_{Ln}}{\Delta i_{L0}} = \left(\frac{m_2}{m_1}\right)^n = \left(\frac{d}{1-d}\right)^n \quad (5.9)$$

Para conocer el comportamiento que sigue la variación incremental a lo largo del tiempo respecto a la corriente que pasa por la bobina en régimen estacionario, se calcula el límite de a_n cuando $n \rightarrow \infty$, obteniéndose:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{d}{1-d}\right)^n = 0 \quad \text{para } d < 0,5 \quad (5.10)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{d}{1-d}\right)^n = 1 \quad \text{para } d = 0,5 \quad (5.11)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{d}{1-d}\right)^n = \infty \quad \text{para } d > 0,5 \quad (5.12)$$

En consecuencia, se puede concluir que: 1) El lazo interno de corriente es estable si $m_1 > m_2$. Para esto, la condición de estabilidad es que $d < 0,5$. En este caso, la magnitud de la perturbación va decreciendo con el tiempo hasta que el convertidor vuelve a su estado inicial de equilibrio. 2) El lazo es críticamente estable si $m_1 = m_2$, lo que sucede cuando $d = 0,5$. En este caso la magnitud de las oscilaciones permanece constante y el convertidor no recupera su estado inicial de equilibrio. Finalmente, 3) el lazo es inestable si $m_1 < m_2$. Para esto, la condición de

inestabilidad es que $d > 0,5$. En este caso, las oscilaciones van aumentando con el tiempo y el convertidor nunca retorna a su estado inicial de equilibrio. En [137], Capítulo 13, se pueden consultar ejemplos de simulación que muestran la evolución temporal de las formas de onda asociadas a la corriente sensada en estado estacionario y perturbada para cada uno de los tres casos.

La inestabilidad para $d > 0,5$ es un problema conocido y estudiado en el control de corriente de pico, el cual es innato a la técnica e independiente de la topología del convertidor, luego el análisis realizado en esta sección para la topología Boost es igualmente válido para el resto de configuraciones.

- **Compensación de la pendiente:** La forma de solventar el problema de inestabilidad inherente al control de corriente de pico, consiste en añadir en el esquema de la Figura 5.2 una señal periódica con forma de diente de sierra a la medida de la corriente sensada, o restar la misma forma de onda a la señal de control. La Figura 5.6 muestra las formas de onda que ilustran la compensación de la pendiente.

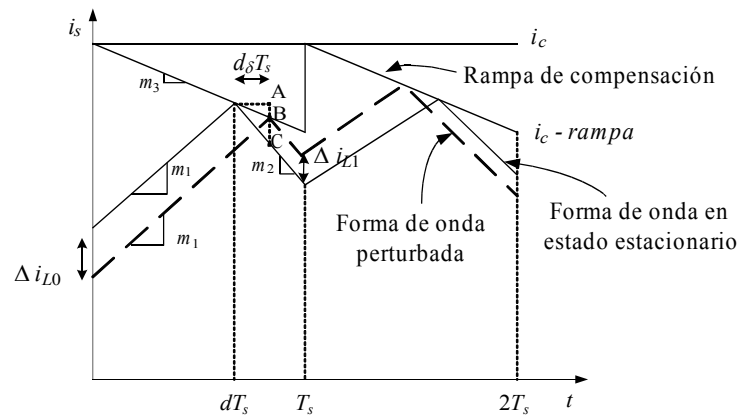


Figura 5.6: Formas de onda de la corriente por la bobina con compensación de la pendiente.

Considerando las formas de onda de la corriente sensada en estado estacionario y perturbada, la pendiente de la corriente durante el intervalo de conducción es (5.13):

$$m_1 = \frac{BC}{d_\delta T_s} \tag{5.13}$$

Y la pendiente de la rampa de control es (5.14):

$$m_3 = \frac{AB}{d_\delta T_s} \quad (5.14)$$

A partir de las pendientes anteriores se puede calcular la perturbación de la corriente al comienzo del primer ciclo (5.15):

$$\Delta i_{L0} = (m_1 + m_3) d_\delta T_s \quad (5.15)$$

Para conocer la perturbación de la corriente al finalizar el primer periodo, es necesario conocer antes la pendiente de la corriente durante el intervalo de no conducción (5.16):

$$m_2 = \frac{AC}{d_\delta T_s} = m_1 + m_3 \quad (5.16)$$

Entonces, la perturbación en la corriente al finalizar el primer ciclo es (5.17):

$$\Delta i_{L1} = BC = AC - AB = (m_2 - m_3) d_\delta T_s \quad (5.17)$$

La relación entre las perturbaciones al principio y final del primer ciclo es (5.18):

$$a_1 = \frac{\Delta i_{L1}}{\Delta i_{L0}} = \frac{m_2 - m_3}{m_1 + m_3} \quad (5.18)$$

Teniendo en cuenta la expresión (5.7) para la relación entre las pendientes m_1 y m_2 , la ecuación (5.18) puede expresarse de la forma (5.19):

$$a_1 = \frac{\frac{m_2 - m_3}{m_1 - m_1}}{1 + \frac{m_3}{m_1}} = \frac{\frac{d}{(1-d)} - \frac{m_3}{m_1}}{1 + \frac{m_3}{m_1}} \quad (5.19)$$

El valor límite del ciclo de servicio (5.11) es aquel para el que $a_1 = 1$. Con lo cual, sustituyendo este valor en (5.19) y despejando d , se tiene (5.20):

$$d = \frac{0,5 + \frac{m_3}{m_1}}{1 + \frac{m_3}{m_1}} \quad (5.20)$$

Esta expresión muestra que a medida que la pendiente normalizada (m_3/m_1) de la rampa de compensación aumenta, el rango del ciclo de servicio para el que el lazo de control de corriente es estable, aumenta por encima del valor límite que se había obtenido de 0,5. Por ejemplo, si el cociente $m_3/m_1 = 0,5$, el valor crítico de d se sitúa en $2/3$, con lo cual, el lazo de control de corriente es estable para el rango del ciclo de servicio $0 \leq d \leq 2/3$.

El inconveniente de esta solución de aplicar una rampa de compensación es la necesidad de circuitería adicional para implementarla.

Para el caso del control de corriente de valle (manteniendo la dualidad respecto al control de corriente de pico), a la señal que actúa como referencia en corriente se suma una señal de rampa en diente de sierra, de forma que el punto de intersección de la señal perturbada con la señal de control compensada suceda a un nivel superior respecto al punto de intersección de la señal en régimen estacionario con dicha señal de control. Es decir, tomando como referencia la Figura 5.6, la señal de control de corriente i_c ahora es menor que el valor medio de la corriente sensada. A esta señal de control se le suma una señal diente de sierra que actuará como pendiente de compensación. En esencia, lo que se hace es añadir un offset a la pendiente de compensación. En consecuencia, resulta una señal de control superior a la señal i_c inicial; luego el punto donde interceptan la señal de corriente sensada i_s con la nueva señal de control de corriente se antepone temporalmente al punto de intersección obtenido si no se emplea la rampa de compensación. Como el punto de intersección determina el cambio de no conducción a conducción del transistor del convertidor, este adelanto temporal impide que la perturbación en la corriente siga aumentando.

A pesar de que teóricamente se ha demostrado que el control de corriente de pico o de valle puede ser una buena opción de control por corriente programada, en la práctica presenta una serie de problemas como son los siguientes:

- **Alta sensibilidad al ruido:** el control de corriente de pico y de valle compara la pendiente positiva de la corriente sensada con un nivel de corriente programado por el lazo de control externo (señal de referencia). El comparador activa el paso a no conducción del transistor cuando la corriente sensada alcanza el nivel deseado. El valor absoluto de la pendiente de la corriente es normalmente bastante más pequeño que el valor absoluto de la señal de referencia, lo cual se acentúa si la tensión de entrada al convertidor es baja. Esto puede comprobarse en la

ecuación (5.5) para el caso del convertidor Boost. En consecuencia, este método es extremadamente susceptible al ruido que pueda existir en la tensión de entrada al convertidor. Al mismo tiempo, cada vez que el transistor conmuta se genera un pico instantáneo de ruido en la corriente. Una fracción de un voltio acoplado en el circuito de control puede causar el paso a no conducción del transistor de forma inmediata, provocando un comportamiento subarmónico con mucho más ruido. El *layout* del circuito y el aislamiento entre pistas es esencialmente importante para obtener un funcionamiento correcto.

- **Necesidad de una rampa de compensación:** como se ha visto, el control de corriente de pico y de valle es inherentemente inestable cuando el ciclo de servicio del convertidor es mayor que 0,5. La solución a este problema consiste en añadir una rampa de compensación. El valor de la pendiente de la rampa de compensación (m_3) se calcula a partir del valor del ciclo de servicio y en función del valor de la pendiente positiva de la corriente en la bobina (m_1), ver (5.20). A su vez, para el caso del convertidor Boost, el valor de m_1 depende de las tensiones a la entrada y salida del propio convertidor, según (5.5). Es decir, el valor de la rampa de compensación no es fácil de calcular, especialmente cuando los valores de tensión a la entrada y salida del convertidor pueden variar. Una rampa fija puede provocar sobrecompensación para gran parte del tiempo, lo que desemboca en una degradación del funcionamiento y aumento de la distorsión.

- **Error de pico respecto al valor medio de corriente:** el error entre la corriente de pico o de valle y la corriente media, en el método de control de corriente de pico o de valle, no es un problema importante para la topología reductora Buck. Esto se debe a que el rizado de corriente suele ser mucho más pequeño que la corriente media en la carga (que coincide con la corriente media por la bobina, ver Figura 4.20). En cambio, para una topología elevadora tipo Boost, este error provoca distorsión en la forma de onda de la corriente a la entrada del convertidor. Mientras que el pico de corriente intenta seguir el nivel de corriente programado (señal de referencia), la corriente media no lo hace. El error entre la corriente de pico y la corriente media empeora cuando el nivel de corriente es bajo, especialmente en modo de conducción discontinuo cuando la señal de corriente se hace cero durante casi la mitad del ciclo. Para reducir la distorsión que se pueda generar, el error debe ser pequeño; y esto se consigue con una bobina de gran tamaño. Pero un rizado en corriente reducido se traduce en una rampa de corriente poco abrupta, lo que empeora la sensibilidad al ruido que de por sí ya existe.

5.2.2 Control de corriente media

El control de corriente media elimina los problemas inherentes al control de corriente de pico y de valle, como son la alta sensibilidad al ruido y la necesidad de una rampa de compensación. Además, el control de corriente media se puede emplear para controlar la corriente que pasa por otros componentes diferentes a una bobina independientemente de la topología, permitiendo así ampliar el rango de configuraciones de convertidores en los que se puede aplicar este tipo de control. Es decir, si se desea aplicar control de corriente sobre el transistor o el diodo de un convertidor con alguno de los métodos vistos anteriormente (control de corriente de pico y de valle), el propio funcionamiento del dispositivo no va a permitir realizar el control de corriente de valle, ya que el valor de corriente mínimo siempre va a ser cero (cuando el dispositivo no está conduciendo). En cambio, el control de corriente media sí es posible aplicarlo sobre cualquier dispositivo de cualquier topología.

En la Figura 5.7 se muestra un posible esquema del circuito de control de corriente media. Nótese el amplificador de error entre la corriente sensada y la de control que se introduce previo al generador de la señal PWM que controla el transistor [141], [142].

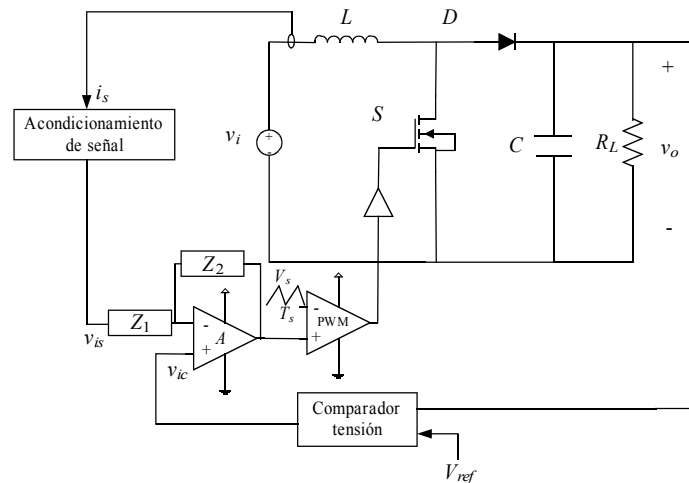


Figura 5.7: Circuito de control de corriente media.

La señal asociada a la corriente de control v_{ic} es generada por el lazo externo de tensión. La diferencia o error entre la señal que representa el valor medido de la corriente sensada v_{is} y la señal de referencia, es amplificado y comparado con una señal diente de sierra de gran amplitud a la entrada del comparador PWM. Los valores correspondientes al ancho de banda y ganancia

del lazo de corriente se pueden calcular para conseguir un comportamiento óptimo mediante la red de compensación formada por Z_1 y Z_2 que completa el amplificador de error. Comparando este método con el control de corriente de pico (o de valle), la frecuencia de corte del lazo de corriente puede ser aproximadamente la misma en ambos casos, pero para el control de corriente media la ganancia será mucho mayor a frecuencias más bajas. Para ello sólo hay que ajustar los valores de Z_1 y Z_2 .

Resumiendo, las características principales del control de corriente media son:

1) La corriente media sigue la corriente programada con un mayor grado de precisión. Esto es especialmente importante en reguladores de factor de potencia con restricciones en distorsión de armónicos inferior al 3% y tamaño de bobina reducido. De hecho, el control de corriente media funciona adecuadamente incluso en el límite del modo de conducción continuo, a bajas frecuencias. El lazo externo de tensión es ajeno al cambio de modo.

2) La compensación de la rampa no es necesaria, pero hay un límite en la ganancia del lazo a la frecuencia de conmutación para que el sistema se mantenga estable. Esta estabilidad se puede mantener teniendo en cuenta el siguiente criterio: *la pendiente negativa de la corriente sensada que se aplica a una de las entradas del comparador PWM no debe exceder la pendiente de la rampa aplicada a la otra entrada del comparador*. Este criterio establece un límite superior de la ganancia del amplificador de error a la frecuencia de conmutación. El siguiente ejemplo permite aclarar este aspecto.

De acuerdo a la Figura 5.7, la pendiente negativa de la corriente por la bobina (mientras el transistor no conduce), se convierte en pendiente positiva después de ser amplificada e invertida por el amplificador de error. Para evitar oscilaciones subarmónicas, esta pendiente (asociada al intervalo de no conducción del transistor) a la salida del amplificador de error no debe ser mayor que la pendiente de la rampa del oscilador en la entrada invertida del comparador PWM.

Para el caso particular del convertidor Boost, la pendiente negativa de la corriente por la bobina es (5.6), y la pendiente de la señal diente de sierra es V_s/T_s . A la entrada el comparador PWM, o lo que es lo mismo, a la salida del amplificador de error, la pendiente de la corriente es igual que a la entrada pero multiplicada por la ganancia de amplificador de error A . Entonces, de acuerdo al criterio considerado, el valor máximo de la ganancia del amplificador de error se

obtiene igualando las expresiones obtenidas para las pendientes de las señales a la entrada del comparador PWM (5.21):

$$(V_o/L)A = V_s/T_s \quad (5.21)$$

De donde resulta que la ganancia máxima del lazo de corriente depende de las características de la rampa, de la frecuencia de conmutación y del tamaño de la bobina empleados, (5.22):

$$A = \frac{V_s L}{V_o T_s} \quad (5.22)$$

3) La inmunidad al ruido es mayor. El transistor empieza a conducir cuando el error de corriente a la entrada del comparador PWM es mayor que la señal diente de sierra. Si la señal de rampa está en sus niveles más bajos, la diferencia entre el error de corriente y la señal de rampa es mayor aún; luego una perturbación en la señal de rampa o en la señal de error seguirá manteniendo al transistor en conducción y no provocará el paso a no conducción.

4) El control de corriente media se puede emplear para medir y controlar la corriente en cualquier rama de un convertidor. Como ya se ha comentado anteriormente, no es posible aplicar el control de corriente de valle a cualquiera de los dispositivos que integran un convertidor DC/DC, ya que el valor mínimo de corriente en los dispositivos de conmutación siempre va a ser cero. Por contra, el control de corriente media no presenta esta limitación, es decir, puede ser utilizado para controlar la corriente tanto a la entrada como a la salida de las diferentes topologías (Buck, Boost, Buck-Boost, etc).

5.2.3 Control de corriente por conductancia

Las fuentes bibliográficas con referencias claras al control de corriente por conductancia son muy escasas y poco recientes, [143], [144]. El principio general del control de corriente por conductancia se muestra en la Figura 5.8.

En este caso se hace el estudio para un convertidor Buck, siendo extensible para el resto de topologías de convertidores conmutados, [145].

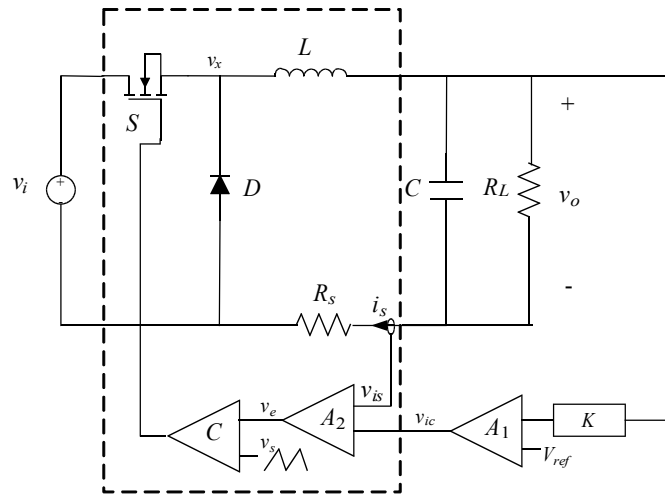


Figura 5.8: Esquema de control de corriente por conductancia para un convertidor Buck.

La tensión a la salida del convertidor v_o es transformada a niveles de tensión adecuados mediante un divisor de tensión que posee una constante de conversión K , para después ser comparada con la tensión de referencia V_{ref} . El error generado es amplificado mediante el amplificador A_1 . De esta forma se genera la señal asociada a la corriente de control v_{ic} , con la que se compara la señal de tensión correspondiente a la corriente sensada v_{is} . El sensado de corriente se puede hacer por ejemplo insertando una resistencia R_s en la rama de retorno de la corriente. El amplificador de error A_2 compara el valor correspondiente a la tensión de la corriente sensada con la señal de control generada, formando así el lazo interno de control de corriente. La señal de error v_e generada por el segundo amplificador de error es comparada, mediante el comparador C , con una señal diente de sierra v_s para generar la señal PWM con la que se actúa sobre la puerta del transistor. Los elementos que están dentro del cuadro de línea discontinua forman la etapa de control de corriente por conductancia.

El estudio del control por conductancia se hace en base al análisis de la ganancia del controlador completo en lazo abierto A_{OLT} , que puede ser expresada como el producto de la ganancia en lazo abierto del control en tensión A_{OLV} , por la ganancia del lazo interno del controlador por conductancia A_{CLC} (5.23):

$$A_{OLT} = A_{OLV} \cdot A_{CLC} \quad (5.23)$$

Para conocer cada uno de los términos, se estudia por separado cada lazo de control. Así, para el controlador del lazo externo de tensión, la ganancia en lazo abierto A_{OLV} deriva de la relación⁴⁸ (5.24).

$$A_{OLV} = \frac{v_o}{v'_o} = \frac{i_s \cdot Z_o}{v'_o} \quad (5.24)$$

Donde i_s es la corriente que circula por la rama de retorno del convertidor, Z_o es la impedancia equivalente de la red R_L - C a la salida del convertidor, v_o es la tensión a la salida del convertidor con el lazo de tensión abierto y v'_o es la tensión aplicada al divisor de tensión K (ahora no conectado a R_L). Nótese que para este cálculo, V_{ref} es cero. Es decir, sobre la Figura 5.8, en lazo abierto se elimina la conexión entre la salida del convertidor y el divisor de tensión junto con la señal de referencia V_{ref} .

La corriente i_s (consecuencia de la acción de control) se puede expresar en base a la conductancia total G de la etapa de control (línea discontinua en Figura 5.8) y la señal de control de entrada v_{ic} (salida de A_1) mediante la expresión (5.25).

$$i_s = G \cdot v_{ic} \quad (5.25)$$

donde la señal de control v_{ic} , en lazo abierto, se calcula a partir de (5.26):

$$v_{ic} = K A_1 v'_o \quad (5.26)$$

Luego la ganancia en lazo abierto del controlador de tensión se expresa de la forma (5.27):

$$A_{OLV} = K A_1 G Z_o = \frac{K A_1 G R_L}{(1 + j f / f_o)} \quad (5.27)$$

donde $f_o = 1/(2\pi R_L C)$

Por otra parte, atendiendo al lazo interno del controlador por conductancia (ver Figura 5.8), para obtener la ganancia del mismo hay que calcular el cociente de la variable de salida de la etapa de control entre la variable de entrada, sin considerar el divisor de tensión K ni el amplificador A_1 (que pertenecen al lazo externo en tensión previamente estudiado). Para este

⁴⁸ A partir de la expresión (5.24), y de acuerdo a la nomenclatura utilizada a lo largo de toda la memoria, las magnitudes expresadas en minúscula se refieren a valores instantáneos y las expresadas en mayúsculas se refieren a valores en régimen estacionario. En la Figura 5.8, todas las variables se refieren a valores instantáneos.

caso, dichas variables corresponden con la tensión en la resistencia de sensado v_{is} y la tensión de control v_{ic} respectivamente, obteniéndose así la expresión (5.28).

$$A_{CLC} = \frac{i_s R_s}{v_{ic}} \quad (5.28)$$

donde la corriente i_s coincide con la que circula por la bobina (y que posteriormente se reparte entre el condensador y la resistencia de carga a la salida). Su valor se puede expresar como (5.29).

$$i_s = \frac{v_x}{Z_T} \quad (5.29)$$

siendo Z_T la impedancia equivalente formada por la red L , C y R_L y v_x es la tensión en el punto de conexión del transistor, diodo y bobina.

La señal de error se puede expresar en función de la ganancia del segundo amplificador, (5.30).

$$v_e = A_2(v_{ic} - i_s R_s) \quad (5.30)$$

A su vez, la tensión en el punto de unión del transistor con la bobina y el diodo v_x está relacionada con la tensión a la entrada del convertidor v_i y el ciclo de servicio d . En régimen estacionario, el valor de v_x coincide con la tensión a la salida del convertidor v_o , luego v_x mantiene una relación con v_i y d similar a la de v_o , dando lugar a la conocida relación de conversión de un convertidor Buck (5.31):

$$v_x = d \cdot v_i \quad (5.31)$$

Por otra parte, la relación que mantiene la tensión pico a pico de la señal diente de sierra V_s , está relacionada con la señal de error y el ciclo de servicio. Es decir, el punto de intersección entre la señal de error y la señal diente de sierra, determina el tiempo de conducción del transistor del convertidor. Entonces, cuando el error iguala a la señal diente de sierra ha transcurrido una porción de tiempo d respecto del periodo de conmutación. En consecuencia, este punto de intersección puede conocerse a partir de (5.32):

$$v_e = d \cdot V_s \quad (5.32)$$

En consecuencia, combinando las expresiones (5.29), (5.30), (5.31) y (5.32) resulta que la tensión en la resistencia R_s se expresa de la forma (5.33):

$$i_s R_s = \frac{v_{ic} R_s}{R_s + \frac{Z_T V_s}{A_2 v_i}} \quad (5.33)$$

Y la ganancia del lazo interno del controlador de corriente es (5.34):

$$A_{CLC} = \frac{1}{1 + \frac{Z_T V_s}{A_2 v_i R_s}} = \frac{1}{1 + \frac{Z_T}{R_{eq}}} \quad (5.34)$$

Siendo las expresiones para R_{eq} y Z_T , (5.35) y (5.36) respectivamente:

$$R_{eq} = \frac{A_2 v_i R_s}{V_s} \quad (5.35)$$

$$Z_T = j\omega L + \frac{R_L}{1 + j\omega R_L C} \quad (5.36)$$

Para altas frecuencias de conmutación (decenas de kilohertzios), el primer término de la expresión para Z_T es mucho mayor que el segundo, resultando así un sistema de primer orden para el lazo cerrado de control de corriente, (5.37).

$$A_{CLC} = \frac{1}{(1 + j f / f_c)} \quad (5.37)$$

con $f_c = R_{eq} / 2\pi L$

Se observa pues, en función de la expresión obtenida para f_c , que para mantener el ancho de banda constante en el lazo de control de corriente, la tensión en régimen estacionario a la entrada del convertidor V_i y la tensión pico a pico de la señal diente de sierra deben conservar la misma proporción α (5.40):

$$V_s = \alpha V_i \quad (5.40)$$

A la hora de diseñar la ganancia del lazo interno del controlador de corriente, se conoce que, por las ecuaciones (5.34) y (5.37), cuanto mayor sea la ganancia del amplificador A_2 , mayor ancho de banda se consigue.

Por otra parte, también existe la restricción del *slew rate*⁴⁹ de la señal de error v_e a la salida del amplificador, la cual no debe exceder del *slew rate* de la señal diente de sierra v_s , ya que, de lo contrario, no quedaría definido el punto de intersección de la señal de error con la señal diente de sierra, el cual es el que define la anchura del pulso para generar el ciclo de servicio del convertidor.

El *slew rate* de la señal de error se calcula a partir de (5.30) considerando que v_{ic} permanece constante, resultando así (5.41):

$$\Delta v_e / \Delta t = -A_2 R_s (\Delta i / \Delta t) \quad (5.41)$$

Por otra parte, de acuerdo al análisis del convertidor realizado en la sección 4.2.5, la variación máxima de la corriente por la bobina, (4.6), es $(\Delta i / \Delta t) = V_i / L$. Por tanto, el *slew rate* de la señal diente de sierra es (5.42) [143]:

$$(\Delta v_s / \Delta t) = m V_s f_s \quad (5.42)$$

Donde m es una constante que vale 2 para una señal diente de sierra simétrica y 1 para una señal diente de sierra convencional; f_s es la frecuencia de conmutación que coincide con la frecuencia de la señal diente de sierra.

Combinando las ecuaciones (5.41) y (5.42) se obtiene el límite superior de la ganancia del amplificador empleado en el lazo de control interno, (5.43).

$$A_2 \leq \frac{m L f_s V_s}{R_s V_i} \quad (5.43)$$

Para obtener la expresión de la ganancia en lazo abierto del controlador completo (5.44), se relacionan las ecuaciones (5.23) (5.27) y (5.37):

$$A_{OLT} = \frac{K A_1 G R_L}{(1 + j f / f_o)} \cdot \frac{1}{(1 + j f / f_c)} \quad (5.44)$$

La expresión anterior permite calcular la ganancia en lazo abierto del controlador completo en función de la conductancia total, de ahí la denominación de este tipo de control de

⁴⁹ **Slew Rate:** Efecto no lineal en los amplificadores. Representa la incapacidad de un amplificador para seguir variaciones rápidas de la señal de entrada, esto es, la frecuencia máxima a la que puede funcionar el amplificador para

un nivel de señal de salida dado. El *slew rate* se define como $SR = \left. \frac{dV_o}{dt} \right|_{max}$ y se expresa típicamente en V/ μ s.

corriente, el cual tiene como ventaja el hecho de que puede ser empleado en paralelo con otros módulos de potencia similares.

5.2.4 Control de corriente por deslizamiento

El control por modos deslizantes (*sliding mode control*) [146]-[152] es una forma de estructura de control variable⁵⁰ y es un método de control no lineal muy potente que encuentra aplicación en aquellos sistemas no lineales cuyo control es una señal de conmutación⁵¹. La variable que representa a la señal de conmutación actúa como una entrada de control, restringida a tomar valores en un conjunto discreto de naturaleza binaria. Nótese que en función del modelado realizado en el Capítulo 3, la señal de control para la planta pila de combustible + convertidor DC/DC es el ciclo de servicio de este último, que no es una función continua, sino un valor discreto comprendido entre 0 y 1. Parece pues que el control por modos deslizantes puede ser un esquema de control idóneo para la planta en cuestión.

El control por deslizamiento tradicional se puede definir como la aplicación de una señal de control que conmuta a alta frecuencia y consigue llevar el estado del sistema a un campo escalar $S(x)$, denominado superficie de deslizamiento. La superficie será definida por el diseñador del sistema de control con objeto de que el estado cumpla las especificaciones deseadas, [146]. La principal ventaja de este control es su robustez ante las perturbaciones cuando éstas tienen cotas conocidas.

Para el análisis del control por deslizamiento en convertidores conmutados se va a considerar el convertidor elevador Boost. La Figura 5.9 (análoga a la Figura 3.8) recuerda el esquema de conexión eléctrico del convertidor Boost ideal.

⁵⁰ Conjunto de trayectorias posibles que se pueden obtener en el espacio de estado por medio de activaciones secuenciales del campo vectorial.

⁵¹ Produce las activaciones secuenciales de los campos vectoriales.

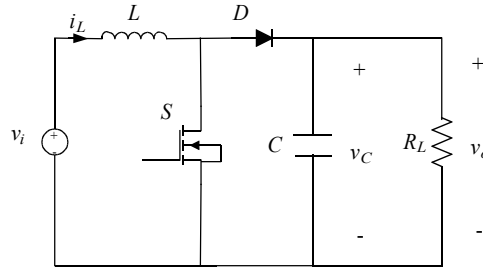


Figura 5.9: Esquema eléctrico de un convertidor Boost ideal.

En la sección 3.2.2 se desarrolló y obtuvo el modelo de estado del convertidor Boost, teniendo en cuenta pérdidas en la bobina y el condensador y considerando una fuente de corriente a la salida. Este modelo queda representado mediante la ecuación (3.34). A partir de este modelo más general, si se particularizara para el caso de que el condensador y la bobina se consideran ideales ($r_c = r_L = 0$ en la Figura 3.11), que no hay perturbaciones a la entrada ($v_{i\delta} = 0$) y, por último, que a la salida del convertidor hay conectada una carga R_L en vez de la fuente de corriente i_o (Figura 5.9), se obtiene el modelo de estado (5.45):

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L}(1-d) \\ \frac{1}{C}(1-d) & \frac{-1}{R_L C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_i}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.45)$$

donde el valor de la corriente a la salida i_o se ha expresado en función de la variable de estado v_c y de la resistencia de carga R_L ($i_o = v_c/R_L$). En consecuencia, la expresión (5.45) se puede desglosar en la suma de los términos que contribuyen a definir el vector de estado para cada intervalo de conducción y no conducción de la forma (5.46):

$$\dot{\mathbf{x}} = d \mathbf{A}_1 \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 + (1-d) \mathbf{A}_2 \mathbf{x} + \mathbf{B}_2 \quad (5.46)$$

donde las matrices \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_2 , \mathbf{B}_1 y \mathbf{B}_2 son:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{R_L C} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{V_i}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{R_L C} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \frac{V_i}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

La ecuación (5.45) se puede expresar de la forma (5.47):

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \boldsymbol{\delta} + u(\mathbf{B} \mathbf{x} + \boldsymbol{\gamma}) \quad (5.47)$$

donde $\mathbf{A} = \mathbf{A}_2$, $\boldsymbol{\delta} = \mathbf{B}_2$, $\mathbf{B} = \mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2$ y $\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2$, siendo u la señal de control que es el ciclo de servicio d .

A partir del modelo de estado del convertidor, se define la variable que se desea controlar, que en este caso es la corriente por la bobina; ésto es, la variable de estado $x_1 = i_L$. Ahora, queda la superficie de deslizamiento que hace que la variable de estado a controlar sea constante, esto es (5.48), [147]:

$$S(x) = \{(x_1, x_2) \in \mathfrak{R}^2 : x_1 - K = 0, K = \text{constante}\} \quad (5.48)$$

Nótese que si K es una corriente deseada y se logra hacer $S(x) = 0$; la corriente por la bobina sigue a la corriente deseada.

Para garantizar que el sistema sea estable, se debe asegurar que el sistema es capaz de alcanzar $S(x) = 0$ desde una condición inicial distinta de cero y, una vez alcanzado, la acción de control debe mantenerlo en este lugar, [148]. Estas condiciones se pueden expresar matemáticamente de la forma siguiente (5.49):

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{dS(x)}{dt} < 0 \\ \lim_{s \rightarrow 0^-} \frac{dS(x)}{dt} > 0 \end{aligned} \quad (5.49)$$

De esta forma, si la acción de control hace que se cumplan las condiciones (5.48) y (5.49), el sistema se encuentra en modo deslizante sobre la superficie $S(x)$.

La Figura 5.10 muestra un ejemplo de la conmutación cuando se ha introducido una banda de histéresis alrededor de la superficie de deslizamiento.

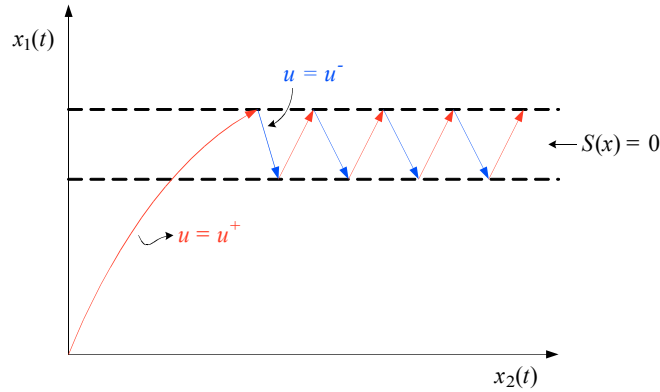


Figura 5.10: Ejemplo con banda de histéresis finita en modo deslizante.

Bajo las premisas establecidas, se determina que la condición de invarianza que caracteriza la dinámica promediada o dinámica ideal de deslizamiento es (5.50):

$$\frac{dS(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \langle \nabla S, (\mathbf{A}x + \boldsymbol{\delta} + u(\mathbf{B}x + \boldsymbol{\gamma})) \rangle = 0 \quad (5.50)$$

Donde ∇S es el gradiente de S y $\langle \dots, \dots \rangle$ denota el producto escalar. Esta condición expresa el hecho de que idealmente las trayectorias de estado evolucionan sobre la superficie de deslizamiento.

De la expresión (5.50), se puede calcular el valor que debe tomar la acción de control (variable de control en el punto de equilibrio, $u_{eq} = D$, ciclo de servicio en régimen estacionario) para que el sistema se mantenga en la superficie de deslizamiento, (5.51).

$$u_{eq} = D = \frac{-\langle \nabla S, (\mathbf{A}x + \boldsymbol{\delta}) \rangle}{\langle \nabla S, (\mathbf{B}x + \boldsymbol{\gamma}) \rangle} \quad (5.51)$$

Luego, para que el sistema pueda alcanzar el régimen de deslizamiento es necesario que el valor que resulta de hacer el producto escalar $\langle \nabla S, \mathbf{B}x + \boldsymbol{\gamma} \rangle$ sea diferente de cero, es decir $(\mathbf{B}x + \boldsymbol{\gamma})$ no puede ser tangente a $S(x)$, [147]. A esta condición se le denomina *condición de transversalidad*. Entonces, resulta (5.52):

$$\langle \nabla S, \mathbf{B}x + \boldsymbol{\gamma} \rangle = \langle (1, 0), \begin{pmatrix} \frac{x_2}{L} \\ -\frac{x_1}{C} \end{pmatrix} \rangle = \frac{x_2}{L} \quad (5.52)$$

La condición de transversalidad se cumple siempre que x_2 sea diferente de cero. Esta variable de estado corresponde con la tensión en los extremos del condensador, que como se están considerando elementos ideales, coincide con la tensión a la salida del convertidor. Para el caso del convertidor Boost, al ser una topología elevadora, la tensión a la salida siempre va a ser mayor o igual que la tensión a la entrada, luego se cumple la condición de transversalidad. A su vez, del cociente (5.51) se calcula que el valor de la acción de control que garantiza la superficie de deslizamiento cuando se alcanza el régimen estacionario es (5.53):

$$D = 1 - \frac{V_i}{X_2} \quad (5.53)$$

Es decir, teniendo en cuenta que X_2 es la tensión a la salida del convertidor, se obtiene la relación que mantiene la tensión a la salida del convertidor Boost con la tensión a la entrada y el ciclo de servicio en régimen permanente, la cual fue deducida en (3.24).

Una vez que se obtiene la superficie de deslizamiento asociada al sistema formado por el convertidor Boost, se estudia la habilidad del mismo para rechazar perturbaciones. Se considera entonces que el sistema (5.47) sufre una perturbación $\mathbf{p}(\mathbf{x}, t)$ de forma que se convierte en el sistema (5.54):

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \boldsymbol{\delta} + u(\mathbf{B}\mathbf{x} + \boldsymbol{\gamma}) + \mathbf{p}(\mathbf{x}, t) \quad (5.54)$$

Se dice que el modo deslizante ideal presenta la propiedad de *invarianza fuerte* con respecto a $\mathbf{p}(\mathbf{x}, t)$, sí y sólo sí, la dinámica ideal de deslizamiento es independiente de $\mathbf{p}(\mathbf{x}, t)$, (5.55):

$$\mathbf{p}(\mathbf{x}, t) \in \text{span}\{(\mathbf{B}\mathbf{x} + \boldsymbol{\gamma})\} \quad (5.55)$$

Decir que $\mathbf{p}(\mathbf{x}, t)$ está en el *span* de $(\mathbf{B}\mathbf{x} + \boldsymbol{\gamma})$, equivale a decir que $\mathbf{p}(\mathbf{x}, t)$ puede expresarse como $\mathbf{p}(\mathbf{x}, t) = \alpha(\mathbf{x}, t)(\mathbf{B}\mathbf{x} + \boldsymbol{\gamma})$ para una función escalar suave $\alpha(\mathbf{x}, t)$, es decir, $\mathbf{p}(\mathbf{x}, t)$

forma parte del espacio de funciones generado por $(\mathbf{B}\mathbf{x} + \boldsymbol{\gamma})^{52}$. La condición (5.55) se denomina condición de acoplamiento (*matching condition*), [149].

Cuando la perturbación $\mathbf{p}(\mathbf{x}, t)$ no verifica esta condición, se dice que la dinámica ideal de deslizamiento exhibe una propiedad de invarianza débil. La justificación de esta condición resulta del hecho de que si $\mathbf{p}(\mathbf{x}, t)$ no pertenece al espacio vectorial de $\mathbf{g}(\mathbf{x})$, entonces $\mathbf{p}(\mathbf{x}, t)$ se puede descomponer en una suma única de dos vectores; uno a lo largo de $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ y el otro a lo largo del espacio tangente a la superficie $S(x)$, es decir (5.56).

$$\mathbf{p}(\mathbf{x}, t) = \alpha(\mathbf{x}, t)\mathbf{g}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}, t) \quad (5.56)$$

donde $\alpha(\mathbf{x}, t)$ es un campo escalar y $\boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}, t)$ es un campo vectorial.

Nótese que, de acuerdo a la condición de transversalidad (5.52), el primer sumando de la expresión (5.56) representa la componente perpendicular de las perturbaciones a la superficie de deslizamiento. Luego el movimiento deslizante ideal no se ve afectado por el primer sumando. Por otra parte, $\boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}, t)$ es tangencial a $S(x)$, es decir $\boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}, t)$ no afecta la existencia local del movimiento deslizante aunque sí afecta a la dinámica ideal de deslizamiento dentro de su movimiento restringido en $S(x)$.

El diseño de una superficie de deslizamiento apropiada para conformar el campo vectorial deseado, y que sea independientemente de $\mathbf{p}(\mathbf{x}, t)$, sólo es posible si la condición de *matching* se satisface.

Si el modo deslizante existe para el sistema perturbado (5.54), necesariamente el vector de perturbación debe ser (5.57):

$$\mathbf{p}(\mathbf{x}, t) \equiv \alpha(\mathbf{x}, t)\mathbf{g}(\mathbf{x}) \quad (5.57)$$

donde $\alpha(\mathbf{x}, t)$ está acotado por (5.58):

$$u_{eq} - u^+ < \alpha(\mathbf{x}, t) < u_{eq} - u^- \quad (5.58)$$

Para el caso particular del convertidor Boost, las perturbaciones se consideran que existen en la tensión a la entrada y en la resistencia de carga. Entonces, siguiendo con la notación empleada a lo largo de toda la memoria para especificar valores instantáneos, en

⁵² En lo sucesivo y para facilitar la escritura al vector $(\mathbf{B}\mathbf{x} + \boldsymbol{\gamma})$ se le denominará $\mathbf{g}(\mathbf{x})$.

equilibrio y variaciones incrementales, la tensión a la entrada y la resistencia de carga perturbadas pueden ser expresadas de la forma (5.59):

$$v_i = V_i + v_{i\delta} ; \quad r_L = R_L + r_{L\delta} \quad (5.59)$$

Si se considera primero la perturbación en la tensión a la entrada, la dinámica del convertidor que se ha recogido en (5.51) tiene la forma (5.60):

$$\begin{aligned} L \frac{dx_1}{dt} &= V_i + v_{i\delta} - x_2(1-u) \\ C \frac{dx_2}{dt} &= x_1(1-u) - \frac{x_2}{R_L} \end{aligned} \quad (5.60)$$

Identificando cada uno de los términos de (5.60) con los términos de (5.54), se puede conocer el vector de perturbaciones $\mathbf{p}(\mathbf{x}, t)$. A su vez, el vector de perturbación debe cumplir la condición (5.55) para que la superficie sea independiente de dicha variación. De lo anterior se extraen los vectores $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ y $\mathbf{p}(\mathbf{x}, t)$, (5.61). Se observa pues que el vector $\mathbf{p}(\mathbf{x}, t)$ no satisface la condición de invarianza fuerte o *matching condition*.

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{x_2}{L} \\ -x_1 \\ \frac{1}{C} \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{p}(\mathbf{x}, t) = \begin{bmatrix} \frac{v_{i\delta}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.61)$$

De forma análoga, si se consideran ahora las perturbaciones en la resistencia de carga R_L , se obtiene que el vector $\mathbf{p}(\mathbf{x}, t)$ tampoco cumple la condición de invarianza fuerte, (5.62).

$$\left(0, \frac{-x_2}{R+r_\delta} \right) \notin \text{span} \left(\frac{x_2}{L}, -\frac{x_1}{C} \right) \quad (5.62)$$

Luego el control de corriente por deslizamiento del convertidor Boost, tal como se ha definido en (5.48), no es robusto frente a perturbaciones en la señal de entrada ni a cambios en la resistencia de carga. Una posible solución consiste en utilizar una superficie de deslizamiento variante en el tiempo para que compense el efecto de las perturbaciones, [150], [151].

Finalmente se va a comentar una posible solución para implementar la superficie de deslizamiento (Figura 5.11). Dicha superficie la implementa el circuito que realiza la resta entre las tensiones en régimen estacionario correspondientes a la señal de corriente de control v_{ic} y a

la tensión asociada con la señal de corriente sensada v_{is} , [152]. Este circuito se conecta a un comparador de histéresis cuya salida activa o desactiva el transistor del convertidor según la ley de control (5.48). La relación entre la tensión de salida y entrada que implementa la superficie de deslizamiento es (5.63):

$$v_s = \left[\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_{is} \right] \cdot \left[1 + \frac{R_4}{R_3} \right] - \frac{R_4}{R_3} \cdot v_{ic} \quad (5.63)$$

La anchura del comparador de histéresis determina la frecuencia de conmutación del convertidor sobre la superficie de deslizamiento, que en este caso viene expresada por (5.64):

$$v_b - v_a = \left[\frac{R_5}{POT + R_5} V_{DD} + \frac{POT}{POT + R_5} V_{CC} \right] - \left[\frac{R_5}{POT + R_5} V_{DD} \right] \quad (5.64)$$

Es decir, la anchura de la superficie de deslizamiento puede ser variada mediante la regulación del potenciómetro POT .

$$v_H = v_b - v_a = \left[\frac{POT}{POT + R_5} V_{CC} \right]$$

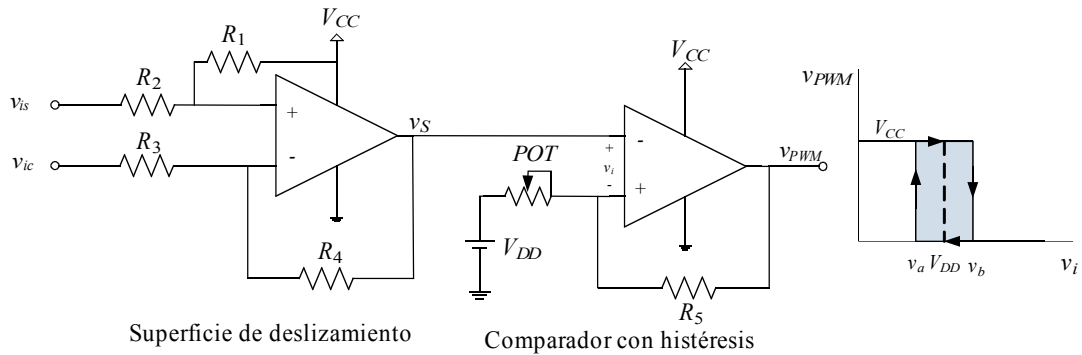


Figura 5.11: Circuito que realiza el control de corriente por deslizamiento.

5.2.5 Control de corriente por tiempo de conducción (*on-time*) y por tiempo de no conducción (*off-time*) constante

Los controladores de corriente por tiempo de conducción y no conducción constante suelen ser las alternativas a los controladores de frecuencia constante. Estos métodos de control

pueden ofrecer como ventajas una baja susceptibilidad al ruido y fácil implementación, [153]. El método de control de corriente por tiempo de no conducción constante utiliza la característica de que la corriente por la bobina del convertidor tiene pendientes positiva y negativa durante los intervalos de conmutación, lo cual puede ser empleado para controlar los tiempos de conducción y no conducción del transistor.

Existen diferentes esquemas que pueden ser empleados para implementar estos métodos de control. La Figura 5.12 muestra un posible esquema y las formas de onda asociadas al control de corriente por tiempo de no conducción constante para el convertidor Boost.

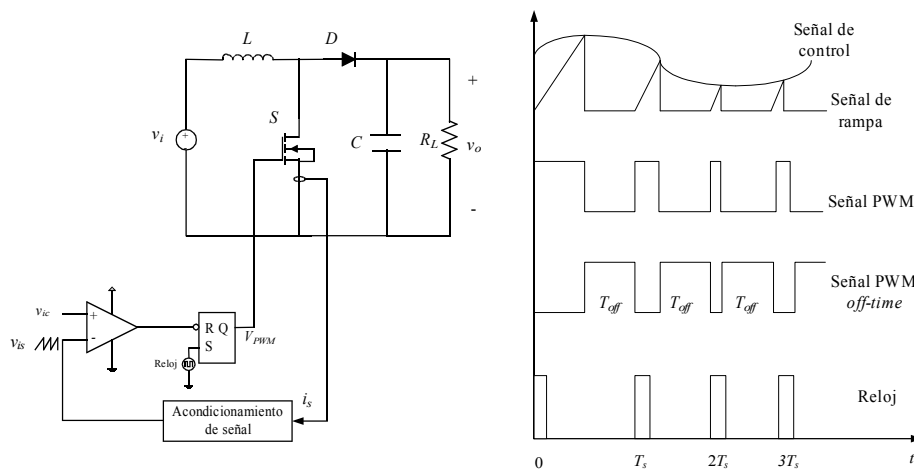


Figura 5.12: Esquema eléctrico y formas de onda para el control en corriente por tiempo de no conducción constante para un convertidor Boost.

Una señal de rampa v_{is} se activa cada vez que el transistor del convertidor empieza a conducir. Como se puede apreciar en la Figura 5.12, esta señal de rampa puede derivar a partir del sensado de corriente por el transistor o por la bobina. La rampa es comparada con la señal de control v_{ic} y la salida del comparador activa la entrada R (reset) del biestable. La entrada S (set) se conecta a una señal de reloj que determina el instante en que el transistor empieza a conducir. El flanco de subida de la señal de reloj dispara el biestable, activando la salida Q y poniendo la señal V_{PWM} a nivel “1” lógico. Cuando la señal de rampa alcanza el valor de la señal de control, el biestable se resetea y la señal V_{PWM} pasa a nivel “0” lógico y permanece en este nivel hasta que el flanco de reloj vuelva a activar el biestable. En consecuencia se genera una señal PWM de anchura variable.

Como ya se ha mencionado anteriormente, en el caso del control por tiempo de no

conducción constante, la señal de rampa utilizada puede ser la propia corriente por la bobina o el transistor del convertidor. De forma análoga, pero generando la señal de rampa cuando el transistor pasa a no conducción, se puede entender el control por tiempo de conducción constante.

El método de control por tiempo de no conducción constante elimina los problemas de inestabilidad que aparecían en el control de corriente de pico y de valle, [154]. Como se ha analizado en la sección 5.2.1, el ciclo de servicio del convertidor debe ser menor de 0,5 para evitar que se produzcan oscilaciones no amortiguadas y el convertidor se vuelva inestable. Para solucionar este problema se demostró que podía emplearse una rampa de compensación. La Figura 5.13 muestra como el control por tiempo de no conducción constante favorece el rechazo a las perturbaciones en la corriente.

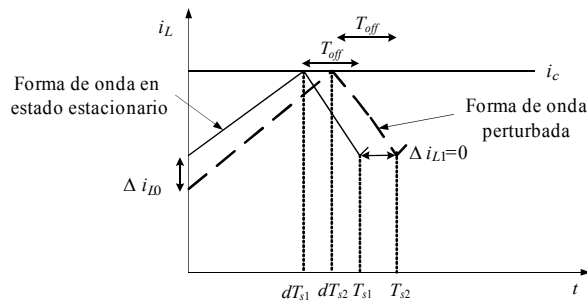


Figura 5.13: Rechazo a las perturbaciones en el control de corriente por tiempo de no conducción constante.

Considerando que sólo se producen perturbaciones en la corriente, la pendiente de la corriente en cada intervalo de conducción se mantiene constante. Al ser el valor de la corriente de control el mismo para la señal no perturbada y para la señal perturbada, el valor máximo de la corriente por la bobina coincide con la corriente de control.

Cuando se produce la intersección entre la corriente por la bobina y la corriente de control, el transistor, de acuerdo al principio de operación del control por tiempo de no conducción constante, deja de conducir y la pendiente de la corriente por la bobina se vuelve negativa. El tiempo durante el que el transistor no está conduciendo es constante, y también es constante, como ya se ha dicho antes, la pendiente de la corriente por la bobina. Entonces la variación de la corriente por la bobina durante el intervalo de no conducción en el primer ciclo de conmutación,

también se mantiene constante. Luego el nivel de corriente mínimo que alcanza la corriente por la bobina para la señal no perturbada y la señal perturbada es el mismo, anulándose así la diferencia entre ambas señales. Es decir, el control de corriente por tiempo de no conducción constante corrige los problemas de inestabilidad en el primer ciclo de conmutación.

En base a esta observación, se deduce también que mediante el control de corriente por tiempo de no conducción constante, el rizado de corriente se mantiene constante (valor de corriente pico a pico). En consecuencia, el valor de corriente crítica que determina el umbral entre el modo de conducción continuo (CCM) y discontinuo (DCM) del convertidor también es fijo.

Otro de los efectos que tiene este método de control se observa sobre la corriente de salida, que en el caso del convertidor Boost corresponde con la corriente que pasa por el diodo (Figura 5.9). Con métodos de control de corriente a frecuencia constante, el tiempo durante el que la corriente pasa por el diodo (la bobina entrega energía a la red de salida), que corresponde con el tiempo de no conducción, depende del error entre la corriente sensada y la de control, es decir, no es una fracción de tiempo constante. En cambio, empleando el control por tiempo de no conducción constante, la corriente pasa por el diodo durante este intervalo de tiempo constante [155], con lo cual el número de armónicos de la corriente de salida es menor respecto al control a frecuencia constante. La Figura 5.14 muestra las formas de onda de la corriente en el transistor de conmutación y el diodo para los dos tipos de control.

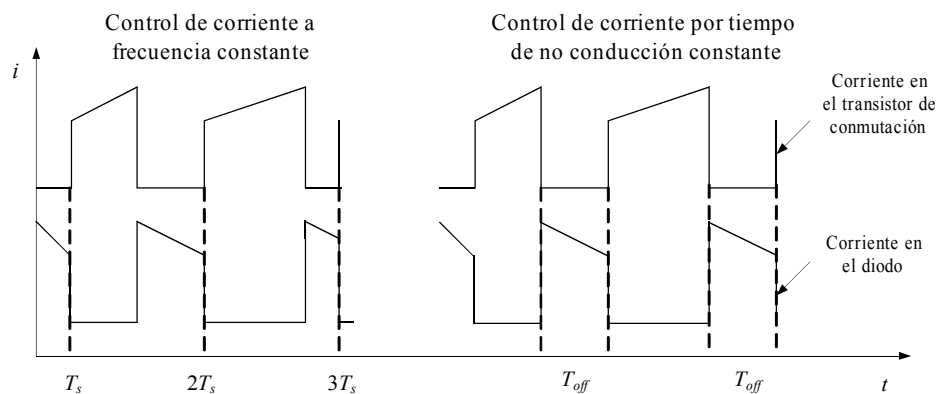


Figura 5.14: Comparación de formas de onda para el control de corriente a frecuencia constante y variable.

Para implementar el control de corriente por tiempo de no conducción constante se puede

emplear el circuito integrado UC1842, Figura 5.15. Este integrado implementa un temporizador en base a una red RC externa (R_T y C_T). Durante el intervalo de conducción del transistor del convertidor, la señal V_{PWM} está a nivel alto, “1” lógico, luego a la salida del comparador LM139 (se utiliza este comparador por ser aconsejado por el fabricante del UC1842) existe un nivel bajo de tensión que se traslada al terminal positivo del condensador C_T , inhibiéndose así la carga del mismo. Cuando el transistor del convertidor deja de conducir, la señal V_{PWM} pasa a nivel bajo, lo que genera un nivel alto a la salida del comparador, produciéndose así la carga del condensador C_T , hasta el nivel de disparo (comienzo de un nuevo ciclo de conmutación del convertidor) durante un intervalo de tiempo constante.

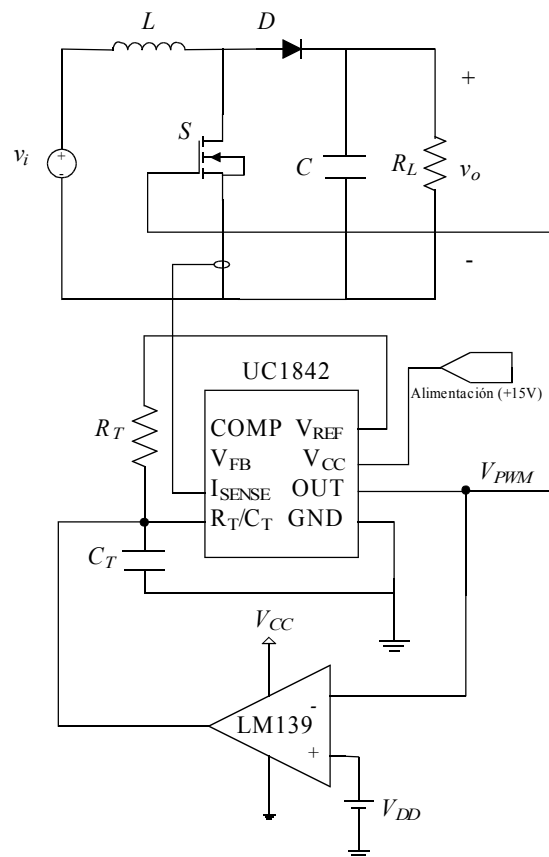


Figura 5.15: Circuito para la implementación del control de corriente por tiempo de no conducción constante.

5.3 Control en corriente del sistema híbrido de pila de combustible

Todo el análisis realizado hasta ahora en el capítulo, ha tenido por objeto facilitar la elección del sistema de control que gestione el suministro de potencia de la pila de combustible, dentro del sistema híbrido experimental objeto de esta Tesis, cuyo esquema se repite de nuevo por comodidad en la Figura 5.16 (análogo a la Figura 4.28).

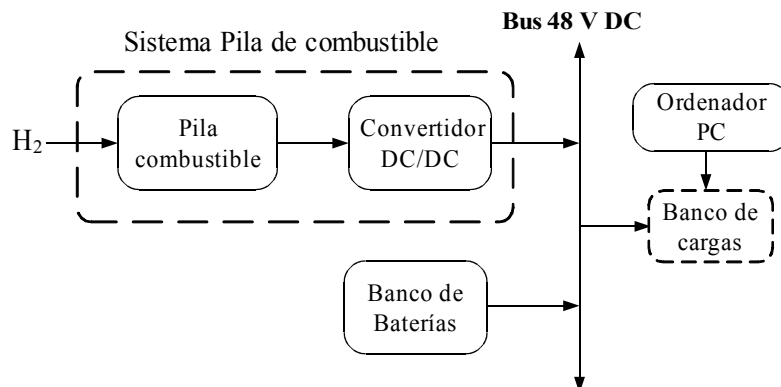


Figura 5.16: Sistema híbrido de pila de combustible a controlar.

Los componentes del mismo son un módulo de pila de combustible Nexa que a través de un convertidor elevador Boost está conectado a un bus de 48V-DC. A este bus también está conectado un banco de baterías (cuatro baterías de 12V cada una conectadas en serie).

A continuación, en base al análisis realizado en el capítulo y a los requerimientos específicos del sistema a controlar, se van a justificar cada una de las decisiones tomadas hasta la implementación práctica y pruebas experimentales del sistema de control desarrollado.

5.3.1 Justificación de la técnica de control de corriente empleada

En la sección 4.2.2 queda justificada la necesidad del control en tensión para que el sistema de pila de combustible pueda alimentar, sin necesidad de otra fuente auxiliar, cargas que funcionen a tensión regulada. Sin embargo, este control no permitía elegir el punto de funcionamiento de la pila, es decir, decidir la potencia que entrega la pila de combustible en cada instante. Para esto es necesario regular la corriente suministrada por la pila de combustible.

Alguno de los métodos de control que se han introducido en la sección anterior, están orientados a regular la tensión a la salida del convertidor en base a medir la corriente por la bobina o por el transistor (Figura 5.3, Figura 5.7, Figura 5.8 y Figura 5.15); sin embargo, en el caso del sistema híbrido con pila de combustible objeto de estudio, no es necesario regular la tensión a la salida del convertidor porque esta tensión está fijada por el banco de baterías⁵³ (ver Figura 5.16). Es decir, el problema a resolver es poder controlar el ciclo de servicio del transistor del convertidor en función del error que exista entre la corriente sensada i_s y la corriente de control i_c (ver Figura 5.17), de modo que el error tienda a ser eliminado.

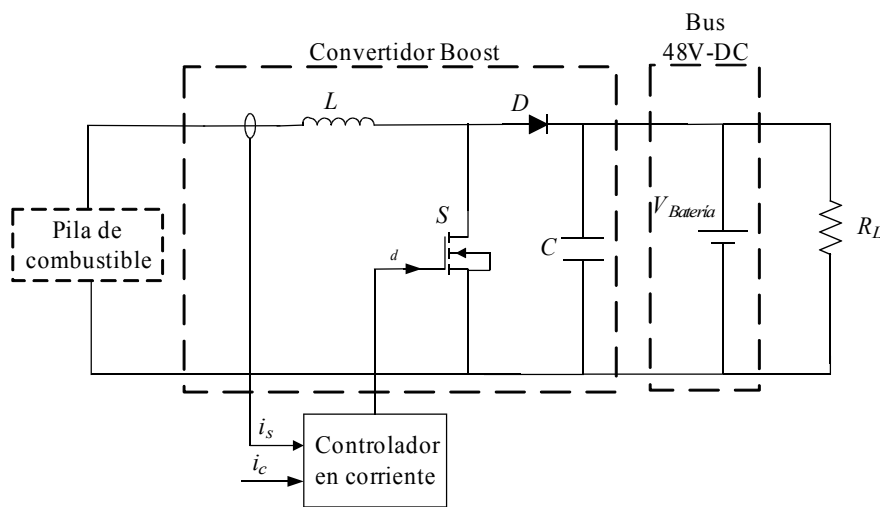


Figura 5.17: Esquema de sistema híbrido con pila de combustible y control de corriente.

Para el caso particular de control de corriente en un convertidor Boost (como este caso), regular la corriente por la bobina equivale a controlar directamente la corriente suministrada por la pila de combustible y en consecuencia la potencia generada.

A continuación se procede a justificar la decisión del método de control de corriente que se va a utilizar. Los criterios para esta elección son: facilidad de implementación, estabilidad del lazo de control, insensibilidad al ruido y reducción del error entre corriente de pico y corriente

⁵³ Como ya se ha recordado en varias ocasiones a lo largo de esta memoria, no es objeto de esta Tesis el estudio e implementación de los procesos de recarga de las baterías; en consecuencia durante todas las pruebas de laboratorio la recarga de las baterías se ha realizado de forma externa mediante un cargador comercial, por lo que la tensión en el bus de 48 V-DC siempre ha estado garantizada.

media. En este sentido, atendiendo a aspectos sobre facilidad de implementación, el control por conductancia implica la necesidad de al menos tres amplificadores operacionales y un estudio exhaustivo de las ganancias en frecuencia de cada uno de ellos en el lazo de realimentación. Respecto a los métodos de control a frecuencia variable, el control por deslizamiento necesita construir una superficie de deslizamiento variante con el tiempo⁵⁴.

Respecto a la estabilidad del lazo de control, se ha demostrado que el control de corriente de pico (igualmente para el control de corriente de valle) es inestable para valores del ciclo de servicio superiores a 0,5; siendo necesario una rampa de compensación, lo que complica la implementación. El control por conductancia establece restricciones concretas para la elección de las ganancias de los amplificadores con objeto de garantizar la estabilidad del lazo; y el control por deslizamiento provoca que la señal de salida presente alta sobreoscilación, ya que en el instante inicial (arranque del convertidor) el error entre la señal de control y la sensada es máximo. Este valor grande del error equivale a que el transistor de conmutación va a estar conduciendo durante mucho tiempo; el suficiente hasta que la señal sensada coincida con la de control. Como el control por deslizamiento es a frecuencia variable, el tiempo de conducción no es fijo y dependerá del valor de la señal de control. En consecuencia, para el caso del convertidor Boost, donde la bobina está a la entrada del convertidor en serie con la fuente de entrada, la corriente por la bobina irá incrementándose durante todo el tiempo que el transistor esté conduciendo, generándose así sobreoscilación en la señal que se está controlando.

Por otro lado, el módulo de pila de combustible elegido para la implementación del prototipo (Nexa de Ballard) introduce una complejidad adicional al control: el módulo dispone de un mecanismo de autoregulación que desconecta la pila de combustible cuando el nivel de corriente bruta (corriente de carga + corriente de autoconsumo) supera 75 A, o bien la tensión alcanza valores inferiores a 18 V. Entonces, para poder emplear el control por deslizamiento en un sistema con este módulo comercial, es necesario definir y establecer un circuito que limite el tiempo máximo de conducción del transistor de conmutación para evitar que actúe el sistema de autocontrol de la pila de combustible. Además, este mecanismo debe ser capaz de variar el tiempo máximo de conducción en función del error entre el valor sensado de corriente y la

⁵⁴ La superficie de deslizamiento variable es necesaria para asegurar que el sistema sea estable frente a perturbaciones en la tensión de entrada o en la resistencia de carga.

corriente de control. En definitiva y para esta aplicación, se desecha por compleja la implementación de un sistema de control por deslizamiento.

Respecto de los métodos de control de corriente a frecuencia constante, el control de corriente de pico (y de valle) y el control por conductancia son muy sensibles al ruido.

Sobre los métodos a frecuencia variable, si para el control por tiempo de no conducción constante se utiliza la corriente por la bobina para generar la señal de rampa, se aumenta la sensibilidad al ruido, lo cual contrarresta la ventaja relativa a la facilidad de implementación práctica que supone sensar la corriente por la bobina.

El último aspecto a considerar es el error entre la corriente de pico y corriente media respecto del seguimiento de una señal de referencia, el cual puede ser un factor determinante en el método de control de corriente de pico y de valle. En la sección 5.2.1 se puso de manifiesto que en un convertidor Boost este error provoca distorsión en la forma de onda de la corriente a la entrada del convertidor. El pico de corriente sigue la referencia, pero la corriente media no. El error entre corriente de pico y corriente media empeora especialmente cuando el convertidor trabaja en modo de conducción discontinuo, cuando la señal de corriente se anula durante parte del ciclo. La solución consiste en emplear una bobina de gran tamaño, perjudicando así la insensibilidad al ruido.

A continuación, con la intención de seguir profundizando en la búsqueda de la mejor solución para implementar el controlador de corriente, se va a analizar como último factor decisivo una cuestión experimental primordial: la forma de realizar el necesario sensado de corriente.

5.3.2 Sensado de corriente

Para establecer el control de corriente es necesario emplear un bloque de acondicionamiento que adapte la corriente sensada en el convertidor a una señal de tensión interpretable por el lazo de control. Para esto existen diferentes soluciones posibles: mediante un amplificador de instrumentación, un circuito integrado para monitorizar la corriente o mediante un sensor de efecto Hall. En lo que sigue se particulariza el estudio para el convertidor Boost que usa el prototipo de esta Tesis, en el cual, el sensado de corriente se realiza en la bobina.

- **Sensado de corriente mediante amplificador de instrumentación:** En este caso se emplea una resistencia con valor óhmico muy bajo (resistencia de shunt R_s) en serie con la bobina. El amplificador de instrumentación transforma la diferencia de tensión entre los extremos de la resistencia en una señal de tensión unipolar referenciada a masa. Para la configuración que se muestra en la Figura 5.18, la tensión a la salida v_{is} se relaciona con la tensión en los extremos de la resistencia de shunt R_s mediante la ecuación (5.65).

$$v_{is} = \frac{R_4}{R_2 + R_4} \cdot \frac{R_9}{R_8} \cdot \left(1 + \frac{2R_6}{POT} \right) (v_s^+ - v_s^-) \quad (5.65)$$

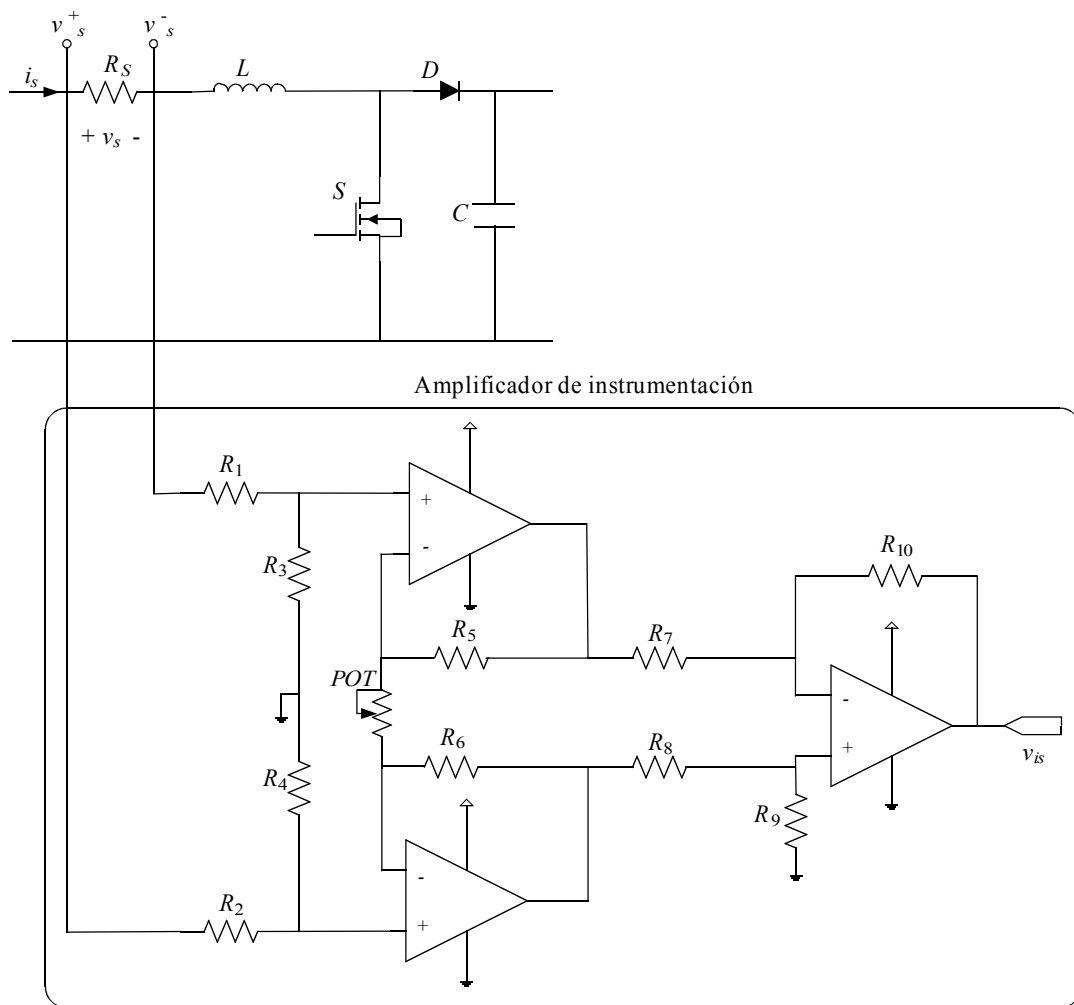


Figura 5.18: Amplificador de instrumentación para el sensado de corriente.

- **Sensado de corriente mediante circuito integrado de monitorización:** En este caso también se emplea una resistencia de shunt en serie con la bobina, pero el circuito correspondiente al amplificador de instrumentación se sustituye por un circuito integrado que permite conocer el valor de la corriente i_s que pasa por la resistencia de shunt en base a generar una señal de tensión. La Figura 5.19 muestra un esquema del circuito interno del integrado INA139. En esencia reduce el circuito del amplificador de instrumentación a un solo amplificador que genera una tensión a la salida v_{is} en función de la corriente en la resistencia de shunt R_s de acuerdo a la ecuación (5.66):

$$v_{is} = \frac{I_s \cdot R_s \cdot R_L}{1k\Omega} = \frac{R_s}{1k\Omega} (v_s^+ - v_s^-) \quad (5.66)$$

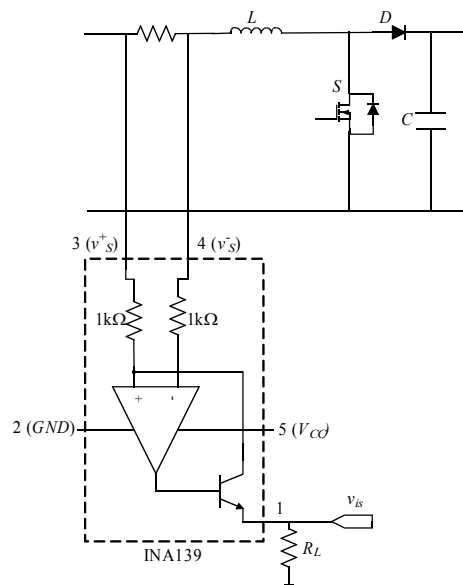


Figura 5.19: Sensado de corriente mediante el CI INA139.

Estas dos opciones para el sensado de corriente presentan la desventaja de que son circuitos con alta sensibilidad al rizado de la corriente, especialmente cuando el valor de corriente es bajo. Además, para el caso de un amplificador de instrumentación, se deben elegir amplificadores de alta velocidad⁵⁵, sin embargo estos encapsulados alcanzan precios muy

⁵⁵ Véase por ejemplo las características de fabricante del comparador LMH 7324, el cual es un comparador con tiempo de retardo de 0,7 ns.

elevados y tienen integrado un sólo comparador, lo que obliga a disponer de más de una unidad para implementar el esquema de sensado de corriente.

- **Sensado de corriente mediante sensor de efecto Hall:** Los transductores de corriente basados en efecto Hall presentan determinadas ventajas respecto al amplificador de instrumentación. En primer lugar destaca la facilidad de conexión, ya que sólo necesita ser colocado sobre el cable conductor del que se quiere conocer la corriente. Además, el coste de estos sensores es mucho más reducido que el de un amplificador de instrumentación.

Otras características notables son su precisión, tiempo de reacción, alta inmunidad a interferencias externas y amplio ancho de banda.

5.3.3 Implementación práctica del circuito de control

Una vez analizados los diferentes métodos de control de corriente y las distintas alternativas para el sensado de corriente, valorando sus ventajas y desventajas para cada caso, se decide realizar la regulación de la potencia suministrada por la pila de combustible a través del convertidor DC/DC Boost (ver Figura 5.16) mediante un controlador de corriente media a frecuencia constante (ver Figura 5.17), empleando un sensor de efecto Hall LEM LTS 25-NP⁵⁶ para el acondicionamiento de señal. Estos sensores generan una salida de tensión v_{is} que varía linealmente respecto a la corriente que pasa por él, i_s , Figura 5.20.

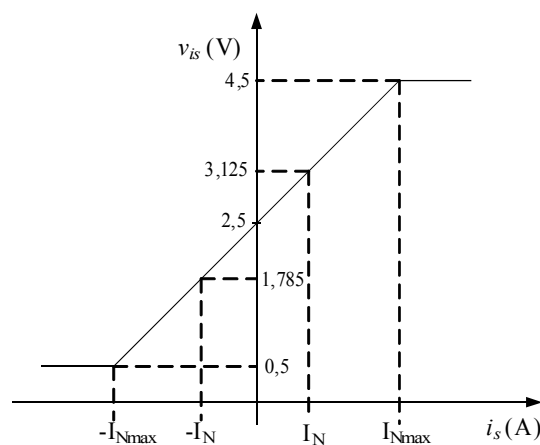


Figura 5.20: Característica V-I del sensor LEM de efecto Hall utilizado.

⁵⁶ El tiempo de reacción de este sensor puede ser inferior a 100 ns y presenta un ancho de banda de hasta 100 kHz.

El circuito de control recibe esta señal de tensión y la compara con la señal de control v_{ic} . La señal PWM que actúa como ciclo de servicio dependerá del error generado.

De acuerdo a los valores de tensión que proporciona el sensor, comprendidos entre 2,5V y 5V, la generación de la señal de control y su posterior comparación se puede implementar mediante el mismo circuito integrado que se utilizó para el control de tensión, el TL494 (ver sección 4.2.2). Ahora no obstante, hay que realizar las modificaciones siguientes respecto de la Figura 4.5. La señal sensada se conecta directamente a la entrada +I1 del circuito integrado TL494 por estar dentro de los niveles de tensión con los que trabaja Figura 5.21.

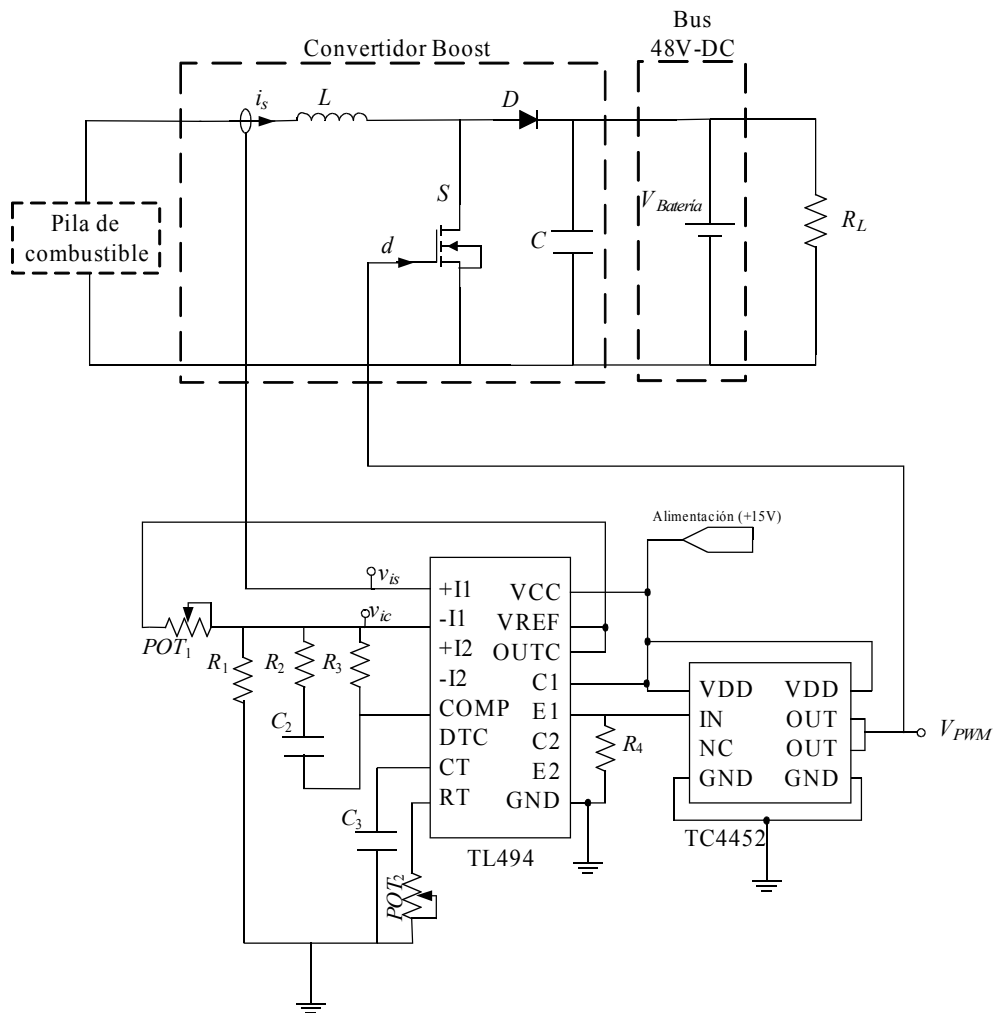


Figura 5.21: Esquema eléctrico del circuito de control de corriente.

La señal de referencia, suministrada por el terminal VREF de 5V del integrado se conecta a la entrada $-I1$ a través de un divisor de tensión variable formado por POT_1 y R_1 . De esta forma, la referencia puede variar entre los valores que varía la señal sensada. La Figura 5.22 muestra la realización física del sistema pila de combustible + convertidor DC/DC con el circuito de control de potencia. Sobre el fondo aparece el módulo de pila de combustible Nexa y en primer plano, se aprecia el convertidor Boost, el sensor de corriente y la placa encargada del control de corriente sobre el convertidor.

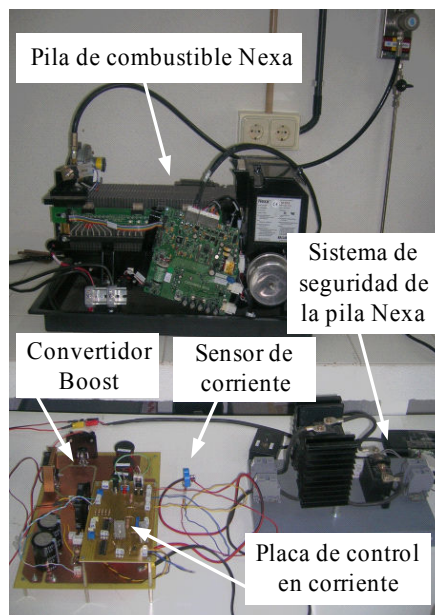


Figura 5.22: Detalle de la implementación física del sistema completo.

Como conclusión y antes de pasar al testeo experimental del prototipo diseñado, cabe decir que existen diversos trabajos donde se presenta un sistema híbrido basado en pila de combustible de arquitectura similar a éste. En ellos se pueden ver diferentes soluciones para la implementación del control. Así por ejemplo en [156] se utiliza la herramienta software VP-SIM, desarrollada por la Universidad de Ohio, para implementar el lazo de control y para realizar el reparto de potencia en base a la estrategia de control seguida. En este caso, se sigue el criterio conocido como estrategia de minimización del consumo equivalente (ECMS-*Equivalent Consumption Minimization Strategy*).

En otro sentido, en [157] se propone un sistema de suministro de energía con aplicación directa en vehículos, formado por una pila de combustible tipo PEM como fuente de potencia principal y un banco de baterías y otro de ultracondensadores como dispositivos de almacenamiento. El balance de energía se hace en base a la regulación de tensión de un Bus DC mediante tres lazos de control en tensión. El primero actúa sobre el banco de ultracondensadores para garantizar la tensión en el bus, el segundo actúa sobre el banco de baterías que debe mantener cargado el banco de ultracondensadores; y el tercero actúa sobre la pila de combustible cuya función es suministrar energía al banco de baterías para mantenerlo a un nivel de carga adecuado. Para la validación del algoritmo de control se construye un sistema hardware realizado con circuitos analógicos, y el cálculo numérico se realiza mediante la herramienta dSPACE, [158].

Finalmente, en [159] el sistema de control pretende garantizar que cada una de las fuentes del sistema híbrido (pila de combustible y batería) trabajen a alta eficiencia y presenten un comportamiento dinámico bueno. En este sistema ambas fuentes están conectadas al bus DC mediante un convertidor (unidireccional para la pila de combustible y bidireccional para la batería) al bus DC. En cada convertidor se emplea un control de tensión y corriente. La suma del error en tensión más el error en corriente es comparada con una señal diente de sierra para generar el ciclo de servicio del convertidor. Para esto se implementa un circuito de control con un lazo de tensión y otro de corriente. En este caso, la implementación del lazo de control se realiza íntegramente mediante hardware.

Como se puede deducir, existen diversas alternativas para resolver el lazo de control en corriente: íntegramente mediante software, mediante implementación hardware-software o íntegramente mediante hardware. En este trabajo se ha optado por la tercera solución.

5.3.4 Testeo experimental del sistema

En base a la implementación física que se ha realizado, los resultados experimentales están destinados a reflejar el comportamiento real del prototipo construido (ver Figuras 5.17 y 5.22) y demostrar que es posible regular la potencia suministrada por la pila de combustible, dentro de su rango de potencia, para cualquier demanda de carga. Para esto, la experimentación se ha dividido en dos grupos. El primero muestra las formas de onda correspondientes a la

tensión y corriente cuando se aplica el control de corriente desarrollado sobre el sistema pila de combustible + convertidor Boost. Así se presentan los resultados que se obtienen a partir de dos configuraciones: la primera, cuando la referencia en corriente es fija y se produce un cambio en la carga. La segunda, cuando se aplica un cambio de referencia de corriente manteniendo el mismo valor de la carga.

El segundo grupo de pruebas recoge los resultados experimentales cuando el sistema de pila de combustible es conectado al bus de 48 V-DC mantenido por el banco de baterías descrito en la sección 4.2.4. Se mostrará cómo cuando se mantiene un valor de referencia de corriente fijo (potencia fijada en la pila de combustible) y se varía la carga, el banco de baterías garantiza el valor de tensión en el bus a la vez que suministra la diferencia de corriente entre la demandada por la carga y la suministrada por la pila de combustible.

- **Control de corriente en el sistema pila de combustible + convertidor DC/DC:** En este caso se han realizado dos pruebas diferentes. En la primera de ellas se fija la referencia de corriente a 12 A y el valor resistivo de la carga en $R_L = 10 \Omega$. De acuerdo a los resultados experimentales, Figura 5.23, la tensión en la pila de combustible es de 33 V⁵⁷. A la salida del convertidor Boost, la tensión es de 63 V y la corriente entregada a la carga medida es de 5,8 A. El valor de corriente que se esperaba a la salida del convertidor, considerando pérdidas nulas, es de 6,3 A. La diferencia entre ambos valores se justifica teniendo en cuenta la eficiencia del convertidor construido (sección 4.3). Este convertidor presenta una eficiencia que varía desde 0,90 para potencias muy bajas hasta 0,96 para la potencia nominal. En este caso, la potencia de entrada al convertidor es de $(33 \text{ V} \cdot 12 \text{ A}) = 396 \text{ W}$, mientras que la potencia de salida se calcula a partir de $(63 \text{ V} \cdot 5,8 \text{ A}) = 365,4 \text{ W}$, resultando así que la eficiencia en este punto de funcionamiento es $\eta = 0,92$. El ciclo de servicio que resulta de aplicar la expresión (3.24) para las tensiones es $D = 1 - (33 \text{ V} / 63 \text{ V}) = 0,4$.

Durante el intervalo de funcionamiento, se provoca que el valor resistivo de la carga a la salida se reduzca a la mitad, siendo $R_L = 5 \Omega$, sin cambiar la referencia de corriente. Puesto que la referencia no cambia, la corriente suministrada por la pila de combustible se sigue manteniendo

⁵⁷ El valor teórico de tensión a la salida de la pila de combustible según la curva de polarización del fabricante mostrada en la Figura 3.3 es, para 12 A, de 35 V. La diferencia de tensión entre el valor teórico y el experimental se debe a que, como ya se comentó en la sección 4.3, la pila de combustible, con las horas de funcionamiento sufre una degradación que provoca un pequeño desplazamiento de su curva de polarización inicial al salir de fábrica.

en 12 A y, en consecuencia, la tensión entre los extremos de la misma continúa en 33 V. Es decir, el punto de operación de la pila de combustible permanece inalterable. En cambio, la tensión a la salida del convertidor desciende como consecuencia de la reducción de la carga, alcanzando el valor de 45 V, y la corriente medida por la carga es 8,1 A. El valor de corriente que se esperaba a la salida del convertidor, considerando pérdidas nulas, es de 9 A. La diferencia entre la potencia a la entrada y a la salida determina la eficiencia del convertidor, que para este caso sigue siendo $\eta = (45 \text{ V} \cdot 8,1 \text{ A}) / (33 \text{ V} \cdot 12 \text{ A}) = 0,92$. El ciclo de servicio con el que trabaja ahora el convertidor es $D = 1 - (33 \text{ V}/45 \text{ V}) = 0,2$. La prueba anterior muestra el correcto funcionamiento del controlador de corriente diseñado, ya que para una referencia fija, la disminución de la resistencia de carga ha provocado que el controlador disminuya el ciclo de servicio para que aumente la corriente a la salida del convertidor.

La segunda prueba que se realiza sobre el sistema de pila de combustible consiste ahora en modificar la referencia de corriente, de modo que la pila de combustible modifique su punto de funcionamiento. La carga se fija en $R_L = 10 \Omega$, la señal de referencia se fija inicialmente en 7 A, lo que provoca una tensión entre los extremos de la pila de combustible de 36 V. La tensión a la salida del convertidor es de 50 V y la corriente suministrada a la carga es 4,7 A; el ciclo de servicio al que está trabajando ahora el convertidor es $D = 1 - 36 \text{ V}/50 \text{ V} = 0,28$.

Durante el intervalo de funcionamiento se varía el valor de la referencia, pasando de 7 A a 3 A, para volver posteriormente al valor inicial. Tras el cambio de la señal de referencia, la tensión en la pila pasa a 39 V (ver Figura 5.24) y el nuevo punto de operación de la pila de combustible viene determinado por el par de valores (3 A, 39 V). La tensión a la salida del convertidor desciende hasta los 39,5 V, la corriente a la salida del mismo es de 2,7 A y el ciclo de servicio para este nuevo punto de funcionamiento es prácticamente cero, $D = 1 - 39 \text{ V}/39,5 \text{ V} = 0,01$. Se observa pues que la eficiencia para esta potencia de trabajo es $\eta = (39,5 \text{ V} \cdot 2,7 \text{ A}) / (39 \text{ V} \cdot 3 \text{ A}) = 0,91$. Esta prueba vuelve a mostrar el funcionamiento adecuado del controlador de corriente diseñado, ya que para una referencia variable, el controlador ajusta el ciclo de servicio del convertidor, de modo que la pila de combustible la pueda seguir.

Sobre la Figura 5.24 se puede deducir también la forma de solucionar el problema de suministro⁵⁸ de la pila de combustible. Como ya se vio en la Figura 3.4, la dinámica lenta de la

⁵⁸ El problema de suministro de combustible en la pila de combustible es conocido en las fuentes bibliográficas internacionales como *fuel starvation phenomenon*. Este fenómeno es provocado por la falta de respuesta de la pila a

pila de combustible viene causada por la dificultad que tiene el flujo de combustible que alimenta la pila para seguir los cambios en la carga. En esta figura se puede comprobar que limitando la variación de la corriente de referencia a una pendiente máxima de 4 As^{-1} se consigue que cuando se produzca un incremento de la corriente demandada, la pila de combustible sea capaz de responder de forma fiel con un comportamiento puramente resistivo.

El valor máximo de la pendiente de la corriente de referencia depende fundamentalmente de la potencia de la pila. Para pilas de mayor potencia a la empleada en este prototipo, la velocidad máxima de respuesta suele venir dada en términos de potencia, [160]. Así, por ejemplo, para pilas de combustible con potencia nominal de 2,5 kW, la variación de demanda de potencia no puede ser superior a 500 Ws^{-1} , mientras que para pilas de combustible de 40 kW la pendiente se limita a $2,5 \text{ kW}^{-1}$.

- **Control de corriente en el sistema híbrido: pila de combustible + convertidor DC/DC + batería:** Cuando la pila de combustible y el convertidor DC/DC se conectan al bus mantenido por el banco de baterías, se garantizan los 48 V de salida del sistema completo. Además, para una referencia de corriente dada y si fuera necesario, el banco de baterías suministra el exceso de potencia entre la demandada por la carga y la suministrada por la pila de combustible.

La Figura 5.25 muestra los resultados experimentales cuando la señal de referencia se fija a 12 A y la carga a $R_L = 10 \Omega$. La referencia de corriente de 12 A fija la tensión de salida de la pila en 33 V. La tensión en el bus se mantiene a 48 V y la corriente a la salida medida es de 5 A. Idealmente se espera un valor de corriente para $R_L = 10 \Omega$ de 4,8 A; esta diferencia se debe a la propia tolerancia de la resistencia. En este punto de trabajo, la pila de combustible es capaz de asumir toda la demanda de la carga.

Si ahora la resistencia de carga se reduce a la mitad (5Ω) sin cambiar la referencia de corriente (Figura 5.26), la pila sigue en su mismo punto de operación (12 A, 33 V), pero la demanda de corriente en la carga es ahora prácticamente el doble que en el caso anterior. La corriente de la carga medida es de 9,8A (el valor ideal de corriente por la carga esperado se calcula de $2 \cdot 4,8 \text{ A} = 9,6 \text{ A}$). Puesto que la pila sólo aporta al bus 5 A, el resto de corriente hasta 9,8 A es suministrado por el banco de baterías. Nótese en la Figura 5.26 cómo cada vez

los cambios instantáneos en la demanda de la carga. Esto es consecuencia de las constantes de tiempo que lleva asociadas todo sistema de pila de combustible real: bombas, válvulas, etc.

CAPÍTULO 5. CONTROL EN CORRIENTE DEL SISTEMA HÍBRIDO DE PILA DE COMBUSTIBLE

que se conmuta el valor de la carga de 10 a 5 Ω manteniendo la referencia de corriente fija, el banco de baterías pasa de suministrar 0 A a 4,8 A al bus DC.

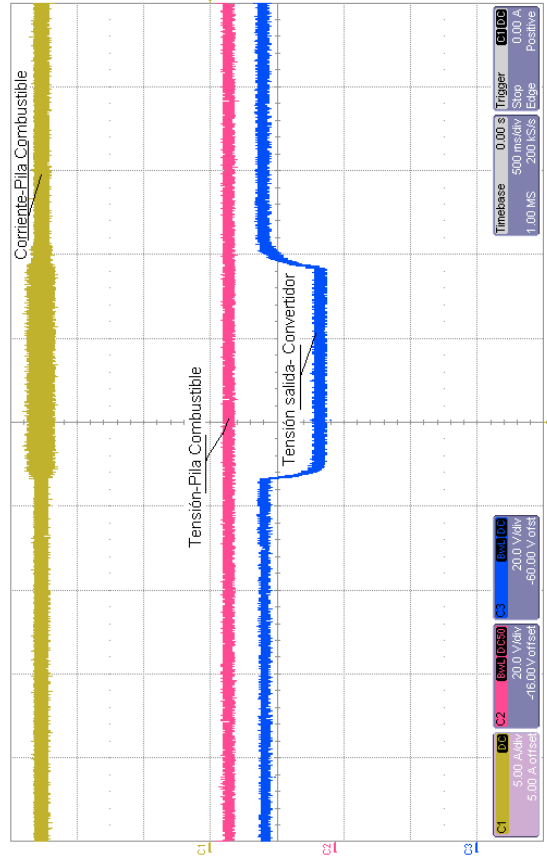


Figura 5.23: Pila de combustible + convertidor DC/DC. Resultados experimentales cuando se varia la carga manteniendo fija la referencia: Corriente-Pila Combustible (Canal C1: 5 A/div, 500 ms/div), Tensión-Pila Combustible (Canal C2: 20 V/div, 500 ms/div, sonda x20), Tensión-Bus DC (Canal C3: 20 V/div, 500 ms/div). Osciloscopio LeCroy 500 MHz.

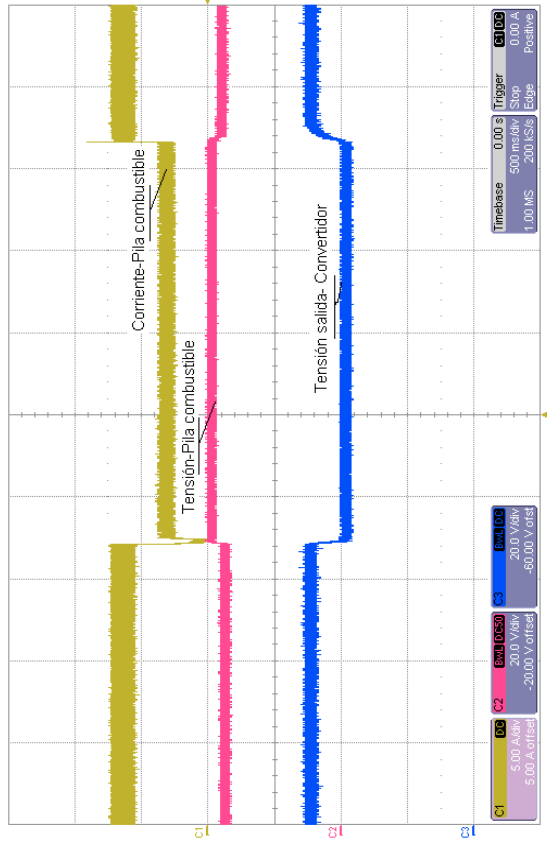


Figura 5.24: Pila de combustible + convertidor DC/DC. Resultados experimentales cuando se varia la referencia manteniendo constante la carga: Corriente-Pila combustible (Canal C1: 5 A/div, 500 ms/div), Tensión-Pila Combustible (Canal C2: 20 V/div, 500 ms/div, sonda x20), Tensión-Bus DC (Canal C3: 20 V/div, 500 ms/div). Osciloscopio LeCroy 500 MHz.

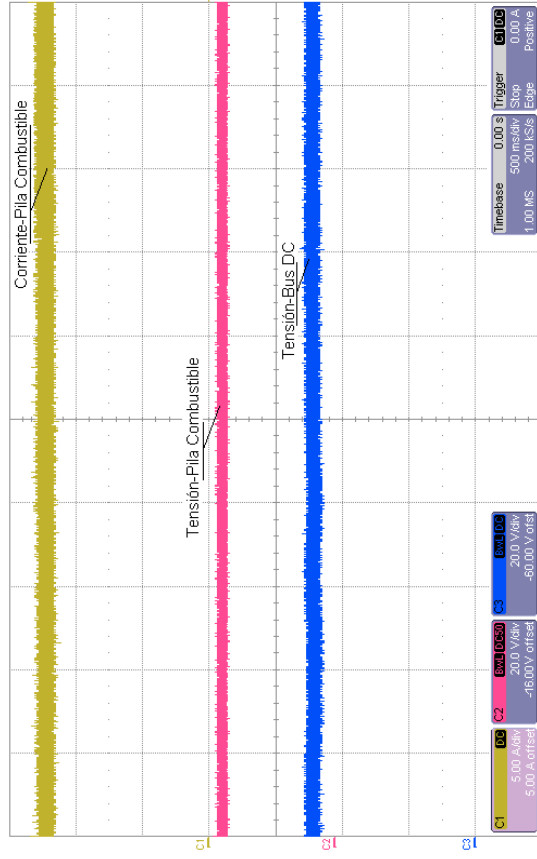


Figura 5.25: Sistema híbrido completo. Resultados para una referencia de corriente en la pila de 12 A y R_L fija a 10 Ω (a): Corriente-Pila Combustible (Canal C1: 5 A/div, 500 ms/div), Tensión-Pila Combustible (Canal C2: 20 V/div, 500 ms/div, sonda x20), Tensión-Bus DC (Canal C3: 20 V/div, 500 ms/div). Osciloscopio LeCroy 500 MHz.

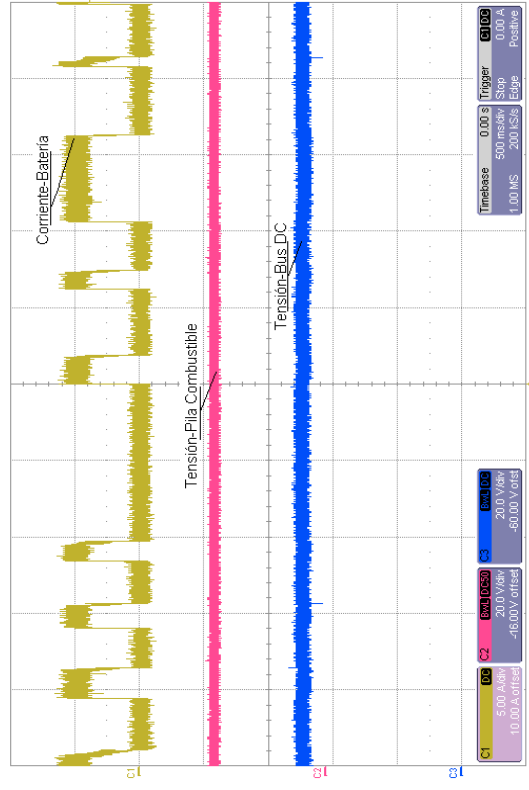


Figura 5.26: Sistema híbrido completo. Resultados experimentales para una referencia de corriente en la pila de 12 A y R_L , conmutando entre 10 y 5 Ω (b): Corriente-Banco Baterías (Canal C1: 5 A/div, 500 ms/div), Tensión-Pila Combustible (Canal C2: 20 V/div, 500 ms/div, sonda x20), Tensión-Bus DC (Canal C3: 20 V/div, 500 ms/div). Osciloscopio LeCroy 500 MHz.

5.4 Conclusiones y comentarios bibliográficos

Este capítulo ha estado caracterizado por tener dos partes claramente diferenciadas: una de alta componente teórica y otra con un marcado carácter experimental. La elección de una de las posibles soluciones para la implementación del sistema de control de corriente para el prototipo desarrollado ha venido acompañada de un estudio de los diferentes métodos de control analógico de corriente presentes en la literatura. Así por ejemplo, las referencias [137]-[155] pueden ser consultadas para conocer las ventajas y desventajas de cada uno de estos métodos de control, clasificados según [137]-[140] en control de corriente de pico, de corriente de valle, de corriente media, por conductancia, por deslizamiento y tiempo de conducción/no conducción constante.

Después del exhaustivo análisis realizado, la solución por la que se ha optado para realizar el control de corriente (por *corriente media*) se ha justificado en base a aspectos fundamentales como, facilidad de implementación, estabilidad del lazo de control, insensibilidad al ruido y reducción del error entre corriente de pico y corriente media. Las referencias [156]-[159] muestran posibles alternativas para implementar el lazo de control: mediante software, hardware o combinación de ambas. La principal ventaja de la segunda es su velocidad frente a las otras dos.

La tercera sección ha estado dedicada a la parte experimental del capítulo. Se han propuesto distintas soluciones para realizar el sensado de corriente, desde la construcción de un amplificador de instrumentación, pasando por el empleo de un circuito integrado de monitorización, hasta el uso de un sensor de efecto Hall, que por sus características y prestaciones, conforma la alternativa por la que se ha optado. Además, se ha descrito en detalle la circuitería de control que se ha construido para realizar el control de corriente, donde se ha utilizado el mismo circuito integrado que se empleó para la regulación de tensión efectuada en el Capítulo 4, aunque en este caso, el objetivo responde a un esquema eléctrico ligeramente diferente, ya que ahora se trata de tener la posibilidad de variar la señal de referencia y no la señal real medida.

Por último, se ha probado experimentalmente el prototipo construido. Así se ha comprobado que el sistema pila de combustible sigue la corriente de referencia que ha sido

CAPÍTULO 5. CONTROL EN CORRIENTE DEL SISTEMA HÍBRIDO DE PILA DE COMBUSTIBLE

establecida en cada momento. Además se ha establecido cómo es posible fijar el punto de operación de la pila de combustible a la vez que la tensión en el bus se mantiene fija a 48V.

Se ha comprobado experimentalmente también cómo el funcionamiento simultáneo de la pila de combustible junto con las baterías aparece siempre que se fija el punto de trabajo de la primera y las variaciones en la carga implican un aumento en la demanda de potencia, que debido a la referencia de corriente impuesta por el controlador, no puede ser atendida por la pila de combustible.

Capítulo 6. Conclusiones y Desarrollos futuros

Este último capítulo que cierra la memoria de esta Tesis está orientado a recoger todas las conclusiones derivadas de los trabajos de investigación realizados, lo cual conformará la primera sección del capítulo, así como las principales aportaciones y futuras líneas de trabajo que se prevé pueden surgir de la Tesis, que serán el objeto de la segunda sección.

En esta Tesis se ha realizado el diseño, desarrollo, construcción y pruebas de un prototipo experimental de sistema híbrido formado por una pila de combustible⁵⁹ y un banco de baterías. La topología en base a la que se ha diseñado y construido toda la electrónica de potencia corresponde al esquema de conexión para la alimentación de una carga aislada. Para esto ha sido necesario realizar un análisis atendiendo a los tipos de pilas de combustible existentes, las diferentes aplicaciones y disponibilidad comercial. En cuanto a la experimentación práctica, antes de afrontar la implementación física del sistema se ha realizado un estudio teórico de simulación que ha permitido disponer de un modelo de estado apto para control de un sistema integrado por una pila de combustible y un convertidor DC/DC con topología elevadora. A la hora de interconectar las dos fuentes de potencia (pila de combustible y banco de baterías), de acuerdo a la topología elegida, ha sido necesario establecer un mecanismo de control en tensión (para fijar el nivel de tensión en cada punto debido a que la pila de combustible no entrega potencia regulada) y un mecanismo de control en corriente, ya que al existir más de una fuente, se puede decidir la fracción de potencia a suministrar por la pila de combustible.

⁵⁹ Utilizando el concepto planta = pila de combustible + convertidor DC/DC desarrollado en esta Tesis, el sistema y también su potencia, puede ser extendido paralelizando plantas conectadas al bus de continua de 48 V, y controlando de forma adecuada el reparto de potencia entre todas las plantas así como entre ellas y el banco de baterías.

Respecto a las conclusiones que se verán a continuación, éstas tienen por objetivo mostrar los resultados teórico, de simulación y experimental, que contienen la mayoría de los capítulos de esta Tesis.

6.1 Conclusiones

Respecto al estudio y revisión de la tecnología de las pilas de combustible que se realiza en el **Capítulo 2**, lo primero que se deduce es que el estado actual de la tecnología ha sido fruto de un arduo desarrollo que ha durado casi dos siglos; desde que, como se puede comprobar en la carta que Schöbein escribe a Faraday el 4 de Abril de 1840, aquel confesara que no concebía la forma en la que Grove había sido capaz de obtener electricidad a partir de la combinación de hidrógeno y oxígeno. A este descubrimiento le siguieron dos importantes hitos: la fundamentación teórica del proceso electroquímico que sucede en una pila de combustible formulada por Ostwald, y su implementación práctica de forma útil, realizada por Bacon.

Del estudio realizado sobre las características de las pilas de combustible, su principio de funcionamiento y clasificación según el tipo de electrolito usado, se concluye que no todos los tipos de pilas de combustible han alcanzado el desarrollo suficiente como para ser utilizados comercialmente. No obstante, para las pilas de combustible que ya experimentan una explotación comercial considerable, sí se pueden ver las múltiples aplicaciones para las que pueden ser utilizadas: aplicaciones estacionarias, portátiles, de micropotencia, de transporte, etc.

De la comparativa realizada entre las pilas de combustible, los motores de combustión interna, las baterías y los ultracondensadores, se extrae que las baterías, los ultracondensadores y las pilas de combustible son dispositivos complementarios para la mayoría de las aplicaciones. Por tanto, en general, la sustitución de un motor de combustión interna por una pila de combustible requiere que ésta esté hibridada casi siempre con baterías y en algunos casos, y para aplicaciones muy específicas, con ultracondensadores. También, es posible que se dé la hibridación pila de combustible + batería + ultracondensador para cubrir las dos principales carencias de las pilas de combustible: respuesta lenta e imposibilidad de recuperar energía, mediante frenada regenerativa, por ejemplo. La característica que diferencia un ultracondensador de una batería es que el primero tiene gran capacidad de almacenamiento de energía en términos de peso y volumen, pero es incapaz de realizar un suministro constante a

una carga, ya que su descarga es muy rápida. Por tanto, el ultracondensador es ideal para estar sometido a continuas cargas y descargas con requerimientos de liberación de energía muy rápidos. No obstante, los últimos desarrollos en baterías de iones de litio están poniendo en duda la necesidad de disponer de ultracondensadores en aplicaciones de automoción y otras.

En definitiva, se puede afirmar que hoy en día hay tecnología suficiente para sustituir en los vehículos los motores de combustión interna por sistemas híbridos no contaminantes basados en pilas de combustible. No obstante, ello requiere también de una fuerte inversión en infraestructuras, fundamentalmente en hidrogeneras⁶⁰.

En cuanto a la integración de los sistemas de pilas de combustible para su utilización práctica, las topologías que marcan las directrices para luego elegir los sistemas de acondicionamiento de potencia, dependen especialmente del tipo de carga que se desea alimentar: carga aislada, sistema de generación de potencia ininterrumpida, sistema de generación de potencia para inyección a red, sistema de automoción, etc.

Otro de los aspectos a resaltar es la integración de las pilas de combustible con otros sistemas de producción de energía renovable. Esta hibridación se está convirtiendo en una opción muy interesante, ya que cuando se utilizan sistemas de producción de energía renovable complementarios, la eficiencia y la duración del suministro del sistema global resulta sensiblemente mejorados.

El **Capítulo 3** ha tenido como objetivo fundamental el desarrollo de un modelo apto para control de la planta integrada por el sistema pila de combustible-convertidor DC/DC. Para ello se ha seguido un desarrollo por pasos que ha permitido afrontar los sistemas de pila de combustible y convertidor DC/DC por separado, para luego integrarlos bajo el concepto de la ingeniería de control de planta a controlar. Si bien, existen trabajos publicados sobre modelado de pilas de combustible desde hace más de una década, las deficiencias de estos modelos para reflejar el comportamiento temporal real de la pila de combustible, ha provocado que la comunidad científica procediera al desarrollo de modelos dinámicos de pilas de combustible, basados principalmente en ecuaciones empíricas y/o reacciones electroquímicas dentro de cada celda de la pila. No obstante, hasta que no se han elaborado modelos dinámicos de pilas de

⁶⁰ Una adecuada red de hidrogeneras, similar a la que ya existe de gasolineras, permitiría recargar hidrógeno en ruta de forma análoga a como se hace hoy en día con la gasolina o el gasoil. Esto está empezando a ser ya una realidad; así por ejemplo en Septiembre 2008 el número de hidrogeneras en Europa es de 60, de las cuales dos están en España, [161].

combustible desde el punto de vista de sus terminales eléctricos, no se han podido abordar técnicas formales de control para decidir qué cantidad de potencia debe suministrar la pila en cada momento. Un modelo eléctrico preciso de una pila de combustible permite mejorar el aprovechamiento energético de la misma.

En este sentido, se ha realizado un ajuste paramétrico de forma que el modelo dinámico eléctrico de partida pueda ser utilizado para describir el comportamiento experimental de una determinada pila de combustible de tipo PEM, el módulo Nexa de Ballard. No obstante, la metodología desarrollada puede ser considerada genérica y válida, por tanto, para describir el comportamiento real de cualquier pila de combustible de tipo PEM. Para ello, sólo hace falta realizar un ajuste de los parámetros de la pila de combustible deseada según el procedimiento descrito en el capítulo.

De la misma forma, se ha desarrollado el modelo en el espacio de estado para el sistema de acondicionamiento de potencia que debe acompañar al sistema pila de combustible (convertidor Boost), ya que ello la convierte en una fuente de potencia regulada. El modelo del convertidor se ha desarrollado sustituyendo la resistencia de carga por una fuente de corriente equivalente a su consumo. Esto permite extender la validez del modelo a diferentes tipos de cargas: carga resistiva, motor, bus de continua o etapa de potencia, convertidor o inversor.

Después de linealizar los modelos de los dos sistemas (pila de combustible y convertidor Boost) e integrarlos, se obtiene el modelo linealizado y la función de transferencia del sistema completo. El interés de disponer de una función de transferencia del sistema completo, estriba en la posibilidad de diseñar sistemas de control lineales que permiten la gestión del reparto de potencia y la elección del funcionamiento idóneo de la pila de combustible.

En la última parte del capítulo se realizan numerosas simulaciones que permiten comprobar la validez de los modelos desarrollados.

El **Capítulo 4** está caracterizado por su alto contenido experimental. La implementación real de un sistema híbrido de pila de combustible conlleva realizar un estudio minucioso de todos los elementos que componen el sistema y la interrelación entre ellos. Además, hay que tener en cuenta que los sistemas de pila de combustible no tienen aún una gran implantación en el mercado y, por tanto, la disponibilidad comercial es limitada. Por otro lado, las características

físicas y funcionamiento de este tipo de sistemas exigen unos requerimientos adicionales en los sistemas de acondicionamiento de potencia y fuentes auxiliares.

El testeo del prototipo experimental desarrollado en este capítulo requiere disponer de una carga variable que permita configurar todos los escenarios de demanda. Estudiadas las dos soluciones más usadas en la bibliografía: 1) implementación de una carga variable basada en el control del ciclo de servicio de un convertidor conectado a la pila de combustible y 2) cargas electrónicas comerciales, se ha concluido que debido a sus inconvenientes (bien por no ajustarse a las necesidades requeridas, o bien por su elevado coste y reducido rango de operación) no son aptas para utilizarlas en el prototipo construido. En consecuencia se ha decidido la construcción de un banco de cargas controlable desde un PC capaz de alcanzar diferentes niveles de potencia. Esto ha permitido que en el sistema de generación eléctrica objeto de esta Tesis se pueda alternar el funcionamiento de las distintas fuentes de potencia, así como hacerlas trabajar de forma conjunta.

Los resultados experimentales ponen de manifiesto el correcto funcionamiento del prototipo desarrollado: la tensión en el bus DC y la salida quedan fijadas a 48 V y 12 V respectivamente, independientemente de la fuente de potencia actuante y de la demanda de la carga.

El **Capítulo 5** se caracteriza por tener dos partes claramente diferenciadas: una de alta componente teórica sobre técnicas de control de corriente de convertidores y otra con un marcado carácter experimental de prueba del sistema híbrido de pila de combustible desarrollado. La elección de una de las posibles soluciones para la implementación del sistema de control en corriente se ha justificado a partir del estudio de los diferentes métodos de control analógico en corriente presentes en la literatura: control de corriente de pico, de corriente de valle, de corriente media, por conductancia, por deslizamiento y tiempo de conducción y no conducción constante. De dicho estudio se dedujo que atendiendo a aspectos como facilidad de implementación, estabilidad del lazo de control, sensibilidad al ruido y reducción del error, el control de corriente media es el más recomendable para el sistema de pila de combustible construido.

Mientras que en el Capítulo 4 se estudió e implementó el control de tensión del convertidor DC/DC a la salida de la pila, asegurando con ello los valores establecidos en cada punto de conexión, en este capítulo se implementa el control de corriente. Éste es necesario cuando se

desea poder gestionar la potencia entregada por la pila de combustible independientemente de la demandada por la carga. Dada las características específicas de la topología del sistema híbrido construido (conectado a un bus DC cuya tensión es fijada por un banco de baterías), es posible decidir la potencia suministrada por la pila de combustible a la vez que se garantizan los niveles de tensión en los distintos puntos de conexión.

Mediante los resultados experimentales obtenidos se ha demostrado que el sistema prototipo construido funciona según los requerimientos de diseño. Esto es, la pila de combustible sigue la corriente de referencia que se decide en cada momento, a la vez que el banco de baterías se encarga de garantizar el nivel de tensión en el bus DC y de suministrar la diferencia de potencia entre la demanda de la carga y la potencia que, mediante el controlador de corriente, se ha decidido que suministre la pila de combustible. Otra de las observaciones que se pueden hacer a partir de los resultados obtenidos es que el fenómeno conocido como *fuel starvation phenomenon* puede ser soslayado controlando la pendiente de los cambios de la referencia de corriente a seguir.

Se considera pues que el objetivo de esta Tesis: *Estudiar, diseñar e implementar un prototipo de sistema híbrido con pila de combustible* se ha cumplido de forma satisfactoria, a la vez que se han abierto nuevas y desafiantes líneas de investigación.

6.2 Desarrollos futuros

Lejos de considerar esta Tesis como algo cerrado, los capítulos que la conforman han terminado siendo puertas abiertas hacia trabajos de investigación futuros.

Así por ejemplo, a partir de lo ya realizado en el Capítulo 2, *Sistemas de Pilas de Combustible*, se puede profundizar en el estudio del principio de funcionamiento y características eléctricas de otros tipos de pilas de combustible diferentes a las de membrana polimérica. Por otra parte, las topologías de conexión analizadas motivan a extender el estudio teórico de los sistemas de acondicionamiento de potencia a otros tipos de cargas con diferentes restricciones de funcionamiento. Además, en lo referente a sistemas de automoción, algo hacia lo que actualmente la tecnología de las pilas de combustible está claramente enfocada, queda abierto todo un campo donde se discuta y revise el concepto actual de vehículo híbrido eléctrico con pila de combustible, distribución de componentes, autonomía, consumo, sistema de gestión

de energía, prestaciones, etc.

El estudio realizado en el Capítulo 3, *Modelado del Sistema de Pila de Combustible-Convertidor DC/DC*, anima a proponer la idea de crear una herramienta software que permita, a partir de modelos previamente desarrollados, simular sistemas híbridos con pilas de combustible. Con ayuda de esta aplicación se podría estudiar el comportamiento de otros tipos de pilas de combustible, de otros convertidores, diferentes topologías de conexión y, por supuesto, diferentes sistemas de control, facilitando así el camino hacia la implementación física.

Esta propuesta no es una cuestión menor, ya que se está tratando con sistemas que tienen todavía poca disponibilidad comercial y, por tanto, son caros y resulta ardua la tarea de implementar prototipos experimentales. En consecuencia, sería de gran ayuda conformar mediante simulación una solución lo más real posible previa al abordaje de adquisición de equipos y realizaciones físicas.

Los Capítulos 4, *Sistema Híbrido de Pila de Combustible: Implementación y Testeo*, y 5, *Control en Corriente del Sistema Híbrido de Pila de Combustible*, traen consigo una necesidad inmediata no abordada en esta Tesis y objeto de un desarrollo futuro: implementar un controlador de alto nivel que gestione el trasiego de potencia en el sistema completo. Esto es, que gestione la producción y reparto de potencia de cada una de las fuentes actuantes en el sistema. Los criterios bajo los que puede actuar este controlador pueden ser muy diversos: perfil de demanda de la carga, consumo de la pila de combustible, el estado de carga de las baterías, tiempo de vida máximo para cada una de las fuentes de potencia actuantes, etc.

Desde el punto de vista del control a bajo nivel, el que se ha realizado en este trabajo en los capítulos 4 y 5, queda abierta la posibilidad de implementar otros métodos de control, fundamentalmente en corriente, ya sea de tipo analógico (alguno/s de los estudiados en el Capítulo 5) o incluso de tipo digital. Así por ejemplo el control por deslizamiento, caracterizado por su rapidez, representa una interesante línea de actuación para el caso de la pila de combustible con la que se ha trabajado. Dada las propias características de esta pila de combustible (módulo Nexa de Ballard), el control por deslizamiento implica proponer soluciones para evitar el problema conocido como *fuel starvation*, a la vez que se debe controlar el tiempo máximo de conducción del transistor de conmutación para evitar el autoapagado de la pila de combustible; algo que entra en controversia precisamente con el propio principio de

control por deslizamiento.

En otro sentido, desde el punto de vista de la electrónica de potencia se abre todo un abanico de posibilidades. Por un lado, la opción de construir y realizar pruebas experimentales con etapas de acondicionamiento mediante otras topologías diferentes a las utilizadas en esta Tesis: reductora, elevadora o reductora-elevadora. Por otro, la de implementar un sistema que permita la recarga de las baterías a partir de la energía suministrada por la pila de combustible o por otras fuentes, en base a intercalar un convertidor bidireccional entre el banco de baterías y el bus DC. También queda abierta la posibilidad de integrar en el sistema otras fuentes de potencia como pueden ser ultracondensadores (capaces de soportar intensos picos de carga y descarga) o un sistema fotovoltaico.

La construcción de un completo sistema de adquisición y monitorización de datos es otra de las tareas a acometer. Resulta de gran ayuda disponer de un sistema que permita adquirir y visualizar en tiempo real y mediante una interfaz sencilla, variables que describan el funcionamiento del mismo: tensión y corriente de cada uno de bloques que integran el sistema, valores de potencia demandada y suministrada, nivel de carga de las baterías, niveles de temperatura alcanzada, etc.

Finalmente, cerrando este trabajo, cabría pensar en trasladar el sistema construido a un caso práctico real similar a alguno de los que se describen en los primeros capítulos. La integración del sistema construido en una aplicación doméstica, de transporte, de suministro a zona aislada, de apoyo a la conexión a red o de suministro a las cargas de hotel en los vehículos de largo recorrido, supone la verdadera y definitiva prueba final. Realmente este es el objetivo; integrar los resultados de esta Tesis junto con otras en curso en el seno del Grupo de Investigación para llevar a cabo un prototipo de *Sistema generador de energía eléctrica autónomo, continuo y no contaminante*.

Referencias Bibliográficas

- [1] U. Bossell. "The birth of the Fuel Cell 1835-1845". *Power for the 21st Century*, Vol. 1, pp.7, 2004.
- [2] P.G. Grimes. "Historical pathways for fuel cells". *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 15 (12), pp. 1-10, 2000.
- [3] E. I. Ortiz-Rivera, A. L. Reyes-Hernandez, A. Febo. "Understanding the history of fuel cells". *IEEE Conference on the History of Electric Power*, Vol. 1, pp.117-122, 2007.
- [4] Faraday and Schöebeing. *The letters of Faraday and Schöenbein*. Universidad de California (<http://www.archive.org/stream/lettersoffaraday00fararich>), 1899.
- [5] P. B. L. Chaurasia, Y. Ando, T. Tanaka. "Regenerative fuel cell with chemical reactions". *Energy Conversion and Management*, Vol. 44 (4), pp. 611-628, 2003.
- [6] A. Boudghene Stambouli, E. Traversa. "Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 6 (5), pp. 433-455, 2002.
- [7] J. Appleby. "From Sir William Grove to today: fuel cells and the future". *Journal of Power Sources*, Vol. 29 (1-2), pp. 3-11, 1990.
- [8] C. Stone, A. E. Morrison. "From curiosity to power to change the world". *Solid State Ionics*, Vol. 152-153, pp. 1-13, 2002.
- [9] <http://www.si.edu/>
- [10] J. R. Selman. "Molten-salt fuel cells—Technical and economic challenges". *Journal of Power Sources*, Vol. 160 (2), pp. 852-857, 2006.
- [11] A. L. Dicks. "Molten carbonate fuel cells". *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 8 (5), pp. 379-383, 2004.
- [12] <http://americanhistory.si.edu/fuelcells/phos/pafcmain.htm>
- [13] J. Weissbert, R. Ruka. "A Solid Electrolyte Fuel Cell". *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 109 (8), pp. 723-726, 1962.
- [14] Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory. *Fuel Cell Handbook-Seventh Edition*. U.S. Department of Energy, 2004.
- [15] E. Wright. "Comparison of the theoretical performance potential of fuel cells and heat engines". *Renewable Energy*, Vol. 29 (2), pp. 179-195, 2004.

- [16] R. Ramdamm, A. Naeter. "Fuel Cells - An Introduction". *IEEE Special Technical Session on Fuel Cell*, Vol. 1, pp. 702-709, 2001.
- [17] D. Ilic, K. Holl, P. Birke, T. Wöhrle, F. Birke-Salam, A. Perner, P. Haug. "Fuel cells and batteries: Competition or separate paths?". *Journal of Power Sources*, Vol. 155 (1), pp. 72-76, 2006.
- [18] A. Jossen, J. Garche, H. Doering, M. Goetz, W. Knaupp, L. Joerissen. "Hybrid systems with lead-acid battery and proton-exchange membrane fuel cell ". *Journal of Power Sources*, Vol. 144 (2), pp. 395-401, 2005.
- [19] R.I. Deakin, J.T.S. Irvine. *Batteries and fuel cells*. McGraw-Hill, 2005.
- [20] F. T. Bacon. "Fuel cells, past, present and future". *Electrochimica Acta*, Vol. 14 (7), pp. 569-585, 1969.
- [21] Y. Bréelle, P. Degobert. "Application perspectives for dissolved-fuel cells". *Advanced Energy Conversion*, Vol. 5 (4), pp. 279-290, 1965.
- [22] M. Cifrain, K. V. Kordesch. "Advances, aging mechanism and lifetime in AFCs with circulating electrolytes". *Journal of Power Sources*, Vol. 127 (1-2), pp. 234-242, 2004.
- [23] J. Liu, M. Eikerling. "Model of cathode catalyst layers for polymer electrolyte fuel cells: The role of porous structure and water accumulation". *Electrochimica Acta*, Vol. 53 (13), pp. 4435-4446, 2008.
- [24] F. Barreras, A. Lozano, L. Valiño, C. Marín, A. Pascau. "Flow distribution in a bipolar plate of a proton exchange membrane fuel cell: experiments and numerical simulation studies". *Journal of Power Sources*, Vol. 144 (1), pp. 54-66, 2005.
- [25] F. Calise, M. D. d'Accadia, G. Restuccia. "Simulation of a tubular solid oxide fuel cell through finite volume analysis: Effects of the radiative heat transfer and exergy analysis ". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32 (17), pp. 4575-4590, 2007.
- [26] T. J. Lee, K. Kendall. "Characterisation of electrical performance of anode supported micro-tubular solid oxide fuel cell with methane fuel". *Journal of Power Sources*, Vol. 181 (2), pp. 195-198, 2008.
- [27] M. Farooque, H. C. Maru. "Fuel cells-the clean and efficient power generators". *Proceedings of the IEEE*, Vol. 89 (12), pp. 1819 - 1829, 2001.
- [28] M.A. Laughton. "Fuel cells". *Engineering Science and Education Journal*, Vol. 11 (1), pp. 7-16, 2002.
- [29] D. Morsi, S. K. Salman. "Investigation into Modelling of a Fuel Cell Stack System". *Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference*, Vol. 1, pp. 137 - 141, 2006.
- [30] Y. Guezennec, C. Ta-Young, G. Paganelli, G. Rizzoni. "Supervisory control of fuel cell vehicles and its link to overall system efficiency and low-level control requirements". *IEEE Proceedings of the American Control Conference*, Vol. 3, pp. 2055-2061, 2003.
- [31] Ballard. *Nexa power module Manual, FC101-5101485*. Ballard, 2004.

- [32] S. S. Williamson, A. Emadi. "Comparative assessment of hybrid electric and fuel cell vehicles based on comprehensive well-to-wheels efficiency analysis". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 54 (3), pp. 856 - 862, 2005.
- [33] G. Newton Lewis. "The osmotic pressure of concentrated solutions and the laws of perfect solutions". *Journal of American Chemical Society*, Vol. 30 (5), pp. 668 - 683, 1908.
- [34] R. F. Mann, J. C. Amphlett, M. A. I. Hooper, H. M. Jensen, B. A. Peppley, P. R. Roberge. "Development and application of a generalized steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell". *Journal of Power Sources*, Vol. 86, pp. 173-180, 2000.
- [35] J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge and A. Rodrigues. "Parametric modelling of the performance of a 5kW proton-exchange membrane fuel cell stack ". *Journal of Power Sources*, Vol. 49, pp. 349-356, 1994.
- [36] W. Caisheng, M. H. Nehrir, S. R. Shaw. "Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits ". *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol 20 (2), pp. 442-451, 2005.
- [37] M. Hatti, M. Tioursi, W. Nouibat. "Static Modelling by Neural Networks of a PEM Fuel Cell ". *IEEE- IECON 32nd Annual Conference on Industrial Electronics*, Vol. 1, pp. 2121-2126, 2006.
- [38] R.A. Costa, J.R. Camacho. "The dynamic and steady state behavior of a PEM fuel cell as an electric energy source ". *Journal of Power Sources*, Vol. 161 (2), pp. 1176-1182, 2006.
- [39] R. R. Passos, V. A. Paganin, E. A. Ticianelli. "Studies of the performance of PEM fuel cell cathodes with the catalyst layer directly applied on Nafion membranes". *Electrochimica Acta*, Vol. 51 (25), pp. 5239-5245, 2006.
- [40] J. M. Correa, F. A. Farret, V. A. Popov, M. G. Simoes. "Sensitivity analysis of the modeling parameters used in Simulation of proton exchange membrane fuel cells". *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 20 (1), pp. 211 - 218, 2005.
- [41] J. M. Correa, F. A. Farret, L. N. Canha. "An analysis of the dynamic performance of proton exchange membrane fuel cells using an electrochemical model". *IEEE-IECON 27th Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, Vol. 1, pp. 141-146, 2001.
- [42] P.C. Sui, S. Kumar, N. Djilali. "Advanced computational tools for PEM fuel cell design: Part 2. Detailed experimental validation and parametric study". *Journal of Power Sources*, Vol. 180 (81), pp. 423-432, 2008.
- [43] M. A.R. Sadiq Al-Baghdadi, H. A.K. Shahad Al-Janabi. "Parametric and optimization study of a PEM fuel cell performance using three-dimensional computational fluid dynamics model ". *Renewable Energy*, Vol. 32 (7), pp. 1077-1101, 2007.
- [44] Meng Ni, Michael K.H. Leung, D. Y.C. Leung. "Parametric study of solid oxide fuel cell performance ". *Energy Conversion and Management*, Vol. 48 (5), pp. 1525-1535, 2007.
- [45] P. C. Buddingh, V. Scaini, L. F. Casey. "Utilizing waste hydrogen for energy recovery using fuel cells and associated technologies ". *IEEE Transactions on Industry Applications* , Vol. 42 (1), pp. 186 - 194, 2006.
- [46] X. Qingshan, W. Nianchun, K. Ichiyanaagi, K. Yukita. "PEM Fuel Cell modeling and parameter influences of performance evaluation". *IEEE 3th International Conference on*

- Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, Vol. 1, pp. 2827 - 2832, 2008.
- [47] X. Yu, M. R. Starke, L. M. Tolbert, B. Ozpineci. "Fuel cell power conditioning for electric power applications: a summary ". *IEEE IET Electric Power Applications* , Vol. 1 (5), pp. 643-656, 2007.
- [48] J. E. Larminie, A. Dick. *Fuel Cell Systems Explained*. Amazon, 2000.
- [49] X. Yu, P. G. Pickup. "Recent advances in direct formic acid fuel cells (DFAFC) ". *Journal of Power Sources*, Vol. 182 (1), pp. 124-132, 2008.
- [50] S. Uhm, Y. Kwon, S. T. Chung, J. Lee. "Highly effective anode structure in a direct formic acid fuel cell ". *Electrochimica Acta*, Vol. 53 (16), pp. 5162-5168, 2008.
- [51] K. Taneda, Y. Yamazaki. "Study of direct type ethanol fuel cells: Analysis of anode products and effect of acetaldehyde ". *Electrochimica Acta*, Vol. 52 (4), pp. 1627-1631, 2006.
- [52] G. Li, P. G. Pickup. "Analysis of performance losses of direct ethanol fuel cells with the aid of a reference electrode ". *Journal of Power Sources*, Vol. 161 (1), pp. 256-263, 2006.
- [53] W. G. Coors. "Protonic ceramic fuel cells for high-efficiency operation with methane ". *Journal of Power Sources*, Vol. 118 (1-2), pp. 150-156, 2003.
- [54] Z. Shi, J. Luo, S. Wang, A. R. Sanger, K. T. Chuang. "Protonic membrane for fuel cell for co-generation of power and ethylene ". *Journal of Power Sources*, Vol. 176 (1), pp. 122-127, 2008.
- [55] C. Kim, K. Y. Kim, M. Yeong Ha. "Investigation of the characteristics of a stacked direct borohydride fuel cell for portable applications ". *Journal of Power Sources*, Vol. 180 (1), pp. 114-121, .
- [56] R. Jamard, A. Latour, J. Salomon, P. Capron, A. Martinent-Beaumont. "Study of fuel efficiency in a direct borohydride fuel cell ". *Journal of Power Sources*, Vol. 176 (1), pp. 287-292, 2008.
- [57] J. H. Lee, S. T. Baek, H. J. Jung, H. H. Kang, J. M. Chung, I. Y. Suh. "Development of a 250kW power conditioning system for molten carbonate fuel cell power generation system". *ICEMS-International Conference on Electrical Machines and Systems* , Vol. 1, pp. 354 - 358, 2007.
- [58] N. Akkinapragada, B. H. Chowdhur. "A New Inverter for Improved Fuel Cell Performance in Grid-tied Application ". *IEEE-Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 1, pp. 1-8, 2007.
- [59] A. Khaligh, A. M. Rahimi, L. Young-Joo, C. Jian, A. Emadi, S. D. Andrews, C. Robinson, C. Finnerty. "Digital Control of an Isolated Active Hybrid Fuel Cell/Li-Ion Battery Power Supply". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 56 (6), pp. 3709 - 3721, 2007.
- [60] C. Pereira-Bahia, P. Paulmier. "Operational feed-back on Fuel Cell solutions for telecom needs ". *IEEE 29th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Vol. 1, pp. 6 - 10, 2007.

- [61] S. S. Williamson, A. Emadi, M. Shahidehpour. "Distributed fuel cell generation in restructured power systems". *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 2 (10), pp. 2079 - 2084, 2004.
- [62] P. A. Lehman, C. E. Chamberlin, J. I. Zoellick, R. A. Engel. "A photovoltaic/fuel cell power system for a remote telecommunications station". *IEEE 28th Photovoltaic Specialists Conference*, , pp. 1552-1555, 2000.
- [63] R. J. Spiegel, J. L. Preston. "Technical assessment of fuel cell operation on anaerobic digester gas at the Yonkers, NY, wastewater treatment plant ". *Waste Management*, Vol. 23 (8), pp. 709-717, 2003.
- [64] <http://www.fuelcells.org/info/charts/carchart.pdf>
- [65] <http://www.fuelcells.org/info/charts/buses.pdf>
- [66] "Intelligent Energy launches first fuel cell motorbike", *Fuel Cells Bulletin*, Vol. 1 (4), pp. 1, 2005.
- [67] "Fuel cell motorbikes hit the road ", *IEE Review*, Vol. 51 (4), pp. 13, 2005.
- [68] "Second US Army truck with fuel cell APU", *Fuel Cells Bulletin*, Vol. 1, pp. 4, 2003.
- [69] <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/04/seca-wrkshp/Truck%20APUs%20-%20EERE%20-%20Garbak.pdf>
- [70] <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/seca/John%20Garbak.pdf>
- [71] A.R. Miller, K.S. Hess, D.L. Barnes, T.L. Erickson. "System design of a large fuel cell hybrid locomotive ". *Journal of Power Sources*, Vol. 173 (2), pp. 935-942, 2007.
- [72] A. R. Miller, J. Peters, B. E. Smith, O. A. Velev. "Analysis of fuel cell hybrid locomotives". *Journal of Power Sources*, Vol. 157 (2), pp. 855-861, 2006.
- [73] "Airbus fuel cell demo plane goes public", *Fuel Cells Bulletin*, Vol. 1 (7), pp. 3-4, .
- [74] Ásgeir Sigfússon. "Iceland: Pioneering the Hydrogen Economy". *Foreign Service Journal*, Vol. 1, pp. 62-65, 2003.
- [75] <http://www.fuelcells.org/info/charts/specialty.pdf>
- [76] T. Kim, S. Kwon. "MEMS fuel cell system for portable power source: Integration of methanol reformer, PROX, and fuel cell ". *IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* , Vol. 1, pp. 980 - 983, 2008.
- [77] N.S. Sisworahardjo, M.S. Alam, G. Aydinli. "Reliability and availability analysis of low power portable direct methanol fuel cells". *Journal of Power Sources*, Vol. 177 (2), pp. 412-418, 2008.
- [78] M.O. Abdullah, Y.K. Gan. "Feasibility study of a mini fuel cell to detect interference from a cellular phone". *Journal of Power Sources*, Vol. 155 (2), pp. 311-318, 2006.
- [79] M. Harfman-Todorovic, L. Palma, P. Enjeti. "A Hybrid DC-DC Converter for Fuel Cells Powered Laptop Computers ". *IEEE 37th Power Electronics Specialists Conference*, Vol. 1, pp. 1-5, 2006.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [80] D. Ross. "Power struggle: power supplies for portable equipment". *IEE Review*, Vol. 49 (7), pp. 34-38, 2003.
- [81] J.Salminen, D. Steingart, T. Kallio. "Fuel Cells and Batteries". *Future Energy*, Vol. 1, pp. 259-276, 2008.
- [82] D. Ilic, K. Holl, P. Birke, T. Wöhrle, F. Birke-Salam, A. Perner, P. Haug. "Fuel cells and batteries: Competition or separate paths?". *Journal of Power Sources*, Vol. 155 (1), pp. 72-76, 2006.
- [83] N.Zamel, X. Li. "Life cycle analysis of vehicles powered by a fuel cell and by internal combustion engine for Canada". *Journal of Power Sources*, Vol. 155 (82), pp. 297-310, .
- [84] A.Schäfer, J. B. Heywood, M.A. Weiss. "Future fuel cell and internal combustion engine automobile technologies: A 25-year life cycle and fleet impact assessment". *Energy*, Vol. 31 (12), pp. 2064-2087, 2006.
- [85] A.Payman, S.Pierfederici, F. Meibody-Tabar. "Energy control of supercapacitor/fuel cell hybrid power source ". *Energy Conversion and Management*, Vol. 49 (6), pp. 1637-1644, 2008.
- [86] J. Liang, C.Feng. "Stability Improvement of Micro-grids with Coordinate Control of Fuel Cell and Ultracapacitor". *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, Vol. 1, pp. 2472 - 2477, 2007.
- [87] D.K. Choi, B. K. Lee, S. W. Choi, C. Y. Won, D. W. Yoo. "A novel power conversion circuit for cost-effective battery-fuel cell hybrid system ". *Journal of Power Sources*, Vol. 152 (1), pp. 245-255, 2005.
- [88] D. Shmilovitz. "On the definition of total harmonic distortion and its effect on measurement interpretation". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20 (1), pp. 526 - 528, 2005.
- [89] C. Keng Wu. *Pulse width modulated DC/DC converters*. Thomson-Kluwer, 1997.
- [91] V. Quercioi. *Pulse width Modulated (PWM) Power Supplies*. Elsevier, 1993.
- [90] H. W. Whittington. *Switched Mode Power Supplies: Design and Construction*. Wiley, 1996.
- [92] Muhammad H. Rasid. *Electrónica de potencia*. Pearson-Prentice Hall, 2004.
- [93] D. J. Start. "A review of the new CENELEC standard EN 50160". *IEE Colloquium on Power Quality*, Vol. 1, pp. 1-7, 1995.
- [94] http://grouper.ieee.org/groups/scc21/1547/1547_index.html
- [95] K. Rajashekara. "Hybrid fuel cell strategies for clean power generation". *IEEE Industry Applications Conference*, Vol. 3, pp. 2077-2083, 2004.
- [96] X. L. Williamson. "Comparative Investigation of Series and Parallel Hybrid Electric Vehicle (HEV) Efficiencies Based on Comprehensive Parametric Analysis". *IEEE Conference Vehicle Power and Propulsion* , Vol. 1, pp. 499-505, 2007.
- [97] J. C. Amphlett, R. M. Baumert, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge. "Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell, I. Mechanistic model development". *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 142 (1), pp. 1-8, 1995.

- [98] R. Cownden, M. Nahon, M. A. Rosen. "Modeling and analysis of a solid polymer fuel cell system for transportation applications". *Hydrogen Energy*, Vol. 26 (6), pp. 615–623, 2001.
- [99] J. C. Amphlett, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge, A. Rodrigues. "A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells". *Journal of Power Sources*, Vol. 61, pp. 183–188, 1996.
- [100] J. Hamelin, K. Agbossou, A. Laperrière, F. Laurencelle, T. K. Bose. "Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary applications". *Hydrogen Energy*, Vol. 26 (6), pp. 625–629, 2001.
- [101] M. Wang, M. H. Nehrir. "Fuel cell modeling and fuzzy logic-based voltage control". *Journal Renewable Energy*, Vol. 3 (2), , 2001.
- [102] P. Famouri, R. S. Gemmen. "Electrochemical circuit model of a PEM fuel cell". *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 3, pp. 13-17, 2003.
- [103] P. Famouri, R. Gemmen. "PEM fuel cell electric circuit model". *conference on Power Electronics for Fuel Cells Workshop*, Vol. 1, pp. 1-15, 2002.
- [104] Caisheng Wang, Hashem Nehrir, Steven R. Shaw. "Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cells Using Electrical Circuits ". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20 (2), pp. 442 - 451, 2005.
- [105] J. M. Corrêa, F. A. Farret, L. N. Canha, M. G. Simões. "An Electrochemical-Based Fuel-Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51 (5), pp. 1103 - 1112, 2004.
- [106] R. J. Wai, R. Y. Duan. "High-efficiency power conversion for low power fuel cell generation system". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 20 (4), pp. 847 - 856, 2005.
- [107] J.Ch. Schlake, Ch. Preusse, J. Winkelhake, U. Konigorski. "State space model of the direct methanol fuel cell". *Journal of Power Sources*, Vol. 153 (1) , pp. 100-107, 2006.
- [108] A. Bieberle, L. J. Gauckler. "State-space modeling of the anodic SOFC system Ni, H₂-H₂O YSZ". *Solid State Ionics*, Vol. 146 (1-2), pp. 23-41, .
- [109] Y. Qi, B. Huang, J. Luo. "Nonlinear state space modeling and simulation of a SOFC fuel cell". *IEEE American Control Conference*, , pp. 1-5, 2006.
- [110] K. M. Yin. "An algebraic model on the performance of a direct methanol fuel cell with consideration of methanol crossover". *Journal of Power Sources*, Vol. 167 (2), pp. 420-429, 2007.
- [111] P. Costamagna, A. Selimovic, M. Del Borghi, G. Agnew. "Electrochemical model of the integrated planar solid oxide fuel cell (IP-SOFC)". *Chemical Engineering Journal*, Vol. 102 (1), pp. 61-69, 2004.
- [112] H. Sira-Ramírez, R. Márquez, F. Rivas-Echeverría, S. Orestes Llanes. *Control de Sistemas no Lineales*. Pearson Prentice, 2005.
- [113] M. H. Rashid. *Electrónica de potencia : circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación, 2004.

- [114] L. Solero, A. Lidozzi, J. A. Pomilio. "Design of Multiple-Input Power Converter of Hybrid Vehicles". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 20 (5), pp. 1007-1016, 2005.
- [115] P.T. Krein, J. Benstman, R. M. Bass and B. L. Lesieture. "On the use of averaging for the analysis of power electronic systems". *IEEE Transactions on Power Electronic*, Vol. 5 (2), pp. 182-190, 1990.
- [116] S. Cuk, R. D. Middlebrook. "Advances in Switched-Mode Power Conversion Part I". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 30 (1), pp. 10-19, 1983.
- [117] K. Rajashekara. "Hybrid fuel-cell strategies for clean power generation". *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol.41 (3), pp. 682-688, 2005.
- [118] TMW Ellis, MR Von Spakovsky, DJ. Nelson. "Fuel cell systems: efficient, lexible energy conversion for the 21st century". *Proceeding of the IEEE* , Vol. 89 (12), pp. 1808-1818, 2001.
- [119] A. Payman, S. Pierfederici, F. Meibody-Tabar. "Energy control of supercapacitor/fuel cell hybrid power source ". *Energy Conversion and Managemen*, Vol 49 (6), pp. 1637-1644, 2008.
- [120] http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs_fuel_cell.pdf
- [121] M. Kazerani. " IEEE International Symposium on Industrial Electronics". *IEEE International Symposium on Industrial Electronics* , Vol. 1, pp.1015 – 1020, 2007.
- [122] K.K. Tse, M.T. Ho, H.S Chung, S.Y.R Hui. "A comparative study of maximum-power-point tracker for photovoltaic panels using switching frequency modulation". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, pp. 410 – 418, 2004.
- [123] J.M. Enrique, E. Durán, M. Sidrach-de-Cardona and J.M. Andújar. "Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies". *Solar Energy*, Vol. 81, pp. 31-38, 2007.
- [124] http://www.elgar.com/products/Products_Loads.htm
- [125] <http://www.chromausa.com/electronicloads.htm>
- [126] <http://www.h2economy.com/>
- [127] http://www.amrel.com/AMRELPowerProducts/eload_programmable_load.html
- [128] J. Samaniego, F. Alija, S. Sanz, C. Valmaseda, F. Frechoso. "Economic and technical analysis of a hybrid wind fuel cell energy system". *Renewable Energy*, Vol. 33 (5), pp. 839-845, 2008.
- [129] J. Zhenhua, G. Lijun, R.A Dougal. "Adaptive Control Strategy for Active Power Sharing in Hybrid Fuel Cell/Battery Power Sources". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 22 (2), pp. 507 – 515, 2007.
- [130] M J. Vasallo, F. Segura, E. Durán, J. M. Andújar. "Sizing of fuel cell based power backup systems using homer tool". *Proceedings of International Youth Conference on Energetics (IYCE ' 07)*, Vol. 1, pp. 215 – 224, 2007.

- [131] J.M. Andújar, F. Segura, M. Vasallo. "A suitable model plant for control of the set fuel cell-DC/DC converter". *Renewable Energy*, Vol. 33, pp. 813-826, 2008.
- [132] C. Wang, H. Nehrir, R. Shaw Steven. "Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20(2), pp. 442-451, 2005.
- [133] N.N Barsoum, P. Vacent. "Balancing Cost, Operation and Performance in Integrated Hydrogen Hybrid Energy System". *First Asia International Conference on Modelling & Simulation. AMS '07*, Vol. 1, pp.14 - 18, 2007.
- [134] J. M. Correa, A. F. Felix, N. C. Luciane, G. S. Marcelo. "An electrochemical-based fuel-cell model suitable for electrical engineering automation approach". *IEEE Transactions on Industrial Electronic*, Vol.51, pp.1103-1111, 2004.
- [135] <http://www.exide-technologies.ru/>
- [136] M. H. Rashid. *Power Electronics Handbook*. Academic Press, 2001.
- [137] Marian K. Kazimierczuk. *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters*. Wiley, 2008.
- [138] Phiplip T. Krein. *Elements of Power Electronics*. Oxford University Press, 1998.
- [139] K. Wan, J. Liao, M. Ferdowsi. "Control methods in DC/DC power conversion-a comparative study". *IEEE Power Electronics Conference*, Vol. 1, pp. 17-21, 2007.
- [140] www.itee.uq.edu.au/~aupec/aupec02/Final-Papers/K-D-Purton.pdf
- [141] L. H. Dixon. "Average current mode control of switching power supplies". *Unitrode Power Supply Design Seminar*, Vol. 1, pp. 5.1-5.14, 1988.
- [142] C. Sun, B. Lehman. "Discussions on control loop design in average current mode control-PWM DC/DC power convertors". *IEEE Industry Applications Conference*, Vol. 4 , pp. 2411 - 2417, 2000.
- [143] D. O'Sullivan, H. Spruyt, A. Crausaz . "PWM conductance control". *IEEE Conference on Power Electronics Specialists*, Vol. 1, pp. 351-359, 1988.
- [144] J. Pelegri, D. Ramirez, E. Sanchis, A. E. Navarro, S. Casans. "Giant magnetoresistive sensor in conductance control of switching regulators". *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 36 (5), pp. 3578 - 3580 , 2000.
- [145] B. Van Der Weerd, P. Rueda Boldo. "Quasi-Conductance Control for step-up regulation". *European Space Agency, (Special Publication)* , Vol. 661, pp. 1, 2008.
- [146] V. I. Utkin. *Sliding Modes in Control and Optimization*. Springer Verlag, 1992.
- [147] R. Silva-Ortigoza, H. Sira-Ramírez, V. M. Hernández-Guzmán. "Control por modos deslizantes y planitud diferencial de un convertidor de CD/CD boost: Resultados experimentales". *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, Vol. 5 (4), pp. 77-82, 2008.
- [148] Y. He, F. L. Luo. "Study of sliding-mode control for DC-DC converters". *International Conference on Power System Technology*, Vol. 2, pp. 1969-1974, 2004.

- [149] C. W. Tao, W-Y Wang, M. L. Chan. "Design of sliding mode controllers for bilinear systems with time varying uncertainties". *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, Vol. 34 (1), , 2004.
- [150] E. Fossas, J. M. Olm, A. S. I. Zinober. "Sliding motion and direct control of the output voltage in a full bridge boost converter". *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*, Vol. 39 (10), pp. 4760-4765, 1992.
- [151] D. Biel, F. Guinjoan, E. Fossas, J. Chavarria. "Sliding-mode control design of a boost-buck switching converter for AC signal generation". *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, Vol. 51 (8), pp. 1539-1551, 2004.
- [152] D. Seshachalam, R. K. Tripathi, D. Chandra. "Practical implementation of sliding mode control for boost converter". *IEEE Conference on Circuits and Systems*, Vol. 1, pp. 650 - 653, 2006.
- [153] Raymond B. Ridley. "A new continuous-time model for current-mode control with constant frequency, constant on-time, and constant off-time, in CCM and DCM". *IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference* , Vol. 1, pp. 382-389, 1990.
- [154] Smedley, Keyue Ma, Cuk, Slobodan. "One-cycle control of switching converters". *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Vol. 1, pp. 888-896, 1991.
- [155] X. Xu, X. Wu, X. Yan. "A quasi fixed frequency constant on time controlled boost converter". *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Vol. 1, pp. 2206-2209 , 2008.
- [156] P. Rodatz, G. Paganelli, A. Sciarretta, L. Guzzella. "Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor- powered hybrid vehicle". *Control Engineering Practice*, Vol. 13 (1), pp. 41-53, 2005.
- [157] P. Thounthong, S. Raël, B. Davat. "Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications". *Journal of Power Sources*, 10.1016/j.jpowsour.2008.12.120, pp. 1-10,, 2009.
- [158] <http://www.dspaceinc.com>
- [159] K. Jin, X. Ruan, M. Yang, M. Xu. "Power Management for Hybrid Fuel Cell System". *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Vol. 1, pp. 504-509, 2008.
- [160] P. Thounthong, S. Raël, B. Davat. "Control Algorithm of Fuel Cell and Batteries for Distributed Generation System". *IEEE Transactions on Energy Conversion* , Vol. 23 (1), pp. 148-154, 2008.
- [161] <http://www.hydrogencarsnow.com>

Índice Alfabético

A	
Área activa.....	33
B	
Balance of Plant.....	32
C	
Carl Langer.....	22
Celda de combustible.....	33
Celdas unitarias.....	32
Christian Friedrich Schönbein.....	20
Condición de invarianza.....	230
Condición de transversalidad.....	230
Control de corriente de pico.....	207
Control de corriente de valle.....	210
Control de corriente media.....	219
Control de corriente por conductancia.....	221
Control de corriente por deslizamiento.....	227
Control de corriente por tiempo de no conducción constante.....	235
Control en modo corriente.....	204
Control por tiempo de conducción constante.....	236
Curva de polarización.....	40
Curva de potencia.....	46
E	
Ecuación de Nernst.....	41
Efecto de doble capa.....	114
Eficiencia del sistema de pila de combustible.....	39
Eficiencia electroquímica.....	37
Eficiencia global.....	38
Eficiencia termodinámica.....	31
Electrolisis del agua.....	21
Era de la Combustión Electroquímica.....	24

ÍNDICE ALFABÉTICO

F

Francis Thomas Bacon.....	24
Friedrich Wilhelm Ostwald.....	22
Fuel starvation phenomenon.....	250
Función de transferencia del sistema de pila de combustible.....	123
Función de transferencia del sistema pila de combustible-convertidor Boost.....	140

G

G. H. J. Broers.....	26
G. V. Elmore.....	26

H

H. A. Tanner.....	26
-------------------	----

J

J. A. A. Ketelaar.....	26
------------------------	----

L

Leonard Niedrach.....	25
Ludwing Mond.....	22

M

Modelo de estado del convertidor Boost.....	134
Modelo de valores instantáneos.....	134
Modelo de variables promedio.....	134
Modelo eléctrico dinámico equivalente de una celda de combustible PEM.....	114
Modelo eléctrico estático equivalente de una celda de combustible PEM.....	114
Modelo linealizado del convertidor Boost.....	136
Modelo linealizado del sistema pila de combustible alrededor de un punto de equilibrio genérico.....	123
Modelo linealizado del sistema pila de combustible-convertidor Boost.....	138
Modelo linealizado o modelo de pequeña señal de un sistema genérico.....	122
Mono-celda.....	33

P

Pérdidas Óhmicas.....	42
Pérdidas por Activación.....	41
Pérdidas por concentración.....	43
Pila Alcalina	49
Pila de Ácido Fosfórico.....	52
Pila de Carbonato Fundido.....	54
Pila de Membrana Polimérica.....	48
Pila de Metanol Directo.....	51
Pila de Óxido Sólido.....	56
Potencial electroquímico de una celda de combustible.....	41
Proceso de Mond.....	22
Propiedad de invarianza fuerte.....	231

R	
Ruka.....	27
S	
Sir Anthony Carlisle.....	21
Sir William Robert Grove.....	20
Sistema híbrido.....	100
Sistemas de pila de combustible.....	32
Sistemas híbridos de pilas de combustible.....	100
Stack.....	32
Superficie de deslizamiento.....	229
T	
Teflón.....	25
Thomas Grubb.....	25
W	
Walther Nernst.....	23
Weissbart.....	27
William Jacques.....	23
William Nicholson.....	21