

DESARROLLO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE GENERACIÓN BASADO EN PILAS DE COMBUSTIBLE PEM Y SUPERCAPACITORES

Tesis de Magíster

Juan Ignacio TALPONE

Presentada ante la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Nacional de La Plata
como requisito para la obtención del grado académico de

MAGÍSTER EN INGENIERÍA

Dirección de tesis:

Dr. Paul F. Puleston

Mg. Marcelo G. Cendoya

Jurado de Tesis:

Dr. Arnaldo Visintin

Dr. Carlos De Marziani

La Plata, 11 de Junio de 2014

A mi familia...

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a todos los que de alguna manera han colaborado para que esta tesis fuera posible.

En primer lugar a mi familia, especialmente a mis padres, por su infinita paciencia (literalmente) y su eterno apoyo a largo de todos estos años. Asimismo debo agradecer a Yani por su paciencia durante el doloroso proceso de escritura y a sus padres y hermano por sus buenas vibras de siempre durante estos últimos tres años.

En segundo lugar, quiero agradecer a mis queridos directores Paul y Marcelo, principales responsables de que haya tenido la posibilidad de llevar adelante el magister. Gracias por confiar en mi y brindarme su constante apoyo, paciencia y estar siempre dispuestos a enseñarme con inmensa dedicación.

En tercer lugar, al Institut de Robòtica i Informàtica Industrial (IRI) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, España. Muy especialmente al personal del Laboratorio de Pilas de Combustible (Jordi Riera, María Serra, Cristian Kunusch, Attila Husar, Stephan Strahl y Miguel Allué). También debo agradecer su gran ayuda y experiencia a Robert Griñó y Enrique Miró del Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials (IOC) de la misma casa de estudios. Gracias a todos por recibirme como un miembro más y su inmenso apoyo y colaboración durante toda mi estancia y el proceso de desarrollo del proyecto. Conocí a grandes personas y tengo un gran recuerdo y aprecio.

Finalmente, (y no menos importantes que los agradecimientos anteriores) muchas gracias a todos los integrantes y amigos del LEICI, por la colaboración prestada, por los mates, facturas, charlas y muy especialmente por el buen clima de trabajo que se vive a diario. El LEICI es una gran familia y como se dice por allí... “un estilo de vida”.

ÍNDICE GENERAL

Abstract	XI
Resumen	XIII
Lista de Figuras	XV
1. Introducción y Motivaciones	1
2. Perspectiva Energética	5
2.1. Antecedentes Históricos	5
2.2. Economía basada en Combustibles Fósiles	7
2.2.1. Impacto Ambiental de la Economía Fósil	8
2.3. Producción y Consumo Energético Mundial	9
2.4. La Descarbonización y el Rol de las Energías Renovables	11
2.5. Fuentes de Energía Renovables	13
2.5.1. Retos de las Energías Renovables	15
2.6. Proyección Energética en Argentina	18
2.6.1. Descripción del Sistema Eléctrico Argentino	18
2.6.2. Matriz Energética en Argentina	20
2.6.3. Energías Renovables en Argentina	21
2.7. Comentarios Finales	24
2.8. Resumen del Capítulo	25
3. Hidrógeno y Pilas de Combustible	27
3.1. Introducción	27
3.2. El Hidrógeno	28
3.2.1. Métodos de Producción de Hidrógeno	28
3.2.2. Almacenamiento de Hidrógeno	35
3.2.3. Transporte de Hidrógeno	40
3.3. Pilas de Combustible	41
3.3.1. Estructura y Funcionamiento de las Pilas de Combustible	41

3.3.2.	Termodinámica de las Pilas de Combustible	44
3.3.3.	Eficiencia de las Pilas de Combustible y Polarización	46
3.3.4.	Tipos de Pilas de Combustible	52
3.3.5.	Estructura Genérica de un Sistema de Generación Basado en Pilas de Combustible	56
3.3.6.	Ventajas y Desventajas de las Pilas de Combustible	58
3.4.	Resumen del Capítulo	59
4.	Sistemas Híbridos basados en PEMFC	61
4.1.	Introducción	61
4.2.	Aspectos generales de la utilización de PEMFC	61
4.2.1.	Factores que limitan el uso de las PEMFC	63
4.3.	Aplicación de las PEMFC en Sistemas Híbridos	64
4.3.1.	Aplicación en Sistemas de Transporte	64
4.3.2.	Aplicación en Generación Distribuida (GD)	65
4.3.3.	Aplicación en Sistemas Portátiles	68
4.4.	Arquitecturas de Sistemas Híbridos basados en PEMFC	68
4.4.1.	Configuración Paralela de Integración Directa	69
4.4.2.	Configuración Paralela Indirecta Simple	69
4.4.3.	Configuración basada en múltiples convertidores	71
4.4.4.	Configuración basada en un convertidor de múltiples entradas	72
4.4.5.	Estructura para GD, basada en múltiples convertidores	73
4.5.	Dispositivos de Almacenamiento en SH basados en PEMFC	74
4.6.	Supercapacitores como ESS	78
4.6.1.	Características eléctricas de un SC.	78
4.6.2.	Consideraciones de operación del SC.	81
4.7.	Unidades de Acondicionamiento de Potencia para SHGEE basados en PEMFC/ESS	82
4.8.	Elección de la arquitectura del SHGEE desarrollado	83
4.8.1.	Selección de la topología del convertidor CC/CC asociado a la PEMFC	83
4.8.2.	Selección de la topología del convertidor CC/CC asociado al SC	85
4.9.	Resumen del Capítulo	86
5.	Análisis de Funcionamiento del Convertidor CC/CC Elevador No Aislado	87
5.1.	Introducción	87
5.2.	Análisis de Funcionamiento	87
5.2.1.	Análisis del convertidor operando en MCC.	89
5.2.2.	Efecto de los elementos parásitos sobre el desempeño del convertidor en MCC.	93
5.2.3.	Análisis del convertidor operando en MCD.	97
5.3.	Convertidor CC/CC Elevador No Aislado Bidireccional	102
5.4.	Resumen del Capítulo	103

6. Diseño e Implementación del SHGEE basado en PEMFC/SC	105
6.1. Introducción	105
6.2. Descripción del Sistema Híbrido desarrollado	106
6.3. Canal de Generación - Pila de Combustible PEM	107
6.3.1. Descripción y Características de la PEMFC	108
6.3.2. Diseño del Convertidor CC/CC asociado a la PEMFC	110
6.4. Canal de Almacenamiento - Supercapacitor	123
6.4.1. Dimensionamiento y Selección del SC	123
6.4.2. Diseño del Convertidor CC/CC asociado al SC	125
6.4.3. Módulo de protección del SC	126
6.5. Excitación de las llaves de los convertidores	128
6.5.1. Protección de las llaves del convertidor	129
6.6. Unidad de Adquisición y Control	131
6.6.1. Medición y acondicionamiento de corrientes y tensiones	132
6.6.2. Módulo de Adquisición y Control	135
6.7. Fuentes Auxiliares del Sistema Híbrido	138
6.7.1. Canal Auxiliar - Fuente Electrónica Programable	139
6.7.2. Carga Electrónica Programable	140
6.8. Supervisión del Sistema Híbrido	140
6.9. Resumen del Capítulo	143
7. Operación del Sistema Híbrido Desarrollado	145
7.1. Introducción	145
7.2. Modelo dinámico del Sistema Híbrido	146
7.2.1. Modelo dinámico de la PEMFC	146
7.2.2. Modelo dinámico del Supercapacitor	147
7.2.3. Modelo dinámico de los convertidores CC/CC.	148
7.2.4. Modelo Dinámico Completo del SH.	149
7.3. Control del Sistema Híbrido	150
7.3.1. Comentarios relativos al Control del SH	152
7.3.2. Simulaciones del SH, previas a las pruebas experimentales	153
7.4. Implementación y Pruebas Experimentales	159
7.4.1. Detalles de implementación de hardware y software	159
7.4.2. Algunas consideraciones necesarias para la puesta en marcha	161
7.4.3. Pruebas experimentales y Resultados	163
7.5. Resumen del Capítulo	171
8. Conclusiones	173
8.1. Propuestas Futuras	175
Referencias	177

ABSTRACT

The constant industrial and technological development has established a scenario where the electric demand has grown rapidly. In this sense, the increasing exploitation of fossil fuels has achieved a strong reduction in its fields and increased pollution. It has been necessary to raise awareness on the different types of primary energy sources introducing those alternative sustainable non-polluting. Among these, renewable sources present some interesting characteristics that make them attractive, such as complementarity, free disponibility and never-ending capacity.

In this context, and as an alternative to traditional energetic vectors based on fossil fuels, appears a new vector: hydrogen, which is an efficient non-polluting resource. Besides, if it is implemented together with fuel cells, it can produce heat and electricity with water being its only waste. Of all the developed technologies, the PEM fuel cells have shown an excellent performance as sources of energy in different implementations thanks to their reduced size, robustness and low temperature of operation.

According to what was written in the previous paragraphs, this thesis deals with the development of a versatile Electric Energy Generation Hybrid System based on PEM Fuel Cells and Supercapacitors. These devices present high power density and if compared to more traditional technologies -still used nowadays- they are more compact, robust and have a better lifespan. For these reasons, this combination allows you to obtain a generation system of high power density (thanks to the continuous operation of the PEM Fuel Cell) and good dynamic performance.

This system aims at being used as a flexible power supply source in multiple applications or as a powerful tool for the development of advanced energy management strategies in laboratories.

RESUMEN

El constante desarrollo industrial y tecnológico ha establecido un escenario dónde, la demanda energética, en especial la eléctrica, se incrementa rápidamente. En este sentido la creciente explotación de los combustibles fósiles, ha logrado en las últimas décadas una fuerte reducción de sus yacimientos y el incremento de la contaminación ambiental. Tomando conciencia de estos problemas surgió la necesidad de diversificar las fuentes primarias de energía, introduciendo fuentes alternativas sustentables y no contaminantes. Entre éstas, las de origen renovable presentan algunas características que las hacen atractivas: complementariedad, libre disponibilidad y capacidad de generación inagotable.

En este contexto, como una alternativa a los tradicionales vectores energéticos basados en combustibles fósiles, aparece la posibilidad de emplear un nuevo vector: el hidrógeno, un recurso no contaminante y eficiente. Además, empleado conjuntamente con Pilas de Combustible, puede producir electricidad y calor, con agua pura como único residuo.

En base a lo expuesto, en esta tesis se aborda el desarrollo de un Sistema Híbrido de Generación de Energía Eléctrica versátil, basado en una Pila de Combustible PEM y Supercapacitores. De las tecnologías desarrolladas, las Pilas de Combustible tipo PEM, han demostrado un excelente desempeño como fuentes de energía en diversas aplicaciones, gracias a su reducido tamaño, robustez y baja temperatura de operación. Los Supercapacitores, presentan una alta densidad de potencia y frente a otras tecnologías tradicionales actuales son mas compactos, robustos y poseen mayor vida útil. De esta manera, esta combinación permite obtener un sistema de generación de alta densidad energética (gracias al funcionamiento continuo de las primeras) y muy buen desempeño dinámico. El sistema desarrollado tiene por objetivo ser utilizado como fuente de alimentación flexible en múltiples aplicaciones o bien, como una potente herramienta para el desarrollo de avanzadas estrategias de gestión de energía, en ámbito de laboratorio.

LISTA DE FIGURAS

2.1. Evolución de los Recursos Energéticos en el Período 1880 - 2000.	7
2.2. Distribución de la producción de energía (2010).	10
2.3. Distribución de la producción de energía estimada para el año 2030. . .	11
2.4. Crecimiento del consumo energético per cápita.	18
2.5. Matriz Energética Argentina al año 2010.	20
2.6. Localización geográfica de las potencialidades de las fuentes renovables en Argentina (GENREN).	23
3.1. Tanque Quantum [®] para almacenamiento de hidrógeno a alta presión (HFCIT, 2007).	37
3.2. Estructuras de tubos nanométricos de Carbono (UKG, 2007).	39
3.3. Estructura elemental de una Pila de Combustible.	43
3.4. Tensión de una Celda vs. Densidad de Corriente.	47
3.5. Sistema de Generación de Potencia basado en una Pila de Combustible.	56
4.1. Esquema de un Sistema Híbrido que utiliza la PEMFC como fuente principal.	66
4.2. Esquema de un Sistema Híbrido que utiliza la pila PEM como unidad de respaldo.	67
4.3. Conexión de ambas fuentes en forma directa.	70
4.4. Topología basada en un único convertidor (Tipo 1).	70
4.5. Topología basada en un único convertidor (Tipo 2).	71
4.6. Estructura basada en múltiples convertidores.	72
4.7. Estructura basada en un convertidor de múltiples entradas.	73
4.8. Estructura para GD, basada en múltiples convertidores.	74
4.9. Estructura interna de un SC.	79
4.10. Estructura elegida para el SH desarrollado en esta tesis.	84

4.11. Convertidor elevador unidireccional no aislado.	84
4.12. Convertidor elevador bidireccional no aislado.	85
5.1. Circuito del convertidor elevador.	88
5.2. Circuitos equivalentes del convertidor para MCC.	89
5.3. Tensión y corriente en el inductor en MCC.	90
5.4. Corriente en el diodo y corriente y tensión en el capacitor.	92
5.5. Modelo utilizado para el cálculo de rizado debido a r_c	94
5.6. Tensión de salida considerando el efecto de r_c	95
5.7. Relación de Conversión considerando el efecto de r_L	96
5.8. Rendimiento del Convertidor considerando el efecto de r_L	96
5.9. Circuitos equivalentes del convertidor para MCD.	97
5.10. Tensión y corriente en el inductor en MCD.	98
5.11. Relación V_o/V_s en MCD para diferentes valores de K.	101
5.12. Límite MCC-MCD para diferentes valores de I_o	101
5.13. Convertidor elevador no aislado bidireccional.	103
6.1. Estructura del Sistema Híbrido Desarrollado.	106
6.2. Canal de Generación basado en la PEMFC.	107
6.3. Pila de Combustible Nexa [®] (Ballard, 2003).	108
6.4. Curvas de Polarización y Potencia de la PEMFC Nexa (Ballard, 2003).	110
6.5. Curvas de Rendimiento del Módulo PEM Nexa [®] (Ballard, 2003).	111
6.6. Respuesta Transitoria del Módulo PEM Nexa [®] (Ballard, 2003).	112
6.7. Inductor adquirido para el convertidor asociado a la FC.	115
6.8. BC6I Semikron IGBT Pack.	119
6.9. Topología del convertidor y filtro de entrada para la corriente.	120
6.10. Formas de onda del convertidor para $P_s \simeq 510W$	122
6.11. Formas de onda del convertidor para $P_s \simeq 1200W$	123
6.12. Canal de Almacenamiento (SC).	124
6.13. Circuito del convertidor CC/CC para el SC.	126
6.14. Esquema del Módulo de Protección del SC.	127
6.15. Circuito del convertidor CC/CC de la PEMFC con excitación.	129
6.16. Circuito del convertidor CC/CC del SC con excitación.	129
6.17. Esquema del módulo de acondicionamiento y protección controlador- driver.	130
6.18. Detalle de la lógica de protección sintetizada.	131
6.19. Puntos de medición de Corrientes y Tensiones del SH.	132
6.20. Canal de medición de Corriente.	133
6.21. Canal de medición de Tensión.	133

6.22. Canal de medición de Corriente.	134
6.23. Canal de generación adicional basado en fuente electrónica programable.	139
6.24. Vista frontal del panel interfaz de usuario de la Unidad de Acondicionamiento y Control.	141
6.25. Diagrama en bloques de comunicación entre módulos del SH [®]	142
6.26. Fotografía del Sistema Híbrido desarrollado (frente).	142
6.27. Detalles del Sistema Híbrido (conexión UAC y Bus de CC).	143
6.28. Detalles del Sistema Híbrido (CC/CC, SC).	143
7.1. Modelo eléctrico completo de un SC.	147
7.2. Modelo dinámico completo del SH.	149
7.3. SH experimental y Control.	151
7.4. Simulación Δi_{fcref} de $+20A$ (izquierda) y $-10A$ y $-5A$ (derecha).	154
7.5. Simulación Δi_{scref} de $+10A$ (izquierda) y $-10A$ (derecha).	154
7.6. Simulación Δi_{scref} de $+25A$ (izquierda) y $-25A$ (derecha).	154
7.7. Simulación Δi_{scref} de $+55A$ (izquierda) y $-55A$ (derecha).	155
7.8. Simulación de cambio escalonado en $V_{bus-ref}$	155
7.9. Simulación de cambio escalonado en I_{bus}	156
7.10. Acercamiento de I_{bus} en $t = 6s$ y $t = 9s$	157
7.11. Resultados de simulación del SH ante cambios en I_{bus}	157
7.12. Resultados de simulación del SH con sobrecarga.	158
7.13. Resultados de simulación del SH completo para pequeñas perturbaciones.	159
7.14. Esquema PWM utilizado.	160
7.15. Adquisición, procesamiento y sincronización del PWM.	161
7.16. Circuito de inicialización de la tensión del Bus de CC.	162
7.17. Circuito de inicialización de la tensión del SC.	162
7.18. i_{L-FC} , v_{FC} y v_{bus} para $I_o = 5A$ y $D = 0,05$	164
7.19. i_{L-FC} , v_{FC} y v_{bus} para $I_o = 5A$ y $D = 0,15$	164
7.20. i_{L-FC} , v_{FC} y v_{bus} para $I_o = 5A$ y $D = 0,35$	164
7.21. i_{L-FC} , v_{FC} y v_{bus} para $I_o = 4A$ y $D = 0,45$	165
7.22. Efecto del filtro L-C en la corriente de la Nexa [®]	166
7.23. i_{L-FC} para $I_{SC} = 0A$	166
7.24. i_{SC} para condición de descarga del SC a $I_{SC} = 5A$	166
7.25. i_{SC} para condición de carga del SC a $I_{SC} = 5A$	167
7.26. i_{L-SC} para escalón $D = 0,15 \rightarrow 0,25$	168
7.27. i_{L-SC} para escalón $D = 0,35 \rightarrow 0,45$	168
7.28. Perfil de carga utilizado para la prueba del SH completo.	169
7.29. Corriente entregada por la Nexa [®]	169
7.30. Corriente a través del SC.	169

7.31. Tensión en la Nexa® 170
7.32. Tensión en el SC. 170
7.33. Tensión en el Bus de CC. 170

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIONES

La forma de vida actual del hombre ha contribuido a generar individuos fuertemente dependientes de la energía eléctrica. En la actualidad, tanto en ciudades como en sitios aislados, la vida se encuentra condicionada por el uso masivo de artefactos eléctricos. Esta característica social, en conjunto con el crecimiento de la población y la industrialización progresiva de los países en vías de desarrollo ha establecido un escenario dónde, la demanda energética, en especial la eléctrica, se incrementa velozmente.

El desarrollo industrial y tecnológico que se verificó a partir de la segunda mitad del Siglo XX había provocado una creciente explotación de los combustibles fósiles, particularmente los hidrocarburos (petróleo y gas), situación que se reflejó en dos cuestiones fundamentales: la amenaza del agotamiento antes de lo previsto de los yacimientos y el incremento exponencial de la contaminación ambiental, particularmente por la emisión de gases de efecto invernadero desde los centros industriales y las grandes ciudades, que concentraron altos volúmenes de vehículos.

Tal es así que, desde las últimas décadas del Siglo XX, la humanidad comenzó a tomar conciencia de los problemas ambientales, económicos y de sustentabilidad que implicaban continuar basando todo el consumo energético mundial en la explotación de recursos no renovables y surgió la necesidad de diversificar las fuentes primarias de energía. Como consecuencia, un número creciente de países en el mundo unieron sus esfuerzos y comenzaron a investigar y fomentar en conjunto la utilización de las fuentes alternativas, no contaminantes, de energía. Considerando esto, nuestro país no puede ser ajeno a esta realidad mundial. A través del desarrollo de las energías alternativas, se tiene la oportunidad de contribuir al esfuerzo internacional, no sólo de cuidar el

medioambiente, sino en lograr la autosuficiencia energética y al mismo tiempo obtener beneficios económicos y sociales con base en el uso de estas nuevas tecnologías que están revolucionando la forma en que se produce y consume energía.

En su conjunto, las energías alternativas presentan una serie de características atractivas. Entre ellas se encuentra principalmente su libre disponibilidad y una capacidad de generación inagotable bajo la escala temporal humana. Dentro de las existentes se pueden encontrar por un lado, las fuentes de energía primarias renovables tales como la eólica y la solar, dos de las más difundidas en las últimas décadas; y por otro, los vectores energéticos, que son aquellas sustancias que permiten el almacenamiento de energía para su posterior uso conveniente. Estas últimas, a diferencia de las primeras, no existen en estado libre en la naturaleza y por lo tanto es necesario producirlas, invirtiendo energía en ello.

El vector energético que mayor relevancia ha tomado en las últimas dos décadas es el hidrógeno, postulado como firme candidato para sustituir al petróleo en el camino hacia un futuro energético sustentable. El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, insípido, altamente inflamable y no contaminante. Es el más liviano de los gases conocidos y, de los combustibles empleados, es el que tiene mayor contenido energético por unidad de peso y, de los que menos por unidad de volumen. Entre numerosos métodos existentes, puede ser producido en forma “limpia” por electrólisis del agua, a partir de electricidad generada por fuentes renovables como las mencionadas, constituyendo un vector energético 100 % libre de contaminación.

El aprovechamiento de este elemento puede realizarse en forma eficiente utilizando Pilas de Combustible (FC), resultando las de tecnología PEM (PEMFC) las que mayor relevancia han tomado en los últimos años. Estos son dispositivos que permiten generar electricidad mediante una reacción de óxido-reducción del tipo electroquímica, a partir de la combinación de hidrógeno y oxígeno, sin contaminar el medio ambiente ni requerir mantenimiento. Desde el punto de vista económico se caracterizan por su alta eficiencia ($\simeq 60\%$) y, dada su baja temperatura de operación, constituyen una alternativa que ha demostrado excelentes prestaciones, como fuente de generación principal, en diversas aplicaciones estacionarias y móviles. Sin embargo, las PEMFC, presentan limitaciones dinámicas que requieren de su combinación con alguna fuente auxiliar de alta densidad de potencia. Estas estructuras se conocen como “híbridas” y han demostrado un gran potencial para la implementación de sistemas de generación de electricidad de alto rendimiento, capaces de abastecer la demanda en forma continua, con una excelente respuesta dinámica y sin producir deterioro del medioambiente.

En base a la necesidad anterior, en los últimos años, la combinación particular de PEMFC con dispositivos de almacenamiento tales como baterías, volantes de inercia (flywheel) y Supercapacitores (SC), ha sido ampliamente investigada. De los mencionados, las baterías y los SC han tomado mayor relevancia debido fundamentalmente a que no poseen partes móviles, simplificando el mantenimiento. Respecto a las primeras, en la actualidad surgieron nuevas tecnologías, como las baterías de litio y las flowbatteries, con el objeto de reemplazar las baterías convencionales (plomo-ácido) que presentan numerosas desventajas desde el punto de vista de su vida

útil, densidad de energía, ciclos de carga/descarga y contaminación. Sin embargo, estos novedosos sistemas de almacenamiento están siendo desarrollados para aplicaciones de mediana y gran potencia. En consecuencia, actualmente, considerando factores tales como tamaño, cantidad de ciclos de carga/descarga y vida útil, los Sistemas Híbridos basados en PEMFC/SC son los que han demostrado mejor desempeño. En este sentido, en esta tesis se aborda el análisis, diseño e implementación de un Sistema Híbrido de Generación de Energía Eléctrica (SHGEE) versátil, basado en PEMFC/SC. Se pretende que el mismo pueda ser utilizado como una fuente híbrida de potencia en múltiples aplicaciones estacionarias, o bien, como una potente herramienta para la evaluación de avanzadas estrategias de gestión de energía, en ámbito de laboratorio.

De acuerdo a lo expuesto previamente, la presente tesis ha sido organizada de la siguiente manera:

En el Capítulo 2 se aborda la problemática energética mundial y en nuestro país, producto de una economía basada en combustibles fósiles. Es así que se centran los esfuerzos en demostrar la necesidad de diversificar la matriz energética incorporando energías alternativas tales como las renovables y el hidrógeno, un vector energético de excelentes propiedades, a los efectos de garantizar la seguridad energética y reducir la contaminación ambiental.

En el Capítulo 3 se presenta, en una primera parte, el hidrógeno H_2 como vector energético. Se describen sus propiedades, métodos de producción, almacenamiento y transporte, intentando demostrar los beneficios de este gas combustible y el por qué es considerado un elemento fundamental en el camino hacia la independencia de los combustibles fósiles. En una segunda parte se introducen las Pilas de Combustible, como dispositivos que han despertado un gran interés para producir electricidad a partir del hidrógeno, con alta eficiencia y cero polución ambiental. Para ello se describe en detalle su principio de funcionamiento y características principales, tecnologías existentes y sus ventajas y limitaciones. Se intenta que el lector comprenda no solo de la necesidad de introducir un nuevo recurso energético, como es el hidrógeno, sino también, de que manera éste se puede aprovechar en forma eficiente para la producción de energía eléctrica, sin contaminar el medioambiente durante el proceso completo (desde la producción de H_2 hasta la generación de electricidad).

En el Capítulo 4 se analizan con especial énfasis las configuraciones de Sistemas Híbridos de Generación de Energía eléctrica basados en Pilas de Combustible tipo PEM. En este sentido, se estudian las características principales de las diferentes estructuras existentes más importantes y la utilización de unidades de almacenamiento de energía, particularmente Supercapacitores, como fuente auxiliar con el objetivo de mejorar el desempeño dinámico del SH. Finalmente, de acuerdo a lo expuesto, se selecciona la configuración para el Sistema Híbrido desarrollado en esta tesis y elige la topología de las interfaces de acondicionamiento de potencia que el mismo incorpora, a los efectos de controlar el flujo de potencia entre las fuentes y la carga. El análisis de funcionamiento de estas últimas se realiza detalladamente en el Capítulo 5, para obtener las ecuaciones y conocer las características de relevancia para su diseño.

En el Capítulo 6, dada la estructura elegida para el Sistema Híbrido y las interfaces de potencia que lo componen, se realiza el dimensionamiento y diseño de cada uno de sus módulos. De esta manera, a partir de una PEMFC comercial se procede al diseño e implementación de las interfaces de acondicionamiento de potencia, el sistema de adquisición y control y las protecciones auxiliares necesarias. El esfuerzo en el diseño fue realizado de manera de obtener un conjunto robusto y fundamentalmente versátil, que constituya por un lado, una escalable y versátil fuente de alimentación en zonas aisladas (alimentación de viviendas, escuelas, hospitales) y vehículos de propulsión eléctrica; y por otro, una herramienta útil para investigación de técnicas de control avanzadas sobre estas novedosas estructuras, en ámbito de laboratorio.

En el Capítulo 7 el SH es probado con el objetivo de demostrar su excelente desempeño. En este sentido, a partir de la implementación de un sistema de control adecuado, que incluye los lazos de control de las interfaces de potencia y de nivel superior de supervisión, se realizan pruebas individuales de sus módulos y del conjunto completo con el objetivo de alimentar un perfil de carga preestablecido. De esta manera, se desea demostrar la gran potencialidad de este sistema como alternativa para la generación de energía eléctrica en forma continua y eficiente, sin emisiones nocivas al medioambiente. Por último en el Capítulo 8 se exponen las conclusiones y futuras investigaciones.

CAPÍTULO 2

PERSPECTIVA ENERGÉTICA

Las predicciones de decaimiento de las fuentes convencionales de energía, conjuntamente con el incremento en el costo de los combustibles fósiles, particularmente del petróleo y la problemática ambiental relacionada con su utilización, han potenciado el interés en los recursos energéticos renovables. Desde de la década del 80', se observa un sostenido crecimiento de la actividad de investigación y desarrollo en relación con estas fuentes de energía que pueden desempeñar un papel importante en un futuro energético sustentable.

A partir del estudio y análisis de diferentes fuentes bibliográficas, en este capítulo, se presenta una síntesis que pretende contribuir al conocimiento de la situación energética actual, los problemas asociados con la dependencia de fuentes de energía primaria de origen fósil y la importancia de las actividades de investigación y desarrollo para resolverlos, particularmente en el ámbito de las fuentes de energía renovables. Para ello se provee un panorama general del consumo global de energía, las consecuencias ambientales producto de la utilización masiva de fuentes de origen fósil, la situación energética en nuestro país y el estado actual de las energías renovables en el mundo.

2.1. Antecedentes Históricos

El hombre, desde su aparición, utilizó los recursos de la naturaleza, ya sea en forma directa o a través de máquinas para calentar, cocinar, transportar, iluminar y trabajar los metales entre otras actividades.

Los primeros seres humanos utilizaron la biomasa tradicional, es decir, la energía de las plantas para producir fuego y calentar sus viviendas, cocinar y forjar sus herramientas y armas. La fuerza de los animales fue aprovechada, como medio de transporte, para las tareas de carga o fuerza motriz y para los grandes ejércitos. Las primeras civilizaciones crearon máquinas para aprovechar la energía del viento y la fuerza del agua. La energía del Sol se utilizaba para secar los granos e indirectamente calentar los hogares (Godfrey, 2004).

El requerimiento energético durante la revolución industrial fue satisfecho inicialmente mediante la quema de la madera (biomasa). Sin embargo, la fuerte industrialización elevó enormemente el consumo de energía provocando una crisis y fomentando así la búsqueda de sustitutos energéticos. De esta forma, comenzó a emplearse carbón (combustible fósil) como fuente de energía primaria.

Desde mediados del siglo XVIII y hasta fines del siglo XIX, la combinación del carbón (combustible fósil), la metalurgia del hierro (nuevos materiales) y las máquinas de vapor (fuerza motriz) alimentaron la Revolución Industrial. El gas comenzó a utilizarse como combustible para iluminación y calefacción desde fines del siglo XVIII, mientras que el uso del petróleo se inició efectivamente tras la invención del motor de combustión interna a fines del siglo XIX (Miño, 2003). De esta forma se completa la trilogía de las fuentes fósiles. La invención del generador eléctrico para la producción de electricidad y su aplicación en los motores eléctricos y en las redes eléctricas de distribución marcó el inicio de la era moderna, intensificando el proceso industrializador.

El siglo XX trajo consigo una revolución energética y la aplicación de todo tipo de fuentes de energía para los más diversos usos. En el período comprendido entre mediados del siglo XX y el año 1973, en el cual se produce la primera crisis económica mundial, aparece la energía nuclear. Se expande la red eléctrica y la red de distribución de gas. La sociedad depende casi totalmente de los recursos fósiles. En este período los combustibles fósiles son abundantes y de bajo costo. Sin embargo, los procesos continúan siendo ineficientes y no consideran el impacto ambiental.

Posteriormente, desde la crisis de 1973 y hacia el año 2000, en la fase postindustrial, la manufactura sigue creciendo, al igual que los servicios y las comunicaciones, basados en tecnologías en permanente mejora. Se comienza a utilizar más eficientemente la energía mediante la optimización de procesos y nuevos diseños y a reconocer los impactos ambientales que éstos producen (Sorensen, 2000). Debido a las crisis económicas, la mencionada con anterioridad, de 1973 y posteriormente, la de 1979, se toma conciencia de la dependencia del petróleo. Y como consecuencia los países desarrollados comienzan a invertir en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías basadas en fuentes de energía renovables (NTER). Luego, superadas las crisis baja la inversión en estas nuevas tecnologías y se continúa optando por el "petróleo barato". En la Figura 2.1 se muestra en que porcentaje de demanda de energía primaria han participado los diferentes recursos energéticos en el período comprendido entre el año 1880 y el año 2000.

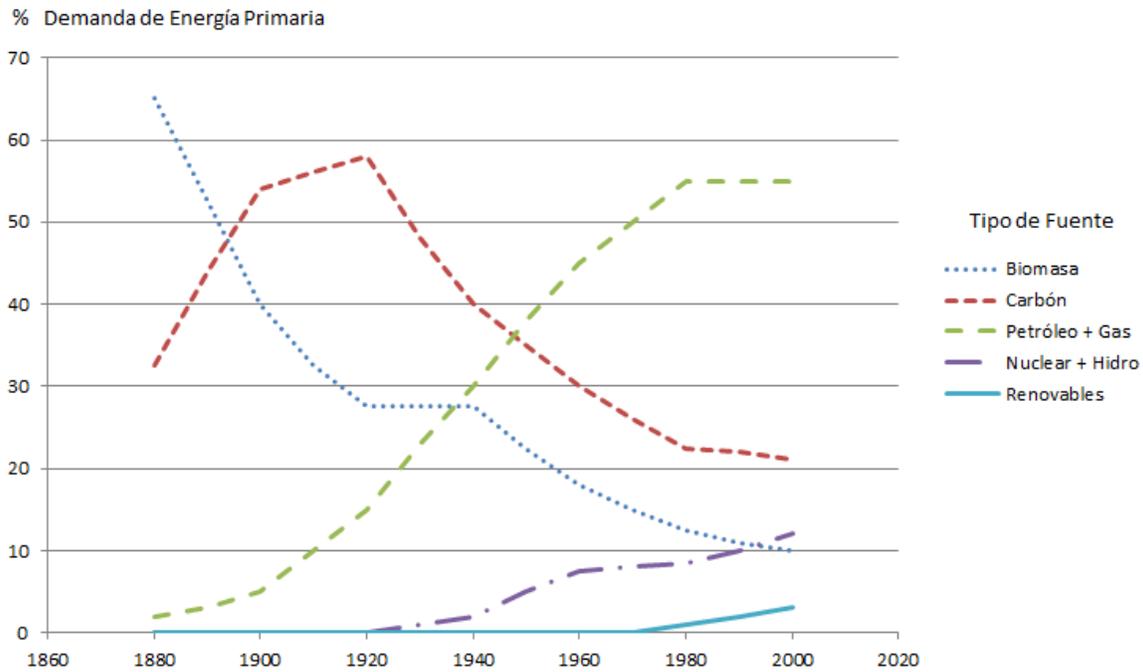


Figura 2.1: Evolución de los Recursos Energéticos en el Período 1880 - 2000.

Finalmente, hoy en día, el calentamiento global, la vigencia del protocolo de Kyoto (Unidas, 1998) y la inestabilidad del precio del petróleo dan un nuevo y enorme impulso al desarrollo de las NTER.

2.2. Economía basada en Combustibles Fósiles

El crecimiento de la población y la actividad económica mundial están imponiendo una presión significativa sobre la “capacidad de carga” de la Tierra, es decir, la carga máxima que la humanidad puede imponer de modo sostenible al medio ambiente antes de que éste sea incapaz de sostener y alimentar la actividad humana (Hui, 2006). La demanda de alimentos, agua potable, vivienda y energía están aumentando así como también la polución generada por el consumo de estos recursos. A su vez, el incremento en la demanda de estos recursos es impulsado no sólo por el crecimiento de la población, sino también del deseo de mejorar su nivel de vida. En general, un mejor nivel de vida requiere un incremento en la energía utilizada por habitante. Estos dos factores juntos conllevan a una mayor demanda de recursos limitados y la producción de residuos contaminantes y peligrosos.

Hoy día, casi la totalidad de la energía utilizada para el transporte y una porción significativa de aquella utilizada en aplicaciones estacionarias proviene de combustibles fósiles. Aunque, durante el siglo pasado, el quemado de combustibles

fósiles ha provocado un tremendo crecimiento económico, aumento de la productividad y un mejor nivel de vida en algunas zonas del mundo, esta situación actualmente ya no es sostenible. El uso de combustibles fósiles degrada el medioambiente y causa enfermedades en la población. Además son fuentes finitas y aquellos países que requieren de un uso continuo y no poseen grandes cantidades de los mismos se transforman en dependientes de aquellos que si pueden proveerselos.

Las reservas de combustibles fósiles que la sociedad posee actualmente no llegarán a cubrir la demanda en el largo plazo. La población mundial hoy en día supera los 6 mil millones de habitantes y su proyección hacia el 2050 espera que se duplique. Los consumos actuales de energía por año son de alrededor de $138,8 \times 10^6$ TWh y su proyección hacia el 2050 casi se triplicará. La diferencia en el factor de multiplicación de ambos parámetros obedece al hecho de que la proyección del crecimiento de la actividad económica mundial la marcará principalmente el sector industrial.

En las naciones industrializadas, una fuente ininterrumpida de energía es fundamental para la estabilidad económica y la seguridad energética. Muchos países industrializados son muy dependientes de otros, por su energía. Sus economías dependen de la voluntad de los países que le proporcionen la necesaria para abastecer su demanda interna.

Por último, aunque los combustibles fósiles se pueden consumir de manera más eficiente mediante la mejora de las técnicas de conversión de energía y otros medios, ellos no son la solución definitiva al problema de la demanda de energía y alternativas, para satisfacer esta demanda, tendrán que ser desarrolladas para un futuro energético sustentable.

2.2.1. Impacto Ambiental de la Economía Fósil

La combustión de combustibles fósiles produce emisiones de gases y partículas que pueden afectar negativamente el medioambiente y la salud de las personas. El Dióxido de Carbono (CO_2), que inevitablemente se genera al quemar combustibles fósiles, es actualmente considerado como una de las fuentes que contribuyen mayoritariamente al recalentamiento global del planeta (efecto invernadero), el cual puede tener consecuencias desastrosas en ciertas regiones produciendo severos cambios climáticos.

En el año 1995 las emisiones globales totalizaron 22.190 millones métricos de toneladas (MMT) de CO_2 , 852 MMT de CO , 99,27 MMT de óxidos de nitrógeno (NO_x) y 141,9 MMT de dióxido de sulfuro (SO_2). Estos valores están aumentando cada año, y este aumento se acelerará a medida que los países con economías en desarrollo y grandes poblaciones como la India y China se expandan.

Con 370 ppm, los niveles atmosféricos de CO_2 están actualmente en sus niveles más altos de los últimos 420000 años. Los niveles de dióxido de carbono hoy en día son un 18 % superiores que en 1960 y se estiman un 31 % más altos que en el año 1750

cuando ocurrió la revolución industrial (Lewis, 2005). Estudios históricos muestran una fuerte correlación entre el CO_2 atmosférico y la temperatura del aire. Los efectos de este crecimiento de la temperatura, también conocido como “calentamiento global”, son desconocidos aunque análisis predictivos sugieren serias consecuencias ambientales. Entre los impactos ambientales se encuentran: pérdida de la biodiversidad, crecimiento del nivel de los mares, mayores sequías, propagación de enfermedades, cambios en los patrones climáticos, aumento de las inundaciones, disminución de los recursos de agua dulce y un incremento de los fenómenos meteorológicos extremos (wwl.org, 2005).

Los costos asociados con el tratamiento de enfermedades como el asma y la pérdida de productividad de los trabajadores debido a sus problemas de salud está teniendo y tendrá un impacto negativo creciente en las economías del mundo. Los NO_x son los principales responsables de la formación de ozono ambiental que se crea cuando la luz del sol incide sobre ellos o hidrocarburos. Éste puede resultar un problema especialmente grave en las zonas urbanas con alta densidad de población. El ozono es un irritante de las vías respiratorias y puede causar dificultad para respirar y dolor al inhalar, agravando los síntomas de asma y tos en los niños. El ozono también provoca la inflamación de las vías respiratorias y disminución de la función pulmonar en adultos (Society, 1996). La exposición a NO_x también puede agravar la respuesta alérgica a los alérgenos en personas sensibles, mas aún en niños. La contaminación de partículas contribuye al exceso de mortalidad y hospitalización por enfermedad cardíaca y del tracto respiratorio en adultos (US Environmental Protection Agency, 2001). Otros estudios han encontrado que la exposición al humo del diesel, una fuente importante de emisiones de partículas, se asocia con un mayor riesgo de cáncer de pulmón. En los niños, este tipo de contaminación afecta la función pulmonar y el crecimiento. También aumenta los síntomas de la bronquitis.

Por todo lo expuesto en esta sección, es importante considerar la relevancia del esfuerzo necesario en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que no sólo permitan mejorar el aprovechamiento de los combustibles fósiles de manera de reducir, como consecuencia, los gases contaminantes emitidos a la atmósfera, sino además de aquellas que impulsen la utilización eficiente de aquellas fuentes primarias de energía renovables cuyo impacto ambiental es mínimo. Siguiendo esta línea, son necesarios, adicionalmente, vectores energéticos no contaminantes y eficientes que permitan el almacenamiento de la energía producida por éstas fuentes para un máximo aprovechamiento de los recursos disponibles con un mínimo daño ambiental.

2.3. Producción y Consumo Energético Mundial

Desde el advenimiento de la Revolución Industrial, el consumo energético mundial ha crecido de forma continuada. En 1890 el consumo de combustibles fósiles alcanzó al de biomasa utilizada en la industria y en los hogares. En 1900, el consumo energético global supuso unos 0,7 TW ($0,7 \times 10^{12}$ watts).

Durante el siglo veinte se observó un rápido incremento en el uso de los combustibles fósiles que se multiplicaron por veinte. Entre 1980 y 2004, las tasas anuales de crecimiento fueron del 2%. En el mundo se utiliza una cantidad de energía del orden de $1,14 \times 10^{14}$ kWh/año, equivalente a un consumo de potencia continuo de 15 TW (terawatts). Actualmente, aproximadamente el 81% de la energía eléctrica es generada a partir de fuentes no renovables (41% carbón, 17% nuclear, 17% gas natural y 6% petróleo) y un 19% hidroeléctrica y otras renovables (principalmente eólica y solar), tal como puede observarse en la Figura 2.2 (EIA, 2006).

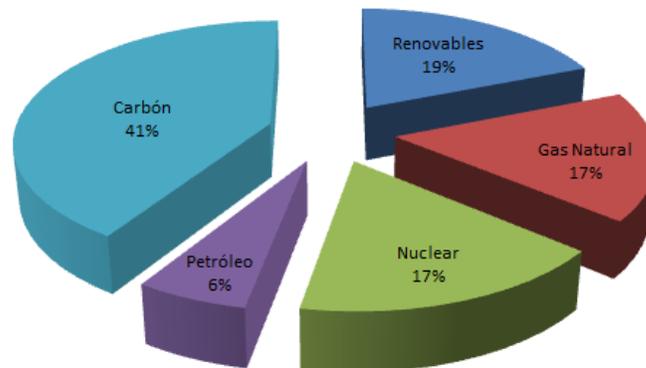


Figura 2.2: Distribución de la producción de energía (2010).

De acuerdo con las proyecciones del Departamento de Administración de Información de Energía de EE.UU. (EIA, 2006), la generación de energía eléctrica a partir de recursos renovables crecerá, pero su contribución general al suministro eléctrico mundial caerá por debajo de su nivel actual a un 17% en 2030 (U.S. International Energy Agency, 2006) como se muestra en la Figura 2.3.

La EIA prevé además un aumento en la capacidad de generación eléctrica para satisfacer la creciente demanda de electricidad y sustituir las viejas plantas de generación de electricidad. La mayoría de estas adiciones proyectadas se espera que vendrán de las plantas de ciclo combinado de gas natural debido a su alta eficiencia (50% y más).

El carbón seguirá desempeñando un papel importante a futuro. Según la EIA, la elección de la tecnología para el incremento de la capacidad de generación proyectada se basa en la opción más barata disponible a un precio que dependerá de la etapa actual de desarrollo de cada tecnología. Por lo tanto, las estimaciones de la EIA suponen que el costo actual de los recursos renovables está obstaculizando su potencial para desempeñar un papel significativo en el mercado de generación de electricidad.

Incluso con medidas de conservación y eficiencia energética, la demanda de energía se duplicará (a 30 TW) en 2050 y a más del triple de la demanda (a 46 TW) a

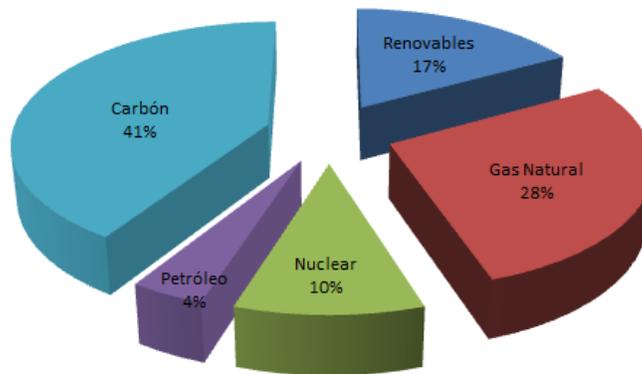


Figura 2.3: Distribución de la producción de energía estimada para el año 2030.

finales del siglo XXI. Un promotor de gran parte de este incremento en la demanda de energía será el crecimiento de las economías de los países no industrializados y las grandes poblaciones del mundo que están comenzando, por primera vez, a experimentar los beneficios de vivir en comunidades electrificadas. En la actualidad, el 18% de la población mundial (países desarrollados) consume el 56% de la energía mundial y el restante 82% de la población (países no desarrollados) está consumiendo un 44%. A medida que la vida de las personas y las economías de los países no desarrollados se hagan más intensivas en energía, habrá un crecimiento acelerado en la demanda de ésta última. Para el año 2030, se proyecta que los países no desarrollados consumirán el 57% de la energía del mundo. Sin embargo, esto no se debe a una reducción en el consumo de energía por los países desarrollados; sino debido a un aumento en el consumo de los que se encuentran en vías de desarrollo y, en general, se prevé que crezca en un 71% (EIA, 2006).

2.4. La Descarbonización y el Rol de las Energías Renovables

En los últimos 130 años, ha habido una transición en los combustibles utilizados para calefacción y producción de electricidad. En un principio se comenzó utilizando madera y luego ésta fue reemplazada por el carbón. Posteriormente el petróleo reemplazó al carbón y, por último, comenzó a utilizarse gas natural. A medida que se avanza por este camino, puede notarse que ha habido una reducción en la cantidad de carbono por cada átomo de hidrógeno en los combustibles utilizados.

Esta tendencia general de transición en el uso de combustibles de alto carbono al

de combustibles bajos en carbono es conocido como descarbonización. El gas natural tiene la mayor relación hidrógeno-carbono atómico y las menores emisiones de CO_2 de todos los combustibles fósiles, que emiten aproximadamente la mitad de CO_2 que el carbón para la misma cantidad de energía. Debido a su competitividad de costos y alta eficiencia, será utilizado para producir una fracción importante de la electricidad demandada en el mundo. Sin embargo, como se ha demostrado en los últimos años, la fuerte dependencia del gas natural para la generación de electricidad sin una expansión simultánea en su infraestructura ha inflado sus costos de manera significativa. Como un medio para compensar el aumento previsto de los precios del gas natural y evitar el riesgo de volatilidad de los precios debido al rápido aumento en su uso, se ha propuesto, entre otras medidas, aumentar la generación de electricidad de las centrales de carbón. La caída de los precios del carbón y su abundancia en determinadas regiones en el mundo han fortalecido este caso. Sin embargo, hasta que los problemas ambientales que están asociados con la quema de carbón y el manejo de las emisiones de CO_2 se resuelvan, el carbón seguirá siendo una fuente no-sostenible y contaminante de electricidad. El gas natural ofrece un puente a un futuro de energía no fósil que es consistente con la descarbonización. Al igual que los demás combustibles fósiles, el gas natural es un recurso finito. Como su contribución a nivel mundial es altamente variable, presentando picos de disponibilidad durante determinados períodos y valles durante otros, costos de producción y transporte elevados y fundamentalmente disponibilidad finita, las fuentes de energía libres de carbono ganarán un papel fundamental en la generación primaria de electricidad.

Para evitar moverse en la dirección equivocada en el camino hacia la descarbonización y considerando que el carbón, la madera y las reservas de gas natural se agotan, las fuentes de energía alternativas no fósiles tendrán que ser introducidas adicionalmente como fuentes de energía primaria. Entre éstas se consideran el hidrógeno (no renovable), la eólica, solar y otras renovables. Este sería el final en la vía a la descarbonización (Said Al-Hallaj, 2011). Un paso clave para alcanzar este objetivo es la construcción de una infraestructura energética que permita que una fuente libre de carbono, como lo es el hidrógeno se distribuya a todos los usuarios de la misma manera que el gas natural y la electricidad en la actualidad.

El hidrógeno es muy escaso en nuestro planeta y su producción es un proceso aún costoso, e involucra actualmente enormes inversiones en investigación y desarrollo. Cuando se llegue a producir hidrógeno comercialmente de bajo costo, los problemas energéticos y ambientales quedarán resueltos, pues el hidrógeno, a diferencia de otros combustibles, no es contaminante. Se puede producir por electrólisis, proceso que requiere grandes cantidades de electricidad, la cual puede obtenerse a partir de la energía del sol, mediante paneles fotovoltaicos y de la energía del viento, utilizando turbinas eólicas. También puede ser producido a partir de hidrocarburos como, por ejemplo, el metano (Bolcich, 2011). La mayor parte del hidrógeno elemental se obtiene “in situ”, es decir, en el lugar y en el momento en el que se necesita. En cualquier caso en las próximas décadas entraremos en una economía basada en el hidrógeno como combustible secundario o vector energético. La energía primaria para su obtención se estima que será la solar y la eólica. De esta manera, el hidrógeno se podría utilizar para

producir calor mediante su combustión y electricidad mediante el uso de un motor de combustión o a través de pilas de combustible.

2.5. Fuentes de Energía Renovables

Existe un conjunto importante de fuentes energéticas renovables potencialmente utilizables para la generación de energía eléctrica. En particular, salvo la energía geotérmica y la energía proveniente de las mareas, las restantes fuentes de energía alternativa corresponden a diferentes manifestaciones de la energía originalmente proveniente del sol, transformada a lo largo del tiempo por variados mecanismos naturales. Ejemplo de ello son la energía eólica, la energía de biomasa, la energía hidráulica, etc. Una breve descripción correspondiente a cada una de las más importantes fuentes de energía renovable se da a continuación:

- **Energía Solar.**

El sol irradia sobre el planeta Tierra 100.000 TWh cada hora. Para el aprovechamiento de esta energía se emplean básicamente dos métodos. Estos son: la conversión fotovoltaica o la calefacción de algún fluido. El primero de ellos utiliza semiconductores fotosensibles que permiten convertir directamente los fotones provenientes del sol en energía eléctrica. Si bien el rendimiento de los módulos fotovoltaicos es reducido (12%-18%), su costo ha ido decreciendo con la expansión de su utilización, tornándose actualmente en una alternativa viable y atractiva producto principalmente de los bajos costos de mantenimiento e instalación que posee. La segunda técnica para el aprovechamiento de la energía solar consiste en emplear el calor que la radiación del sol produce, para generar electricidad en forma indirecta. Estos sistemas emplean superficies colectoras de los rayos solares para calentar un fluido que posteriormente es forzado a describir un ciclo termodinámico. El trabajo útil obtenido a través de este ciclo permite impulsar un generador de energía eléctrica.

- **Energía Eólica.**

La energía eólica ha sido aprovechada por el hombre desde los albores de la civilización. En el pasado, sus usos principales tuvieron lugar principalmente en la navegación, el bombeo de agua y la molienda de granos. Recién pasada la mitad del Siglo XX y ante necesidades energéticas concretas, los sistemas de conversión de energía eólica a eléctrica recibieron un gran impulso. En la actualidad este recurso se presenta como uno de los más promisorios dentro del ámbito de las energías alternativas. Su aprovechamiento se realiza a partir de una turbina que, al ser impulsada por el viento, pone en funcionamiento algún tipo de generador eléctrico. Mundialmente existen muchos emplazamientos comerciales para el aprovechamiento de este tipo de energía. La importancia de este recurso energético se evidencia en las expectativas que se tienen sobre el futuro del mismo. Según el Consejo Global de la Energía Eólica, la capacidad instalada de energía

eólica se incrementó un 27% desde finales de 2006 hasta finales de 2007 hasta un total de 94,1 GW, con alrededor de la mitad del incremento en los Estados Unidos, España y China. Se duplica la capacidad cada tres años aproximadamente (Valenciaga, 2001). La capacidad total instalada es de aproximadamente tres veces la potencia producida promedio por estos sistemas que oscila actualmente, por lo general, entre un 25% y un 40% de la capacidad nominal. La Argentina posee zonas como la patagonia donde este recurso tiene gran potencialidad. Si bien su explotación es aún incipiente ya existen varios emplazamientos para su aprovechamiento.

- **Geotérmica.**

Bajo la corteza de nuestro planeta se encuentra almacenada en forma de calor una gran cantidad de energía denominada energía geotérmica. Parte de ella se encuentra dentro de reservorios formados en zonas de roca porosa en forma de vapor o agua caliente. Para su explotación, se bombea el fluido hacia la superficie donde la energía que posee almacenada en forma de calor se emplea para mover un generador eléctrico. El tipo de proceso utilizado en esta conversión energética depende de la temperatura a la cual se encuentre el fluido. Si bien su aprovechamiento resulta dificultoso debido a la baja conductividad térmica de los materiales involucrados, existen zonas que presentan un elevado gradiente térmico resultando aptas para la explotación de esta energía. En la actualidad se están investigando otras formas de utilización de este recurso ya que se presenta como una energía confiable de gran potencialidad y de operación ininterrumpida.

- **Energía Hidroeléctrica.**

El agua fluyendo desde un nivel superior a otro inferior posee en cada instante una cantidad de energía que se manifiesta en parte como energía potencial y en parte como energía cinética. Es esta última clase de energía la susceptible de ser transformada en trabajo constituyéndose por lo tanto en la base de todo aprovechamiento hidráulico. Desde la antigüedad el hombre utilizó la energía cinética del agua de los ríos en la construcción de molinos hidráulicos. Sin embargo, fue recién a finales del siglo XIX cuando se la empleó por primera vez en la generación de energía eléctrica. A pesar de ser ésta una energía renovable limpia, en la actualidad su principal explotación se realiza a partir de grandes centrales hidroeléctricas las cuales producen un alto impacto ambiental. En menor escala también se la puede aprovechar a través de microturbinas. Si bien la utilización de estas minicentrales hidroeléctricas está condicionada por las características del lugar de emplazamiento, suponen un mínimo impacto ambiental.

- **Energía de Biomasa.**

Se define como biomasa a toda la materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo en ella a los materiales procedentes de su transformación natural o artificial. Desde el punto de vista energético, la biomasa se puede aprovechar de dos maneras; quemándola para producir calor o transformándola en combustible. La naturaleza de la biomasa es muy variada, pero en general

se puede decir que se compone de hidratos de carbono, lípidos y proteínas. Su utilización con fines energéticos requiere de su pre procesamiento mediante procesos físicos (triturado, compactado y/o secado), químicos (hidrólisis, pirólisis y/o gasificación), biológicos (microorganismos) y/o termoquímicos (combustión, gasificación o pirólisis). En el caso de su transformación a combustible se pueden obtener combustibles sólidos (leña, astillas, carbón vegetal), líquidos (biocarburantes, aceites, aldehídos, alcoholes, cetonas, ácidos orgánicos) o gaseosos (biogas, hidrógeno).

- **Energía del Mar.**

Los mares son grandes reservorios de energía, acumulada a partir de la interacción la masa de agua realiza con la radiación solar, el viento y la influencia gravitacional del Sol y la Luna. De esta manera, su energía puede clasificarse de acuerdo a su procedencia en energía térmica, energía de las olas o energía de las mareas respectivamente. La conversión de la energía térmica oceánica es un método para transformar en energía útil la diferencia de temperatura entre el agua de la superficie y el agua que se encuentra en la profundidad. Si bien actualmente existen dos sistemas para el aprovechamiento de esta fuente energética los rendimientos obtenidos son bajos. La tecnología utilizada para su explotación se encuentra en una incipiente etapa experimental. Las olas del mar son un derivado terciario de la energía solar. Únicamente el 0,01 % del flujo de la energía solar se transforma en energía de las olas. Una de las propiedades características de las olas es su capacidad de desplazarse a grandes distancias con poca pérdida de energía. Así, la energía generada en cualquier parte del océano termina en los bordes continentales. En comparación la densidad de energía de las olas por metro de costa es un orden de magnitud mayor que la densidad de energía solar por metro cuadrado, constituyendo por lo tanto un recurso de gran potencialidad. Dentro de los sistemas ideados para su aprovechamiento se puede realizar una clasificación entre los dispositivos flotantes y los fijos a la plataforma continental. Todos ellos se encuentran en etapa de experimentación. La energía estimada que se disipa por las mareas es del orden de 22.000 TWh al año. De esta energía se considera recuperable una cantidad que ronda los 200 TWh. El obstáculo principal para la explotación de esta fuente es el económico. Los costos de inversión tienden a ser altos con respecto al rendimiento. La limitación para la construcción de estas centrales, no solamente se centra en el alto costo de la energía producida, sino también en el impacto ambiental que generan.

2.5.1. Retos de las Energías Renovables

Es importante tener una visión realista de las posibilidades, así como los problemas asociados con el uso de energías renovables. Los retos más importantes para la adopción a gran escala de tecnologías de energía renovable se puede dividir en tres categorías:

- Económicos.
- Tecnológicos.
- Sociales.

El principal obstáculo que frena el desarrollo de las fuentes de energía renovables es el económico, porque normalmente son más caras que los combustibles fósiles o la energía nuclear. Para avanzar en esta cuestión, la energía renovable debe ser generada, almacenada y utilizada de una manera competitiva desde el punto de vista de los costos. Aunque desde otro punto de vista, no es tan claro que las energías tradicionales sean más baratas, porque si incluyéramos el costo que supone limpiar la contaminación que provocan o disminuir sus daños ambientales, el precio de la energía obtenida del petróleo, carbón, gas o uranio, sería bastante más alto del que tienen en el mercado. Es en este sentido que existen muchos incentivos para mejorar las tecnologías asociadas y reducir el costo de sistemas de energía renovable.

Respecto a los retos tecnológicos, es importante considerar la investigación y desarrollo de nuevos materiales y métodos que permitan no sólo construir elementos tecnológicos que aprovechen estos recursos renovables para producir electricidad en forma eficiente, sino que además, permitan combinarlos para lograr continuidad en la producción dadas sus características intermitentes individuales.

Finalmente los retos sociales son principalmente aquellos asociados al impacto ambiental que producen los elementos tecnológicos que permiten el aprovechamiento de los recursos renovables disponibles (granjas solares o eólicas, entre otras tecnologías) y su aceptación por parte de la sociedad. Entre éstos se consideran la contaminación visual y la alteración del ecosistema. Es muy importante evaluar adecuadamente el lugar de emplazamiento de estos sistemas considerando que pueden afectar de manera significativa los hábitos de vida de la población y otros seres vivos. De hecho, éste puede ser un factor determinante. Aún cuando el recurso energético existe en un determinado lugar y éste es abundante, los estudios de impacto ambiental son fundamentales y están contemplados en la evaluación de grandes proyectos. También, es importante aprender a usar eficientemente la energía, es decir, no emplearla en actividades innecesarias y conseguir hacer las tareas con el mínimo consumo de ella posible.

A continuación se enumeran algunas de las ventajas más importantes del uso de fuentes de energía renovables en la producción de electricidad:

- La operación de sistemas de energías renovables no producen emisiones nocivas, incluyendo NO_x , SO_x , CO y partículas, y por lo tanto no tienen efectos adversos sobre la salud de las personas. Además, no hay gases de efecto invernadero, emitidos como resultado de su operación.
- Debido a la gran cantidad de tecnologías “limpias” de producción de electricidad, las fuentes de energía renovables también son vistas como un medio para mejorar

la seguridad energética. Puesto que la electricidad puede ser generada a partir de una variedad de éstas (solar, eólica, biomasa, etc.), un país con una fuente de éstas características con alto grado de disponibilidad puede aumentar la seguridad energética.

- En muchas zonas del mundo en desarrollo, la infraestructura de distribución eléctrica necesaria para proporcionar a los usuarios de electricidad no existe. La infraestructura requiere una gran cantidad de recursos y puede ser costoso. A menudo, los grandes generadores diesel se utilizan para proporcionar electricidad en zonas sin infraestructura, pero esto también puede ser costoso debido a los requerimientos de combustible (es necesario trasladar el combustible hacia el punto de emplazamiento del generador) y costos de mantenimiento. En estos casos, si un recurso renovable significativo está disponible en la zona de interés, algún sistema tecnológico de producción de electricidad basado en dicho recurso es una alternativa viable.

También hay muchos problemas asociados con los sistemas de energía renovable. Algunas de las desventajas más relevantes vinculadas con estos recursos son:

- **Funcionamiento intermitente:** debido a la característica de intermitencia de los recursos de energía renovables, la demanda no puede satisfacerse con un alto grado de fiabilidad. El almacenamiento de energía se hace necesario para lograr un alto grado de fiabilidad y éste puede ser muy costoso. Si se pretende que la energía renovable compita favorablemente con la generación convencional de electricidad basada en combustibles fósiles, este problema tendrá que ser solucionado eficientemente. En el país hay varios proyectos liderados por el FONCYT en esta área.
- **Estabilidad de la Red:** estudios realizados han encontrado que si la penetración del viento excede a la demanda máxima de la red en un 20-30%, entonces la estabilidad ésta se convierte en un problema (Dutton, 2000; Paynter, 1991). La utilización de algún tipo de mecanismo de almacenamiento de energía será necesario si los niveles más altos de penetración en la red se van a superar. De esta manera, la energía se puede almacenar cuando los niveles de producción son altos y se libera a la red más tarde, mejorando así la utilización de la capacidad y la economía del sistema de energía renovable instalado.
- **Los altos costos de capital inicial:** como resultado de los altos costos de capital de inversión inicial en los sistemas de energías renovables, la gestión inteligente de la energía debe ser empleada para reducir al mínimo el costo de la electricidad durante la vida útil del sistema.

2.6. Proyección Energética en Argentina

La población de la República Argentina, de acuerdo al censo del 27 de octubre de 2010 que realizó el INDEC, asciende a 40.117.096 habitantes, con una densidad media de 14,4 *hab/km²*. Así mismo, la población se incrementó en 3.856.966 de habitantes desde el 2001, lo que implica un aumento de requerimientos energéticos para satisfacer las necesidades de la industria y del comercio y la demanda per capita de los ciudadanos en pos de una mejor calidad de vida. En la Figura 2.4 puede muestra el crecimiento en el consumo energético, en kWh por habitante, desde la década de 1970 y hasta el año 2009.

2.6.1. Descripción del Sistema Eléctrico Argentino

La Argentina es un país muy extenso. Debido a las grandes distancias entre las regiones donde se encuentran las principales centrales hidroeléctricas (Comahue y Noreste) y las regiones donde se concentra la demanda eléctrica (Buenos Aires y Rosario), se requiere de un amplio y complejo sistema de transporte y distribución de energía eléctrica, con más de 9000 km de líneas de alta tensión (500 kV). El sistema tiene una potencia instalada de 24.000 MW. En el año 2006 se generaron, solamente en el sistema argentino interconectado (SADI), 108.300.000 GWh.

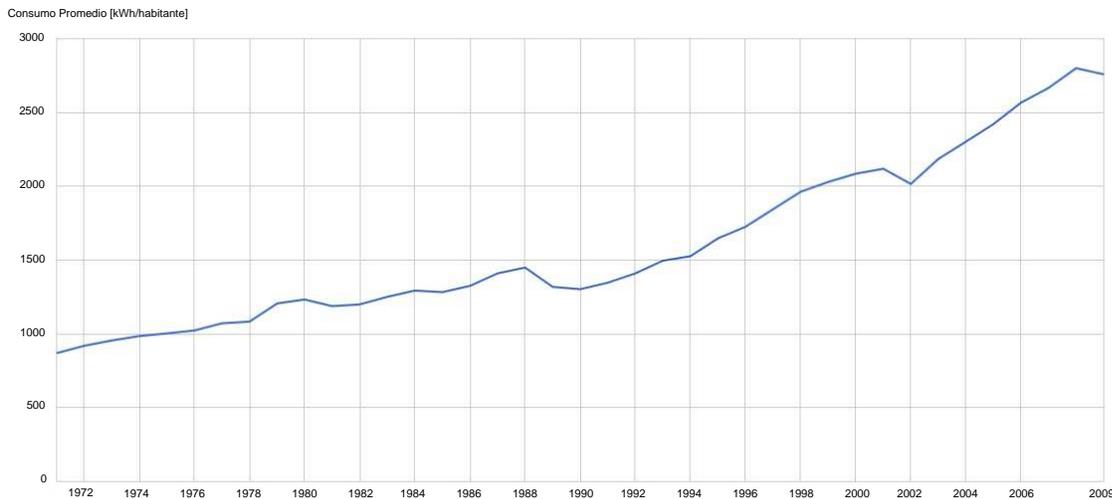


Figura 2.4: Crecimiento del consumo energético per cápita.

Debido a que el crecimiento de la demanda de energía eléctrica superó todas las expectativas, desde hace algunos años comenzó a desarrollarse un plan de corto plazo y elaborarse un plan estratégico de mediano y largo plazo. En el primer caso, se han lanzado varias obras importantes de generación eléctrica y una significativa expansión del sistema de transporte en extra alta tensión a través del Plan Federal de Expansión,

en el que se incluye la integración del sur de nuestro país al Sistema Interconectado Nacional. La primera parte de esta obra de interconexión ya está concluida. El 1 de marzo de 2006 fue inaugurada la interconexión entre el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) con el Sistema Patagónico (MEMSP) a través de la línea Choele Choel-Puerto Madryn. Este plan incluye, además de la línea mencionada, la línea Comahue-Cuyo, la línea minera (Cuyo-Noroeste Argentino), la línea Noroeste Argentino-Noreste Argentino y la tercera línea entre la central hidráulica de Yacyretá y el Gran Buenos Aires.

Empleando distintos modelos de planificación de la expansión eléctrica y utilizando hipótesis moderadas de crecimiento de la demanda, se ha llegado a la conclusión de que hay que incorporar al sistema de generación argentino alrededor de 40.000 MW nuevos de potencia antes del año 2025.

De esos 40.000 MW, se prevé, a corto plazo, la incorporación de alrededor de 3500 MW de nuevas fuentes de generación en los próximos tres años, con lo que se satisfaría el suministro eléctrico de los próximos años. Esos 3500 MW están compuestos por: la terminación de la central nuclear Atucha II (750 MW), la elevación de la cota de la central hidráulica de Yacyretá (1000 MW), dos ciclos combinados, de 800 MW cada uno, a instalarse en Campana y en los Timbúes (1600 MW) y pequeñas obras hidroeléctricas (Claudio Carpio, 2009).

Analizándolo desde el punto de vista de la proyección de la energía demandada y generada hasta el año 2025, se puede observar que, aun incluyendo los proyectos anteriormente mencionados, queda una importante cantidad sin definir. Esta cantidad, alrededor de 36.500 MW, debería ser establecida en el plan estratégico de mediano y largo plazo.

Parte de esta diferencia se prevé que podrá ser provista por nuevas plantas de generación de gas natural, aunque hay que tener en cuenta la extensión geográfica de nuestro país y que se deben construir nuevas y extensas líneas de transporte de energía eléctrica, o bien, gasoductos que lleven el gas natural a los generadores en su punto de emplazamiento. Otra opción consiste en la instalación de pequeñas centrales nucleares cerca de la demanda, evitando así problemas de transporte. Aunque en este caso no alcanza con que sea conveniente desde el punto de vista económico, desde la estabilidad del sistema eléctrico o desde la seguridad del suministro, sino que es importante considerar el destino de los residuos nucleares y la seguridad de operación de las plantas por sobre todas las cosas.

En Argentina, existen varias alternativas basadas en la producción de energía eléctrica a partir de recursos renovables, principalmente solar mediante paneles fotovoltaicos y eólica a través de aerogeneradores. En nuestro país existe un gran potencial para la explotación de estos recursos. Asimismo es posible utilizar la energía generada a partir de estas fuentes para producir Hidrógeno mediante electrólisis y así poder almacenarlo para utilizarlo posteriormente para la producción de electricidad. El hidrógeno puede ser agregado o mezclado con gas natural hasta un 10 a 20% y transportado como éste último para abastecer de energía a plantas de generación

eléctrica distribuidas en diferentes lugares, o bien para ser empleado como combustible en vehículos eléctricos basados en Pilas de Combustible.

2.6.2. Matriz Energética en Argentina

Los combustibles fósiles contribuyen más del 90 % a la matriz energética argentina, y su generación eléctrica se basa principalmente en energía térmica (fósil), hidráulica y nuclear. En la Figura 2.5 se representa la distribución de estas fuentes en el año 2010, perteneciente al último informe publicado por la Secretaría de Energía a fines del 2011.

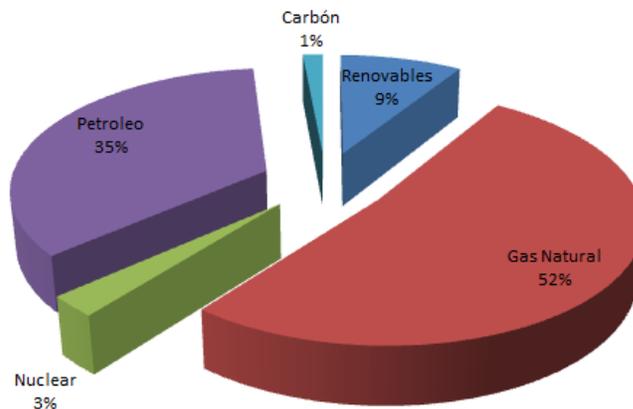


Figura 2.5: Matriz Energética Argentina al año 2010.

Si bien en nuestro país no se prevé actualmente que sea posible el reemplazo sustancial de los combustibles fósiles en el corto plazo, ni en el mediano, existen hoy algunas líneas de acción que tienen el consenso internacional y que están encaminadas en la dirección hacia el proceso de “descarbonización”. Estas pueden agruparse en tres categorías, a saber:

- **Reducir la relación CO_2/kW al utilizar recursos fósiles:** Esta opción requiere liberar menos dióxido de carbono a la atmósfera por cada kilovatio-hora de energía que se produce o consume al utilizar recursos fósiles. Este concepto implica el desarrollo de nuevas tecnologías energéticas que, si bien siguen utilizando recursos fósiles, lo hacen de manera más eficiente.
- **Diversificar la matriz energética:** En los últimos cuarenta años el uso de la energía fósil aumentó en comparación con el uso de todas las fuentes de energías primarias. Es posible cambiar esta tendencia diversificando la matriz energética de cada país. Esto quiere decir que es importante incorporar más fuentes de energías renovables y de tecnologías maduras como la nuclear y la hidroeléctrica en gran escala. La diversificación incluye también el uso de combustibles no fósiles, como bioetanol, biodiesel e hidrógeno. Los dos primeros son factibles de

ser implementados ya de manera directa y el último, tal como se mencionó en los últimos párrafos de la Sección 2.4 es aún materia de fuerte investigación.

- **Ahorrar energía y mejorar la Eficiencia Energética:** El consumo de energía de un país se divide en cinco grandes componentes: domiciliario, público, industrial, agropecuario y comercial (transporte). Los dos primeros tienen que ver con pautas sociales de consumo, materiales de construcción utilizados en las viviendas, electrodomésticos, artefactos de gas, sistemas eléctricos y climatización del hogar. En nuestro país la contribución domiciliaria al consumo de energía per cápita es relativamente importante, y en general es así para otras naciones. Esto significa que una reducción en los gastos de energía domiciliarios reducirá sensiblemente el consumo global de energía. Estas pautas de ahorro son muy significativas, y algunos especialistas señalan que la construcción de viviendas, utilizando los materiales adecuados, puede reducir los gastos de energía un 70 %.

Siguiendo las pautas antes descriptas, esta matriz debe diversificarse (Cárdenas, 2011), ya que es principalmente fósil, y en la Argentina se han reducido considerablemente las reservas de combustibles fósiles. Además existen problemas en el suministro de estos recursos para la generación eléctrica, especialmente en el caso del gas natural, donde se satura en invierno la capacidad de transporte y, al tener prioridad el abastecimiento a los sectores residenciales, las centrales generadoras que lo utilizan deben sustituirlo por combustibles líquidos. De esta manera, tal como puede observarse en la Figura 2.5, la matriz de generación eléctrica tiene una fuerte dependencia del gas natural y de combustibles líquidos, lo que ha llevado a la necesidad de importación de estos fluidos. Por esta razón, debe tenerse en cuenta la imprevisibilidad del costo internacional y la necesidad de suministro en el futuro. Algunas acciones que se han tomado en los últimos años están en esta dirección, tales como se mencionaron con anterioridad, la terminación de la central nuclear Atucha II, la elevación de la cota de la central hidráulica de Yacyretá y la construcción de dos ciclos combinados, aún cuando se encuentran en diverso estado de avance.

2.6.3. Energías Renovables en Argentina

Argentina tiene la necesidad al igual que el resto de los países del mundo, de enfrentar el problema del agotamiento de los recursos fósiles. El desarrollo de las tecnologías renovables representa una inversión prometedora y lucrativa para la sociedad en conjunto, y además es una buena herramienta para desarrollar tecnología local.

En la actualidad el uso de las fuentes renovables en nuestro país tiene un papel limitado y en un nivel de pequeña escala. Asimismo se suele mencionar que no son económicamente competitivas de manera que no pueden reemplazar, hoy día, la utilización masiva de combustibles fósiles. Además, es importante considerar que no

todas las tecnologías renovables, existentes o a desarrollar, son viables en un contexto específico, dando lugar al concepto de nicho para identificar aquellas que tienen mayor probabilidad de penetración y mayor efectividad para cumplir con determinados objetivos.

Si bien ya han comenzado a desarrollarse pequeños programas y acciones, que estimulan este tipo de proyectos (un ejemplo de ello es la planta de producción de H_2 de Pico Truncado en la Pcia. de Santa Cruz, a cargo del Dr. Juan Carlos Bolcich), aún son en pequeña escala y no representan lo que sucede a nivel general en varios países del mundo. Se realizaron estudios y mapas para conocer el potencial de energías renovables en cada provincia con la mayor exactitud posible y, de acuerdo a informes técnicos y tal como puede observarse en la Figura 2.6, Argentina cuenta con una gran cantidad y calidad recursos eólicos, solares y geotérmicos. Para lograr un futuro sustentable resultará prioritario multiplicar los esfuerzos en pos de lograr la eficiencia energética y lograr reducir la demanda de energía. En este mismo sentido deben incrementarse las investigaciones y su financiación para el desarrollo de nuevas fuentes.

La energía proveniente del viento es considerada como la tecnología con mayor potencial de desarrollo a nivel nacional, seguida por la energía solar, luego la hidroenergía y por último la biomasa. Existen dificultades políticas y limitaciones estructurales de los organismos gubernamentales responsables de establecer políticas que den solución a estos problemas. Es necesaria la aplicación de instrumentos que promuevan estas fuentes de energía mediante la formulación e implementación de una política energética que incluya a las energías renovables.

En este contexto, a fines de 2009 se realizó un proceso de licitación para la instalación de fuentes renovables por un total de 1.000 MW de acuerdo a la siguiente distribución: 500 MW eólicos, 150 MW térmicos a partir del uso de biocombustibles, 120 MW a partir de residuos urbanos, 100 MW de biomasa, 60 MW de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, 30 MW de generación geotérmica, 20 MW de origen solar (en la provincia de San Juan) y otros 20 MW de biogas. Si bien la cifra de 1.000 MW parece pequeña frente a los algo más de 20.000 MW pico de potencia demandada en el país durante el mes de julio del 2011, es relativamente importante frente a la actual potencia instalada de energía renovable, que es de 373,57 MW: 345,7 corresponde a hidroeléctrica de pequeña escala, 27 MW a eólica y el resto es solar y geotérmica (según datos del año 2008 de la Secretaría de Energía de la Nación).

Finalmente, es de destacar que existen importantes recursos energéticos renovables en la Argentina que podrían ser utilizados para la generación de energía eléctrica. De acuerdo a lo expuesto, estudios previos han realizado una cuantificación preliminar del potencial de generación e identifican la existencia de capacidad tecnológica para llevar adelante los proyectos. En este sentido, el Estado presenta un rol fundamental para determinar políticas energéticas que permitan un desarrollo energético que incluya estas fuentes que contribuyen a la reducción de las emisiones de gases de efecto (GEI) invernadero y a su vez constituyen un puente hacia un futuro con un alto grado de independencia de aquellas tecnologías basadas en combustibles fósiles, que además de producir graves consecuencias ambientales, son recursos limitados cuyas reservas se



Figura 2.6: Localización geográfica de las potencialidades de las fuentes renovables en Argentina (GENREN).

agotan y cada vez más costosos de producir.

2.7. Comentarios Finales

Como aquí se ha expuesto, desde hace algo más de doscientos años, el manejo por parte del hombre de formas de energía de mayor densidad que la leña, como el carbón, luego el petróleo y actualmente el gas natural han permitido el acceso a mejores servicios de transporte, fuerza motriz, confort en el hogar y perfeccionamiento del comercio. El conjunto de tecnologías especialmente desarrolladas en el siglo XX, ha elevado el nivel de consumo de energía per capita en la mayoría de los países del mundo, considerándolo un parámetro sinónimo de bienestar. También, ha permitido incrementar la producción de alimentos, hecho que ha posibilitado el aumento vertiginoso de la población global. Todo este progreso continuo, basado en recursos no renovables como fuentes primarias de energía, logrado a lo largo de varios años ha colapsado y resulta inconveniente, en la actualidad, para el interés común. Las razones principales son:

- **Impacto ambiental negativo:** emisión de Gases de Efecto Invernadero.
- **Condicionamiento social:** los combustibles fósiles constituyen sistemas concentrados de energía y, en general, permiten el abuso de unos pocos sobre la mayoría.
- **Seguridad en el abastecimiento:** al ser pocas y concentradas las fuentes fósiles energéticas por causas naturales o del hombre, la provisión en todo lugar y momento está condicionada.
- **Costos:** situaciones monopólicas.
- **Agotabilidad:** todas las fuentes fósiles, o al menos las que ofrecen ser explotadas a bajo costo, estudios actuales estiman que en pocas décadas se habrán terminado.

Afortunadamente, el ingenio humano, impulsado por la necesidad de encontrar alternativas, espera con esfuerzo encontrar, en las fuentes renovables directas o derivadas del sol, como lo son el viento, la hidráulica, la geotérmica y la biomasa, el recurso energético primario que le permita mantener el consumo per capita e incluir al tercio de población mundial, hoy todavía carente de servicios energéticos. Sin embargo, las características propias de las fuentes renovables, que se encuentran distribuidas por todo el planeta con mayor o menor abundancia según las regiones, deben superar la condición de oferta no continua (el sol sale de día, el viento está disponible sólo cuando sopla), mediante un elemento o vector energético que permita su acumulación transitoria. En este sentido, aparece como solución a este inconveniente el Hidrógeno, elemento en estado gaseoso en condiciones ambientales normales de temperatura y presión, el cual es factible de almacenar, transportar y distribuir, lo que permite su aplicación a cualquier segmento de la demanda (Paynter, 1991). Además, tal como se ha expuesto a lo largo de este capítulo, el cambio climático provocado por la quema de combustibles fósiles y la seguridad energética son dos razones suficientes que impulsan las investigaciones acerca de este elemento. Otra razón es que la aparición del

mismo ha aumentado el interés, en los últimos años, por el desarrollo de las pilas de combustible, que utilizan el hidrógeno para generar electricidad y únicamente producen como subproducto vapor de agua. Una tecnología impulsada, fundamentalmente, por las multinacionales automovilísticas, que están destinando cifras multimillonarias a la investigación y desarrollo de las mismas.

Una inquietud que surge a partir de la utilización de Hidrógeno se refiere a la seguridad de su empleo generalizado. Hoy ya el mundo maneja alrededor de cincuenta millones de toneladas de hidrógeno por año, de uso en destilerías, industrias de fertilizantes, metalúrgicas, electrónicas y elaboración de alimentos. Sumado a esa amplia experiencia, desde hace doce años se trabaja en el desarrollo de una norma internacional, especialmente orientada a establecer códigos, normas y estándares de seguridad en la utilización de este combustible.

Una de las formas de implementación de cadenas energéticas que utilicen el Hidrógeno como combustible surge de iniciativas en nuestro país. Las características modulares de estas formas de energía, en relación con las fuentes renovables, el uso del agua y la biomasa como materias primas para producir Hidrógeno, ofrecen un sinnúmero de alternativas técnicas, pero con la gran fortaleza de poder encarar estos emprendimientos a escala local, desde municipios a cooperativas u organizaciones sociales de menor tamaño o con capacidades financieras modestas. Para que estas posibilidades se transformen en realidades, es fundamental la definición de una política de Estado específica que impulse la utilización del Hidrógeno como vector energético producido a partir de fuentes primarias renovables. Asimismo es fundamental la inversión en investigación que permita el desarrollo de nuevas tecnologías y métodos para un aprovechamiento eficiente de éstos recursos energéticos.

2.8. Resumen del Capítulo

Las fuentes de energía renovables tienen enormes beneficios ambientales y pueden proporcionar una solución al problema del calentamiento global. Además, considerando los problemas actuales de seguridad en los países desarrollados y los problemas geopolíticos en países productores de petróleo, es cada vez más claro que hay una necesidad de políticas energéticas globales, que se basen en la autonomía, con un significativo papel de los recursos renovables para garantizar la seguridad energética. Sin embargo, a pesar de su atractivo ambiental y de seguridad, está claro que ambos argumentos (medio ambiente y seguridad energética) no fueron suficientes para impulsar cambios drásticos en la previsión para el papel de las energías renovables en las políticas energéticas futuras en muchos países del mundo con algunas excepciones en países de Europa y el Lejano Oriente. El costo de producción de electricidad a partir de recursos de energía renovable sigue siendo alto en comparación con los sistemas convencionales de energía y deberá bajar de manera significativa antes de que éstas puedan desempeñar un papel significativo en el futuro de la industria energética del mundo. Asimismo será necesario disponer de un medio para almacenar

las grandes cantidades de energía producida a partir de estas fuentes primarias de característica intermitente. Es en este contexto donde consideramos que el Hidrógeno toma importancia como vector o “carrier” energético dadas sus propiedades técnicas, reservas prácticamente ilimitadas y bajos niveles de contaminación, con especial atención a la ausencia de CO_2 entre los productos consecuentes de su utilización.

CAPÍTULO 3

HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE

3.1. Introducción

Como se expuso en el capítulo previo, el constante crecimiento del consumo energético, la naturaleza no renovable y limitada de los combustibles fósiles con costos de producción cada vez más elevados y la contaminación del medio ambiente, han creado un mayor interés en los sistemas de generación de electricidad basados en fuentes de energía alternativas.

No obstante, las fuentes de origen renovable son de naturaleza intermitente. Por ejemplo, la energía eólica y la solar, dos de las que han tomado mayor relevancia en los últimos años, son altamente dependientes de las condiciones climáticas. En este contexto, para superar este inconveniente, resulta de particular interés la combinación de estos sistemas con un vector energético como es el hidrógeno y con Pilas de Combustible, que lo utilizan en forma eficiente para generar electricidad. Estas últimas han demostrado un gran potencial como fuentes de generación de energía limpia, gracias a algunas ventajas importantes tales como: alta eficiencia, baja o nula emisión de gases contaminantes y estructura modular y flexible. De esta manera, las fuentes de energía alternativas se complementan entre sí, formando estructuras conocidas como Sistemas Híbridos de Generación de Energía Eléctrica (SHGEE).

Por las razones mencionadas, en este capítulo se describen primero los métodos existentes de producción, almacenamiento y transporte de hidrógeno, un elemento que no existe en la naturaleza en forma libre, que es necesario producir y que juega actualmente un papel muy importante para un futuro energético sustentable.

Posteriormente, se introducen las Pilas de Combustible como dispositivos de generación de energía eléctrica. Se describe el proceso químico que interviene en su funcionamiento, los factores que influyen en su rendimiento de conversión y las características principales de las tecnologías existentes.

3.2. El Hidrógeno

Como se mencionó en el capítulo previo, el hidrógeno es el elemento más abundante en el universo; sin embargo, en nuestro planeta no se encuentra en estado libre, sino que se presenta formando compuestos orgánicos unido al carbono o formando agua unido al oxígeno. Por lo tanto, el hidrógeno no es un recurso natural o una fuente de energía primaria, sino un *portador* de energía. Dado que no podemos tomarlo directamente de la naturaleza, el hidrógeno, al igual que ocurre con la electricidad, es necesario producirlo. Para ello hay que conseguir su separación de los compuestos de los que forma parte, pero para que este proceso de separación tenga lugar será preciso aportar energía, fundamentalmente en forma de calor o de electricidad).

3.2.1. Métodos de Producción de Hidrógeno

Afortunadamente, el hidrógeno puede obtenerse a partir de múltiples materias primas, siguiendo toda una variedad de tecnologías de proceso (química, electrolítica, biológica, fotolítica, termoquímica), en las que se puede utilizar diversas fuentes de energía primaria. Cada tecnología se encuentra en un grado de desarrollo y cada una ofrece oportunidades únicas, beneficios y desafíos. La elección de una u otra materia prima, técnica de producción y fuente de energía dependerá de la disponibilidad del recurso, de la madurez de la tecnología de proceso, del tipo de demanda y aplicación de mercado, de la política energética y de los costos para la obtención del hidrógeno.

Teniendo en consideración que la energía primaria necesaria para el proceso de producción algunas veces procede de la misma materia prima que se procesa y otras, de una fuente de energía primaria distinta, a la hora de planificar una futura economía del hidrógeno en la que sería necesario producir cantidades masivas para atender a la demanda, es fundamental considerar a partir de qué recursos será producido y de dónde se obtendrá la energía necesaria. Teniendo en cuenta esto último, una posibilidad es la utilización de fuentes de energía renovables, principalmente solar y eólica para la producción de electricidad y a partir de ésta, hidrógeno.

Entre las materias a partir de las que puede producirse el hidrógeno están las siguientes:

- *Recursos fósiles:* Derivados del petróleo, Gas natural, Carbón.

- *Recursos renovables:* Agua, Biomasa.

Las técnicas para producción del hidrógeno se pueden clasificar de la siguiente forma:

- *Procesos de conversión química:* Reformado, Gasificación y Pirólisis.
- *Procesos termolíticos:* Termólisis directa y por Ciclos Termoquímicos.
- *Procesos electrolíticos:* Electrólisis.
- *Procesos biológicos:* Fermentación, Digestión anaerobica.
- *Procesos fotónicos:* Foelectrólisis, Fotobiólisis y Fotocatálisis.

Los dos primeros tipos de procesos requieren de un aporte de energía térmica, bien procedente de la combustión del propio recurso que se procesa (conversión química), o bien procedente de una fuente externa (termólisis). En este caso es necesario indicar que los procesos reformado, gasificación y pirólisis de combustibles fósiles, realizados con un aporte de energía térmica externa al recurso fósil, reciben también el nombre genérico de procesos de descarbonización. En cuanto a los procesos electrolíticos, necesitan que se proporcione electricidad (sea cual fuese su origen) y en los fotónicos simplemente se necesita la incidencia directa de radiación solar.

Hidrógeno a partir del Gas Natural

En la actualidad, la fuente principal de producción de hidrógeno industrial es el gas natural y el método más barato es el reformado con vapor de agua (SMR – “steam methane reforming”), aunque también existen los procesos de oxidación parcial (POX) y reformado autotérmico (ATR).

El reformado con vapor de agua es un método ampliamente utilizado para la producción de gas de síntesis, una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono, a partir de metano. La fuente típica es el gas natural, que viene en diversas condiciones tales como: seco, húmedo, dulce y amargo. Estas designaciones se refieren a la composición del gas: El gas seco es principalmente metano, mientras que el gas húmedo contiene hidrocarburos superiores. El gas dulce tiene poco sulfuro de hidrógeno, mientras que el gas amargo contiene altos niveles del mismo.

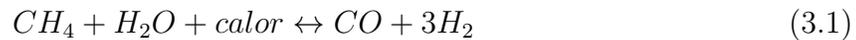
El reformado con vapor de agua típicamente consiste en cuatro pasos: (1) El sulfuro de hidrógeno y otros compuestos de azufre se eliminan para prevenir el envenenamiento del catalizador; (2) Se utiliza el pre-reformado para evitar la formación de carbono durante la etapa principal del reformado y también, reducir la cantidad de vapor requerido; (3) Reformado Primario, en el cual se suministra vapor de agua y calor

para permitir que la reacción tenga lugar sobre un catalizador de níquel a una temperatura comprendida entre 700-830°C; (4) Un reformador secundario utiliza aire para producir calor a través de reacciones de combustión para llevar la temperatura a aproximadamente 1300°C y así convertir la mayor parte del metano restante en gas de síntesis.

El proceso de desulfuración es un proceso exotérmico que se lleva a cabo típicamente en un reactor de lecho relleno. Los compuestos de azufre son absorbidos por el lecho de relleno, que es generalmente de ZnO .

La etapa de pre-reformado se lleva a cabo en un intervalo de temperatura comprendido entre 380-650°C sobre un catalizador. El proceso es endotérmico para el gas natural y exotérmico para materias primas más pesadas. Este proceso elimina además cualquier resto de azufre de la etapa anterior.

La primera etapa de reformado con vapor de agua es un proceso endotérmico que involucra la reacción de metano con vapor de agua a presiones comprendidas entre 3 y 25 bar, por la que se convierten estos reactantes en hidrógeno y monóxido de carbono tal como puede observarse en la Ecuación 3.1.



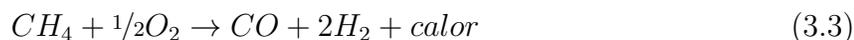
Además, normalmente se hace reaccionar el CO con vapor de agua, proceso conocido como reacción de desplazamiento (WGS) para convertirlo en CO_2 y obtener una producción adicional de hidrógeno tal como puede observarse en la siguiente reacción:



En el reformador secundario, tienen lugar dos acciones. En primer lugar, un oxidante, sea aire u oxígeno se suministra al medio de reacción. El oxidante reacciona con el gas entrante desde el reformador primario en una reacción exotérmica para formar agua y aumentar la temperatura. En el segundo paso, un catalizador de lecho de níquel se utiliza para catalizar la reacción de reformado endotérmica. Este proceso reduce el contenido de metano del gas, producto de la etapa reformador primario desde un 8-9 % a un 0,3-0,7 %.

El reformado con vapor de agua, en plantas centralizadas, puede alcanzar eficiencias del 85 % (sin considerar la compresión del H_2), ofreciendo bajos niveles de emisión y bajos costos del hidrógeno producido.

La oxidación parcial es un proceso exotérmico, en el que el gas natural se oxida solamente hasta CO al entrar en reacción con oxígeno gas, del que se obtiene una producción menor de hidrógeno por cada mol de metano que reacciona.



El calor se libera a una temperatura entre 800 y 1100°C. El carácter exotérmico del proceso permite diseños de la planta más compactos que con el SMR. El reformado autotérmico es una combinación de los anteriores que se diseña de forma que el calor excedente de la oxidación parcial se utiliza para abastecer las necesidades del reformado con vapor. La planta se dimensiona de modo que el proceso global sea ligeramente exotérmico. La temperatura de salida del reactor se sitúa entre 950 y 1100°C, y la presión del gas puede alcanzar 100 bar. Aunque el diseño del reactor es más complejo que en los casos anteriores, en el futuro esta tecnología puede ofrecer altas eficiencias en unidades pequeñas. En Argentina, existe una planta de producción de H_2 a partir de Etanol por reformado, dirigida por el Dr. Miguel Ángel Laborde.

Hidrógeno a partir del Carbón y Petróleo Pesado

La producción de hidrógeno por gasificación de carbón (GICC) es una tecnología madura establecida comercialmente. Es un proceso más complejo que el reformado de gas natural y, en general, el costo del hidrógeno producido por gasificación de carbón es más alto que el obtenido por SMR. Sin embargo, puede convertirse en un procedimiento de producción competitivo conforme los precios del gas natural aumenten.

El fundamento de la gasificación del carbón es su oxidación parcial en presencia de oxígeno y vapor de agua. Cuando este proceso se realiza a temperaturas superiores a 1000°C se produce fundamentalmente CO y de H_2 . El CO se desplaza a CO_2 y, por último, la mezcla resultante de H_2 y CO_2 e impurezas se separa utilizando procesos de absorción física.

Esta técnica no es adecuada para plantas de producción descentralizada debido a que presenta una gran economía de escala y a que la captura y almacenamiento de CO_2 en sistemas pequeños sería difícil y cara. Sin embargo, la producción de hidrógeno centralizada en plantas tipo GICC es una opción particularmente atractiva tanto por la mayor eficiencia obtenida en la coproducción de electricidad e hidrógeno, como por las posibilidades de captura del CO_2 .

El hidrógeno puede ser producido también a partir de petróleo pesado. En este caso, el proceso utilizado se denomina oxidación parcial. El mismo convierte el petróleo en gas de síntesis, CO_2 , CH_4 y H_2S , si hay azufre presente en la materia prima. El petróleo se expone a vapor y cantidades controladas de oxígeno a temperaturas entre 1200-1500°C y a una presión de entre 30-80 bares. Hay tres pasos en este proceso: (1) Se utiliza vapor para reducir el tamaño de las cadenas de hidrocarburos (conocido como "cracking"); (2) Cantidades subestequiométricas oxidan el petróleo en gas de síntesis; (3) Las partículas de carbono reaccionan con el CO_2 y vapor de agua para formar el gas de síntesis.

Hidrógeno a partir de la Biomasa

El interés de la biomasa como materia prima para la obtención del hidrógeno radica, por un lado, en que aporta un balance de CO_2 neutro, de manera que la materia orgánica es capaz de retener durante su crecimiento el CO_2 que se libera durante la producción de hidrógeno, y por otro, en que la biomasa es un recurso renovable y sostenible, siempre que su consumo no sea mayor que la capacidad de regeneración natural. Es posible obtener hidrógeno de la biomasa a partir de un gran número de procesos de tipo biológico y termoquímico. Los procesos biológicos son en general más lentos y costosos que los termoquímicos y en el futuro pueden llegar a jugar un papel de sistemas de producción de hidrógeno descentralizados, mientras que la producción centralizada, a partir de biomasa, se basará fundamentalmente en procesos termoquímicos, entre los que destacan la gasificación y la pirólisis.

Gasificación de biomasa La gasificación de biomasa es un proceso similar al usado para la producción de hidrógeno a partir de carbón, aunque probablemente su escala de operación será menor debido fundamentalmente a su escaso contenido energético (la biomasa contiene sólo en torno a un 6 % de H_2 en peso por término medio). Plantas de producción de gran escala requerirían grandes cantidades de biomasa y esto incrementaría considerablemente los costos de transporte.

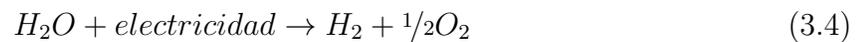
La composición del gas resultante de la gasificación dependerá del tipo de biomasa que se utilice y de si la gasificación se realiza con aire o con oxígeno. Si se realiza con aire, el resultado es un gas pobre compuesto por H_2 y CO , pero también por CH_4 , CO_2 , H_2O y N_2 . En este caso, se suele realizar un reformado con vapor del gas pobre antes de llevar a cabo la reacción WGS. La formación de alquitranes es uno de los principales problemas técnicos para el desarrollo de la gasificación de biomasa. La cantidad de alquitranes generados depende de numerosos parámetros del proceso: características de la biomasa (tipo, humedad y tamaño de partícula) y condiciones de gasificación (temperatura, presión, tiempo de residencia del gas y velocidad de calentamiento de la biomasa). La condensación de los alquitranes en las zonas frías del equipo genera problemas de taponamiento y suciedad, provocando paradas indeseadas de la instalación.

La producción de hidrógeno desde la biomasa compite con la producción de biocombustibles (bioetanol y biodiesel). Tanto el hidrógeno como los biocombustibles presentan la misma ventaja de ser neutros en emisiones de CO_2 . Sin embargo, los biocombustibles ofrecen ventajas adicionales, su tecnología de producción se encuentra en un estado más avanzado de desarrollo y ya están siendo introducidos en el mercado del transporte a través de su infraestructura de suministro. El uso de la biomasa para la producción de hidrógeno puede ser muy atractiva frente a la producción de biocombustibles si se combina con técnicas de captura y almacenamiento de CO_2 , en cuyo caso el proceso lleva a emisiones negativas.

Fotobiólisis La producción de hidrógeno por vía fotobiológica se basa en dos etapas: fotosíntesis y producción de hidrógeno catalizada por hidrogenasas en algas verdes y en cianobacterias. El metabolismo de los microorganismos, por el que se produce hidrógeno, tiene que ser modificado por ingeniería genética para que se alcancen niveles significativos de producción de hidrógeno. Esta técnica requiere todavía de investigación básica y aplicada a largo plazo; sin embargo, si tiene éxito, algún gran avance en esta técnica puede preparar el camino para una producción de hidrógeno sostenible.

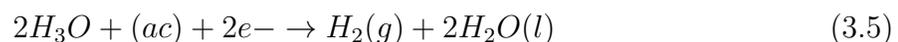
Hidrógeno a partir de Electrólisis de Agua

La electrólisis es un proceso bien conocido por el cual se logra que el agua se separe en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de electricidad. Este proceso se utiliza para aplicaciones que requieren pequeños volúmenes de hidrógeno de alta pureza. Actualmente se logran eficiencias de conversión del orden del 75-80 % en unidades grandes y pudiéndose alcanzar valores comprendidos entre el 80-85 % en equipos de conversión pequeños.

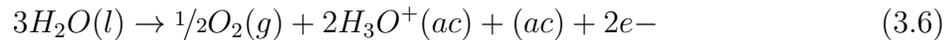


La participación de la electricidad en el proceso ofrece como ventaja la posibilidad de utilizar cualquier fuente primaria de energía para la producción de hidrógeno. No obstante, el principal inconveniente que presenta este proceso consiste en que, como la molécula del agua es muy estable, la energía que hay que poner en juego para lograr su separación también es grande (286,45 kJ/mol a 25°C). Una forma de solucionar esta situación se centra en elevar la temperatura de trabajo. A temperaturas bajas, con agua en estado líquido, prácticamente toda la energía que es necesaria aportar para la separación debe realizarse en forma de electricidad, pero conforme se eleva la temperatura, aunque la energía total necesaria también aumente ligeramente, es posible sustituir parte de la electricidad por calor. Por lo tanto, será interesante realizar la electrólisis a alta temperatura cuando se disponga de una fuente de calor residual procedente de otro proceso. En general se pretende siempre reducir el aporte eléctrico para la electrólisis porque el costo del hidrógeno producido está dominado principalmente por el costo de la electricidad utilizada (independientemente del tamaño del electrolizador y del tipo de recurso primario utilizado).

Análisis Termodinámico En el cátodo de una celda electrolítica, los iones de hidrógeno aceptan electrones en una reacción de reducción que produce gas de hidrógeno:



En el ánodo, los iones de hidrógeno ceden electrones hacia el ánodo en una reacción de oxidación para formar agua y gas de oxígeno:



La reacción total es:



La descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno en condiciones normales de presión y temperatura no es termodinámicamente favorable. El potencial del cátodo está determinado por medio de la Ecuación 3.8. El potencial U° para la reacción del cátodo es de 0V, pero debido a que H_3O^+ no es 1M (mol/litro), sino que es $10^{-7}M$, U difiere de U° y es igual a:

$$U_{catodo} = 0 - \frac{RT}{nF} \cdot \ln \frac{P_{H_2}}{[10^{-7}]^2} \quad (3.8)$$

Si el hidrógeno se produce a presión atmosférica, esto se convierte en:

$$U_{catodo} = 0 - \frac{RT}{nF} \cdot \ln \frac{1}{[10^{-7}]^2} = -0,414V \quad (3.9)$$

Para la reacción del ánodo, el potencial de la celda es:

$$U_{anodo} = U^\circ - \frac{RT}{nF} \cdot \ln \frac{1}{P_{O_2}^{1/2} \cdot [H_3O^+]^2} \quad (3.10)$$

El potencial estándar dado en condiciones normales es de $U^\circ = 1,229 V$. Si se asume que el O_2 está a presión atmosférica:

$$U_{anodo} = 1,229V - \frac{RT}{nF} \cdot \ln \frac{1}{[10^{-7}]^2} = 0,815V \quad (3.11)$$

Entonces, la tensión total de la celda es:

$$\Delta U = U_{catodo} - U_{anodo} = -0,414V - 0,815V = -1,229V \quad (3.12)$$

El signo negativo de ΔU indica que el proceso no se producirá sin un potencial eléctrico aplicado. La tensión mínima que permite que la reacción transcurra se llama el potencial de descomposición del agua y es igual a 1,229 V. Cuando este potencial se aplica, el hidrógeno se produce en el cátodo y el oxígeno en el ánodo. El ejemplo anterior es un análisis puramente termodinámico. Debido a que la concentración de H_3O^+ es tan bajo en agua pura, hace imposible la reacción. Así, se utiliza una solución electrolítica en estos procesos para aumentar la velocidad de reacción (6 molar de hidróxido de potasio, si el electrolizador es alcalino).

Los electrolizadores utilizados en el proceso de producción de hidrógeno, son en general de dos tipos:

1. **Electrolizadores de Agua Alcalina:** En un electrolizador alcalino, los sistemas electrolíticos líquidos utilizan típicamente una solución corrosiva como por ejemplo hidróxido de potasio. En estos sistemas, los iones oxígeno migran a través del material electrolítico, dejando el gas de hidrógeno disuelto en la corriente de agua. Este hidrógeno se extrae del agua y se dirige a un tanque de decantación.
2. **Electrolizadores tipo PEM:** En un electrolizador tipo PEM, los iones de hidrógeno son atraídos hacia y a través de una membrana, donde se recombinan con electrones para formar moléculas de hidrógeno. El oxígeno gaseoso permanece debajo del agua. El agua se recircula y el oxígeno se acumula en un depósito de separación.

3.2.2. Almacenamiento de Hidrógeno

Debido a su baja densidad, el hidrógeno es un gas difícil de almacenar. No obstante, existe una gran variedad de posibilidades para su almacenamiento de forma que puede seleccionarse la técnica más adecuada para cada aplicación en particular. La dificultad del almacenamiento del hidrógeno es tal que su uso en algunas aplicaciones, como las móviles, queda limitado hasta el momento en que se desarrollen y comercialicen sistemas de almacenamiento convenientes en términos de peso, volumen y costos. En aplicaciones móviles el objetivo es almacenar aproximadamente 5 kg de hidrógeno (lo que es equivalente a una autonomía de unos 500 Km en un vehículo basado en una pila de combustible) con una densidad que pueda alcanzar del 5 al 6 % en peso. Se requiere además, que el hidrógeno se libere a temperaturas de entre 80 y 150°C, que el tiempo y la energía necesaria para el llenado sean pequeños y que el costo del tanque sea del orden de 150 US\$\$/kg.

Almacenamiento de Hidrógeno Gas

La compresión de hidrógeno con el propósito de almacenamiento es una tecnología convencional y bien establecida. Es la más simple de las tecnologías de almacenamiento existentes, requiriendo solamente un compresor y un recipiente de almacenamiento capaz de ser presurizado. Los materiales típicos utilizados para la fabricación de los tanques incluyen: acero, aluminio envuelto en fibra de vidrio y de compuesto de fibra de carbono. Los tanques de acero se pueden utilizar siempre y cuando el peso y volumen no sean un obstáculo para los requisitos del sistema, tales como por ejemplo en aplicaciones estacionarias. Los otros dos tipos de tanques mencionados se utilizan cuando el peso y volumen son limitaciones importantes sobre el diseño del sistema, como aplicaciones móviles en vehículos.

La principal limitación con el uso de compresión como un medio de almacenamiento de hidrógeno corresponde a las bajas densidades de energía obtenidas. El gas puede ser comprimido a una mayor presión de almacenamiento, pero esto se traduce en mayores costos de capital y operativos. A 350 bar (5,075 psi) y 700 bar (10.150 psi), las densidades de energía alcanzadas son aproximadamente 2,6 MJ/l y 4,4 MJ/l, respectivamente, en comparación con los 31,6 MJ/l para los combustibles líquidos de origen fósil. A presiones mayores no se consiguen aumentos significativos en la densidad de energía volumétrica.

Quantum Technologies[®] ha desarrollado recientemente un recipiente de almacenamiento de hidrógeno de alta presión de 800 bar (*TriShieldTM*). La carcasa interior de este tanque cilíndrico está hecha de un polímero de alto peso molecular para formar una barrera altamente impermeable al gas, mientras que la cáscara externa es de acero para evitar daños externos del depósito. Entre ambos se encuentra una capa estructural de fibra de carbono que por otra parte eleva importantemente los costos constructivos. Por lo tanto, investigadores de la compañía trabajan con el objetivo es reducir la cantidad de fibra de carbono necesaria, manteniendo un nivel equivalente de seguridad y rendimiento. La Figura 3.1 muestra una imagen de estos tanques.

Una alternativa al almacenamiento de hidrógeno gas para aplicaciones móviles lo ofrecen las microesferas de vidrio. El proceso de carga del hidrógeno se realiza aprovechando la permeabilidad del hidrógeno a alta presión (350-700 bar) y temperaturas del orden de los 300°C en los huecos de las microesferas en un recipiente resistente a la presión. Una vez realizada la carga, el sistema se enfría hasta temperatura ambiente de forma que el gas queda retenido en las microesferas. A esta temperatura el tanque, así cargado, puede instalarse en el vehículo. Posteriormente, para su uso, es necesario calentar la microesferas a 200-300°C para liberar el hidrógeno de forma controlada y alimentar un motor de combustión de hidrógeno o una pila de combustible.

Las principales desventajas que presenta esta técnica son la baja densidad volumétrica y las altas presiones de llenado. Así mismo, las temperaturas de liberación del hidrógeno son demasiado altas si se considera su uso en vehículos a pila de combustible tipo PEM, que opera a temperaturas de entre 70-80°C. No obstante,

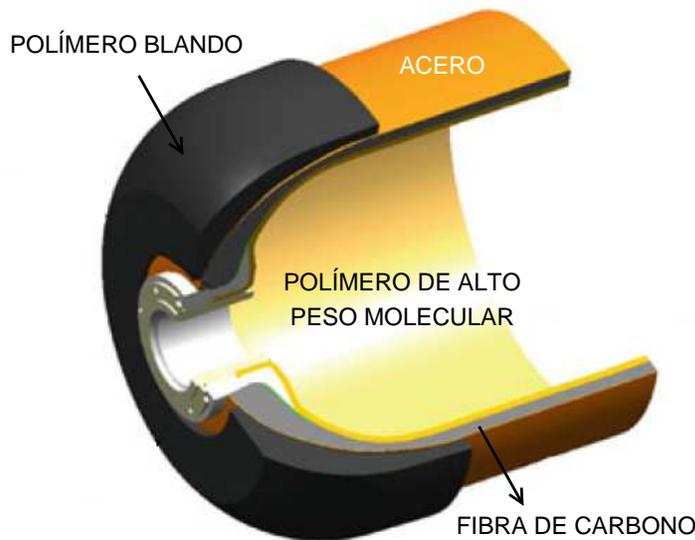


Figura 3.1: Tanque Quantum[®] para almacenamiento de hidrógeno a alta presión (HFCIT, 2007).

ofrecen la ventaja de ser inherentemente seguras dado que el hidrógeno se almacena a bordo a baja presión. Se ha demostrado una densidad de almacenamiento del 5,4% en peso utilizando esta tecnología (Hydrogen Implementing Agreement – Agencia Internacional de la Energía).

Almacenamiento de Hidrógeno Líquido

El hidrógeno líquido se almacena en tanques criogénicos a temperaturas de -253°C ($21,2\text{K}$) y presión ambiente. Como principal ventaja el hidrógeno líquido ofrece su densidad energética por unidad de volumen (muy superior a la del hidrógeno gas) incluso a relativamente bajas presiones. Debido a la baja temperatura de almacenamiento, el hidrógeno líquido sólo puede ser almacenado en sistemas abiertos. La licuefacción de hidrógeno se realiza mediante el enfriamiento de hidrógeno gaseoso. El proceso más simple de licuefacción es el ciclo de expansión de Joule-Thompson. En este proceso, el gas se comprime, se enfría en un intercambiador de calor y se pasa a través de una válvula de estrangulación donde se somete a expansión isoentálpica, resultando una cierta cantidad de hidrógeno en estado líquido. El líquido se extrae y el gas se devuelve al compresor a través de un intercambiador de calor. El trabajo de licuefacción es de aproximadamente $15,2 \text{ kWh/kg}$. Aproximadamente, en el proceso de licuefacción del hidrógeno se pierde del 30 al 40% de la energía.

Una vez licuado, el hidrógeno debe ser almacenado en un recipiente aislado. Una preocupación importante en el almacenamiento de hidrógeno líquido es minimizar las pérdidas de hidrógeno por evaporación. La transferencia de calor desde el medio ambiente al líquido provoca algo de vapor de hidrógeno. El recipiente debe ser refrigerado para evitar estas pérdidas, pero este proceso consume energía. Si no es refrigerado, el hidrógeno gaseoso producto de la evaporación puede ser recapturado, licuado y devuelto al tanque. Estas pérdidas son por lo general de un 0,4% por día, en un volumen de 50 m^3 , en tanques de doble pared, aislados por vacío. La alta energía necesaria para licuar el hidrógeno y las pérdidas por evaporación aumentan drásticamente el costo de almacenar hidrógeno a través de este método.

Almacenamiento de Hidrógeno Sólido

El almacenamiento sólido es potencialmente seguro y eficiente tanto para aplicaciones de transporte como estacionarias. Se consideran cuatro grupos de materiales adecuados para este tipo de almacenamiento que se presentan y describen a continuación.

Hidruros Metálicos Los Hidruros Metálicos almacenan hidrógeno uniéndolo químicamente a elementos metálicos y sus aleaciones. Cuando un contenedor de almacenamiento de hidrógeno se llena, se libera calor. Cuando la presión de hidrógeno aumenta, el hidrógeno se disuelve en el metal y luego comienza a enlazarse con el metal. El calor liberado durante la formación del hidruro debe ser eliminado para evitar que el hidruro se caliente. Cuando el hidrógeno se libera, el tanque requiere calor a una velocidad de transferencia proporcional a la velocidad a la que el hidrógeno se libera. Hay varios tipos de aleaciones que pueden ser utilizadas y cada una de ellas tiene diferentes características de rendimiento.

Los compuestos que contienen enlaces de hidrógeno se pueden dividir en tres grupos de hidruros. El primero y segundo grupo forman soluciones salinas, mientras que los metales de transición forman compuestos principalmente metálicos. Los hidruros covalentes se puede encontrar a la derecha de los metales de transición. Muchos de estos compuestos, MH_n , muestran grandes desviaciones de la estequiometría ideal ($n = 1, 2, 3$). También se llaman hidruros intersticiales debido a que el hidrógeno aparece a menudo en los sitios intersticiales de la red metálica.

Las fases inter-metálicas son de particular interés para el almacenamiento de hidrógeno. Las propiedades de estos hidruros se pueden adaptar debido a la gran variación de los elementos del compuesto inter-metálico. El caso más simple es el sistema ternario AB_xH , donde A es generalmente un metal alcalino y B un metal de transición.

Este tipo de almacenamiento es seguro y manejable y permite almacenar más H_2 por unidad de volumen que con el hidrógeno líquido. Sin embargo, el peso del sistema

es elevado como consecuencia de los bajos niveles de retención de H_2 (menor al 2,5% en peso). Por tanto no son adecuados para aplicaciones móviles. Es especialmente útil para aplicaciones estacionarias aisladas y con energía eléctrica procedente de fuentes renovables.

Materiales basados en Carbono (nanotubos y nanofibras de grafito) Los nanotubos de carbono (CNT) están constituidos por redes hexagonales de carbono curvadas y cerradas, formando tubos de carbono nanométricos con una serie de propiedades excelentes que fundamentan el interés que han despertado en numerosas aplicaciones tecnológicas. Son sistemas ligeros, huecos y porosos que tienen alta resistencia mecánica y por lo tanto, interesantes para el refuerzo estructural de materiales y formación de composites de bajo peso, alta resistencia a la tracción y enorme elasticidad. En la Figura 3.2 se muestran dos tipos de estas estructuras: En la parte superior una estructura de pared simple y debajo otra de pared múltiple.

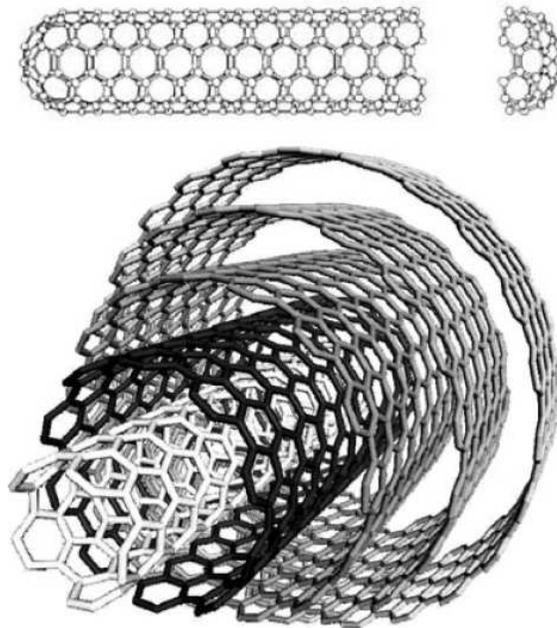


Figura 3.2: Estructuras de tubos nanométricos de Carbono (UKG, 2007).

En términos de su capacidad de almacenamiento, las nanoestructuras de carbono, gracias a su baja masa y su alta capacidad de adsorción, se presentan como las más eficientes en comparación con el grafito de gran área superficial (25% superior a temperaturas bajas). Permiten almacenar densidades del orden del doble que las que actualmente se obtienen con tanques de H_2 líquido. No obstante, diversos experimentos realizados con nanotubos de carbono han puesto de manifiesto que el almacenamiento de hidrógeno en nanotubos de carbono es posible únicamente a temperaturas extremadamente bajas, inferiores a -196°C .

Aunque esta tecnología recibió una gran atención en la pasada década, el consenso

general actual es que las grandes capacidades de almacenamiento (30–60 % en peso) que se publicaron hace unos años, fueron el resultado de errores de medida. Lo cierto es que los experimentos muestran resultados variables y no existe unanimidad respecto a ellos.

Hidruros Complejos Otro medio de almacenamiento de hidrógeno es a través de los hidruros complejos metal-hidrógeno. Su peso ligero y alto número de átomos de hidrógeno por cada átomo de metal es una ventaja sobre hidruros metálicos descritos anteriormente. La principal diferencia entre los hidruros metálicos y los complejos es la transición a un enlace iónico o covalente. Una gran variedad de estos hidruros se forman con los metales ligeros del grupo 1, 2 y 3 de la tabla periódica, es decir, *Li*, *Mg*, *B* y *Al*. Ejemplos comunes son $M(BH_4)$ y $M(AlH_4)$ con $M = Na$ o Li .

El uso de hidruros metálicos complejos para el almacenamiento de hidrógeno es un método muy prometedor, ya que potencialmente tienen una alta densidad volumétrica y gravimétrica de hidrógeno. Sin embargo, su uso actualmente es limitado debido a las propiedades termodinámicas y cinéticas de los compuestos existentes.

3.2.3. Transporte de Hidrógeno

Transporte de Hidrógeno Gas El hidrógeno gas suele ir comprimido en depósitos a presiones de entre 200-700 bar. Los depósitos convencionales de gas comprimido a 200-350 bar son de acero austenítico. Para presiones superiores, de entre 400-700 bar se están desarrollando nuevos materiales compuestos de fibra de carbono y polímeros o bien de aluminio reforzado con fibra de carbono. Estos depósitos se pueden transportar en camiones, trenes o barcos. Los camiones tipo trailer para gas comprimido tienen un costo variable elevado debido al bajo volumen de hidrógeno que transportan y a la distancia que recorren. En cambio los gastos fijos son bajos y flexibles. Esto implica que cuando la distancia al lugar de uso final es grande (mayor de 1000 Km.), el hidrógeno se suele licuar y se emplean camiones cisterna criogénicos para su transporte. Así mismo, está establecida comercialmente la tecnología de transporte de hidrógeno por tubería, aunque no se hayan realizado redes de gasoductos para grandes distancias.

Gasoductos.

Prácticamente todas las compañías de gases industriales operan alguna red de transporte por gasoductos para atender las demandas de sus principales clientes. Una de ellas, la empresa Air Liquide[®], opera una línea red de transporte de 879 km. situada en Bélgica, Holanda y Francia. Asimismo, Air Products[®] y Praxair[®] operan líneas de transporte en Estados Unidos con unas longitudes totales de unos 175 y 275 km. respectivamente. Los conductos existentes tienen un diámetro de 25-30 cm. y operan a presiones de 10-20 bar (aunque también se usan presiones de 100 bar). Los costos de inversión son función del diámetro de las tuberías al igual que en el caso del gas natural, pero para transportar hidrógeno, como su densidad energética por unidad de

volumen es aproximadamente un cuarto de la del gas natural, se necesita o bien una tubería de mayor diámetro o una mayor presión para suministrar la misma cantidad de energía. A igualdad de capacidad energética de la línea de transporte, el costo total de una línea para hidrógeno es del orden de seis veces el de gas natural. En general el hidrógeno no puede transportarse por la red de distribución de gas natural debido a incompatibilidad con los materiales comúnmente utilizados en los conductos (plásticos del tipo del polietileno). Sin embargo, se están realizando estudios para utilizar algunas partes de la red de gas natural para transportar mezclas de hidrógeno y gas natural.

Transporte de Hidrógeno Líquido

Como se ha mencionado, en el proceso de licuación del hidrógeno se consume una gran cantidad de energía primaria que, dependiendo de la técnica seguida, puede situarse entre el 30 y el 40 % del contenido energético del hidrógeno líquido. Los costos de la licuación son también muy altos, pero presentan una importante economía de escala, por lo tanto, a partir de un determinado volumen de producción, puede tomarse la opción de licuar. No obstante, para su transporte por camión o por barco, a largas distancias, es necesario tener en consideración que las pérdidas por evaporación pueden alcanzar unas cantidades entre el 0,2 y 0,4 % del hidrógeno líquido por día. En el caso del transporte marítimo se requerirían barcos rápidos para limitar el impacto de estas pérdidas, aunque el producto evaporado puede recuperarse y utilizarse para la propulsión del barco.

3.3. Pilas de Combustible

Las pilas de combustible (FC) son dispositivos electroquímicos que convierten energía química directamente en energía eléctrica. A diferencia de las baterías, en la que los reactivos requeridos están dentro de ellas, las pilas de combustible están diseñadas para permitir el reabastecimiento continuo del combustible y el oxidante, siendo necesario proporcionarlos de forma constante, desde una fuente externa, para proporcionar electricidad. A continuación se describe la anatomía y funcionamiento de las celdas que componen la pila de combustible, se explica su termodinámica, las tecnologías existentes y se describen los diversos componentes del sistema completo.

3.3.1. Estructura y Funcionamiento de las Pilas de Combustible

La unidad básica de una Pila de Combustible se denomina “monocelda” o simplemente ‘celda’. Una celda está formada por tres piezas superpuestas: una lámina

de electrolito entre dos electrodos porosos. Un electrolito es un material que conduce iones, pero impide el flujo de electrones a través del mismo. Un electrodo es un material que conduce los electrones. Los electrodos son porosos debido a que deben permitir la difusión del gas hacia su cara opuesta, dónde se encuentran partículas catalizadoras, formando una barrera con el electrolito.

El electrodo tiene varias funciones:

- Debe ser capaz de transportar el gas a la capa de catalizador y distribuirlo uniformemente a través del área de la superficie de reacción.
- Permitir la difusión de los gases producto fuera del electrolito.
- Tener buenas características de conductividad eléctrica, ya que es responsable de conducir los electrones fuera de la interfaz a medida que se produce el proceso de reacción.

Asimismo el electrolito también desempeña varias funciones importantes:

- Debe ser capaz de conducir iones de un electrodo al otro, pero evitar el cruce de los electrones.
- Actuar como una barrera entre los gases combustible y oxidante para impedir la mezcla.
- En las pilas de combustible con electrolitos líquidos, los gases reaccionantes se difunden a través de una fina película de electrolito sólida con pequeños poros que permiten mojar porciones del electrodo y así reaccionan en la superficie del mismo.

El tipo de catalizador necesario para que la reacción sea adecuada depende de la temperatura de operación de la pila de combustible. Las pilas de baja temperatura requieren catalizadores costosos, en general de platino, para obtener las velocidades de reacción deseadas. A temperaturas más altas, los reactivos pueden lograr las velocidades de reacción necesarias simplemente utilizando el propio material que forma el electrodo.

En la Figura 3.3 puede verse una representación esquemática de una celda de combustible construida con electrodos porosos. Se ilustran los gases reactantes/producto y las direcciones de conducción del flujo de iones a través de la celda.

El hidrógeno (H_2), gas combustible, penetra por el electrodo negativo (ánodo) y se disocia, en presencia del catalizador, en iones positivos H^+ y electrones e^- . El oxígeno (O_2), gas oxidante, procedente del aire penetra por el electrodo opuesto (cátodo) y se disocia igualmente en presencia del catalizador en iones O_2^- (se forma como elemento parásito peróxido). Los iones positivos de hidrógeno se escapan a través del electrolito

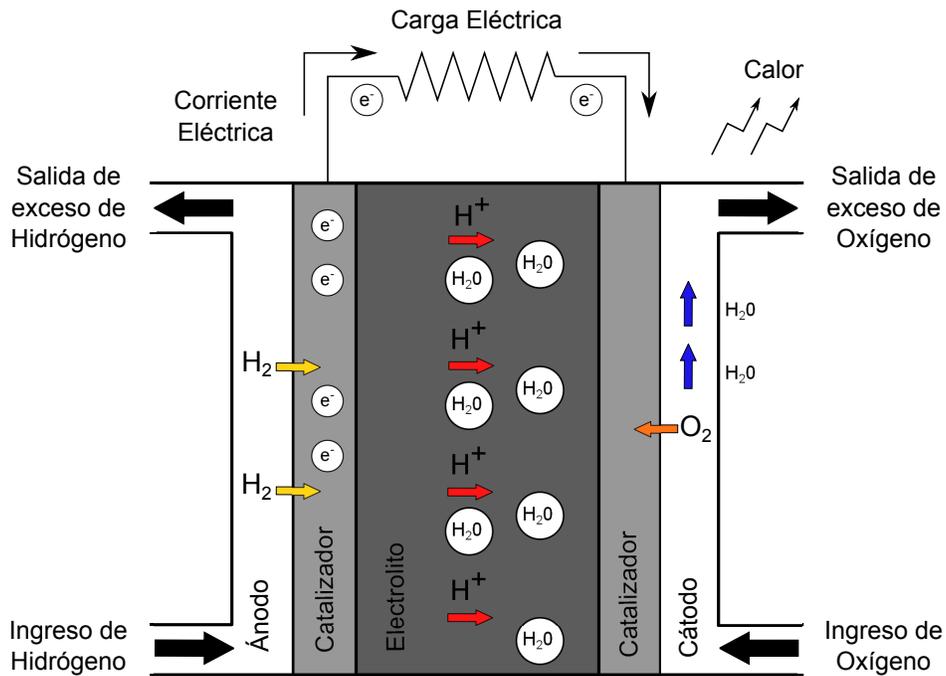


Figura 3.3: Estructura elemental de una Pila de Combustible.

en dirección al cátodo, dejando a los electrones libres en el ánodo. Luego, si existe un camino eléctrico entre el ánodo y el cátodo, los electrones lo recorrerán, estableciendo una corriente eléctrica. En el cátodo los iones hidrógeno, el oxígeno y los electrones se combinan nuevamente formando moléculas de agua H_2O . Además, se produce un importante desprendimiento de energía térmica en forma de calor, cuya magnitud depende de las características constructivas de la celda de combustible.

La tensión producida por una única celda es del orden de un volt a circuito abierto, por lo que para producir tensiones más elevadas se recurre a la disposición en serie de celdas formando lo que se conoce como “stack” (apilamiento). A este apilamiento de celdas, debidamente implementado en una estructura que permita disipar el calor, posibilite la circulación necesaria de los gases y ofrezca los terminales de conexión eléctricos para la utilización de la energía eléctrica producida se le denomina Pila de Combustible o “Fuel Cell” en inglés (FC).

Para que la pila de combustible funcione correctamente, es necesaria la existencia de un sistema de control para proporcionar el aire y el hidrógeno necesarios para suministrar la potencia requerida y eliminar los subproductos y el calor producidos en las celdas.

El sistema de control de la pila de combustible se compone de los siguientes subsistemas:

- *Control de caudal de los reactivos:* mediante una válvula (hidrógeno) y un compresor (oxígeno) se proporcionan de forma rápida los caudales de los reactivos

necesarios, asegurando una respuesta transitoria lo más rápida posible y una operación segura minimizando el consumo auxiliar.

- *Gestión de las variables a controlar:* es necesario que variables como el caudal de los gases reactantes, la temperatura, la potencia y la hidratación de la membrana de la pila de combustible, estén controladas en todo momento para garantizar un correcto funcionamiento del dispositivo. Para ello, el sistema de control cuenta con elementos de refrigeración (ventiladores o circuitos de circulación de agua), de humidificación (bomba) o para el control de la temperatura, que garanticen que estas variables se encuentren en todo instante dentro de sus rangos válidos de funcionamiento.

3.3.2. Termodinámica de las Pilas de Combustible

A continuación se describe la termodinámica de las pilas de combustible explicando el comportamiento de la celda de combustible ideal. Luego, en la siguiente subsección, se consideran las pérdidas debidas a las condiciones no ideales del sistema real para desarrollar las ecuaciones que describen el rendimiento real de la pila de combustible.

La energía total involucrada se compone de dos tipos de energía: (1) energía libre de Gibbs (G) y (2) la energía disponible ($T \cdot S$). La energía libre se llama así porque es la energía que está disponible para su conversión en trabajo útil. La energía no disponible se pierde debido incremento del desorden, o entropía (S) del sistema. El trabajo eléctrico máximo (W_{elec}) obtenible en una celda de combustible operando a temperatura y la presión constantes está dado por el cambio en la energía libre de Gibbs (ΔG) de la reacción electroquímica de la Ecuación 3.13.

$$W_{elec} = \Delta G = -n \cdot F \cdot U \quad (3.13)$$

donde:

n = Número de electrones involucrados en la reacción

F = Constante de Faraday ($96,487 \text{Coulombs/g} - \text{molelectron}$)

U = Tensión de circuito abierto de la celda

Para una celda de combustible, el trabajo máximo disponible se relaciona con la energía libre de reacción, dónde la entalpía (H) de la reacción es una cantidad relevante en el caso de conversión térmica, tal como por ejemplo, en un motor térmico. Para la función de estado de la Ecuación 3.14.

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (3.14)$$

La diferencia entre la ΔG y ΔH es proporcional a la variación de la entropía ΔS . La cantidad máxima de energía eléctrica disponible es la ΔG , como puede verse a partir de la Ecuación 3.13 y la energía térmica total disponible es ΔH . La cantidad de calor que se produce por el funcionamiento de las celdas de combustible operando reversiblemente es $T \cdot \Delta S$. Para una reacción general, en celdas de combustible:



El cambio en la energía libre está dado por la siguiente ecuación:

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \cdot \ln \left[\frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \right] \quad (3.16)$$

Dónde,

ΔG° = Cambio en la energía libre de Gibbs a presión estándar (1 atm) y temperatura T

R = Constante Universal de los Gases

T = Temperatura

A = Concentración de la especie A

Reemplazando la Ecuación 3.13 en la Ecuación 3.16 se obtiene la Ecuación 3.17, que representa en forma general a la expresión ecuación de Nernst, o “de tensión reversible” para una dada temperatura y presión, para una celda de combustible.

$$U = U^\circ + \frac{RT}{nF} \cdot \ln \left[\frac{[A]^a [B]^b}{[C]^c [D]^d} \right] \quad (3.17)$$

U° representa el potencial estándar para una celda de combustible de Hidrógeno y Oxígeno como reactantes, a presiones parciales de 1 atm y temperatura estándar de 25°C (298K), dónde hay una transferencia de dos electrones por cada molécula de agua. Su valor correspondiente es $U^\circ = 1,229 V$, si el agua producida se encuentra en estado líquido y $U^\circ = 1,18 V$, si el agua producida se encuentra en estado gaseoso (Larminie, 2003a).

Para una celda de combustible con hidrógeno (H_2) como combustible y oxígeno (O_2) como gas reactante, la expresión de la Ecuación 3.17 correspondiente a la tensión de vacío está dada por la Ecuación que se presenta a continuación.

$$U = U^\circ + \frac{RT}{nF} \cdot \ln \left[\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0,5}}{P_{H_2O} P_O^{0,5}} \right] \quad (3.18)$$

Dónde,

P_{H_2} = Presión parcial del gas hidrógeno

P_{O_2} = Presión parcial del gas oxígeno

P_{H_2O} = Presión parcial de agua

P_O = Presión atmosférica estándar en la unidad correspondiente (1 atm en el SI)

La ecuación anterior relaciona la tensión de salida ideal U con las concentraciones de reactantes y productos. Este valor se corresponde con la tensión de salida de circuito abierto. Sin embargo, en la práctica, la tensión de la celda es significativamente inferior que el valor teórico debido a que existen pérdidas de funcionamiento, aún cuando en la celda no se haya conectada una carga eléctrica.

3.3.3. Eficiencia de las Pilas de Combustible y Polarización

La eficiencia térmica de un dispositivo de conversión de energía se define como la cantidad de energía útil producida en relación con el cambio en la energía química almacenada. La eficiencia ideal de una celda de combustible, operando de forma reversible, viene dada por:

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (3.19)$$

El rendimiento de una pila de combustible real es menor que la dada en la Ecuación 3.19 debido a las pérdidas:

- (a) por activación.
- (b) óhmicas.
- (c) por concentración.

La Figura 3.4 muestra el comportamiento típico de de la tensión de salida de una FC en función de la densidad de corriente (que se define como corriente absorbida por unidad de superficie de la celda). La línea horizontal, en la parte superior, representa la tensión ideal de la FC obtenida a partir de la ecuación de Nernst. La tensión de la FC real comienza a disminuir a medida que comienza a circular corriente por el circuito.

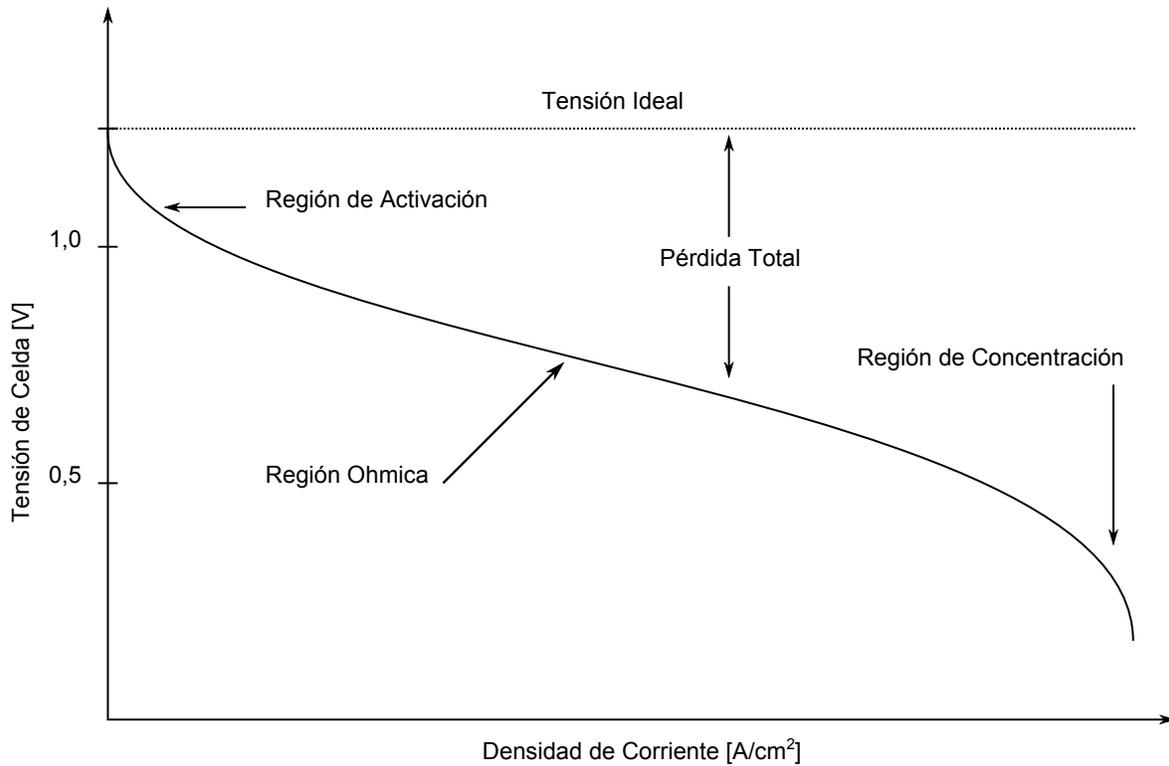


Figura 3.4: Tensión de una Celda vs. Densidad de Corriente.

Pérdidas por Activación

Las pérdidas por activación se deben a la lentitud de la reacción que tiene lugar en la superficie de los electrodos. Una fracción de la tensión generada se pierde para mantener la reacción química que transfiere electrones desde el electrodo negativo hacia el electrodo positivo. Este fenómeno es fuertemente no lineal y aún más acentuado a bajas densidades de corriente.

Para que una corriente eléctrica comience a circular, una pequeña tensión es necesaria para reducir la energía de activación de la etapa de limitación de velocidad de la reacción, que ocurre inicialmente sobre la superficie de los electrodos. A este potencial se lo conoce como “sobretensión de activación” denotado como v_{act} . La velocidad de reacción se puede relacionar con la sobretensión de activación a través de la Ecuación 3.20 conocida como “ecuación de Bulter-Volmer”.

$$i_{FC} = i_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{\alpha_a F}{RT} v_{act}\right) - \exp\left(\frac{\alpha_c F}{RT} v_{act}\right) \right] \quad (3.20)$$

i_{FC} corresponde a la densidad de corriente eléctrica entregada por la celda de combustible (mA/cm^2). Luego, un valor positivo de v_{act} produce una corriente anódica,

lo que significa que los electrones extraídos de los reactivos transferidos al electrodo. Un valor negativo da lugar a una corriente catódica, lo que significa que los electrones se transfieren desde el electrodo hacia los reactivos. La magnitud i_0 se llama “densidad de corriente de intercambio” y se puede considerar como la densidad de corriente a partir de la cual la “sobretensión de activación” comienza a crecer por encima del valor cero. Este valor es función de la concentración de reactivos y productos, de la temperatura y de la interfaz electrodo/electrolito utilizada. Un valor grande de i_0 sugiere que es posible un buen desempeño de la celda de combustible porque altas velocidades de reacción son posibles con una sobretensión de activación menor. α_a y α_c son los coeficientes de transferencia para el ánodo y el cátodo respectivamente; y relacionan como la tensión aplicada favorece la dirección de la reacción electroquímica que está ocurriendo.

Con un poco de álgebra, la expresión anterior puede escribirse según la Ecuación 3.21.

$$i_{FC} = i_0 \cdot \exp\left(\frac{2\alpha F v_{act}}{RT}\right) \quad (3.21)$$

Dónde ahora, α es el coeficiente de transferencia de carga equivalente ($\alpha = \alpha_a + \alpha_c$) y es proporcional a la energía eléctrica aplicada que se aprovecha para cambiar la velocidad de la reacción electroquímica que está ocurriendo, tomando valores comprendidos entre 0 y 1,0. De esta manera, despejando v_{act} de la Ecuación 3.21, se obtiene la expresión de la Ecuación 3.22, conocida como “ecuación de Tafel”, para las pérdidas por activación.

$$v_{act} = \frac{RT}{2\alpha F} \cdot \ln\left(\frac{i_{FC}}{i_0}\right) \quad (3.22)$$

Siendo:

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (3.23)$$

La “constante de Tafel” y su valor dependerá básicamente de la reacción y del material constructivo de los electrodos de la celda.

Es importante recordar que la expresión de la Ecuación 3.22 es válida únicamente si $i_{FC} > i_0$ y a partir de la misma se puede observar que i_0 representa el parámetro de mayor peso para reducir el valor de la sobretensión por activación. De esta manera, para mejorar el desempeño de la celda de combustible, es deseable que el valor de i_0 sea lo mas grande posible, en especial en el cátodo. Esto puede conseguirse:

- Elevando la temperatura de la celda de combustible.
- Utilizando materiales mas efectivos para los catalizadores.
- Incrementando la rugosidad de los electrodos (esto incrementa su área real, aumentando i_0).
- Incrementando la concentración de los gases reactantes (por ejemplo, usando O_2 puro en lugar de aire).
- Aumentando la presión de alimentación.

Pérdidas Óhmicas

Las pérdidas óhmicas son causadas por la resistencia al transporte de los electrones a través de los electrodos y también al pasaje de iones a través del electrolito. A medida que la corriente eléctrica se incrementa, la resistencia óhmica al paso de electrones aumenta. El comportamiento de este factor de pérdida es aproximadamente lineal con la corriente y se describe a partir de la Ecuación 3.24.

$$v_{ohm} = i_{FC} \cdot r_{FC} \quad (3.24)$$

Dónde, r_{FC} es la Resistencia correspondiente a un celda de combustible de $1cm^2$ de área (conocida como ASR - “area-specific resistance”).

Usualmente, si i_{FC} se expresa en unidades de $mA\ cm^{-2}$, r_{FC} debe expresarse en términos de $k\Omega\ cm^2$. Existen tres formas de reducir el valor de esta resistencia (Larminie, 2003a):

1. El uso de electrodos con una conductividad eléctrica lo más alta posible.
2. Un diseño adecuado de las placas y el uso de materiales apropiados en la unión de las celdas.
3. Construir el electrolito lo más delgado posible.

Pérdidas por Concentración

A medida que aumenta la densidad de corriente, los efectos de resistencia de difusión comienzan a jugar un papel importante porque tanto el gas combustible como el oxidante no se transportan con la suficiente rapidez a la superficie del electrodo. Esto se conoce como la pérdida por concentración o por transporte de masa. Bajo condiciones

de corto circuito, la tensión del sistema es cero y la corriente alcanza el valor límite i_{FC-L} . Este valor de corriente se corresponde con la velocidad máxima a la que puede ser el reactivo suministrado a un electrodo. La pérdida por concentración está dada por la Ecuación 3.25.

$$v_{conc} = \frac{RT}{nF} \cdot \ln \left(1 - \frac{i_{FC}}{i_{FC-L}} \right) \quad (3.25)$$

La expresión anterior es una aproximación teórica y posee varios puntos débiles, en especial en celdas alimentadas con aire en vez de oxígeno como reactante (que ocurre en la mayoría de los casos). También hay problemas en el uso de esta expresión en celdas de baja temperatura y en aquellas que utilizan como combustible hidrógeno mezclado con otros gases, como el dióxido de carbono. Lo mencionado anteriormente se debe a que la misma no tiene en cuenta el efecto de producción- evacuación de los productos de reacción tales como el agua, ni considera la generación de nitrógeno en los sistemas de alimentación de aire. Otra expresión que es completamente empírica, se ha vuelto más favorecida y aproxima muy buenos resultados si se eligen cuidadosamente los parámetros “m” y “n” se presenta en la Ecuación 3.26.

$$v_{conc} = m \cdot \exp^{ni_{FC}} \quad (3.26)$$

El valor de “m” es típicamente $3 \cdot 10^{-5}V$ y el de “n” aproximadamente $8 \cdot 10^{-3}cm^2mA^{-1}$. A pesar que ambas Ecuaciones 3.25 y 3.26 pueden verse algo diferentes, si sus constantes se eligen adecuadamente, los resultados pueden ser muy parecidos. Sin embargo, la Ecuación 3.26 puede utilizarse para obtener mejores aproximaciones con valores experimentales.

La pérdida por concentración es un parámetro importante a tener en cuenta en aquellos casos donde el hidrógeno es provisto desde algún tipo de reformador, debido a la dificultad que puede presentarse para aumentar el flujo de hidrógeno rápidamente para responder a una mayor demanda. Otra situación desfavorable ocurre cuando el aire que ingresa por el cátodo no se distribuye correctamente a lo largo del mismo. Cuando se entregan elevadas corrientes, el nitrógeno producido al consumirse el oxígeno puede bloquear el ingreso de este último, causando problemas de suministro. Finalmente, en las celdas de membrana de intercambio de protones (de baja temperatura) la eliminación del agua producto puede traer problemas de pérdidas por concentración (Larminie, 2003a).

Tensión de Salida

La tensión de salida de la celda dependerá de la tensión de circuito abierto, la sobretensión de activación, la pérdida óhmica y la tensión de la pérdida por

concentración. Por lo tanto, la tensión real está dada por la Ecuación 3.27.

$$V_{salida} = U - (v_{act,anodo} - v_{act,catodo}) - v_{ohm} - (v_{conc,anodo} - v_{conc,catodo}) \quad (3.27)$$

De esta manera, para una pila de combustible de N_c celdas, la tensión de salida se puede expresar según la Ecuación 3.28 como la tensión de vacío menos las pérdidas por activación, óhmicas y por concentración.

$$V_{salida} = N_c \cdot [U - v_{act} - v_{ohm} - v_{conc}] \quad (3.28)$$

Reemplazando las Ecuaciones 3.18, 3.22, 3.24 y 3.26 en la expresión anterior, la tensión de salida se puede escribir como:

$$V_{salida} = N_c \cdot \left[U - \left(\frac{RT}{2\alpha F} \cdot \ln \left(\frac{i_{FC}}{i_0} \right) - i_{FC} \cdot r_{FC} - m \cdot \exp^{n \cdot i_{FC}} \right) \right] \quad (3.29)$$

Considerando que la Ecuación 3.22 para la sobretensión de activación puede escribirse como:

$$v_{act} = \frac{RT}{2\alpha F} \cdot \ln \left(\frac{i_{FC}}{i_0} \right) = \frac{RT}{2\alpha F} \cdot (\ln(i_{FC}) - \ln(i_0)) \quad (3.30)$$

Y teniendo en cuenta que el segundo término de la ecuación de la derecha es una constante, se puede definir una tensión de circuito abierto E_0 como:

$$E_0 = U + \ln(i_0) \quad (3.31)$$

Recordando que U es corresponde a la tensión reversible teórica (expresión de Nernst), dada por la Ecuación 3.18. Nótese que E_0 será siempre levemente inferior a U debido a que i_0 será pequeña, haciendo $\ln(i_0)$ negativo. Sustituyendo la expresión anterior en la Ecuación 3.29, se obtiene:

$$V_{salida} = N_c \cdot \left[E_0 - \left(\frac{RT}{2\alpha F} \cdot \ln(i_{FC}) \right) - i_{FC} \cdot r_{FC} - m \cdot \exp^{n \cdot i_{FC}} \right] \quad (3.32)$$

Esta expresión es simple, práctica y se obtienen excelentes resultados cuando se desea reproducir la curva característica $V_{salida} = f(i_{FC})$ para una Pila de Combustible real.

3.3.4. Tipos de Pilas de Combustible

Las pilas de combustible se clasifican normalmente según el tipo de electrolito que utilicen. En esta sección se resumen los diferentes tipos de pilas de combustible y describen sus características principales.

Pilas de Combustible de Membrana Polimérica (PEM)

Las Pilas de Combustible de Membrana Polimérica (en inglés: Proton Exchange Membrane Fuel Cell o “PEMFC”) utilizan una membrana hidratada polimérica que actúa como conductor de iones. Para este tipo de membranas se utilizan polímeros fluorocarbonados similares al teflón, los cuales se combinan con algún tipo de ácido sulfónico. Las moléculas ácidas se fijan en el polímero y no pueden separarse, pero los protones de éstos grupos ácidos pueden migrar a través de la membrana. El material preferido es *Nafion*[®], una membrana ampliamente utilizada, fabricada por *DuPont*[®]. La utilización de un polímero sólido como electrolito elimina la corrosión y los problemas de seguridad asociados a electrolitos líquidos, que pueden derramarse y afectar la vida útil de la FC. Los electrodos son electrodos porosos de carbono combinados con un catalizador de platino. El combustible más común utilizado es H_2 puro y el oxidante más común es aire. El hidrógeno ingresa en el ánodo, donde es ionizado con la ayuda del catalizador de platino. Los átomos de hidrógeno son conducidos a través de la membrana mientras que los electrones libres se llevan hacia el cátodo, a través de un circuito eléctrico externo, donde se encuentran con los iones de hidrógeno y el aire para formar agua como producto. El platino es muy sensible al monóxido de carbono, por lo que resulta difícil y costoso el uso de combustibles que no sean H_2 puro. El uso de platino como catalizador hace que este tipo de FC sean costosas, por lo que se intenta reducir la cantidad de platino utilizado para reducir su precio. Su temperatura de funcionamiento es baja, lo que permite arranques instantáneos (la potencia máxima se puede obtener después de aproximadamente 3 minutos de operación) y no requiere de aislaciones térmicas.

La gestión del agua en este tipo de FC es un tema crítico. La falta de agua reduce la vida de las celdas que las conforman y la conductividad iónica del electrolito, mientras que el exceso de agua reduce la potencia de salida. Con el fin de mantener la hidratación adecuada de la membrana y maximizar la potencia, la temperatura de funcionamiento de la PEMFC se debe mantener alrededor de los 80°C.

Además, la temperatura y la presión también juegan un papel importante para establecer el rendimiento de las PEMFC. El aumento de la temperatura de trabajo es ventajoso debido a que se reduce la resistencia óhmica del electrolito y se reducen también las limitaciones de transferencia de masa. Otra variable importante es la presión. Una presión de oxígeno más alta reduce la pérdida de activación en el cátodo, mejorando la eficiencia de la PEMFC. Además, otra ventaja es que el aumento de la presión disminuye la deshidratación de la membrana a una temperatura dada, de

manera que es posible trabajar a temperaturas superiores. Presiones de trabajo de 2 a 4 atmósferas conducen a un equilibrio óptimo entre costo y rendimiento. Sin embargo, presiones superiores a las 5 atm empiezan a ser dañinas para el sistema.

Las prestaciones de las PEM han mejorado mucho en los últimos años. Se consiguen densidades de corriente cercanas a los 900 mA/cm^2 a una tensión de $0,7 \text{ V}$ por celda con hidrógeno y oxígeno a unas 4 atm de presión. Si, por el contrario, el hidrógeno y el oxígeno se introducen a presión ambiente, se pueden alcanzar densidades de 530 mA/cm^2 .

En un stack de 5 kW, la compañía *Ballard*[®] ha alcanzado a $0,7 \text{ V/celda}$ densidades de corriente de $0,68 \text{ A/cm}^2$. Las dimensiones del stack son de $250 \cdot 250 \cdot 425 \text{ mm}$, por lo que se obtienen rendimientos aproximados de 200 kW/m^3 .

Pilas de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC)

En este tipo de pilas se utiliza Ácido Fosfórico en estado líquido como electrolito. El mismo está contenido en una matriz de silicona y teflón de estructura porosa que evita fugas del electrolito por efecto capilar. Sin embargo, algo de ácido puede perderse a través del contacto con los flujos de combustible y oxidante, por lo que tras unas horas de operación debe añadirse algo de ácido para compensar ésta pérdida. En este caso, al igual que en las PEMFC los catalizadores son de platino y los electrodos de carbono poroso.

El subproducto del proceso es agua, la cuál se elimina con el oxidante en el cátodo (aire u oxígeno). El procedimiento de eliminación de este agua requiere que el sistema opere a temperaturas cercanas a los 200°C . A temperaturas menores, el agua se disolvería en el electrolito y no podría ser eliminada. A temperaturas mayores, el ácido fosfórico se descompondría.

El exceso de calor se extrae con intercambiadores situados en las placas de carbón para cada celda. El refrigerante utilizado puede ser líquido o gaseoso aunque por lo general se utiliza agua.

En el ánodo, el hidrógeno se separa en dos protones H^+ , los cuales atraviesan el electrolito hasta el cátodo. Los dos electrones pasan por un circuito externo hacia el cátodo. Como pasa en las PEMFC, en el cátodo se unen los electrones, con los protones de hidrógeno y los átomos de oxígeno para producir agua.

Las PAFC pueden operar con una variada combinación de rangos de temperaturas, presiones, tasas de utilización de gases y densidades de corriente. El beneficio de encontrar las condiciones de operación más eficaces debe contrastarse con la energía requerida para lograr estas condiciones en un ambiente dado, así como el efecto sobre la vida útil del sistema. Un aumento en la temperatura de operación aumenta la tensión de la PAFC, pero este aumento se debe limitar para evitar el desgaste del catalizador

y otros componentes. El aprovechamiento de un mayor porcentaje del combustible es deseable desde un punto de vista de costos, pero resulta en presiones parciales menores, conduciendo a mayores pérdidas de concentración de polarización. Por último, la tensión de la PAFC y por lo tanto su eficiencia disminuyen con el aumento de la densidad de corriente.

Las plantas de generación basadas en esta tecnología ofrecen eficiencias de entre el 36 % y el 42 %. Valores mayores se pueden obtener con flujos de combustible y oxidante presurizados, lo que conlleva un mayor costo en los elementos del sistema. La densidad de potencia en este tipo de FC es de alrededor de $0,18 \text{ W/cm}^2$

Pilas de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC)

La Pila de Combustible de Carbonatos Fundidos (MCFC) utiliza una sal de carbonato fundido como electrolito. Normalmente se utiliza carbonato de litio o carbonato de potasio. Su temperatura de operación está en torno a los 650°C , a la cual esta sal es líquida y se comporta como un buen conductor iónico. El electrolito está contenido en una matriz cerámica porosa e inerte, normalmente de LiAlO_2 .

La reacción anódica ocurre entre el hidrógeno y los iones de carbonato (CO_3) del electrolito, lo que da como subproductos CO_2 y agua, además de liberar electrones. La reacción catódica combina el oxígeno, el CO_2 y los electrones que han circulado por el circuito externo, produciendo otra vez iones de carbonato que se unen al electrolito. Existe entonces una necesidad de CO_2 en el oxidante, por lo que hay que dotar estas FC con un sistema de captación de CO_2 para su funcionamiento.

A medida que la temperatura de operación de la MCFC aumenta, la tensión teórica de salida disminuye, al igual que su eficiencia. Por otro lado, también aumenta la velocidad de la reacción electroquímica y entonces la corriente entregada para una tensión fija. En comparación con otro tipo de tecnologías, como por ejemplo las PAFC, una MCFC puede operar a tensiones más elevadas para una misma densidad de corriente. Es por esto que, teóricamente, una MCFC debería ser para la misma potencia, menos voluminosa y costosa que una PAFC de características equivalentes.

La MCFC produce también energía térmica en el proceso, que puede ser aprovechada en una turbina de gas para cogenerar. En un ciclo combinado de ambas tecnologías, se ha estimado que la MCFC puede alcanzar eficiencias del orden del 60 %.

La temperatura de operación se encuentra en el rango de los $600\text{-}650^\circ\text{C}$, a la cual se alcanza la conductividad iónica deseable del electrolito. A estas temperaturas no se precisan catalizadores de metales nobles. El ánodo está compuesto por polvo de níquel sinterizado, siendo altamente poroso. El cátodo está compuesto por óxido de níquel con algo de litio. Además, debido a los valores elevados de temperatura es necesario contar con un mecanismo para evacuar el calor del cátodo, utilizándose por lo general grandes volúmenes de aire por convección forzada (Singhal, Oxford 2004).

Es importante considerar en las MCFC que la corrosión del cátodo reduce la vida útil de la MCFC considerablemente. Otro factor importante es la temperatura de operación, que debe mantenerse constante, ya que una caída de 30°C reduce la tensión de salida en un 15 % aproximadamente, dado al incremento de la resistencia iónica y eléctrica de los electrodos.

Pilas de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC)

Las Pilas de Combustible tipo SOFC (en inglés: Solid Oxide Fuel Cell) utilizan un electrolito sólido cerámico que reduce la corrosión y elimina los problemas asociados al uso de electrolitos líquidos. El material preferido que se utiliza es el zirconio estabilizado con ytrio, un excelente conductor, a altas temperaturas, de iones de oxígeno cargados negativamente. Las técnicas de fabricación incorporan procesos similares a aquellos empleados en semiconductores. Para que una cerámica pueda alcanzar una conductividad iónica aceptable, se necesitan temperaturas cercanas a los 1000°C (Singhal, Oxford 2004). A estas temperaturas, el reformado interno de hidrógeno también es posible, además de poder utilizar el calor residual para cogeneración y así aumentar la eficiencia global del sistema en un ciclo combinado.

Respecto de los electrodos, el ánodo es de zirconio/níquel poroso, mientras que el cátodo es un manganato de lantano dopado con magnesio. Las celdas se construyen con contactos eléctricos semiconductores de alta temperatura.

En operación, el hidrógeno o el monóxido de carbono CO del combustible reacciona con los iones de oxígeno $O^{=}$ del electrolito para producir agua o CO_2 y depositar electrones en el ánodo. Los electrones circulan por un circuito externo y regresan al cátodo donde reaccionan con los de oxígeno del aire y forman nuevamente los iones $O^{=}$ que se incorporan al electrolito. Es importante destacar que las SOFC pueden utilizar CO o hidrógeno como combustibles.

Las pilas tipo SOFC pueden alcanzar, en pequeños stacks, tensiones de 0,6 V/celda y densidades de corriente del orden de 0,25 A/cm². Su vida útil es cercana a las 30000 horas y pueden soportar una considerable cantidad de ciclos de calentamiento/enfriamiento. En la actualidad, SOFC alimentadas con gases a presión ambiente alcanzan eficiencias del 45 %, aunque con gases presurizados pueden llegar al 60 %. Si además, el calor residual se aprovecha en un ciclo combinado para cogeneración la eficiencia sube considerablemente.

A diferencia de otras tecnologías y al igual que en las MCFC, el CO no actúa como veneno, sino que por el contrario, puede utilizarse como combustible. Además, estas FC tienen la ventaja de ser más resistentes al azufre contenido en la mayoría de los combustibles. De hecho, varias de las unidades desarrolladas, funcionan con metano, propano, butano, biomasa gasificada y vapores de pinturas.

Debido a la alta temperatura de operación, el tiempo de arranque es considerable

y las prestaciones de las celdas son muy sensibles a variaciones de ésta temperatura. Una caída del 10 % en la temperatura puede suponer una caída del 12 % de la eficiencia del sistema, debido al aumento de la resistencia interna en la conductividad de iones oxígeno del electrolito cerámico (Singhal, Oxford 2004). Las altas temperaturas que se alcanzan también obligan a la utilización de aislantes térmicos sofisticados para proteger el ambiente circundante y mantener el calor.

Por todo lo expuesto, este tipo de FC son ideales para aplicaciones estacionarias, pero no para aquellas de características móviles, como el sector del transporte.

3.3.5. Estructura Genérica de un Sistema de Generación Basado en Pilas de Combustible

Para poder producir energía es necesario integrar el "stack" de la FC con otros componentes para así formar un Sistema de Generación de Potencia. En la Figura 3.5 se presenta un esquema genérico para una pila tipo PEM donde se muestran los elementos necesarios para conformar un sistema de generación eléctrico a partir de una FC y como éstos se interrelacionan entre sí.

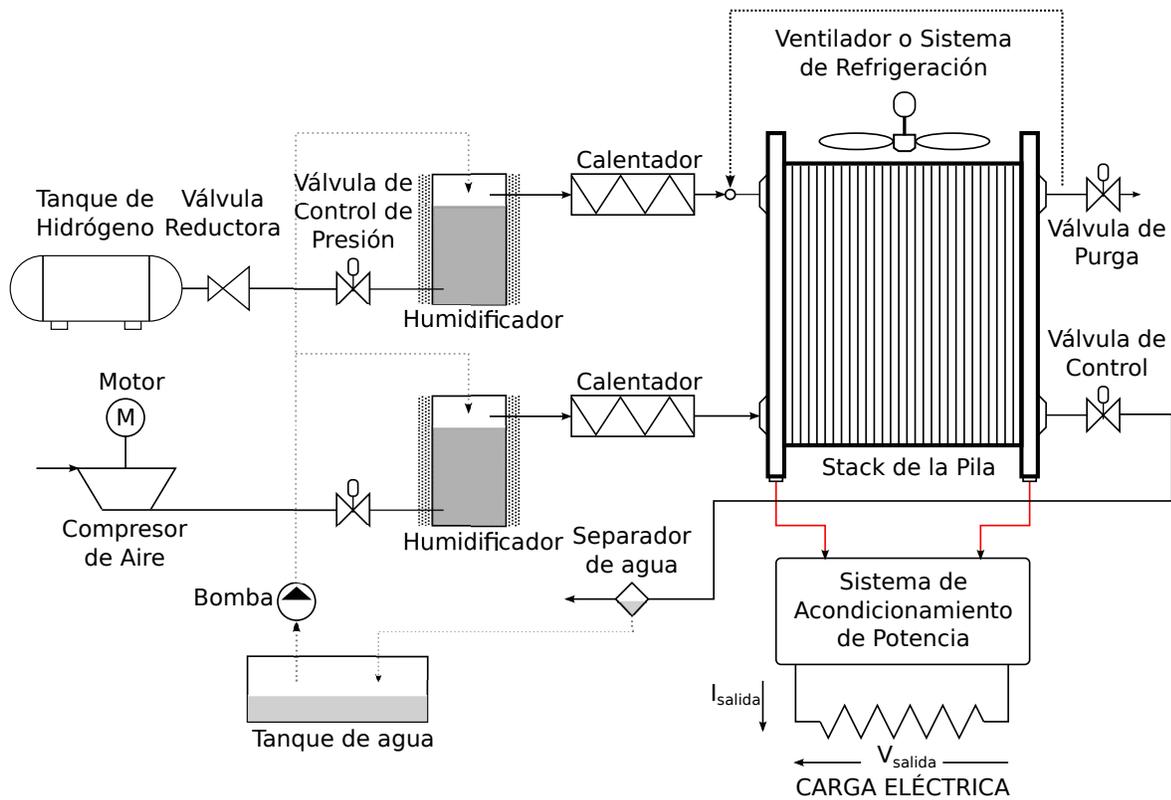


Figura 3.5: Sistema de Generación de Potencia basado en una Pila de Combustible.

Estos componentes se pueden clasificar dentro de cuatro subsistemas que se

describen a continuación.

Subsistema de Suministro de Reactantes

Este subsistema consiste en los circuitos de suministro de hidrógeno y aire. El objetivo es suministrar el flujo adecuado de ellos para asegurar una respuesta transitoria rápida del sistema. El circuito de alimentación de hidrógeno está compuesto por lo general de un tanque presurizado de H_2 puro conectado al ánodo a través de una válvula reductora de presión y una válvula controlada de presión, mientras que el circuito de aire se compone de un compresor de aire que alimenta el cátodo, a partir de aire comprimido captado de la atmósfera. Una válvula de purga en el ánodo se abre periódicamente para eliminar el agua acumulada.

Subsistema de Control de Temperatura

En este caso se considera el sistema de enfriamiento de la PEMFC y el de calentamiento de los reactantes. El control térmico de la FC es crítico ya que el buen desempeño de ésta depende fuertemente de la temperatura, tal como se explicó oportunamente en cada tecnología. Para ello se utiliza aire forzado o un circuito de refrigeración por circulación de agua.

Subsistema de Gestión de Agua

Para las PEMFC, el objetivo de este subsistema es mantener una hidratación adecuada de la membrana polimérica (electrolito) y un adecuado balance de agua, debido a que su rendimiento también depende fuertemente de la hidratación del electrolito. Ambos reactantes, el hidrógeno y el aire, son generalmente humidificados antes de inyectarse a la FC utilizando humidificadores en ambos circuitos. El agua que se produce en el cátodo puede ser capturada en un separador de agua y re-inyectada en los humidificadores mediante una pequeña bomba.

Subsistema de Acondicionamiento de Potencia

La FC produce una tensión de salida continua no regulada. De acuerdo a la curva de polarización presentada en la Figura 3.4, esta tensión cae con el aumento de la corriente eléctrica. A excepción de unas pocas aplicaciones dónde esto no representa un inconveniente, en general, se utiliza un sistema de acondicionamiento de potencia, que permite adecuar la característica de la FC para la aplicación particular, regulando por ejemplo la tensión de salida en un valor fijo determinado.

3.3.6. Ventajas y Desventajas de las Pilas de Combustible

Las pilas de combustible son dispositivos eficientes. Convierten directamente la energía química en eléctrica de manera silenciosa y sin utilizar mecanismos móviles. Además, al no tratarse de un ciclo termodinámico, su eficiencia no se ve afectada por las limitaciones del ciclo de Carnot.

Dadas sus características de operación, permiten localizar la generación de energía en el punto de consumo. Además, si son FC de alta temperatura, es posible utilizar el calor residual generado para aumentar la eficiencia total del sistema en ciclos térmicos combinados. Luego, combinadas con energía eólica o fotovoltaica, permiten complementar la demanda de energía de la red independientemente de las condiciones meteorológicas y la hora del día.

Desde el punto de vista medioambiental, una FC en general utiliza hidrógeno y aire como reactantes, produciendo únicamente agua y calor como subproducto. En las de alta temperatura, la utilización del calor residual para calefacción de recintos o calentamiento de agua permite reducir la emisión de gases de efecto invernadero. Finalmente, un nivel de ruido ambiental bajo es otra ventaja. Un sistema de FC emite, por lo general, menos de una cuarta parte del ruido producido por un generador diesel o de gas análogo.

Los sistemas basados en FC ofrecen además una gran flexibilidad desde el punto de vista de los combustibles que pueden utilizarse. Prácticamente cualquier combustible hidrocarburo líquido o gas puede ser utilizado, a través de un proceso adecuado, como fuente de átomos de hidrógeno (propano, gas natural, metanol, etanol, gasoil y naftas). Por último, cabe destacar que el mantenimiento de los sistemas de FC es relativamente sencillo al no poseer partes móviles. Solamente requieren una simple inspección periódica de los sistemas auxiliares y estado general del stack.

Por otra parte, considerando las desventajas de estos dispositivos, la principal de ellas es la necesidad de H_2 para que puedan funcionar. Si bien es cierto que pueden utilizar como combustible una gran variedad de hidrocarburos, éstos deben ser convertidos en hidrógeno mediante un proceso llamado “reformado por vapor de agua”. Si se hace así, hay que considerar el rendimiento del reformado y el de la FC en forma conjunta, para obtener un rendimiento global. Además, el reformado produce CO_2 y aunque las concentraciones son mucho menores que aquellas producidas por la utilización directa de los combustibles de origen fósil, contribuyen igualmente al calentamiento global.

Por otra parte, si la utilización va a ser en aplicaciones móviles, entonces no se podrá aprovechar el calor generado debido a que en estos casos suelen emplearse FC de baja temperatura (PEMFC). Si por el contrario, su uso va a ser residencial, podrá aprovecharse este calor, en algunas ocasiones, por lo que habrá que especificar el rendimiento global con o sin reformado y con aprovechamiento del calor o sin él.

3.4. Resumen del Capítulo

En este capítulo se presentaron las principales características que involucran la producción, almacenamiento y transporte de hidrógeno. Se hizo una revisión de las tecnologías actuales y perspectivas de futuro en estas temáticas que constituyen un gran desafío en la actualidad dadas las grandes propiedades de este vector energético sustentable y no contaminante.

Es importante destacar de lo expuesto que, mediante recursos renovables, es posible generar energía eléctrica no solamente para abastecer una demanda sino que, además, se puede aprovechar parte de la electricidad producida, agua como “combustible” y un electrolizador para “fabricar” hidrógeno en forma “limpia” y luego almacenarlo o transportarlo para alimentar una Pila de Combustible. De esta manera, es posible abastecer la demanda en forma continua, aún cuando, debido fundamentalmente a las condiciones climáticas, no haya disponibilidad de los recursos renovables.

A continuación, nos centraremos específicamente en los Sistemas Híbridos que utilizan Pilas de Combustible como fuente principal de generación de electricidad. Específicamente, son de interés aquellos sistemas de generación que utilizan PEMFC, una tecnología en constante evolución que tiene la versatilidad de poder ser empleada tanto en aplicaciones estacionarias como móviles.

CAPÍTULO 4

SISTEMAS HÍBRIDOS BASADOS EN PEMFC

4.1. Introducción

De acuerdo a lo expuesto en el capítulo previo, el interés particular en las PEMFC se debe a que, en comparación con otras tecnologías comerciales de FC, éstas representan actualmente una de las más desarrolladas y, dadas sus principales características, pueden utilizarse en múltiples aplicaciones, ya sean estacionarias o móviles.

En este contexto, persiguiendo los objetivos del Capítulo 1, se describen a continuación los aspectos fundamentales de la utilización de PEMFC como fuente principal de generación de electricidad, introduciendo la necesidad de combinarlas con alguna fuente adicional de energía, de alta densidad de potencia, a los efectos de mejorar su desempeño y eficiencia. De esta combinación surgen diferentes configuraciones que conforman Sistemas Híbridos basados en PEMFC, resultando de interés aquellos que emplean Sistemas de Almacenamiento de Energía (ESS) como fuente adicional asociada. El análisis previo, permitirá al final del capítulo justificar la configuración elegida para el SH desarrollado, de manera de lograr los objetivos buscados.

4.2. Aspectos generales de la utilización de PEMFC

Como se destacó en el capítulo previo, una de las tecnologías más prometedoras de fuentes de energía alternativas para la producción de energía eléctrica “limpia” son

las Pilas de Combustible. De los diferentes tipos de Pilas de Combustible comerciales, descritas oportunamente, las PEMFC han encontrado un amplio campo de aplicación, especialmente en transporte, sistemas de generación distribuida (GD) y equipamiento electrónico portátil. Éstas presentan algunas ventajas interesantes, tales como:

- Pueden operar a temperaturas relativamente bajas.
- Pueden utilizar aire atmosférico como reactante para funcionar (toleran CO_2).
- Poseen densidades de potencia elevadas.
- Trabajan a presiones bajas (1 a 2 atm), lo que las hace más seguras.
- Toleran mayor diferencia de presión entre los gases reactantes.
- Su diseño es simple y se construyen a partir de materiales resistentes.
- Son compactas y robustas.

Por otra parte también poseen algunas desventajas, algunas de las cuales se listan a continuación, pero que en principio no representan una dificultad para su utilización en las diversas aplicaciones posibles y, de hecho, las soluciones tecnológicas actuales permiten minimizar su impacto.

- Son sensibles a impurezas en el hidrógeno.
- Necesitan unidades para humidificar los gases reactantes.
- Utilizan materiales costosos para el catalizador (platino) y la membrana (polímero sólido).

La tecnología PEM está aún bajo investigación para su uso en sistemas de gran potencia. Por otra parte, su uso como fuente de energía única, en aplicaciones donde hay cambios abruptos en la demanda de potencia, tales como residenciales o en vehículos eléctricos, no es adecuada. Esto se debe fundamentalmente a la lenta dinámica que caracteriza a este tipo de FC, siendo incapaces de seguir variaciones rápidas en la demanda de energía. Estas condiciones de operación, de corta duración, causan grandes caídas de tensión de salida en el dispositivo, fenómeno conocido como “de inanición o insuficiencia” (en inglés: “starvation”). Este sucede cuando, ante un incremento abrupto en la demanda de corriente, existe un déficit del hidrógeno u oxígeno necesario (debido a la lenta dinámica, propia del sistema de alimentación de la PEMFC) para poder entregarla y, como consecuencia, su tensión de salida cae abruptamente. Esta situación puede dar como resultado la producción de hidrógeno y oxígeno en el cátodo y el ánodo respectivamente. Por ejemplo, en el caso de inanición de hidrógeno, la corriente de la PEMFC no puede mantenerse causando una peligrosa elevación de tensión entre sus electrodos. Por lo tanto, el agua, producida en el ánodo, puede dividirse en hidrógeno

y oxígeno nuevamente, produciendo oxígeno en el ánodo. Del mismo modo, durante la inanición de oxígeno, la reacción en el cátodo puede producir hidrógeno. La presencia de oxígeno en el ánodo y de hidrógeno en el cátodo da lugar a una inversión de la tensión de la celda, es decir, una diferencia de potencial negativa entre el ánodo y el cátodo. Esto, acelera la corrosión de los componentes de carbono en la celda pudiendo dañar, eventualmente, su estructura (Babir, 2005).

Conociendo la situación anterior, para utilizar una PEMFC en aplicaciones dinámicas con variaciones naturalmente abruptas de demanda, la tasa de variación de corriente o de potencia entregada por el dispositivo debe limitarse para evitar el problema de insuficiencia de combustible. Por lo tanto, se recomienda asociarla con al menos una fuente de energía auxiliar de mayor densidad de potencia para lograr, de esta manera, mejorar el rendimiento dinámico y la eficiencia global del sistema y además, evitar provocar daños irreversibles en el stack.

Existen muchos tipos de unidades auxiliares para compensar la lenta respuesta de las PEMFC. Éstas pueden ser unidades de almacenamiento de energía, tales como: baterías, supercapacitores (SC), volantes de inercia (Flywheel); o también otras fuentes de energía como: turbinas eólicas, sistemas fotovoltaicos, generadores diesel, entre otros.

En particular, en gran parte de las aplicaciones, se prefieren las unidades de almacenamiento de energía puesto que no sólo compensan la lenta dinámica de la PEMFC, sino que además permiten recuperar la energía cinética reutilizable, por ejemplo, en aplicaciones en vehículos eléctricos, durante los períodos de frenado (frenado regenerativo). Como consecuencia, en estos casos, el consumo de hidrógeno de la FC se puede reducir significativamente.

Las combinación de la PEMFC con fuentes auxiliares de generación y almacenamiento de energía conforman Sistemas Híbridos de Generación de Energía Eléctrica (SHGEE). Debido a las características de las múltiples fuentes, en un Sistema Híbrido basado en una PEMFC, la eficiencia y economía de combustible de estas unidades híbridas dependen principalmente de una arquitectura y estrategia de gestión de energía adecuadas.

Se pueden encontrar varias contribuciones en la literatura especializada respecto a la gestión de la energía (Moré, 2012) y los problemas asociados a la selección y diseño de una arquitectura adecuada del sistema. En la siguiente sección, se describen las áreas de aplicación, de mayor interés, de las PEMFC, que surgieron en los últimos años.

4.2.1. Factores que limitan el uso de las PEMFC

Hay muchos factores que han limitado el desarrollo comercial de las PEMFC. Por un lado, debido a las características del hidrógeno, que en el caso particular de las PEMFC debe tener determinado nivel de pureza y los onerosos costos asociados a su producción, almacenamiento y distribución. Por otro, también hay que considerar el alto costo de

fabricación de la PEMFC, causado por factores como: materiales complejos utilizados para la fabricación de los catalizadores, la membrana y las placas colectoras.

La mayoría de las PEMFC consumen hidrógeno puro o bien utilizan gas rico en hidrógeno como combustible primario. Hasta ahora, los resultados experimentales con PEMFC han revelado que funcionan mejor con hidrógeno de alta pureza. Sin embargo, para muchas aplicaciones, especialmente móviles, debido a la falta de disponibilidad de la infraestructura de reabastecimiento de combustible y las técnicas de almacenamiento existentes, el hidrógeno puro aún no es una opción viable (Thounthong, 2009b). Así, la producción, distribución y el almacenamiento de hidrógeno pueden ser una cuestión difícil, especialmente cuando se consideran los altos costos de los equipos necesarios para estas actividades (Ball, 2009). En resumen a todo lo mencionado, un uso más amplio de las PEMFC se logrará cuando una serie de problemas importantes y complejos se resuelvan, entre ellos principalmente:

- Mayor vida útil para los catalizadores y membranas.
- Desarrollo de catalizadores sin platino, con el uso de estructuras alternativas, tales como nanotubos de carbono y membranas más baratas.
- Construcción de nuevas plantas para la producción de hidrógeno de alta pureza que admitan una amplia gama de combustibles primarios como fuente.
- Construcción de numerosas estaciones de reabastecimiento de hidrógeno, especialmente para aplicaciones de transporte.

4.3. Aplicación de las PEMFC en Sistemas Híbridos

4.3.1. Aplicación en Sistemas de Transporte

En la actualidad, los vehículos eléctricos con baterías son los más conocidos y comúnmente comercializados. En general, los vehículos eléctricos son utilizados donde el ruido o la contaminación de los motores de combustión interna prohíbe su aplicación, como por ejemplo, en el caso de utilitarios de la industria minera o en sistemas de transporte subterráneo. También son útiles en sitios con ausencia de aire como en el caso de los vehículos submarinos o de aplicación espacial. Las principales deficiencias de esta alternativa se atribuyen al almacenamiento de la energía eléctrica en baterías convencionales, debido a su baja capacidad, costo elevado, tiempo prolongado de carga, rango de temperatura de funcionamiento acotado y baja estabilidad del ciclo de operación. Estas propiedades han impedido su uso más amplio para la propulsión de

vehículos de pasajeros (Larminie, 2003b). Las PEMFC ofrecen muchas ventajas sobre las baterías para aplicaciones en vehículos, ya que, a diferencia de éstas últimas, pueden producir energía eléctrica en forma continua mientras se les provea del combustible necesario. Además, son eficientes, limpias y flexibles. Tienen el potencial de alcanzar hasta un 60% de eficiencia a temperaturas de funcionamiento inferiores a otras tecnologías. A bordo del vehículo, la conversión de hidrógeno a energía de tracción produce sólo agua y calor. Tal como se expuso en el capítulo anterior, el hidrógeno puede ser producido a partir de una variedad de fuentes: combustibles fósiles, como por ejemplo, el gas natural; energías renovables (solar y eólica son grandes candidatos) o bien, biomasa y energía nuclear.

Automóviles, autobuses, motos, coches de golf, vehículos de servicio (tales como grúas elevadoras y vehículos aeroportuarios), locomotoras, tranvías, barcos, aviones y vehículos submarinos son algunas de las tantas aplicaciones de los sistemas basados en pilas tipo PEM en el área de transporte. Especialmente en la industria automotriz, casi todos los grandes fabricantes de automóviles han construido prototipos de vehículos basados en PEMFC y asimismo anunciado sus planes futuros, para su producción y comercialización en los próximos años (Ball, 2009).

4.3.2. Aplicación en Generación Distribuida (GD)

El término GD se refiere a cualquier unidad de generación de pequeña escala ubicada cerca del punto de suministro, en lugar de ubicaciones remotas o en grandes centrales. Los sistemas de generación alternativos, como las turbinas eólicas, los sistemas fotovoltaicos y las pilas de combustible desempeñan un papel importante para satisfacer la demanda de los consumidores, utilizando los conceptos de Generación Distribuida (GD). Las principales ventajas de los sistemas de GD están en que permiten reducir las pérdidas en las largas líneas de transmisión y distribución, bajando el costo de instalación, mejorando la regulación de tensión local y con la posibilidad de añadir fácilmente una pequeña unidad de generación adicional durante las condiciones de máxima demanda (Wang, 2008).

Actualmente sistemas basados en PEMFC se utilizan en configuraciones de GD en aplicaciones tales como hospitales, hoteles, oficinas, escuelas y como prueba en algunos hogares en algunos países de Europa Occidental. En estos casos, el sistema PEMFC está conectado a la red eléctrica para proporcionar energía adicional a la planta o, como un sistema independiente de la red para generar electricidad en zonas remotas o aisladas (conocidos como sistemas “autónomos” o en inglés: “stand-alone”). El uso de PEMFC en aplicaciones de GD, puede ser como fuente de alimentación principal o como unidad de respaldo (“Backup”) tal como se describen a continuación.

• Uso de las PEMFC como fuente principal de energía

El uso de PEMFC como fuente principal de energía en los sistemas de GD es una solución que ha producido un gran interés en los últimos años. Hay dos formas, investigadas actualmente, de emplear esta tecnología: se pueden combinar con una unidad de almacenamiento de energía, típicamente baterías, supercapacitores y flywheel (Thounthong, 2007) o bien con una unidad secundaria de alimentación principal como micro-turbinas, generadores diesel u otras (Uzunoglu, 2007). El hidrógeno necesario para el funcionamiento de tales sistemas se suministra generalmente a través de una unidad de reforma, con gas natural como combustible de entrada. Un esquema general para tales sistemas puede verse en la Figura 4.1.

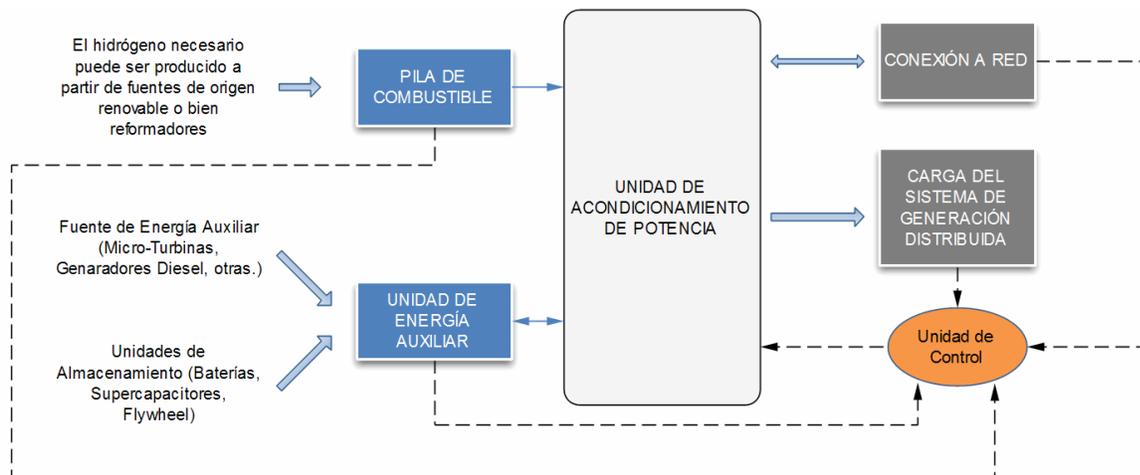


Figura 4.1: Esquema de un Sistema Híbrido que utiliza la PEMFC como fuente principal.

En sistemas como el de la figura anterior la PEMFC se utiliza para abastecer la energía demandada por la carga hasta alcanzar su valor nominal. Cuando ésta no puede cumplir con lo pedido, la unidad secundaria de alimentación se encarga de suministrar la diferencia. La razón por la cual se emplea la FC como fuente principal se debe por un lado a las baja contaminación producto de su operación y por otro, a los costos más elevados que podrían darse al generar energía con la unidad secundaria. En particular, en el caso dónde la unidad secundaria se corresponde con un sistema de almacenamiento como los ya mencionados, estos últimos sirven para suplementar la lenta respuesta de la PEMFC durante cambios abruptos en la demanda de la carga, mejorando así la calidad de suministro del sistema.

• Uso de las PEMFC como unidad de respaldo

Se define como “Fuente de Energía de Respaldo” o en inglés de “Backup” a cualquier dispositivo que proporciona energía instantánea, sin interrupción, cuando las fuentes de energía principales no están disponibles o no pueden satisfacer la demanda de energía.

El uso de las PEMFC en sistemas de GD como unidad respaldo toma relevancia en una configuración en la que fuentes renovables, como turbinas eólicas y/o sistemas fotovoltaicos son las de generación principales y la PEMFC se alimenta a través de un electrolizador asociado al sistema. En la Figura 4.2 se presenta un esquema de una topología híbrida de estas características. En estos sistemas, la generación de energía por parte de las fuentes principales depende fuertemente de las condiciones meteorológicas. Si hay un exceso de energía generada, ésta se utiliza para generar hidrógeno mediante el electrolizador y almacenarlo en tanques, para uso futuro en el sistema de FC. Por otra parte, la PEMFC produce energía eléctrica cuando la generada por las fuentes principales no es suficiente para abastecer la demanda. En estos sistemas, una alternativa como unidad de respaldo es el uso de unidades de batería convencionales; sin embargo, es una opción que corre con desventaja si se tienen en cuenta factores como contaminación ambiental, economía y fiabilidad (Wang, 2008). De ser necesario, en los sistemas con PEMFC también es posible introducir una unidad de almacenamiento adicional como las antes citadas para, al igual que en el caso previo, mejorar la velocidad de respuesta del SH ante cambios en la demanda.

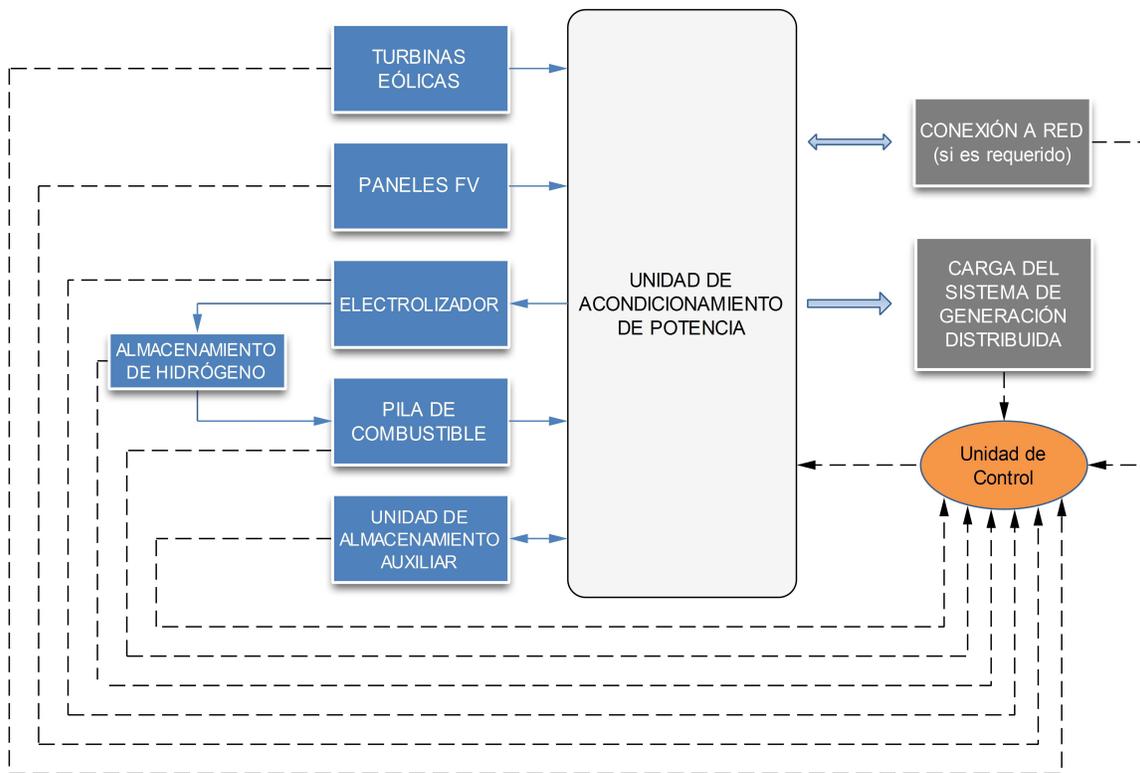


Figura 4.2: Esquema de un Sistema Híbrido que utiliza la pila PEM como unidad de respaldo.

4.3.3. Aplicación en Sistemas Portátiles

Las PEMFC pueden proporcionar energía eléctrica en lugares donde no es posible una conexión a red, utilizándose como unidades de potencia portátiles. Por ejemplo, en un lugar al aire libre el uso de una FC para generar energía eléctrica en lugar del uso de un generador diesel evita emisiones nocivas y no causa problemas de ruido en el entorno. Además, las FC se utilizan como unidades de apoyo cuando se producen cortes de energía y en aplicaciones militares. En este último caso, son mucho más livianas y con mayor vida útil que las baterías, dos características particularmente importantes para los soldados durante los períodos de maniobras militares. Algunas áreas de aplicación actuales de las PEMFC en sistemas militares portátiles incluyen: cargadores de baterías de equipos, sistemas de navegación, sistemas de comunicaciones y sensores. Además, se recomienda últimamente el uso de PEMFC en computadoras portátiles y teléfonos móviles, idea que ha logrado una amplia atención de diversos fabricantes. Las investigaciones de importantes empresas como Motorola, Toshiba, Samsung, Panasonic y Sony han demostrado que un teléfono móvil puede funcionar el doble de tiempo en comparación con el que utiliza una batería de litio con un tamaño equivalente y sólo necesita 10 min para recargarse. En cuanto a las computadoras portátiles se refiere, se ha demostrado que aquellas que utilizan PEMFC pueden funcionar hasta 5 horas o más (Andujar, 2009). Estos tipos de PEMFC utilizadas en dispositivos móviles se llaman “microFCs”.

4.4. Arquitecturas de Sistemas Híbridos basados en PEMFC

Las estructuras de Sistemas Híbridos de Generación de Energía Eléctrica (SHGEE) se pueden clasificar, en una primera instancia como: de acoplamiento en corriente alterna, en corriente continua o mixtos.

En el primer caso, todas las fuentes que intervienen se hayan conectadas a un Bus de Corriente Alterna (Bus de CA) principal formando una “micro-red”, antes de conectarse (o no hacerlo, en caso de sistemas autónomos) a la red. Las fuentes pueden ser naturalmente de corriente alterna o bien de continua con un inversor asociado y estar localizadas en diferentes puntos, incluso separadas distancias considerables. Estos presentan como desventajas que la tensión y la frecuencia del Bus de CA deben ser adecuadamente controladas para asegurar estabilidad del sistema de generación y compatibilidad con la red, si es que existe conexión y en ocasiones la cantidad de convertidores electrónicos asociados puede incrementar los costos y la complejidad y reducir la eficiencia del sistema.

En Sistemas Híbridos acoplados en corriente continua todas las fuentes de energía se hayan conectadas a un Bus de Corriente Continua (Bus de CC) común a través de

convertidores electrónicos adecuados (o no, según las características de cada fuente en particular). En caso de tener conexión a red, ésta se hace a través de un único inversor. En este último caso, la tensión y la frecuencia de la red son independientes de aquellas de cada fuente utilizada; sin embargo, el uso de un único inversor implica que el mismo deberá ser capaz de manejar la suma total de las potencias de las fuentes intervinientes.

Esta tesis se centra específicamente en un Sistema Híbrido de acoplamiento en CC y es por ello que a continuación nos vamos a centrar en el análisis de diferentes configuraciones basadas en un Bus de CC principal que vincula las distintas fuentes de energía y cargas. Este tipo de estructuras son flexibles, escalables y las más utilizadas en Sistemas Híbridos de baja y media potencia basados en PEMFC. A continuación se centran los esfuerzos en analizar aquellas configuraciones que resultan de mayor relevancia para el tipo de acoplamiento seleccionado.

4.4.1. Configuración Paralela de Integración Directa

La configuración híbrida más sencilla está formada por una PEMFC y una Unidad de Almacenamiento de Energía (ESS) conectadas directamente al Bus de Corriente Continua, como se muestra en la Figura 4.3. Sin embargo, ésta posee varias desventajas entre las que se destacan dos ampliamente limitantes para su utilización: En primer lugar, la tensión de la Unidad de Almacenamiento debe coincidir con la nominal de la Pila de Combustible, con el fin de no sobrecargar a la primera de ellas, lo que limita en gran medida la flexibilidad del sistema. Además, en este sentido, si se utilizara como dispositivo de almacenamiento un Supercapacitor, podría no aprovecharse óptimamente la capacidad de almacenamiento del mismo (recordemos que su energía depende del cuadrado de la tensión de operación y dado el costo de estos dispositivos, no sería algo conveniente utilizarlo con tensiones muy por debajo de su nominal). En segundo lugar, debido a que la distribución de potencia entre la PEMFC y la Unidad de Almacenamiento está determinada por las características de impedancia de cada fuente, el rendimiento del Sistema Híbrido en esta configuración puede ser innecesariamente limitado por uno de esos dos componentes. Por ejemplo, la capacidad de potencia pico del conjunto puede ser restringida por la PEMFC, cuando ésta alcanza su límite de potencia seguro, mientras que la potencia de salida disponible de la Unidad de Almacenamiento está todavía muy por debajo de su máximo admisible.

4.4.2. Configuración Paralela Indirecta Simple

Dos estructuras diferentes que utilizan un único convertidor CC/CC se muestran en las Figuras 4.4 y 4.5. La configuración de la Figura 4.4 regula la potencia de salida de la FC para abastecer la demanda de la carga hasta alcanzar su capacidad nominal. Mientras que el resto de la energía entre la demanda de carga y la potencia de salida de la FC es, naturalmente, suministrada por la unidad de energía auxiliar. En este caso,

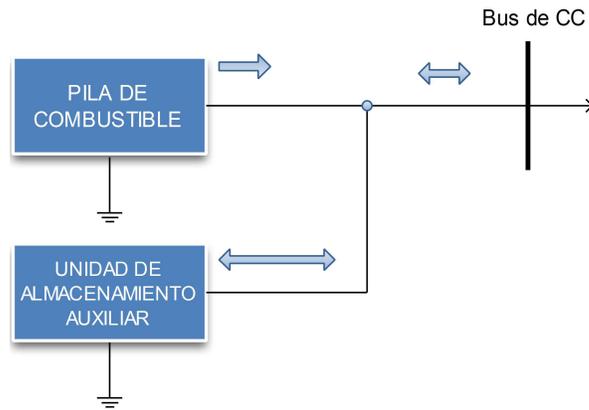


Figura 4.3: Conexión de ambas fuentes en forma directa.

ésta última puede ser una Unidad de Almacenamiento, o bien otra fuente de generación de energía. Además, dada la lenta dinámica característica de estas FC, ante cambios en las condiciones de carga, la energía puede ser provista inicialmente por la unidad auxiliar, hasta que la FC alcance el nuevo punto de operación (Fontela, 2007). Por otra parte, en la configuración de la Figura 4.5 se puede establecer la regulación de la tensión del Bus de CC a través del control de la potencia de salida del sistema auxiliar.

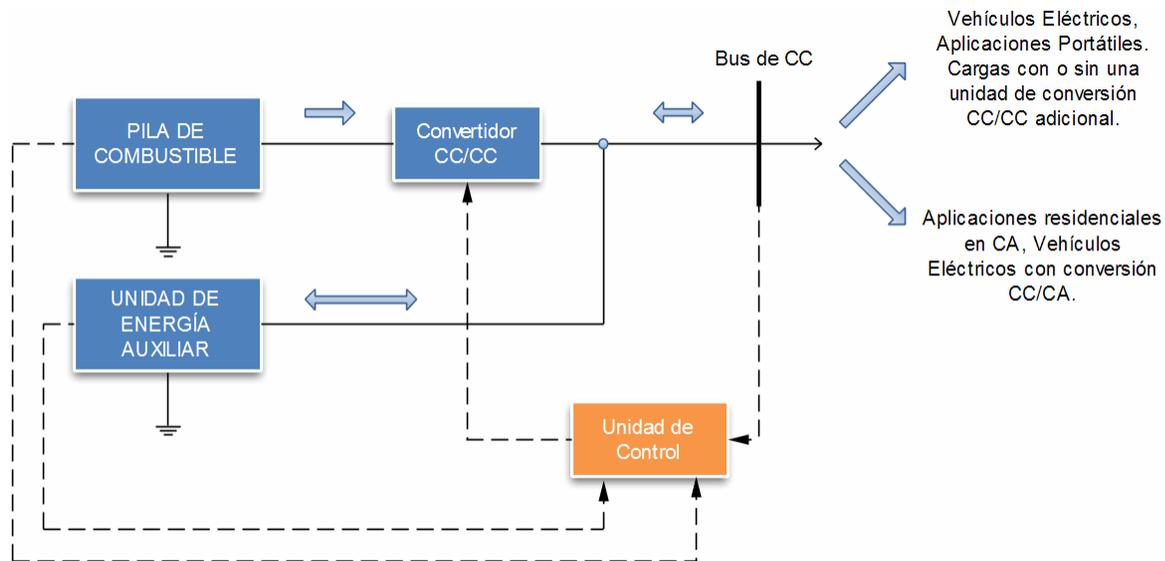


Figura 4.4: Topología basada en un único convertidor (Tipo 1).

En esta configuración, si la unidad auxiliar es un sistema de almacenamiento de energía, se pueden alcanzar tres modos de operación durante el intercambio de energía entre los componentes del sistema (Payman A.; Pierfederici, 2008):

- El modo *normal*, en el que la potencia de carga es positiva (absorbe) y menor que la energía nominal de la fuente principal. En este modo, el control del convertidor

CC/CC se basa en la carga o descarga de la unidad de almacenamiento por encima o por debajo de su nivel de tensión de referencia.

- El modo de *sobrecarga*, en dónde la potencia de carga es positiva (absorbe) y mayor que la que puede entregar la fuente principal. Aquí, la unidad de almacenamiento garantiza la regulación de tensión del Bus de CC, compensando la diferencia de potencia entre la demandada por la carga y entregada por la fuente principal. En esta condición, para cumplir con las especificaciones, la unidad de almacenamiento se descargará y esto deberá ser tenido en cuenta durante su dimensionamiento.
- El modo de *recuperación*, en el cual la carga entrega potencia al sistema. En este modo, el control del convertidor CC/CC se encarga de regular la tensión del Bus de CC de manera que el dispositivo de almacenamiento deberá absorber potencia, cargándose hasta alcanzar su valor de carga nominal.

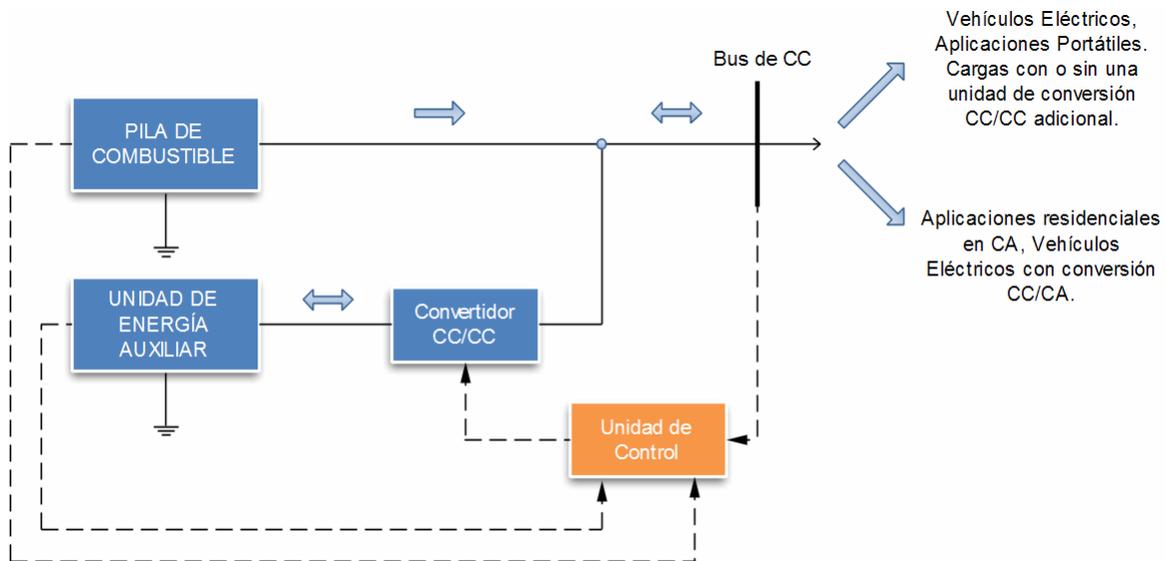


Figura 4.5: Topología basada en un único convertidor (Tipo 2).

4.4.3. Configuración basada en múltiples convertidores

En la Figura 4.6 se muestra una estructura para Sistemas Híbridos que utiliza un convertidor electrónico CC/CC por cada fuente de energía asociada al Bus de CC. En este tipo de configuración, el convertidor de una de las fuentes de energía disponibles se emplea para la regulación de la tensión del Bus de CC y el resto de los convertidores se controlan para hacer un seguimiento de la potencia demandada por la carga. De esta manera, esta estructura permite abastecer la energía requerida por la carga desde las diferentes fuentes de energía asociadas, mientras mantiene la tensión del bus en un valor constante. De todas las aquí descritas ésta resulta la más versátil y se utiliza en

numerosas aplicaciones, desde transporte (Thounthong, 2009a) hasta sistemas de GD (Stewart, 2009).

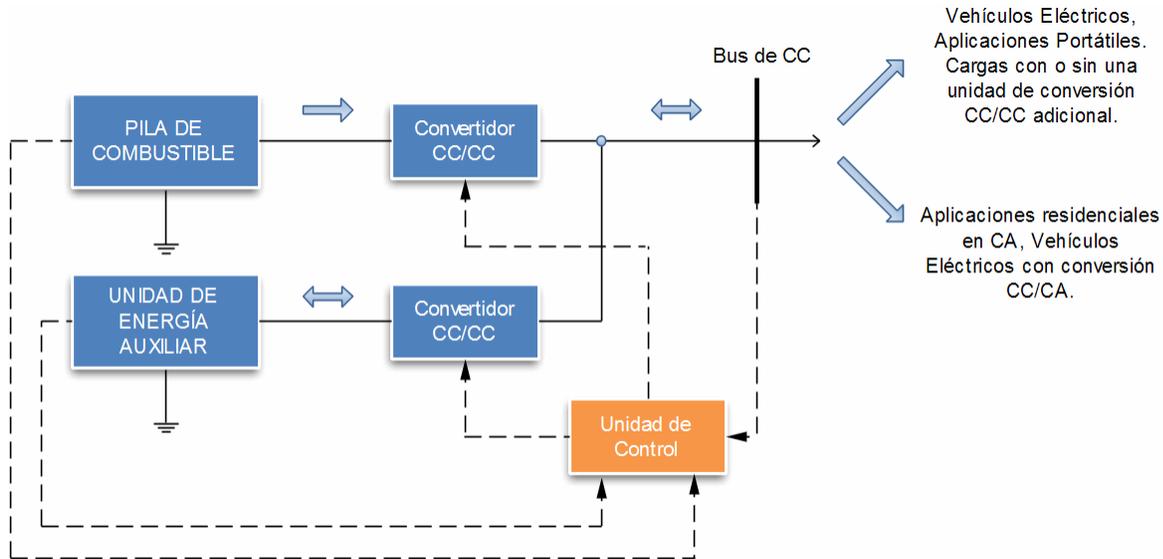


Figura 4.6: Estructura basada en múltiples convertidores.

En esta configuración, al igual que en el caso anterior, si la unidad auxiliar es una unidad de almacenamiento de energía, el flujo de potencia puede ir en ambos sentidos tal como se indica en la figura con una flecha bi-direccional.

4.4.4. Configuración basada en un convertidor de múltiples entradas

Considerando las características de la estructura anterior, basada en múltiples convertidores, algunas aplicaciones utilizan como arquitectura de diseño un único convertidor de múltiples entradas y una única salida como se ve en la Figura 4.7. Ésta tiene como ventaja principal la reducción en el número de elementos utilizados en el diseño de la interfaz electrónica de potencia. Sin embargo, el diseño, la construcción y el control de estos sistemas es relativamente más complejo que en el caso de una arquitectura con múltiples convertidores independientes, siendo como consecuencia menos versátiles y convenientes (Perez, 2009).

Mediante un convertidor de múltiples entradas es posible implementar arquitecturas conocidas como “multistack”, dónde se combinan FC en serie y/o paralelo con el objetivo de alcanzar potencias elevadas con niveles de tensión y corriente adecuados, de interés en aplicaciones de gran potencia. Además, esta estructura puede considerarse como “tolerante a fallas” puesto que si una FC del arreglo sufre un desperfecto, el sistema puede seguir funcionando con un grado de deterioro relativamente pequeño. Dada esta propiedad, su aplicación resulta de interés en Sistemas Híbridos empleados

en el área de transporte dónde puede ser necesario cierto grado de redundancia. Por otra parte, tal como se mencionó en el párrafo anterior, el control de este tipo de estructuras puede resultar algo complejo por lo que no son actualmente consideradas una opción viable (Davat, 2009) para la mayoría de las aplicaciones.

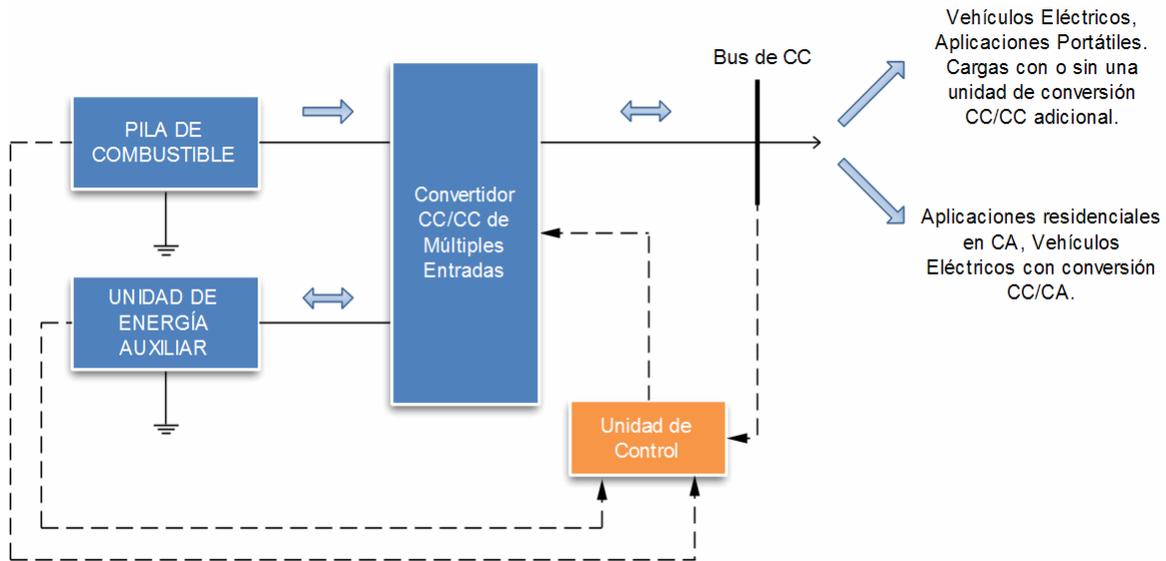


Figura 4.7: Estructura basada en un convertidor de múltiples entradas.

4.4.5. Estructura para GD, basada en múltiples convertidores

Las arquitecturas descritas anteriormente se emplean generalmente en aplicaciones dónde la PEMFC se utiliza como fuente de energía principal. Sin embargo, en sistemas de GD, dónde fuentes de energía renovables, como eólica y solar, son utilizadas típicamente como fuente de energía principal y la PEMFC como unidad de respaldo se pueden clasificar en forma específica en una estructura particular. En general, se emplea una arquitectura paralela dónde cada fuente de energía del sistema tiene asociado un convertidor electrónico CC/CC. Todos ellos se conectan a un Bus de CC común y se controlan en forma independiente siguiendo diferentes objetivos (Wang, 2008). Esto se observa en la Figura 4.8.

La principal desventaja de las estructuras paralelas de múltiples convertidores consiste en la pérdida asociada con cada convertidor electrónico utilizado, que reduce el rendimiento global del Sistema Híbrido. Es por ello que en algunos casos, dónde el rendimiento del SH es un factor limitante, resulta de mayor interés el uso de estructuras sencillas de integración directa como las descritas, dónde se suprime un convertidor reduciendo las pérdidas asociadas. Este tipo de estructuras pueden resultar desventajosas si se considera su versatilidad; sin embargo, en muchas aplicaciones esto puede no significar un problema.

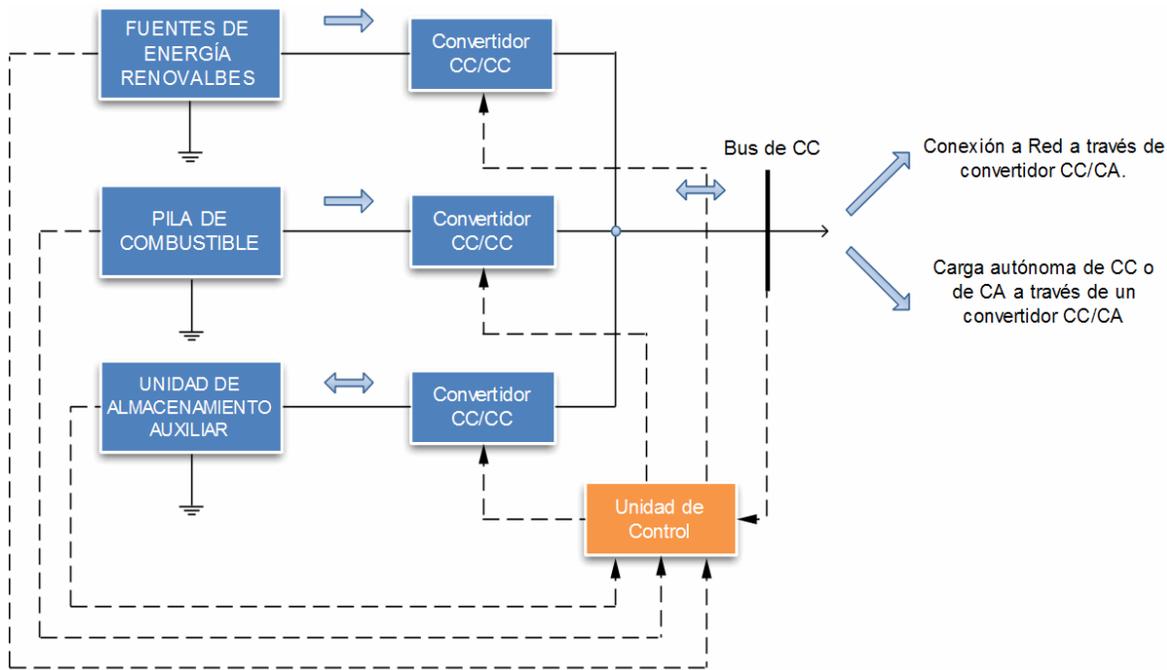


Figura 4.8: Estructura para GD, basada en múltiples convertidores.

4.5. Dispositivos de Almacenamiento en SH basados en PEMFC

Como se mencionó al principio del capítulo, en Sistemas Híbridos basados en PEMFC y, en particular, en aquellos utilizados en aplicaciones donde se requieren altas densidades de energía y potencia; donde, la PEMFC se utiliza como fuente de alimentación principal, resulta importante contar con una fuente secundaria adicional de alta densidad de potencia. Es en este contexto, tecnologías tales como baterías o supercapacitores, representan una opción que ha tomado importancia en los últimos años. Estas aplicaciones se caracterizan por presentar perfiles de carga con picos de demanda ocasionales o periódicos de gran potencia. Mientras que una PEMFC de dimensiones adecuadas puede suministrar la potencia media necesaria, no puede, tal como se explicó anteriormente, proporcionar la alta potencia pico intermitentemente exigida en forma transitoria. Desde otro punto de vista, mientras que los Sistemas de Almacenamiento de Energía (ESS) pueden suministrar la potencia pico demandada, no son capaces por sí solos de proporcionar la energía a largo plazo requerida por la aplicación. De esta forma el conjunto se complementa para abastecer adecuadamente el perfil de carga solicitado.

Es importante recordar que demandas elevadas de potencia, repetitivas y escalonadas, pueden conducir a la degradación de vida útil de la PEMFC, si ésta no es suplementada con una fuente auxiliar de mayor densidad de potencia. Un ESS,

puede suministrar (o absorber) la variación de potencia transitoria y permitir que la PEMFC alcance más lentamente los nuevos niveles de demanda o bien, que ésta funcione en condiciones casi estacionarias. Este último beneficio también conduce a una mejor calidad de la energía producida por el sistema, ya que un rápido aumento en la demanda de carga no podría ser suministrado por la FC dando lugar a una caída significativa de la tensión de salida, que puede incluso causar una parada indeseada del sistema o el daño de algún dispositivo alimentado por el mismo.

La combinación de la PEMFC con un ESS en un Sistema Híbrido permite, por un lado aumentar la capacidad de suministro de potencia pico del sistema; mientras que por otro, preserva la alta densidad de energía para satisfacer las necesidades de estas aplicaciones. Por otro lado, hay también muchos otros beneficios de esta hibridización:

- El ESS puede proporcionar alimentación a los sistemas auxiliares para el arranque de la PEMFC.
- Se reduce el consumo de hidrógeno y mejora la respuesta dinámica del SH. Reduce el tiempo que le demanda al sistema alcanzar la potencia requerida por la carga.
- Reduce el costo y peso global del sistema (el costo por unidad de potencia del sistema de almacenamiento es considerablemente inferior al de la PEMFC).
- Los componentes se pueden hacer funcionar en la región de mayor eficiencia, para que ninguno tenga que proporcionar la potencia de plena carga.
- La incorporación de un ESS permite utilizar la PEMFC para proporcionar una tensión estable en la carga, suministrando la potencia media demandada.
- El ESS, al ser utilizado para suministrar los picos de demanda de potencia transitorios o durante condiciones de “sobrecarga”, mejora en gran medida la dinámica del sistema.
- Aumenta la versatilidad del sistema permitiendo recuperar energía desde la carga (regeneración).

Se sabe que el ESS puede ser implementado utilizando dispositivos tales como Baterías, Supercapacitores (SC) y Volantes de Inercia (“Flywheel”). También existe la posibilidad de utilizar una combinación de los dos primeros (Henson, 2008). En este sentido, los Supercapacitores poseen mayor densidad energética que los capacitores convencionales y mayor densidad de potencia que las Baterías convencionales. La capacidad de éstos varía desde algunos hasta unos cientos de Faradios por celda (Burke, 2000). Por otra parte, los Volantes de Inercia son dispositivos que permiten almacenar energía en forma de energía cinética, a partir de la rotación de un volante con alto momento de inercia. Actualmente estos logran almacenar cantidades de energía comparables a la de una batería, con la ventaja adicional de no contener materiales peligrosos ni de ser afectados por cambios de temperatura. Son dispositivos confiables y resultan ideales para complementar o reemplazar los sistemas de baterías

convencionales de plomo-ácido (Valenciaga, 2001). Además, poseen densidades de potencia comparables con los Supercapacitores. Sin embargo, a pesar de que las tecnologías actuales permiten producir Volantes de Inercia de bajo mantenimiento, el hecho de que tengan piezas mecánicas rotantes no los hace adecuados para algunas aplicaciones (Wildi, 2007), en particular aquellas dónde las PEMFC son de preferencia.

Existe una gran cantidad de Sistemas Híbridos que emplean baterías como dispositivos de almacenamiento pero en la actualidad hay un gran interés en la utilización de Supercapacitores. De esta manera, aquellos sistemas basados en SC poseen como ventaja un mayor ancho de banda que las tecnologías de baterías convencionales, lo que se traduce en una respuesta dinámica más rápida. Además, los SC presentan un elevado número de ciclos de carga-descarga. Estos factores son determinantes para la viabilidad de su uso en una aplicación particular.

Se destaca que, en la actualidad, existe un profundo interés en la investigación y desarrollo de nuevos sistemas de almacenamiento, puesto que resulta un área crítica en los sistemas híbridos de generación de energía eléctrica. En este sentido, hoy en día han surgido dos nuevas tecnologías muy prometedoras e interesantes en este campo, tales como baterías de litio y las flowbatteries. Sin embargo, éstas son aún objeto de numerosas investigaciones y su aplicación comercial o masiva en el corto plazo en sistemas de media y alta potencia no está prevista.

Independientemente de la tecnología utilizada, existen dos parámetros importantes que definen un Sistema Híbrido que combina PEMFC con algún Sistema de Almacenamiento de Energía y que permite comparar diferentes sistemas que combinan estas fuentes. Éstos se introducen a continuación:

Grado de Hibridización

El Grado de Hibridización (HD) se define como la relación entre la máxima potencia del Sistema de Almacenamiento de Energía y la Potencia Total disponible del sistema en su conjunto, tal como se define en la Ecuación 4.1.

$$HD = \frac{P_{ESS-max}}{P_{ESS-max} + P_{FC-max}} \cdot 100 \% \quad (4.1)$$

Dónde, $P_{ESS-max}$ es la máxima potencia que puede entregar el dispositivo de almacenamiento y P_{FC-max} la máxima potencia disponible de la FC. Con esta definición, un Grado de Hibridización del 100 % se refiere a un sistema que no posee una FC asociada. Por el contrario, un HD del 0 % implica que el sistema no posee un ESS.

Relación Potencia/Energía de almacenamiento

La relación Potencia/Energía del sistema se define como la relación entre la Densidad de Potencia (PD) y la Densidad de Energía (ED) del Sistema de Almacenamiento, tal como se presenta en la Ecuación 4.2.

$$P/E = \frac{P_{ESS}[Wkg^{-1}]}{E_{ESS}[Whkg^{-1}]} [W \cdot Wh^{-1}] \quad (4.2)$$

En la Tabla 4.1 se presentan algunos valores típicos de Densidad de Potencia y Energía para los ESS mas relevantes (Pede, 2004).

ESS	P/E	PD	ED
Tecnología	$W \cdot Wh^{-1}$	$W \cdot kg^{-1}$	$Wh \cdot kg^{-1}$
Baterías de Plomo Ácido	10	300	30
Baterías de Ni-MH	10	4-500	50-70
Supercapacitores	> 100	1000	5

Tabla 4.1: Características de Potencia y Energía de los ESS más utilizados.

Estos valores crecen constantemente con el desarrollo de la tecnología. En particular, algunos SC con tecnología de doble capa asimétrica poseen densidades de energía muy superiores a la cifra presentada en la tabla, alcanzando los $[40Whkg^{-1}]$ (Arbizzani, 2008).

Por ejemplo, a partir de la información presentada en la tabla, se observa que los SC típicamente tienen una relación P/E 10 veces superior o más que las baterías clásicas. No obstante las baterías poseen densidades de energía mucho más elevadas que los SC.

Por otra parte, como ventaja adicional, los SC admiten entre 500.000 y 1.000.000 de ciclos de carga/descarga profunda con solamente pequeños cambios en sus características (pueden sufrir entre un 10 % y un 20 % de degradación en su capacidad y resistencia), presentando una alta eficiencia de carga/descarga (Burke, 2000).

Dadas sus características, y la información presentada, se puede observar que en algunas aplicaciones, como por ejemplo, en vehículos eléctricos basados en baterías, estas últimas y los SC no necesariamente compiten entre sí, sino que se complementan (Feroldi, 2009).

4.6. Supercapacitores como ESS

Tal como fue mencionado en la sección anterior, los Supercapacitores (SC) son una de las novedades más interesantes en el campo del almacenamiento de energía de los últimos diez años. Entre las potenciales aplicaciones se destacan aquellas dónde se necesita una gran cantidad de energía en un tiempo relativamente corto, tales como fuentes de alimentación ininterrumpida en combinación con baterías y fuentes híbridas de potencia en combinación con alguna fuente de generación alternativa como las PEMFC. Son dispositivos atractivos dadas su alta densidad de energía y potencia en comparación con otros, su larga vida útil y su gran cantidad de ciclos de carga/descarga permitidos.

La celda de un SC se compone básicamente de dos electrodos, un separador y un electrolito, tal como se aprecia en la Figura 4.9. Los electrodos están constituidos de un colector metálico de alta conductividad eléctrica y de un material activo de gran superficie, construido a partir de un material de superficie altamente irregular a los efectos de obtener mayor área efectiva y como consecuencia mayor capacidad. Ambos electrodos están separados por una membrana (separador) muy delgada (del orden de unas decenas de nm), que permite la movilidad de los iones cargados, pero evita el intercambio de cargas entre ambos. Este compuesto es posteriormente enrollado en forma cilíndrica o rectangular y colocado dentro de un recipiente contenedor. Todo el conjunto está impregnado con un electrolito, el cuál puede ser de estado sólido, de tipo orgánico o acuoso, dependiendo de los requisitos de potencia de la aplicación. La tensión de trabajo del supercapacitor está principalmente limitada por la tensión de descomposición del electrolito y éste valor depende fuertemente de la temperatura ambiente y la intensidad de corriente. Actualmente la tecnología permite obtener, dado el delgado espesor del separador, tensiones por celda del orden de $2V$ a $4V$, con densidades de energía aproximadas en el rango de $0,3$ a $5 Wh/kg$. La capacidad de un SC puede ser muy alta, de hasta varios miles de faradios.

4.6.1. Características eléctricas de un SC.

A continuación, se describen brevemente las características más relevantes de un SC, a considerar para su dimensionamiento en una aplicación particular.

Capacidad.

Corresponde a su capacidad nominal C_{SC} . Conocida también como “capacidad de CC” y especificada en faradios [F]. Luego su “capacidad real” es la capacidad dentro de los límites de tolerancia especificados por el fabricante.

Tensión de operación.

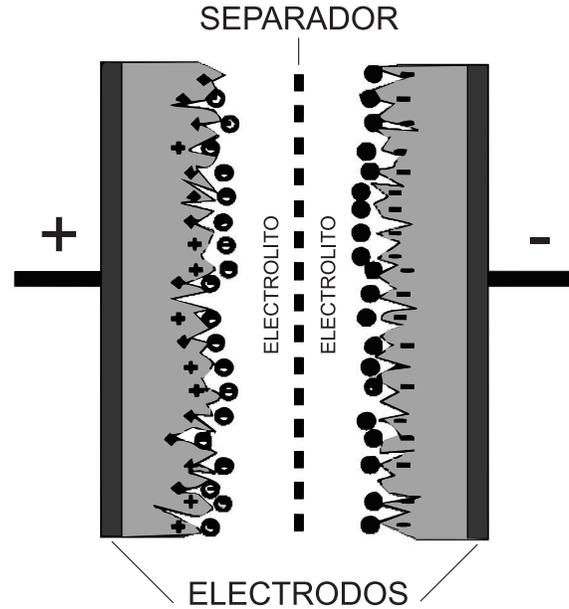


Figura 4.9: Estructura interna de un SC.

Los SCs son componentes de baja tensión y para su funcionamiento seguro es necesario que la misma se mantenga dentro de los límites especificados. Su valor nominal es la tensión de CC máxima o de pico que puede ser aplicada continuamente dentro de un rango de temperatura de operación definido. Este límite está dado por la tensión de ruptura del electrolito, que tiene un valor típico del orden de 2,4V para una celda simple. Dado que este valor es menor que la requerida generalmente por cualquier aplicación particular, para alcanzar valores superiores es necesario conectar varias celdas en serie. Además, en esta situación, como cada celda puede tener una ligera diferencia en el valor de su capacidad y su resistencia equivalente serie, es necesario “balancear” pasivamente o activamente las mismas. El balanceo pasivo emplea resistencias en paralelo con cada celda y estabiliza la tensión. El balanceo activo puede incluir un sistema de gestión electrónico de tensión para balancear cada celda del conjunto.

Resistencia interna.

Durante la carga o descarga de un SC se produce un movimiento de los portadores de carga en el electrolito a través del separador hacia los poros del electrodo. Durante este movimiento ocurren pérdidas que pueden atribuirse a la existencia de una resistencia interna en la celda. Esta resistencia interna R_i se define como resistencia equivalente serie de continua R_{ESR-CC} y puede calcularse a partir de la expresión de la Ecuación 4.3, dónde se considera una variación de tensión del SC ΔV_{SC} debida a una corriente de descarga constante $I_{SC-desc}$.

$$R_i = R_{ESR-CC} = \frac{\Delta V_{SC}}{I_{SC-desc}} \quad (4.3)$$

El valor de R_{ESR-CC} es provisto por el fabricante y los valores de ΔV_{SC} e $I_{SC-desc}$ se especifican según la norma IEC 62391-1. Esta resistencia limita las corrientes pico de carga/descarga y, junto con C_{SC} , establecen la constante de tiempo $\tau_{SC} = R_{ESR-CC} \cdot C_{SC}$. La R_{ESR-CC} no debe confundirse con la resistencia interna de CA definida como resistencia equivalente serie de CA (R_{ESR-CA}) que normalmente se especifica para los capacitores convencionales. Se mide a una frecuencia de 1 kHz y en comparación con la resistencia de CC, ésta es más pequeña.

Límite en la corriente de carga y descarga.

En el almacenamiento de energía eléctrica en SC la corriente no está limitada por reacciones químicas como sucede en las baterías. Las corrientes sólo están limitadas por la R_{ESR-CC} , que es claramente inferior a la de estas últimas. Esta resistencia produce pérdidas internas ($P_{perd} = I_{SC}^2 \cdot R_{ESR-CC}$) que generan calor, que debe ser liberado al ambiente para mantener una temperatura de funcionamiento estable por debajo de la temperatura máxima admisible.

Los parámetros máximos especificados por el fabricante para la cantidad de ciclos de carga/descarga incluyen las corrientes de carga y descarga y la duración y frecuencia de los picos de corriente que puede manejar el dispositivo. Se especifican dentro del rango de temperatura y para el rango completo de tensión de operación, para un tiempo de vida útil definido.

Densidad de energía y de potencia

La energía específica que puede almacenar un SC está dada por la Ecuación 4.4.

$$E_{SC-eff} = \frac{1}{2} \cdot C_{SC} \cdot V_{SC-w}^2 \quad (4.4)$$

Esta cantidad representa la energía efectiva que un SC puede entregar, donde, V_{SC-w} es su tensión de operación. Sin embargo, en la práctica solo una fracción de esta energía se encuentra disponible. La caída de tensión y la constante de tiempo debida a la resistencia interna, reducen la energía disponible que puede extraerse durante un intervalo finito de tiempo y esto debe considerarse en el dimensionamiento del SC. Luego, si durante la descarga se permite una disminución de la tensión desde V_{SC-w} a V_{SC-min} , la energía extraída está dada por la Ecuación 4.5.

$$E_{SC-eff} = \frac{1}{2} \cdot C_{SC} (V_{SC-w}^2 - V_{SC-min}^2) \quad (4.5)$$

Asimismo, la potencia pico máxima P_{SC-max} que puede extraerse a una tensión en bornes V_{SC-w} está dada por la Ecuación 4.6.

$$P_{SC-max} = \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{SC-w}^2}{R_{ESR-CC}} \quad (4.6)$$

La P_{SC-max} corresponde a la potencia entregada por un único pulso (de determinada amplitud) rectangular de corriente pico para una tensión y duración especificadas. En la práctica, este pulso de corriente no es rectangular, debido a las constantes de tiempo inherentes al SC y además la tensión es menor, causada por la caída interna en R_{ESR-CC} . Por consiguiente, la norma IEC 62391-2 propone una expresión para calcular una potencia pico máxima mas “real” en aplicaciones de potencia, conocida como Potencia Pico Máxima Efectiva, dada por la Ecuación 4.7.

$$P_{SC-eff} = \frac{1}{8} \cdot \frac{V_{SC}^2}{R_{ESR-CC}} \quad (4.7)$$

4.6.2. Consideraciones de operación del SC.

Para preservar la vida útil de estos dispositivos es recomendable jamás superar su tensión nominal de trabajo ni permitir sobre-elevaciones de temperatura de almacenamiento y funcionamiento por encima de los valores recomendados por su fabricante. Por ejemplo, a modo de referencia, la vida útil de una celda se reduce a la mitad por cada 100 mV o 10 °C de operación, por encima de sus valores de tensión y/o temperatura nominales.

Respecto al envejecimiento del SC, éste se debe fundamentalmente al deterioro del electrolito que ocurre debido a impurezas generadas a partir de reacciones internas de reducción u oxidación. Esto conlleva a un incremento gradual de la resistencia interna (R_{ESR-CC}) del SC, una reducción de su capacidad y a un aumento de su tasa de auto-descarga. Este proceso de envejecimiento es sensiblemente afectado con el incremento en la tensión de operación por encima de su valor nominal, por lo que es recomendable que esta última sea monitoreada. Asimismo, un incremento en la R_{ESR-CC} produce a elevadas corrientes un aumento indeseado de la temperatura interna del SC, algo que debe considerarse en aplicaciones de gran potencia.

4.7. Unidades de Acondicionamiento de Potencia para SHGEE basados en PEMFC/ESS

Los sistemas de acondicionamiento de potencia, se utilizan para transformar un suministro eléctrico de corriente alterna a continua, viceversa o en el mismo tipo, pero de características diferentes (otros niveles de tensión, corriente o frecuencia si corresponde). En el caso particular de las PEMFC y dispositivos de almacenamiento tales como Baterías y SC, la energía de salida es naturalmente de corriente continua. Así, de acuerdo a la estructura de SH utilizada puede ser necesario transformarla en alterna o en una continua de diferentes niveles de tensión o corriente.

Para las estructuras de corriente continua aquí estudiadas el uso de un convertidor electrónico de potencia como interfaz entre la PEMFC o el ESS y el Bus de CC tendrá como objetivo principal, dependiendo de la aplicación y las magnitudes eléctricas en juego, producir una tensión de salida continua regulada o ajustar la potencia inyectada desde la fuente hacia la carga. En general, se desea que éstas unidades de conversión sean pequeñas, livianas, robustas y por sobre todo, eficientes.

En aplicaciones de generación de energía eléctrica, dónde el rendimiento de conversión es un factor importante se utilizan Convertidores Electrónicos CC/CC conmutados (“convertidores CC/CC” como se hará referencia a ellos de aquí en adelante). Estos basan su funcionamiento en el control del estado Encendido (ON) y Apagado (OFF) de llaves de potencia, implementadas con dispositivos semiconductores. Debido a la baja pérdida de potencia en ambos estados puede lograrse alta eficiencia de conversión, minimizando las pérdidas. La frecuencia de conmutación es elevada, típicamente del orden de unas decenas de kHz, dependiendo de la potencia. De esta manera, dada la capacidad de los convertidores electrónicos de funcionar a alta frecuencia, en caso de requerirse aislación eléctrica entre la entrada y salida del convertidor y/o la adaptación de niveles tensión (relaciones de conversión) elevadas, se puede incorporar un transformador de alta frecuencia cuyo tamaño y peso es pequeño, en comparación con los pesados transformadores empleados en los clásicos reguladores lineales (Mohan, 1989).

Respecto a la PEMFC, es importante considerar el rizado en la corriente que ésta entrega, si se conecta al sistema a través de un convertidor CC/CC. Afortunadamente, un estudio realizado sugiere que corrientes con contenido armónico superior a 400Hz tienen un impacto menor sobre el funcionamiento de la FC (Gemmen, 2002). En caso de utilizar convertidores CC/CC, que trabajan a frecuencias medias y altas (del orden de decenas de kHz), el proceso electroquímico puede ser completamente desacoplado y como consecuencia no verse afectado por estas variaciones rápidas de la corriente. Sin embargo, estos estudios sólo consideran que un factor de rizado menor al 4% en la corriente de salida de la FC tendrá un impacto insignificante sobre la membrana de difusión y no afectará su vida útil, pero no dicen nada respecto a amplitudes de rizado mayores, incluso del orden de la corriente media de salida. En este sentido, es

importante considerar que no es sencillo obtener un rizado de baja amplitud cuando las potencias y, en particular, las corrientes involucradas son elevadas (del orden de unas decenas de ampere). Conseguir este tipo de amplitudes en el rizado implica que pueda incrementarse indeseablemente el costo y peso relativo del sistema. Por esta razón, para obtener un rizado de corriente compatible con la PEMFC sin aumentar demasiado la complejidad y costo del sistema, puede resultar conveniente agregar un filtro adecuado entre la PEMFC y el convertidor electrónico, como se verá mas adelante.

En cuanto a la ESS, es necesario tener en cuenta que en caso de conectarse al Bus de CC a través de un convertidor electrónico, éste último debe tener la capacidad de transportar el flujo de potencia en ambos sentidos (bidireccional). Esto permitirá al ESS entregar/absorber energía hacia/desde el Bus de CC, permitiendo un óptimo aprovechamiento del dispositivo.

4.8. Elección de la arquitectura del SHGEE desarrollado

De acuerdo a lo expuesto en las secciones anteriores se eligió como estructura para el SH desarrollado en esta tesis la paralela de múltiples convertidores basada en PEMFC/ESS, con Bus de CC común. El motivo de esta elección es principalmente su gran versatilidad, ya que por un lado, es posible añadir fuentes de generación y/o almacenamiento adicionales sin realizar grandes cambios en el sistema y por otro controlar ambos canales (a través de los convertidores) según los objetivos buscados. Como dispositivo de ESS se optó por un SC, dadas las ventajas mencionadas que estos proveen cuando se combinan con PEMFC. En la Figura 4.10 se presenta la estructura general del SH desarrollado.

De esta manera, las características adoptadas permiten producir energía eléctrica limpia en forma continua logrando una muy buena respuesta dinámica ante variaciones abruptas de la potencia demandada, haciéndola particularmente interesante en sistemas de Transporte y Generación Distribuida, dos aplicaciones de importante relevancia para el reemplazo de fuentes de origen fósil en el camino hacia la descarbonización.

4.8.1. Selección de la topología del convertidor CC/CC asociado a la PEMFC

La mayoría de las PEMFC comerciales producen una tensión de salida comprendida entre $24 - 150V_{CC}$. Entre los distintos fabricantes no se ha establecido aún un rango estándar de valores de tensión de salida. Un convertidor CC/CC adecuado debe permitir compatibilizar la tensión de salida de la FC con los requerimientos del SH del

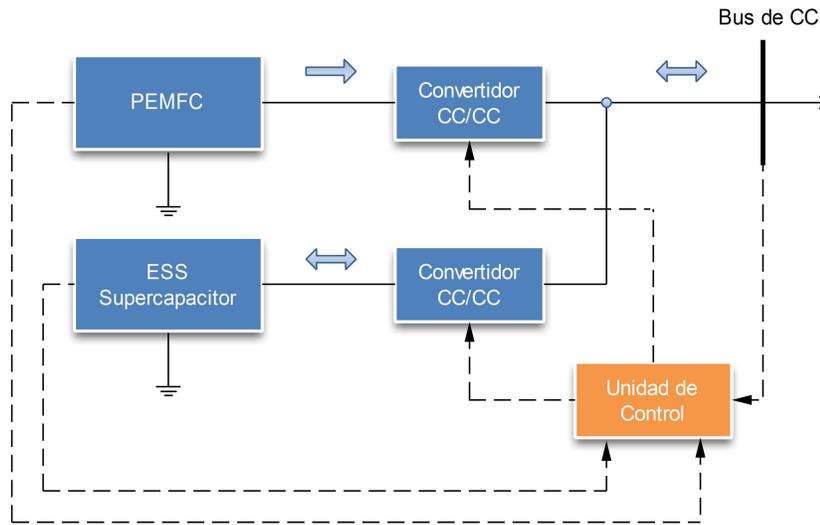


Figura 4.10: Estructura elegida para el SH desarrollado en esta tesis.

cual forma parte, operar en forma eficiente bajo todas las condiciones de funcionamiento y añadir poco costo relativo al conjunto.

De todas las topologías de convertidores CC/CC existentes y ampliamente estudiadas en la bibliografía especializada, la que resulta de mayor interés en gran parte de las aplicaciones y que fue seleccionada en este trabajo, dadas su sencillez, alto rendimiento y versatilidad, es la correspondiente al convertidor CC/CC elevador (boost) no aislado, unidireccional. Su topología se muestra en la Figura 4.11.

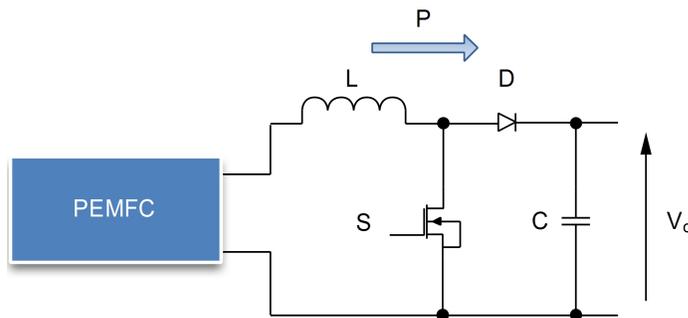


Figura 4.11: Convertidor elevador unidireccional no aislado.

Cabe mencionar que existen otras alternativas ventajosas, principalmente desde el punto de vista del rendimiento de conversión; sin embargo, su complejidad constructiva, cantidad de elementos, costos y complejidad de control, hace que en el caso de los objetivos que se persiguen en esta tesis, el convertidor electrónico elegido sea la opción más adecuada (Liu, 2006).

Este convertidor permite que la corriente fluya solamente desde la FC hacia el Bus

de CC. Es importante considerar que las PEMFC, no admiten corriente inversa. Esta condición puede traer graves consecuencias internas provocando el daño irreversible de la membrana (stack). Por lo tanto, para evitar el flujo de corriente hacia la PEMFC, en caso de utilizar una topología de convertidor diferente, que permita el flujo de corriente en ambos sentidos, un diodo de bloqueo de seguridad se debe insertar en serie con la salida de la FC para su protección.

Por otra parte, el convertidor elegido posee una relación de conversión limitada (típicamente 1:4 con un diseño bien logrado) (Mohan, 1989) fundamentalmente por las pérdidas debidas a los componentes reales. Por lo tanto, su diseño debe asegurar una relación de conversión tal que para la mínima tensión de salida de la PEMFC se pueda alcanzar la tensión de salida deseada. Esto implica que antes de diseñar la etapa de potencia es necesario conocer las características eléctricas de la PEMFC a utilizar.

4.8.2. Selección de la topología del convertidor CC/CC asociado al SC

De forma similar a lo que ocurre con la PEMFC, existen un gran número de topologías para vincular el SC al Bus de CC del SH (Kirubakaran, 2009b). Considerando criterios similares de selección a lo utilizados anteriormente, se eligió para el SC la topología elevadora no aislada, pero en este caso, bidireccional. En la Figura 4.12 se muestra el circuito correspondiente.

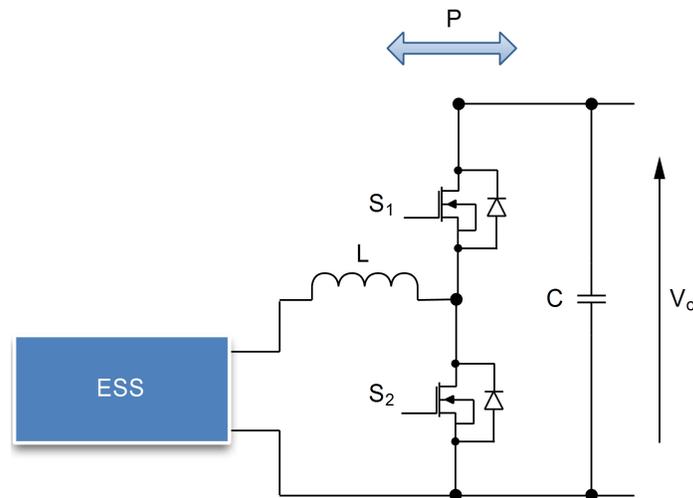


Figura 4.12: Convertidor elevador bidireccional no aislado.

Ésta, al igual que la utilizada en la PEMFC, posee varias ventajas atractivas, tales como baja complejidad constructiva, pocos componentes, bajo costo relativo, muy buen rendimiento y es simple de controlar (Kirubakaran, 2009a), logrando que, para los objetivos que esta tesis persigue, sea la opción que mejor se adapta.

4.9. Resumen del Capítulo

Considerando las PEMFC como una alternativa de importante proyección para la generación de electricidad en forma sustentable, en este capítulo se describieron sus aspectos fundamentales y áreas de aplicación inmediatas. Se analizaron las configuraciones más relevantes de Sistemas Híbridos (SH) basados en estos dispositivos y presentaron las ventajas de aquellos que utilizan ESS como fuente de energía auxiliar. En este contexto, se demostraron las excelentes prestaciones de los Supercapacitores como dispositivos para el almacenamiento de energía y su potencial utilización en combinación con PEMFC para la conformación de SH de excelente desempeño.

Finalmente, de acuerdo al estudio anterior realizado, se presentó la estructura elegida para el Sistema Híbrido desarrollado en esta tesis. En este sentido, se optó por una configuración paralela de múltiples convertidores basada en PEMFC/SC. El principal motivo de esta elección se debe a su gran versatilidad y utilización en múltiples aplicaciones, ya sean en transporte como en GD, donde es importante una alimentación continua con buena respuesta dinámica. Asimismo, se eligió como topología para los convertidores electrónicos asociados a ambas fuentes, la elevadora no aislada en sus dos versiones: unidireccional y bidireccional. Estos resultan una excelente alternativa, dada su poca cantidad de componentes, simplicidad de control y muy buen rendimiento de conversión.

A continuación, en los próximos dos capítulos se realizará primero un análisis de la topología elegida para los convertidores y luego, en el Capítulo 6 se presentará el diseño e implementación de todos los módulos que componen el Sistema Híbrido desarrollado.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR CC/CC ELEVADOR NO AISLADO

5.1. Introducción

En este capítulo se estudian los convertidores electrónicos CC/CC utilizados como interfaces de acondicionamiento de potencia en el SH desarrollado en esta tesis, presentado en el capítulo previo.

A los efectos de comprender su principio de funcionamiento y disponer de las ecuaciones necesarias para su diseño, se realiza a continuación un análisis de sus modos de operación y los aspectos principales a considerar para su implementación, en lo que se refiere al desempeño de estos equipos con componentes reales.

5.2. Análisis de Funcionamiento

Tal como fue expuesto, la topología elegida para los convertidores CC/CC es la elevadora de tensión (boost) no aislada. Este convertidor CC/CC se presenta en dos versiones: unidireccional y bidireccional. La primera, solo permite flujo de potencia desde la fuente hacia la carga; en cambio, la segunda permite que la potencia fluya en

ambos sentidos, desde la fuente hacia la carga y viceversa.

A continuación, en una primera parte, se revisa el funcionamiento del convertidor en su versión unidireccional. En la Figura 5.1 se presenta su circuito eléctrico.

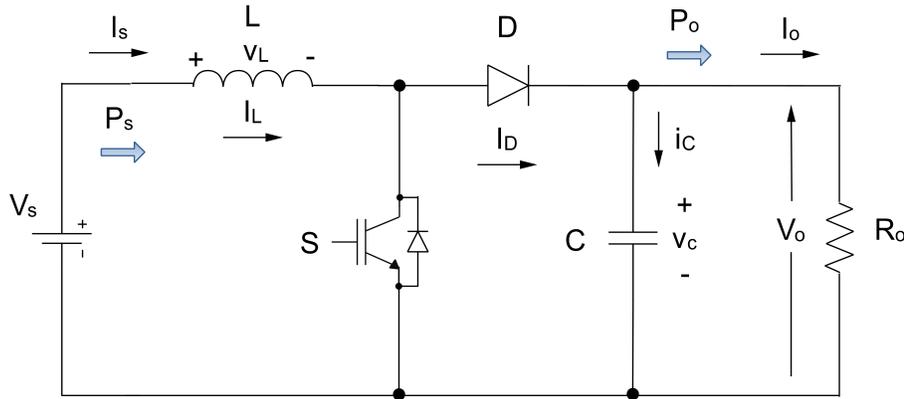


Figura 5.1: Circuito del convertidor elevador.

El convertidor consiste en un inductor L , una llave controlada S , un diodo D y un capacitor de salida C . Se considera que el mismo es alimentado por un generador ideal de tensión V_s y la carga equivalente de salida se representa por una resistencia R_o .

La llave (S) permanece cerrada un tiempo t_{on} . Durante este intervalo de tiempo, el diodo (D) está polarizado en inversa, aislando la salida de la entrada. Así, la fuente de entrada V_s provee energía al inductor, mientras el capacitor de salida se descarga a través de la resistencia de carga, manteniendo $V_o \simeq cte$. La corriente a través del inductor crece linealmente hasta que la llave se “abre”. En este instante, la corriente a través del inductor produce la conmutación del diodo al estado de conducción, proporcionando la I_o y reponiendo carga a C . De esta manera, ahora la corriente a través del inductor decrece linealmente hasta un valor mínimo, cuando se produce una nueva conmutación de la llave y se reinicia el período T_s . El diodo conduce durante un intervalo de tiempo t_{off} . Si al final de cada período de conmutación, cuando la llave es “encendida” nuevamente, la corriente a través del inductor no se ha hecho cero, se dice que el convertidor funciona en Modo de Conducción Continua (MCC) y el diodo se comporta como una llave, que conmuta en forma complementaria a S . En la Figura 5.2 se presentan los circuitos equivalentes del convertidor para cada posición de la llave, en MCC. Por otro lado, si la corriente a través del inductor alcanza el valor cero antes del comienzo del nuevo ciclo de conmutación, entonces el convertidor funciona en Modo de Conducción Discontinua (MCD).

Este convertidor se puede controlar de dos formas diferentes. La primera, considerando un tiempo de conducción de la llave t_{on} constante y el período de conmutación T_s variable, es decir variando la frecuencia de conmutación. Y la segunda, operando a T_s constante y variando el tiempo de conducción t_{on} , conocida como modulación de ancho de pulso (PWM). En este caso, se opta por la segunda puesto que la primera presenta el inconveniente de que, dada la variación de frecuencia el rizado

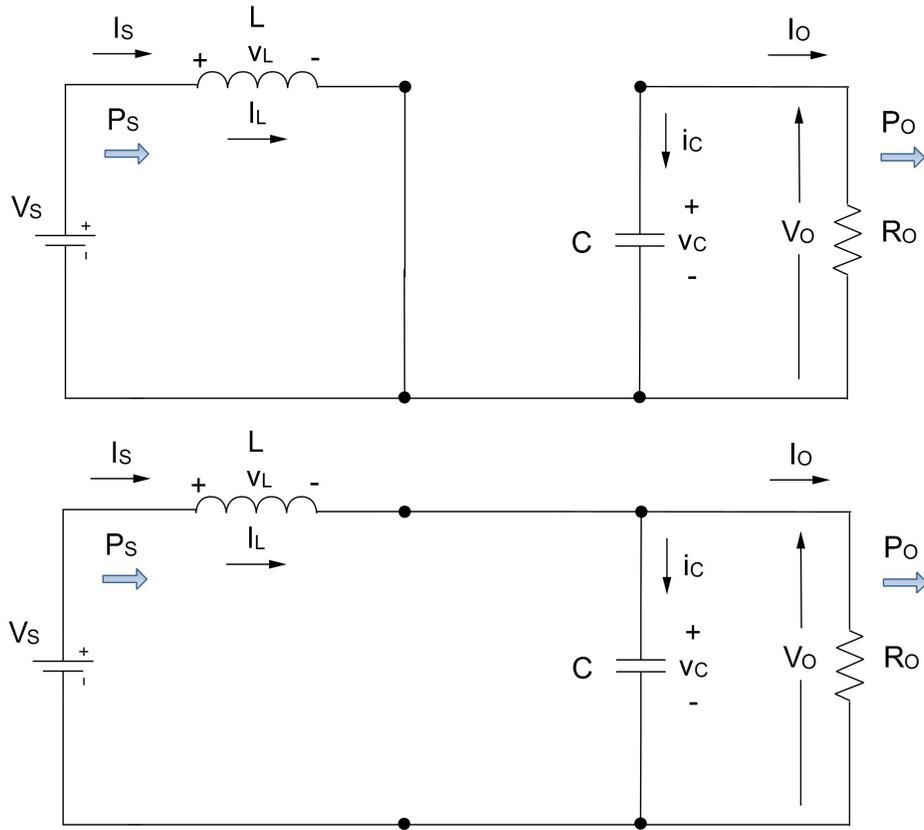


Figura 5.2: Circuitos equivalentes del convertidor para MCC.

a la salida es variable, resultando más dificultoso el diseño del convertidor y complejo su control.

De esta manera, en el esquema de modulación PWM, $T_s = t_{on} + t_{off}$ es constante y se define $D = t_{on}/T_s$, término conocido como “ciclo de trabajo”.

5.2.1. Análisis del convertidor operando en MCC.

Para el análisis de funcionamiento y obtención de las ecuaciones de estado estacionario para el convertidor funcionando en MCC es necesario considerar las hipótesis que se enumeran a continuación:

1. Las formas de onda de tensión y corriente son periódicas, por lo tanto las tensiones y corrientes involucradas admiten representación en serie de Fourier.
2. Se puede aplicar el principio de superposición componente a componente de frecuencia.

3. El valor medio de tensión en el inductor y valor medio de corriente en el capacitor son cero.
4. Se opera a frecuencia de conmutación constante f_s , siendo $T_s = 1/f_s = cte$, el interruptor está cerrado un tiempo $D \cdot T_s$ y está abierto el resto del tiempo $(1 - D) \cdot T_s$.
5. La constante de tiempo $\tau_o = R_o \cdot C \gg T_s$, por lo tanto, la tensión de salida se mantiene aproximadamente constante en un valor V_o .
6. Los componentes del circuito son ideales. Es decir, los tiempos de conmutación de S y D se consideran nulos y no se tienen en cuenta las caídas de tensión en los mismos en estado de conducción. Los elementos pasivos L y C no presentan pérdidas.

En la Figura 5.3 se muestran la tensión (v_L) y la corriente (i_L) en el inductor. Como en un período de conmutación (T_s) la tensión media sobre el inductor debe ser cero, las áreas A_1 y A_2 deben ser iguales. Esto se expresa en la Ecuación 5.1, lo que se conoce como balance “volts-segundo”.

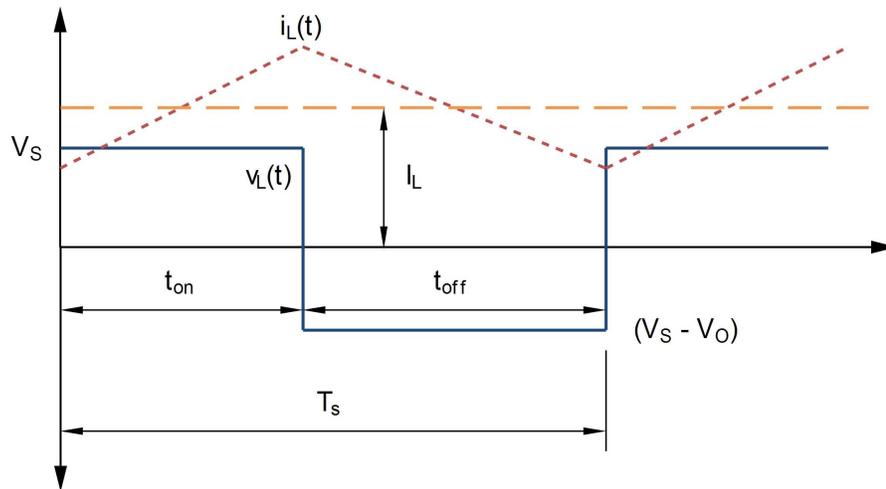


Figura 5.3: Tensión y corriente en el inductor en MCC.

$$V_s \cdot t_{on} + (V_s - V_o) \cdot t_{off} = 0 \quad (5.1)$$

Sabiendo que $T_s = t_{on} + t_{off}$ y dividiendo ambos miembros de la Ecuación 5.1 por este, se obtiene la relación entre la tensión de entrada V_s y la tensión media de salida V_o que se presenta en la Ecuación 5.2 y se conoce como “relación de conversión” del convertidor.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1 - D} \quad (5.2)$$

Como se consideran elementos ideales, sin pérdidas, se tiene que $P_s = P_o$. A partir de esta igualdad, se puede deducir fácilmente la relación entre las corrientes medias de entrada y salida en MCC, en la Ecuación 5.3.

$$\frac{I_o}{I_s} = 1 - D \quad (5.3)$$

Dónde,

I_o = Valor medio de la corriente de salida
 I_s = Valor medio de la corriente de entrada

Así, dado que I_L es igual I_s , a partir de la Ecuación 5.3, se obtiene:

$$I_L = I_s = \frac{I_o}{1 - D} \quad (5.4)$$

Luego, planteando la igualdad entre la potencia de entrada y de salida, es posible afirmar que $V_s \cdot I_L = V_o \cdot I_o = V_o^2/R_o$, siendo $R_o = V_o/I_o$ la resistencia equivalente de carga. Teniendo en cuenta la Ecuación 5.4, se obtiene la Ecuación 5.5 para la corriente media a través del inductor.

$$I_L = \frac{V_s}{(1 - D)^2 \cdot R_o} \quad (5.5)$$

Asimismo, el rizado pico a pico de corriente en el inductor está dado por la Ecuación 5.6.

$$\Delta i_L = \frac{V_s \cdot D \cdot T_s}{L} \quad (5.6)$$

Para obtener la expresión del rizado de tensión de salida del convertidor debemos previamente conocer la corriente en el capacitor. Recordemos que una de las hipótesis

del análisis es que la constante de tiempo $\tau_o \gg T_s$. Esto significa que la reactancia del capacitor a la frecuencia de conmutación es mucho menor que la resistencia de carga. Esto nos permite considerar, con una buena aproximación, que la corriente del capacitor será:

$$i_C = i_D - I_o \quad (5.7)$$

Esta corriente se ilustra en la Figura 5.4.

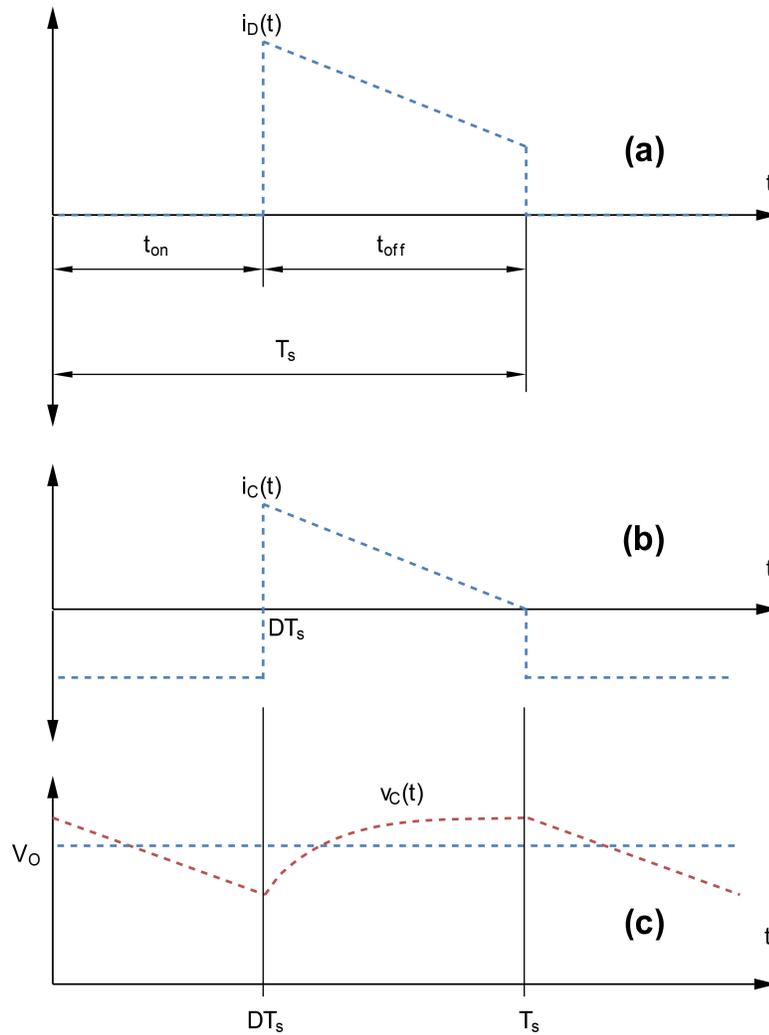


Figura 5.4: Corriente en el diodo y corriente y tensión en el capacitor.

El rizado de tensión se puede obtener como:

$$\Delta V_o = \frac{1}{C} \cdot \int_0^{DT_s} i_c(t) dt = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{V_o}{C \cdot R_o} \cdot D \cdot T_s \quad (5.8)$$

Y finalmente, el rizado de tensión expresado en forma relativa está dado por:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{R_o \cdot C f_s} \quad (5.9)$$

En la Figura 5.4 se muestra la tensión de salida instantánea del convertidor, donde se aprecia el rizado de tensión analizado previamente.

5.2.2. Efecto de los elementos parásitos sobre el desempeño del convertidor en MCC.

En esta sección se analizará el efecto que tiene sobre la relación de conversión y el rendimiento del convertidor las caídas de tensión en la llave y el diodo y las resistencias parásitas en el capacitor e inductor.

1. **Caída de tensión en la llave y el diodo.** En la práctica las caídas de tensión en la llave y el diodo, durante la conducción, pueden afectar significativamente el funcionamiento del convertidor.

La tensión en el inductor con la llave cerrada resulta como en la Ecuación 5.10.

$$v_L = V_s - V_{Q-on} \quad (5.10)$$

Dónde, V_{Q-on} es la caída de tensión de la llave, en conducción. Con la llave abierta, siendo la tensión en directa del diodo es V_{D-on} , la tensión en el inductor vale:

$$v_L = V_s - (V_o + V_{D-on}) \quad (5.11)$$

Planteando el balance "volts-segundo", se obtiene la Ecuación 5.12.

$$V_o = \frac{V_s}{(1-D)} - V_{D-on} - \frac{V_{Q-on} \cdot D}{(1-D)} \quad (5.12)$$

Se puede observar que considerando la llave y el diodo como dispositivos reales, la tensión de salida V_o es menor que en el caso ideal (Ecuación 5.2). Esta situación, además de provocar una reducción en la tensión de salida, afecta indeseablemente la eficiencia del convertidor. Por lo tanto, en particular, cuando las tensiones de operación son bajas, es necesario seleccionar adecuadamente los dispositivos, de manera de evitar que esta condición afecte el desempeño del conjunto.

2. Resistencia del Capacitor: Efecto sobre el rizado en V_o .

Un capacitor real posee elementos parásitos tales como una resistencia equivalente serie (ESR), una paralelo (EPR) y una inductancia equivalente serie (ESL). Esta última junto con la capacidad, define la frecuencia de autoresonancia del capacitor $f_o = 1/(2\pi\sqrt{LC})$, de manera que si $f_s \ll f_o$, entonces la ESL puede despreciarse. La EPR, en general, tiene un valor elevado, y no tiene un peso significativo en el desempeño del CC/CC, por lo que será ignorado. Por último, la ESR afecta al rizado de la tensión de salida, situación que analizaremos a continuación.

La componente del rizado debido a la resistencia equivalente serie r_c puede estimarse considerando el circuito de la Figura 5.5.

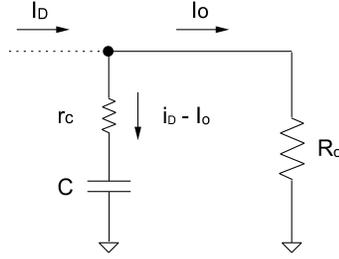


Figura 5.5: Modelo utilizado para el cálculo de rizado debido a r_c .

La corriente a través de r_c es la que se mostró en la Figura 5.4. A partir de la misma se puede encontrar la Ecuación 5.13, que da la amplitud de la componente del rizado en la tensión de salida debido a r_c .

$$(\Delta V_o)_{ESR} = V_o \cdot \frac{r_c}{R_o} \cdot \left[1 + \frac{D[R_o(1 - D^2) + 2Lf_s]}{2Lf_s(1 - D)} - \frac{R_o D}{Lf_s} \right] \quad (5.13)$$

Esta componente del rizado se sumará a la producida por la capacidad, calculada previamente a partir de la Ecuación 5.9, quedando la Ecuación 5.15 para el cálculo del rizado en la tensión V_o .

$$(\Delta V_o)_{total} = \Delta V_o + (\Delta V_o)_{ESR} = \quad (5.14)$$

$$= \frac{V_o \cdot D}{R_o \cdot C f_s} + V_o \cdot \frac{r_c}{R_o} \cdot \left[1 + \frac{D[R_o(1 - D^2) + 2Lf_s]}{2Lf_s(1 - D)} - \frac{R_o D}{Lf_s} \right] \quad (5.15)$$

El efecto de r_c puede ser apreciable, produciendo en algunos casos un rizado en la tensión de salida no admisible. Así, es importante utilizar capacitores diseñados específicamente para estas aplicaciones con baja ESR. Dado que la ESR suele incrementarse con el aumento del valor de capacidad, para reducir su efecto suele formarse la capacidad total C necesaria combinando varios capacitores en paralelo de menor valor. En la Figura 5.6 se muestra la tensión de salida V_o considerando el efecto de r_c .

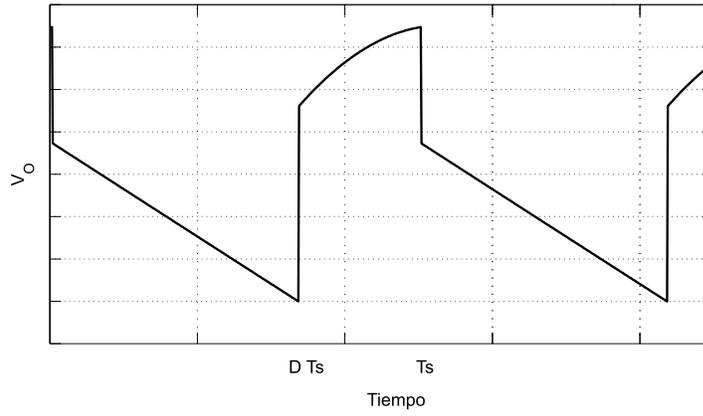


Figura 5.6: Tensión de salida considerando el efecto de r_c .

3. Resistencia equivalente serie del inductor.

Este parámetro es el que más afecta al rendimiento del convertidor y limita la relación de conversión máxima. Para investigar el efecto de la resistencia de inductor en la tensión de salida se supone que la corriente I_L es aproximadamente constante. Asimismo, para simplificar el análisis, se desprecian las demás pérdidas, tal cual se expresa en la Ecuación 5.16.

$$P_s = V_s \cdot I_s = P_o + P_{r_L} = V_o \cdot I_o + I_L^2 \cdot r_L \quad (5.16)$$

Teniendo en cuenta la Ecuación 5.4 y como $I_D = I_o$, reemplazando en la Ecuación 5.16 se obtiene:

$$V_s = V_o \cdot (1 - D) + I_L \cdot r_L \quad (5.17)$$

Y despejando finalmente la relación de conversión V_o/V_s , se obtiene la expresión de la Ecuación 5.18.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{(1 - D)} - \frac{1}{(1 - D)^2} \cdot \left(\frac{r_L}{R_o} \right) \quad (5.18)$$

La relación de conversión ahora incluye un factor adicional que tiene en cuenta el efecto de r_L . En la Figura 5.7 se muestra como varía la relación de conversión en función de D , con r_L como parámetro.

Del análisis de la Figura 5.7 surge que la r_L debe ser pequeña comparativamente a R_o , de lo contrario se limita seriamente la máxima relación de conversión que se puede obtener.

Por otra parte, como se mencionó en un principio, la resistencia del inductor también afecta al rendimiento energético del convertidor. El rendimiento, considerando el efecto de r_L , está dado por la expresión de la Ecuación 5.19.

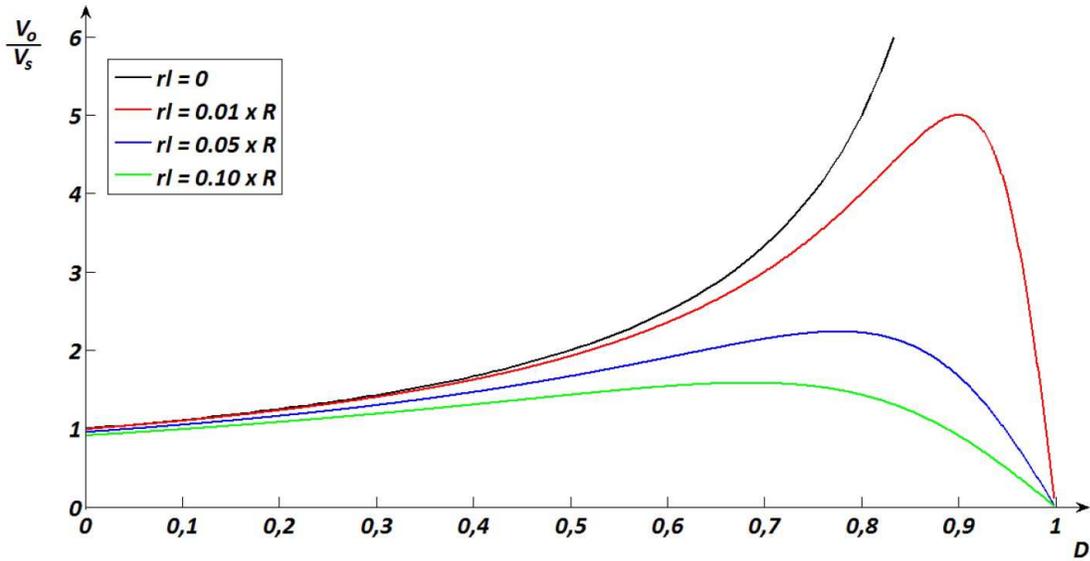


Figura 5.7: Relación de Conversión considerando el efecto de r_L .

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_{perdidas}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{r_L}{R \cdot (1-D)^2}\right)} \quad (5.19)$$

Por último, analizando la expresión anterior, se puede observar que cuando aumenta D , disminuye el rendimiento, como se indica en la Figura 5.8.

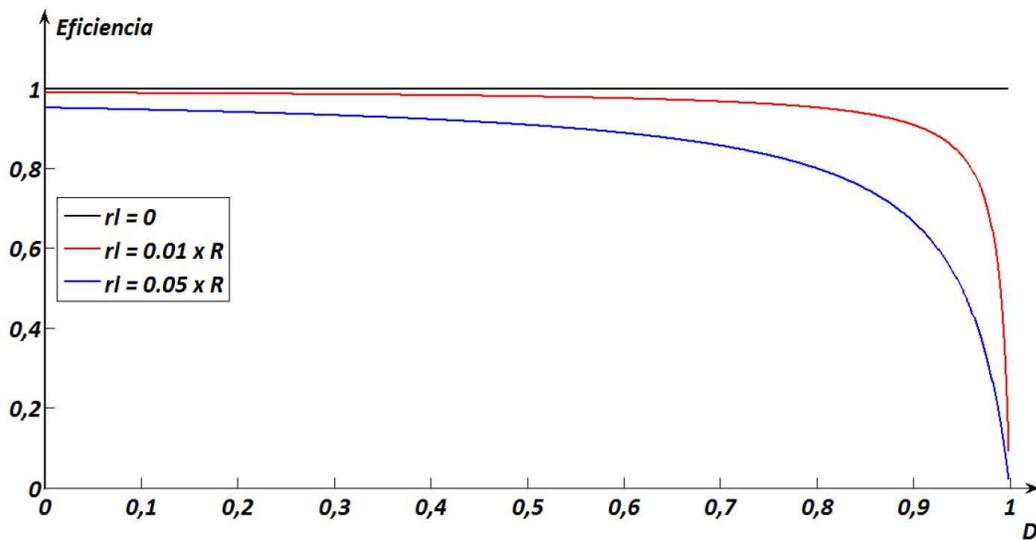


Figura 5.8: Rendimiento del Convertidor considerando el efecto de r_L .

5.2.3. Análisis del convertidor operando en MCD.

De acuerdo a lo dicho anteriormente, si durante el período en que la llave S se encuentra abierta, la corriente instantánea i_L llega a cero antes del inicio del próximo ciclo de conmutación, entonces se dice que el convertidor opera en MCD (Mohan, 1989). En la Figura 5.9 los circuitos eléctricos equivalentes para este modo de operación.

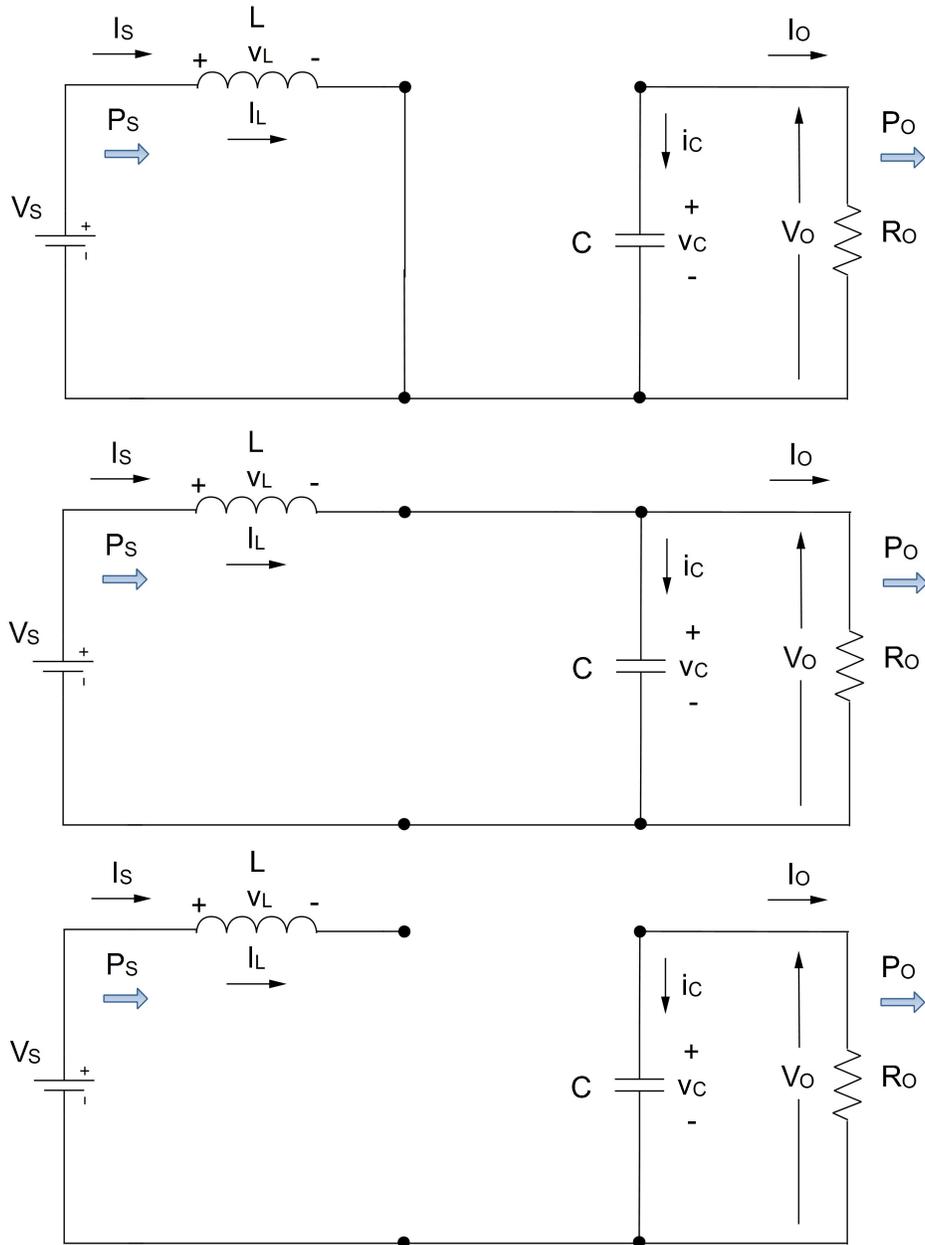


Figura 5.9: Circuitos equivalentes del convertidor para MCD.

Luego, para el análisis de funcionamiento y obtención de las ecuaciones de estado estacionario para el convertidor en MCD es necesario considerar las mismas

suposiciones enunciadas para el análisis realizado en MCC. En la Figura 5.10 se presentan las formas de onda de tensión y corriente de estado estacionario para el inductor en MCD.

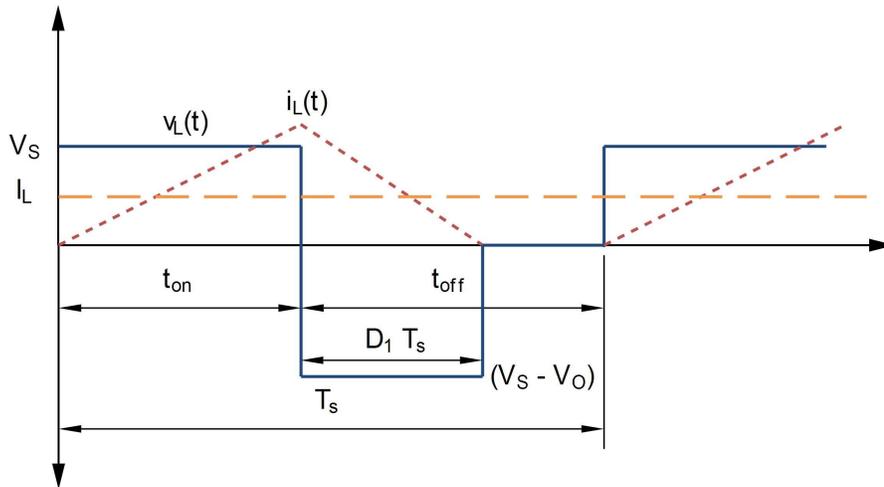


Figura 5.10: Tensión y corriente en el inductor en MCD.

Planteando el balance volts-segundo en un período de conmutación, obtenemos la Ecuación 5.20.

$$V_s \cdot D \cdot T_s + (V_s - V_o) \cdot D_1 \cdot T_s = 0 \quad (5.20)$$

Dónde, ahora $D_1 \cdot T_s$ es el tiempo que conduce el diodo. Con esta expresión se puede deducir la Ecuación 5.21 para la relación de conversión y además, considerando $P_s = P_o$, se obtiene fácilmente la Ecuación 5.22 que relaciona los valores medios de corriente de entrada y salida del convertidor.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{D_1 + D}{D_1} \quad (5.21)$$

$$\frac{I_o}{I_s} = \frac{D_1}{D_1 + D} \quad (5.22)$$

A partir de la forma de onda de corriente de la Figura 5.10, se puede obtener la Ecuación 5.23 para la corriente media en el inductor.

$$I_s = I_L = \frac{V_s}{2L} \cdot D \cdot T_s \cdot (D + D_1) \quad (5.23)$$

Combinando las Ecuaciones 5.22 y 5.23, se obtiene la expresión de la Ecuación 5.24 para la corriente de salida I_o .

$$I_o = \frac{V_s T_s}{2L} \cdot D \cdot D_1 \quad (5.24)$$

Entonces, a partir de las Ecuaciones 5.21 y 5.24 se obtiene la expresión para el D en MCD:

$$D = \sqrt{\left[\frac{4}{27} \cdot \frac{V_o}{V_s} \cdot \left(\frac{V_o}{V_s} - 1 \right) \cdot \frac{I_o}{I_{o-max}} \right]} \quad (5.25)$$

Dónde, I_{o-max} es la máxima corriente media en el límite de MCC y se puede calcular a partir de la Ecuación 5.26.

$$I_o = \frac{V_o T_s}{2L} \cdot D \cdot (1 - D)^2 \quad (5.26)$$

Considerando que la corriente media de salida es máxima cuando $D = 1/3$ (Mohan, 1989). En este punto, la expresión queda como en la Ecuación 5.27.

$$I_{o-max} = \frac{2}{27} \cdot \frac{V_o T_s}{2L} \quad (5.27)$$

Luego, reemplazando las Ecuaciones 5.26 y 5.27 en 5.25, se puede obtener la relación de conversión en MCD, como se presenta a continuación en la Ecuación 5.28.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{D^2 \cdot R_o \cdot T_s}{2L}} \quad (5.28)$$

Resulta importante destacar que, según la expresión anterior y a diferencia de lo que ocurre en MCC, la relación de conversión no depende únicamente de D , sino también

del periodo de conmutación T_s y la resistencia de carga de salida equivalente R_o . Se define:

$$K = \frac{2 \cdot L}{R_o \cdot T_s} \quad (5.29)$$

Que es un parámetro adimensional que da una medida de la tendencia del convertidor a operar en MCD. Existe un valor crítico de K que depende de D y se cumple que si:

$$\begin{cases} K < K_{critico} & \rightarrow MCD \\ K > K_{critico} & \rightarrow MCC \end{cases} \quad (5.30)$$

Para este convertidor el valor de $K_{critico}$ vale (Erickson, 1999):

$$K_{critico}(D) = D \cdot (1 - D)^2 \quad (5.31)$$

Para un ciclo de trabajo $D = 1/3$, se obtiene el máximo valor de $K_{critico}$ y vale $K_{critico}(1/3) = 4/27$. De esta manera, es posible expresar la relación de conversión como en la Ecuación 5.32.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{D^2}{K}} \quad (5.32)$$

En la Figura 5.11 se grafica la ecuación anterior, incluyéndose también a modo de comparación, la relación de conversión para MCC. Se observa que para valores de D medios y altos, cuando el convertidor es operado en MCD la relación de conversión es aproximadamente lineal con una pendiente de $1/\sqrt{K}$.

Como se observa en la Ecuación 5.29, K depende de R_o , por lo que la corriente de salida del convertidor determinará el modo de funcionamiento. Es entonces posible definir un valor de corriente crítica dada por la Ecuación 5.33.

$$I_{oc} = \frac{V_o}{L_c} \cdot \frac{D \cdot (1 - D)^2}{2 \cdot f_s} \quad (5.33)$$

Si la corriente I_o es menor que el valor crítico el convertidor operará en MCD. Esto se muestra en la Figura 5.12.

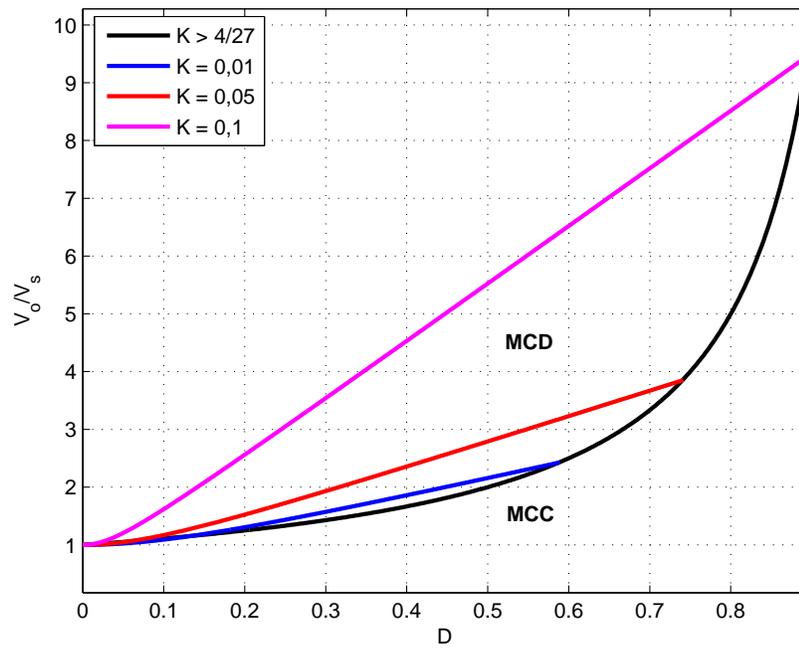


Figura 5.11: Relación V_o/V_s en MCD para diferentes valores de K .

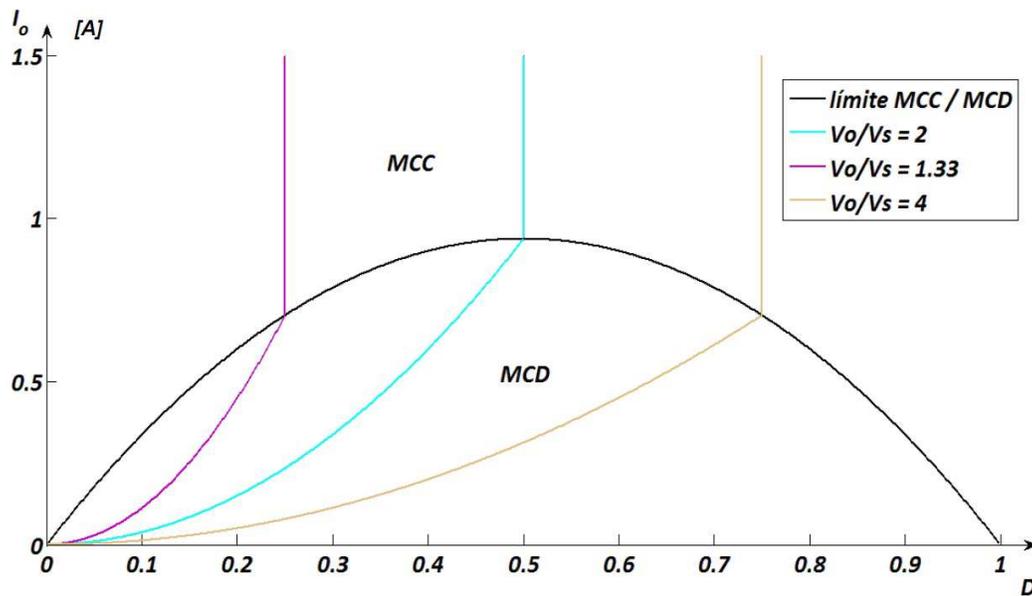


Figura 5.12: Límite MCC-MCD para diferentes valores de I_o .

Para el diseño del convertidor resulta muy útil definir la inductancia crítica como el valor de inductancia, para una dada condición de carga y ciclo de trabajo, por debajo del cual el convertidor operará en MCD. Para el convertidor elevador, la inductancia crítica está dada por la Ecuación 5.34 (Mohan, 1989)

$$L_c = \frac{V_o}{I_o} \cdot \frac{D \cdot (1 - D)^2}{2 \cdot f_s} \quad (5.34)$$

Consideraciones generales para los modos de operación MCC y MCD de un convertidor elevador.

Para finalizar, se enumeran a continuación ventajas y desventajas comparativas entre un modo de operación y otro suponiendo iguales tensiones de entrada/salida y un convertidor de la misma potencia.

1. En MCC el valor del inductor es mayor, resultando un convertidor más costoso, pesado y voluminoso.
2. La amplitud del rizado de corriente en el inductor (corriente de entrada al convertidor) en MCD es mayor, requiriendo dispositivos con mayores valores máximos admisibles.
3. En MCD la transferencia no presenta cero de no mínima fase, simplificando el diseño del controlador.

5.3. Convertidor CC/CC Elevador No Aislado Bidireccional

Como se puede observar en la Figura 6.16, esta topología es similar a la unidireccional, pero se ha reemplazado el diodo por una llave bidireccional en corriente, formada por un transistor y un diodo en antiparalelo. Esto habilita al convertidor a manejar el flujo de potencia en ambos sentidos (Mohan, 1989), de la fuente hacia la carga (operando como un convertidor elevador) y de la carga hacia la fuente (operando como un convertidor reductor).

El hecho de eliminar el diodo hace que el convertidor bidireccional no presente MCD. Por lo tanto, el análisis realizado en la Sección 5.2 para el convertidor unidireccional en MCC, es válido en este caso (Mohan, 1989).

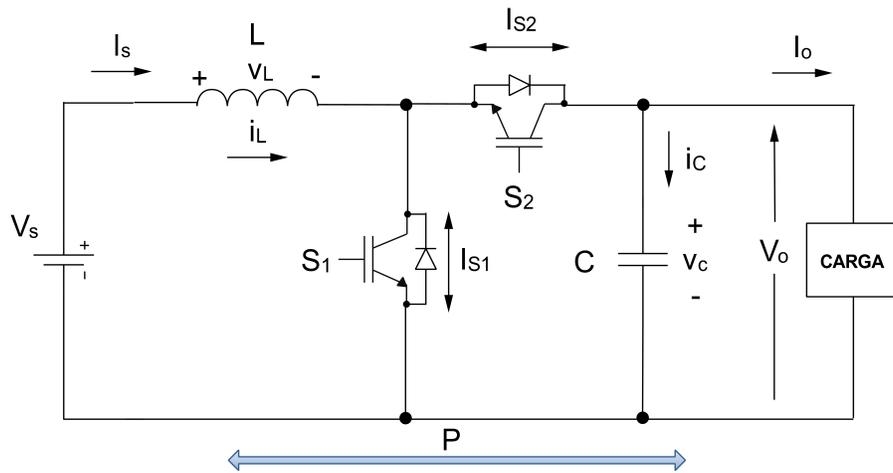


Figura 5.13: Convertidor elevador no aislado bidireccional.

5.4. Resumen del Capítulo

En este capítulo se analizó el funcionamiento del convertidor CC/CC elevador no aislado, que fue seleccionado para implementar las interfaces de acondicionamiento de potencia para el Sistema Híbrido desarrollado. Así, se analizaron en detalles sus modos de operación (MCC y MCD) y los factores que afectan la relación de conversión e intervienen negativamente en el rendimiento de estos dispositivos.

Las ecuaciones obtenidas y el conocimiento de los factores que afectan el funcionamiento de estos equipos permitirán, en el próximo capítulo, dimensionar las interfaces que intervienen en la conexión entre ambas fuentes del SH, de manera de lograr un desempeño, de acuerdo a los objetivos que se persiguen.

CAPÍTULO 6

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SHGEE BASADO EN PEMFC/SC

6.1. Introducción

En este capítulo se aborda el desarrollo de un SHGEE versátil, basado en PEMFC/SC. Se pretende que esta estructura pueda ser utilizada como fuente de alimentación en aplicaciones autónomas como sistemas de generación distribuida en zonas aisladas, o bien, como una potente herramienta para la evaluación de avanzadas estrategias de gestión de energía.

Tal como se expuso en el Capítulo 4, las PEMFC y los SC permiten obtener, en forma conjunta, un excelente desempeño combinando alta densidad de energía y de potencia respectivamente. De esta manera, es posible asegurar que el SH entregue en forma continua la potencia demandada por la carga en cada instante, con una respuesta dinámica adecuada.

A continuación se detalla el diseño e implementación de Hardware del SH, incluyendo el dimensionamiento de los componentes de ambos convertidores electrónicos de potencia involucrados y la electrónica de adquisición, control y supervisión, necesaria para la operación del conjunto.

6.2. Descripción del Sistema Híbrido desarrollado

El diagrama en bloques del SHGEE basado en PEMFC/SC diseñado e implementado en esta tesis se muestra en la Figura 6.1.

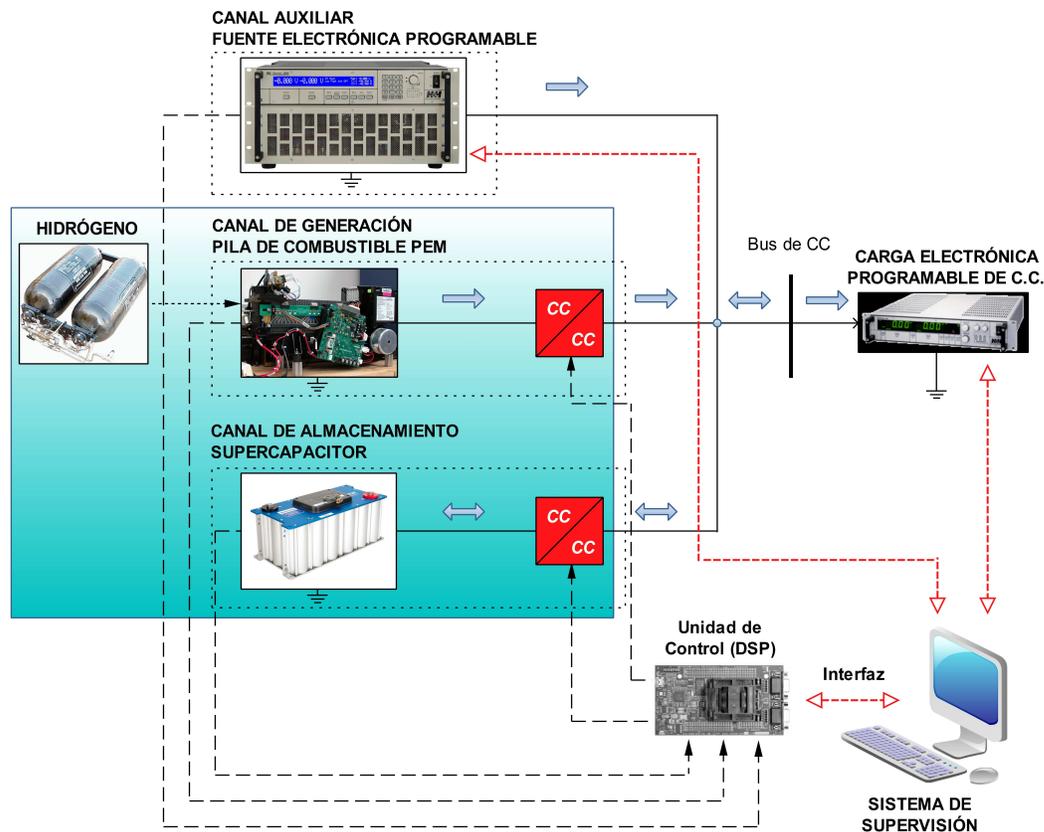


Figura 6.1: Estructura del Sistema Híbrido Desarrollado.

Tal como se discutió en el capítulo previo, el tipo de estructura elegida corresponde a una paralela de múltiples convertidores, construida alrededor de un Bus de CC. Para el Bus de CC se estableció una tensión nominal de 75V. Este valor resultó adecuado para los objetivos propuestos y compatible con parte del equipamiento que incorpora el SH, permitiendo simplificar el diseño del sistema.

Además, el SH es alimentado por una PEMFC comercial que, como se sabe, se encuentra conectada al Bus de CC a través de un convertidor electrónico elevador unidireccional. La unidad de almacenamiento emplea un Supercapacitor (SC) y, como también fue expuesto, un convertidor elevador bidireccional actúa como interfaz entre el mismo y el Bus de CC. Ambos convertidores de potencia son controlados a través de un procesador digital de señales (DSP) dedicado a tal fin. Luego, todo el sistema es monitoreado por un control supervisor, que utiliza una PC de tiempo real, encargada de establecer el estado de operación de cada uno de los módulos.

Como se puede observar, a partir de la figura anterior, el SH asimismo incorpora un canal de generación auxiliar basado en una fuente electrónica programable comercial conectada directamente al Bus de CC. Ésta fuente permitiría emular, si fuese necesario, por ejemplo: una turbina eólica, un sistema fotovoltaico o cualquier otra fuente de generación adicional, de interés a incorporar, para aumentar la versatilidad del SH. Sin embargo, dado que constituye un canal adicional y está basado en un equipo comercial, su dimensionamiento no será tratado en esta tesis y simplemente se presentarán sus características principales. Por otra parte, el SH incorpora como carga una del tipo electrónica programable, que permite al usuario, a través de su programación, producir perfiles con diferentes características de interés para evaluar el funcionamiento del SH.

Para finalizar, cabe mencionar que el SH fue construido, durante un período de tres meses, en el área de Automática y Control del Instituto de Robótica e Informática Industrial (IRII) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España. El instituto posee un laboratorio experimental de pilas de combustible con instalaciones adecuadamente acondicionadas, incorporando los sistemas de seguridad requeridos para operar con hidrógeno en ambientes cerrados en forma segura.

6.3. Canal de Generación - Pila de Combustible PEM

En la Figura 6.2 se presenta un esquema en bloques del canal de generación basado en la PEMFC.

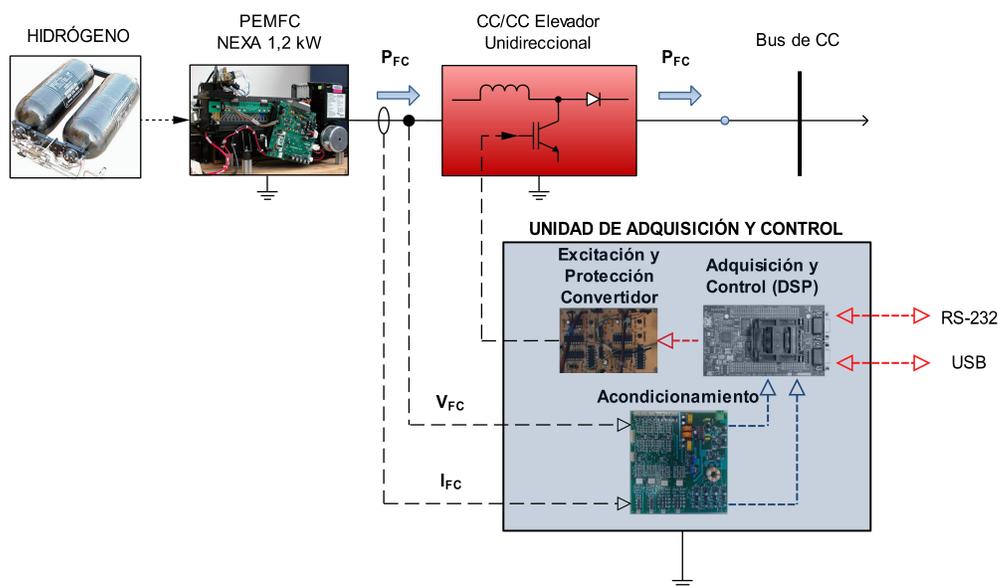


Figura 6.2: Canal de Generación basado en la PEMFC.

La Unidad de Adquisición y Control presente en el esquema, fue diseñada específicamente para generar las señales de control para el convertidor electrónico asociado. La misma utiliza un DSP programable comercial, altamente versátil y será descripta con mayor profundidad más adelante en el desarrollo de este capítulo.

6.3.1. Descripción y Características de la PEMFC

La PEMFC utilizada es el modelo comercial Nexa[®] de la compañía Ballard[®]. En la Figura 6.3 se muestra una fotografía de la misma. Se eligió este modelo en particular por razones de disponibilidad y resultar principalmente un producto probado que ha demostrado excelentes prestaciones.

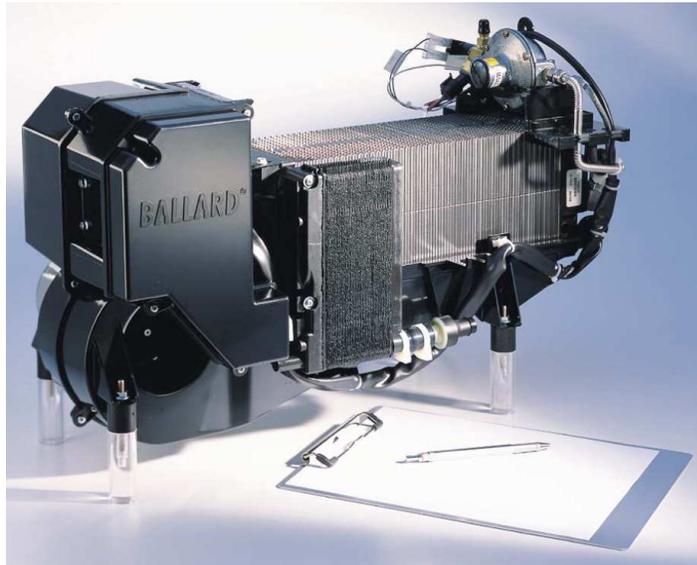


Figura 6.3: Pila de Combustible Nexa[®] (Ballard, 2003).

El módulo de potencia Nexa[®] es un sistema completamente integrado que contiene un stack PEM, así como todo el equipo auxiliar necesario para su funcionamiento en forma segura y monitoreada. Requiere de bajo mantenimiento y está totalmente automatizado, diseñado para ser fácilmente integrado en aplicaciones portátiles o estacionarias como fuente de generación de energía. Con el suministro externo de hidrógeno, la operación de la FC es continua, limitada sólo por la cantidad de combustible disponible. Además, es extremadamente silenciosa y produce cero emisiones contaminantes, permitiendo su operación segura en interiores (Ballard, 2003).

La Nexa[®], para su funcionamiento, incorpora varios subsistemas auxiliares: el subsistema de control de flujo de hidrógeno, el de suministro de aire oxidante y el de suministro de aire de refrigeración. Posee sensores a bordo para la supervisión del rendimiento del sistema y protección, a través de una placa de control basada en un microprocesador y que permite automatizar completamente su puesta en marcha y

operación. A la unidad se le debe suministrar el Hidrógeno Combustible, Aire Oxidante y el Aire de Refrigeración. Además, incorpora en su salida un diodo y un relé de potencia. El primero con el objetivo de proteger el stack y evitar que pueda circular corriente hacia el mismo y el segundo, para desconectar la salida en situaciones de sobrecarga. Para su puesta en marcha la placa de control debe alimentarse a través de una pequeña batería de $24V_{cc}$. Por último, cabe destacar que se puede conectar a una PC a través de una interfaz de comunicación serie (RS-232) para, a través de un software propietario provisto por Ballard[®], proporcionarle las señales de inicio/parada y visualizar sus variables monitoreadas.

Especificaciones Técnicas de la Nexa[®]

A continuación, en las Tabla 6.1 se presentan las principales características de salida de la Nexa[®].

Parámetro de Salida	Definición	Valor	Unidad
Tensión de Salida (V_{oFC})	Rango de tensión de salida	26-46	V
Potencia Nominal (P_{FCn})	Potencia nominal	1200	W
Tensión Nominal (V_{FCn})	Tensión de salida a P_{FCn}	26	V
Corriente Nominal (I_{FCn})	Corriente de salida a P_{FCn}	46	A
Rizado de Corriente	Máximo rizado impuesto	24,7	%(rms)

Tabla 6.1: Especificaciones de salida de la Nexa[®].

Respecto al rizado en la corriente de salida (impuesto por la carga), a partir de la Tabla 6.1 puede verse que el valor pico máximo no debe ser mayor a un 24,7% del valor medio de corriente en todo el rango de operación, para una frecuencia de 120 Hz. Luego, en la Figura 6.4 se presentan las curvas características eléctricas de la Nexa[®], provistas por su fabricante.

Para que la Nexa[®] funcione, el stack provee adicionalmente energía al compresor de aire, el ventilador de refrigeración, la placa de control y a los sensores y actuadores abordo. Así, la potencia necesaria para alimentar el equipamiento auxiliar asciende a unos 35[W] cuando la FC opera en vacío y se incrementa hasta unos 150[W] al operar la FC a carga nominal, debido principalmente al incremento de consumo del compresor de aire y del ventilador de refrigeración. Respecto al rendimiento del módulo, a partir de las curvas experimentales de la Figura 6.5 se puede observar que varía, entre un 50% para una potencia de salida de uno 300[W] aproximadamente y un 40% a carga nominal.

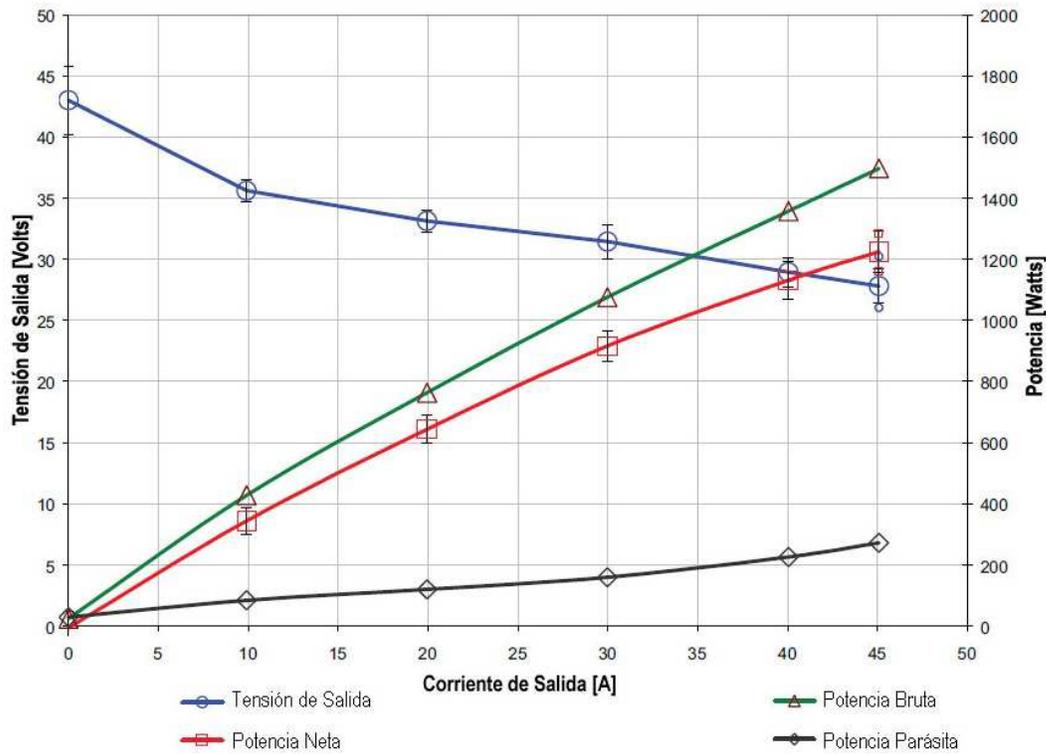


Figura 6.4: Curvas de Polarización y Potencia de la PEMFC Nexa (Ballard, 2003).

Respuesta transitoria de la Nexa[®]

Según ensayos realizados por el fabricante, en la Figura 6.6 se muestran curvas de respuesta transitoria de la Nexa[®], ante un escalón de cambio en la carga.

A partir de la figura, se puede observar (en $t = 2s$) que la dinámica eléctrica se encuentra limitada principalmente por la velocidad de respuesta del compresor encargado de controlar el flujo de aire (oxígeno). Esta característica deberá tenerse en cuenta para evitar exigir a la Nexa[®] y producir indeseablemente una reducción de su vida útil o un daño permanente del stack.

6.3.2. Diseño del Convertidor CC/CC asociado a la PEMFC

Como se sabe del Capítulo 4, la topología para el convertidor CC/CC elegida es la elevadora “boost” unidireccional, no aislada. Éste convertidor se utiliza como interfaz para adaptar la tensión de salida no regulada de la FC a la tensión regulada del Bus de CC del SH en el punto de conexión, tal como se observa en la Figura 6.2.

Teniendo en cuenta las características de salida de la PEMFC de la Tabla 6.1 y la tensión establecida para el Bus de CC, se pueden determinar las especificaciones para

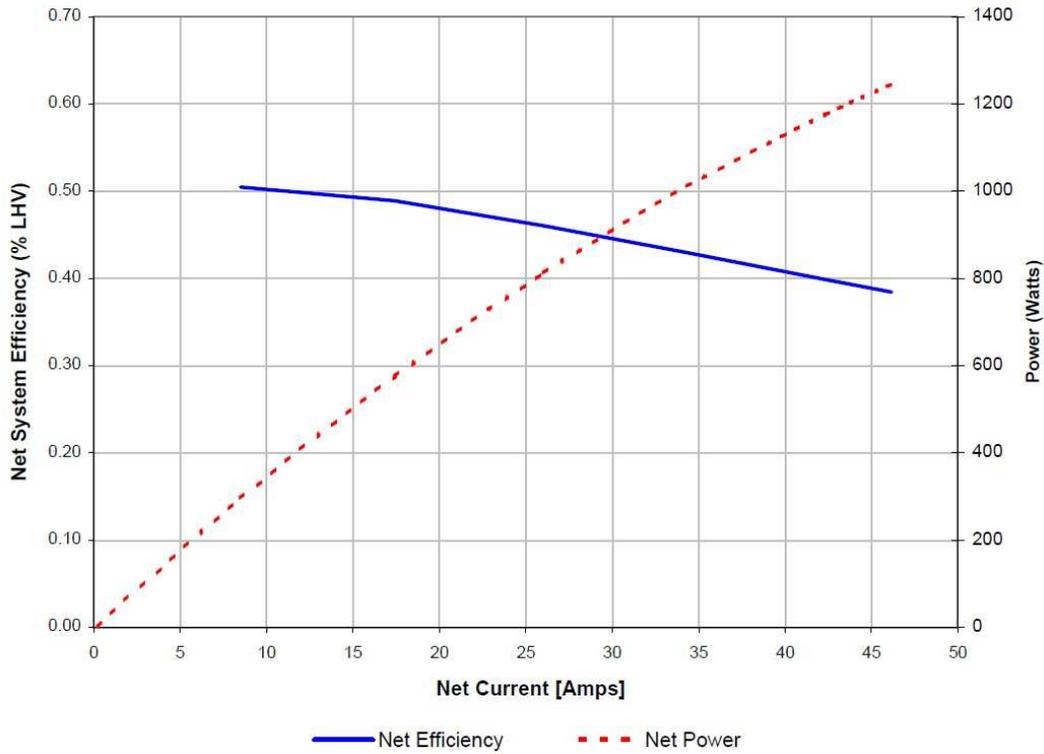


Figura 6.5: Curvas de Rendimiento del Módulo PEM Nexa[®] (Ballard, 2003).

el convertidor que se presentan en la Tabla 6.2.

<i>Potencia nominal P_n</i>	1200 [W]
<i>Rango de tensiones de entrada V_s</i>	26 - 46 [V]
<i>Corriente de entrada nominal I_{sn} (@26V)</i>	46 [A]
<i>Tensión de salida nominal V_{on}</i>	75 [V]
<i>Corriente de salida nominal I_{on}</i>	16 [A]

Tabla 6.2: Especificaciones para el convertidor elevador de la PEMFC.

Teniendo en cuenta el peor de los casos, el convertidor debe ser capaz de elevar la tensión de salida de 26V hasta 75V de corriente continua y por lo tanto se requiere una relación de conversión mínima de 3.

En el Capítulo 5 se presentaron para este convertidor las ecuaciones que describen su funcionamiento en estado estacionario, para sus dos modos de operación (MCD y MCC). A continuación, se detalla el dimensionamiento y selección de cada uno de sus elementos. En la práctica, tal como se verá a lo largo de esta sección, los componentes se deben dimensionar considerando márgenes de seguridad adecuados para obtener un sistema robusto que no se dañe ante condiciones de funcionamiento transitorias no

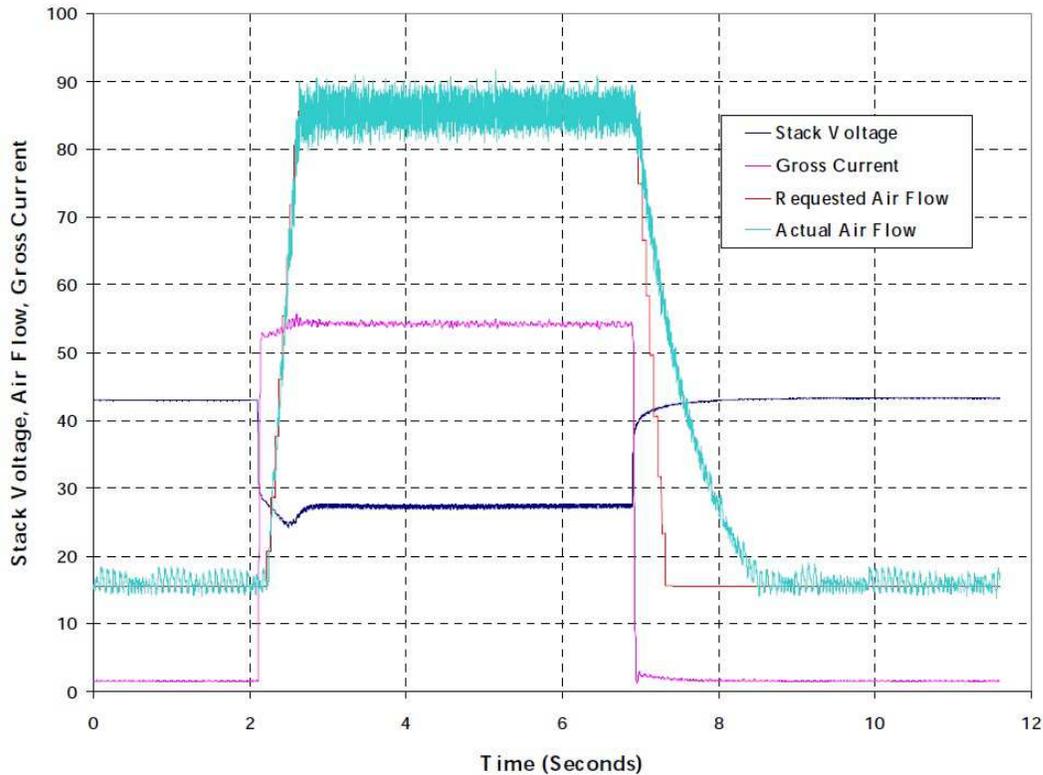


Figura 6.6: Respuesta Transitoria del Módulo PEM Nexa® (Ballard, 2003).

deseadas. Obviamente, el sistema deberá funcionar evitando, en lo posible, superar los límites máximos absolutos admisibles por todos sus elementos.

Como fuera analizado en el Capítulo 5, el convertidor operará en MCD o MCC de acuerdo a la carga solicitada. Un buen punto de partida para el diseño es determinar para que rango de corrientes de entrada es deseable que el convertidor opere en MCC. Recordemos que para un mismo valor medio de corriente de entrada, la amplitud del rizado es mayor en MCD que en MCC. En este sentido, algunos trabajos han demostrado que un rizado de alta frecuencia y amplitud moderada no produce efectos indeseados en el funcionamiento ni problemas perjudiciales en la membrana del stack (W. Choi, June 2004). Sin embargo, se desconoce aún que sucede cuando éste es de gran amplitud y las corrientes de entrada máximas son importantes, como ocurre cuando el convertidor opera en MCD y la potencia solicitada es elevada.

Considerando esta situación, se optó por diseñar el CC/CC para operar en MCC dentro de una porción de la zona lineal de la característica de estado estacionario de la PEMFC. Como se observa en la Figura 6.4, esta zona de operación está comprendida en el rango de corrientes de $10 - 46[A]$. De esta manera, se seleccionó una corriente de $15A$ como valor límite entre ambos modos de operación. De acuerdo a las curvas características de la Nexa®, este punto corresponde a una potencia de unos $500W$, es decir aproximadamente $1/3$ de la potencia nominal que puede entregar. Por lo tanto, el convertidor deberá operar en MCC en las $2/3$ partes del rango de operación nominal

de la PEMFC.

A continuación se presenta como se determinaron los valores de los elementos del convertidor, de manera que este opere en MCC dentro del rango propuesto para las corrientes y tensiones especificadas.

1. Frecuencia de conmutación.

Para la selección de la frecuencia de conmutación del convertidor se debe considerar que:

- Una frecuencia de conmutación elevada permite mejorar la “eficiencia volumétrica” del convertidor, definida como el cociente Potencia Nominal/Volumen del mismo (Mohan, 1989), ya que disminuye el tamaño de los elementos reactivos (L y C).
- Valores muy altos de frecuencia de conmutación reducen la “eficiencia energética” del convertidor, definida como $P_{salida}/P_{entrada}$, ya que aumentan las pérdidas por conmutación en los dispositivos semiconductores utilizados como llaves de potencia y aumentan las pérdidas en los elementos reactivos, particularmente en el núcleo del inductor (Pressman, 1998).
- Una frecuencia de conmutación baja, que caiga dentro del rango audible, produce vibraciones y como consecuencia contaminación sonora y molestias.

De acuerdo a lo expuesto, la frecuencia de conmutación f_s se fijó en $20kHz$ como un buen compromiso entre los factores anteriormente mencionados. Además, como el valor fijado no resulta muy elevado, el mismo no restringe la elección de los dispositivos electrónicos de conmutación.

2. Ciclo de Trabajo “D”.

Como punto de partida, para simplificar el diseño y seleccionar más fácilmente los elementos reactivos del convertidor, es recomendable determinar primero el rango de valores de ciclo de trabajo D dentro del cual se desea que el convertidor opere en MCC. Así, de acuerdo a la Ecuación 5.2, despreciando las pérdidas en los elementos del circuito, en MCC el D queda determinado según la Ecuación 6.1.

Como se definió, se desea que el convertidor opere en MCC para una corriente de entrada $I_s \geq 15A$. A partir de la característica $V - I$ de la Nexa[®], esto corresponde a una tensión de entrada de $V_s \simeq 34V$. En este punto de operación, a partir de la Ecuación 6.1 y considerando que la tensión del Bus de CC es fija e igual a $V_o = 75V$, el D correspondiente es $D_{mcc} \simeq 0,546$.

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = 1 - \frac{V_s}{V_o} \quad (6.1)$$

Por otra parte, el ciclo de trabajo correspondiente al punto de operación nominal, donde $V_{sn} = 26V$ e $I_{sn} \simeq 46A$, mediante la Ecuación 6.1 resulta $D_n \simeq 0,666$.

De acuerdo a los cálculos realizados, el rango de ciclos de trabajo para el convertidor operando en MCC queda determinado como $0,546 < D < 0,653$. Si la potencia solicitada es baja, de modo que la corriente de entrada es inferior a 15A, el convertidor entrará a operar en MCD.

3. Selección del Inductor.

El valor de L debe garantizar, primero, el funcionamiento del convertidor en MCC en el rango de interés propuesto. Esto significa que la inductancia necesaria debe ser superior al valor crítico dado por la Ecuación 5.34. Combinando esta última con la Ecuación 5.4, se obtiene la Ecuación 6.2.

$$L_c = \frac{V_o}{I_s} \cdot \frac{D \cdot (1 - D)}{2 \cdot f_s} \quad (6.2)$$

Teniendo en cuenta esta última y recordando que el punto de operación límite MCC-MCD corresponde a $34V - 15A$, con $D = D_{mcc}$, resulta un valor de inductancia crítica de $31\mu H$.

Por otro lado, debemos evaluar la amplitud del rizado de la corriente de entrada, el cual está dado por la Ecuación 6.3.

$$\Delta i_L = \frac{V_s \cdot D}{L \cdot f_s} = \frac{V_o}{L \cdot f_s} \cdot D(1 - D) \quad (6.3)$$

La amplitud de rizado máxima se da para $D = 1/2$. Sin embargo, en nuestro caso el valor máximo se da para $D = D_{mcc}$, resultando $\Delta i_L \simeq 30A$. Por otro lado, el rizado correspondiente al punto nominal es de $\Delta i_L \simeq 27,4A$.

En ambos casos, el rizado de la corriente de entrada resulta elevado. Si se deseara disminuirlo habría que aumentar el valor de inductancia, pero dada la elevada intensidad de corriente que debe manejar el inductor, se decidió mantener el valor previamente calculado e incluir un filtro pasa-bajos entre el convertidor y la PEMFC, para evitar que esta última sea sometida a picos de corriente muy elevados que pudieran afectar su funcionamiento.

Además, para el diseño del inductor es importante determinar cual es la corriente máxima que deberá soportar, dada por la Ecuación 6.4.

$$I_{L-max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = I_s + \frac{V_o \cdot D \cdot (1 - D)}{2 \cdot L \cdot f_s} \quad (6.4)$$

Evaluando la expresión anterior en el punto de operación nominal, dónde $I_{sn} = 46A$ y $D = 0,653$, se obtiene $I_{L-max} \simeq 60A$. Finalmente, las características del inductor adquirido se presentan en la Tabla 6.3.

En la Figura 6.7 se muestra una fotografía del inductor adquirido, dónde se aprecia su gran tamaño.

<i>Valor de inductancia L</i>	35,1 [μH] _{@10kHz}
<i>Corriente pico nominal \hat{I}_{Ln}</i>	100 [A]
<i>Tensión de aislación V_{ins}</i>	500 [V]
<i>Resistencia Equivalente Serie r_L</i>	32 [$m\Omega$]

Tabla 6.3: Especificaciones del inductor L adquirido.

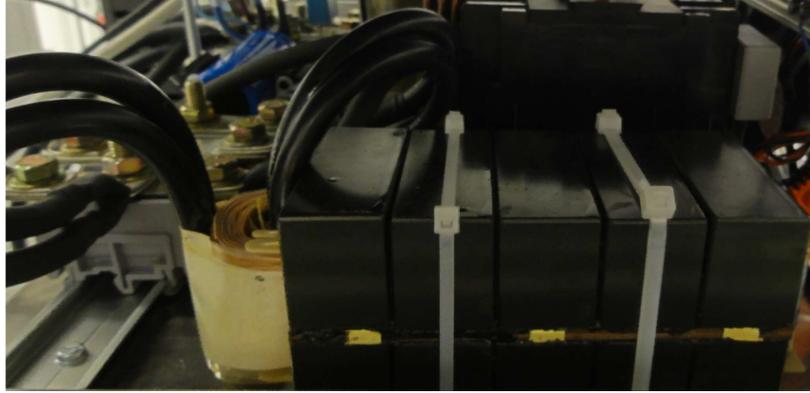


Figura 6.7: Inductor adquirido para el convertidor asociado a la FC.

Luego, la potencia disipada en el inductor, está dada por la Ecuación 6.5.

$$P_{rL} = i_{Lef}^2 \cdot r_L \quad (6.5)$$

Siendo i_{Lef} el valor eficaz de la corriente por el inductor, que se puede determinar mediante la Ecuación 6.6.

$$i_{Lef} = \sqrt{\frac{\Delta i_L^2}{3} + I_s^2} \quad (6.6)$$

Para punto de operación nominal se encontró que $i_{Lef} \simeq 50A$, resultando $P_{rL} \simeq 80W$. Esta potencia representa un pequeño porcentaje de la potencia nominal ($\simeq 7\%$), por lo que el rendimiento energético del convertidor no se verá sensiblemente afectado.

4. Selección del Capacitor.

Para calcular el valor de capacidad necesario para el convertidor se desprecia, en una primera instancia, el efecto que tiene r_C sobre el rizado. De esta manera, despejando C de la Ecuación 5.9, se obtiene:

$$C_{min} = \frac{D \cdot I_o}{V_o \cdot f_s \cdot \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right)} \quad (6.7)$$

Para evaluar la expresión anterior, se consideró $\Delta V_o/V_o = 1\%$ y la peor condición, que ocurre cuando el punto de operación es el nominal ($D = D_n = 0,653$, $V_o = 75V$ e $I_o = I_{on} = 16A$). Reemplazando, el valor de capacidad mínimo necesario es de $C_{o-min} = 693\mu F$.

La Ecuación 6.8 permite calcular en forma aproximada el valor eficaz de la corriente a través del capacitor (Mohan, 1989).

$$I_{C-rms} \simeq I_o \cdot \sqrt{\frac{D}{1-D}} \quad (6.8)$$

En nuestro caso, la corriente que debe soportar el capacitor de salida para la peor condición ($I_o = I_{on} = 16A$ y $D = 0,653$), resulta $I_{C-rms} \simeq 22A$

Respecto a la tensión máxima que el capacitor debe soportar, como el rizado en la tensión de salida es muy pequeño, la misma está dada por la Ecuación 6.9.

$$V_{c-min} = V_o + \frac{\Delta V_o}{2} \simeq V_o \quad (6.9)$$

Sin embargo, debe considerarse una tensión máxima admisible considerablemente mayor para este componente puesto que pueden aparecer picos de tensión transitorios elevados debidos fundamentalmente a inductancias parásitas.

De acuerdo a los cálculos realizados, en la Tabla 6.4 se resumen las especificaciones para el capacitor C .

<i>Valor de capacidad mínima C_{min}</i>	693 [μF]
<i>Corriente eficaz $I_{C_{o-rms}}$</i>	22 [A]
<i>Tensión máxima V_{C-max}</i>	$\gg 75$ [V]

Tabla 6.4: Especificaciones para el capacitor de salida del convertidor.

Finalmente, para cumplir con estas especificaciones, se empleó una combinación de 4 capacitores EPCOS B43303A0347 en paralelo, cuyas características se resumen en la Tabla 6.5.

La capacidad total equivalente es de $1360\mu F$, la corriente eficaz máxima 32A y la ESR equivalente $\simeq 12,5m\Omega$. La frecuencia de autoresonancia de estos capacitores es de 44 kHz, baja considerando la f_s elegida. Así, a los efectos de disminuir la

<i>Valor de capacidad C</i>	340 ($\pm 10\%$) [μF]
<i>Corriente eficaz nominal I_{C-rms}</i>	8 [A]
<i>Tensión nominal V_{Cn}</i>	1200 [V]
<i>Resistencia Equivalente serie ESR</i>	0,05 [Ω]
<i>Inductancia Equivalente serie ESR</i>	40 [nH]
<i>Temperatura máxima de trabajo T_{max}</i>	60 [$^{\circ}C$]

Tabla 6.5: Especificaciones del capacitor EPCOS B43303A0347.

impedancia equivalente del banco de capacitores y mejorar su desempeño, se añadió un capacitor de película EPCOS B25832F4105K001, en paralelo con el banco, de $1 \mu F - 640 V - 10 A_{rms}$ y una ESR de $0,025 \Omega$.

Con el banco de capacitores construido se obtuvo una ESR equivalente del orden de $8m\Omega$. El rizado en V_o sin tener en cuenta el efecto de r_C , calculado a partir de la Ecuación 5.9, es $\simeq 386mV - pp$ ($0,5\%$). Considerando el efecto de r_C , Ecuación 5.15, el rizado total resulta $\simeq 660mV - pp$ (1%).

5. Selección de los dispositivos de conmutación.

Para la selección de los dispositivos de conmutación se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los valores máximos admisibles de un dispositivo, deben ser mayores a la tensión y corriente máxima que serán sometidos. En este sentido, la tensión máxima aplicada a la llave está dada por la Ecuación 6.10.

$$V_{Q-off} = V_o + V_{D-on} \quad (6.10)$$

Dónde, V_{D-on} es la caída de tensión en directa en el diodo D y su valor está comprendido en el rango de $0,7 - 2V$. Así, de acuerdo a las especificaciones de diseño de la Tabla 6.2, para V_{o-max} y considerando un diodo de $2V$ de caída (peor condición), la tensión máxima sobre la llave V_{Q-max} para su selección es de aproximadamente $77V$.

Por otro lado, la corriente máxima por la llave es $I_{Q-max} = I_{L-max}$, dónde este último término corresponde a la corriente pico por el inductor para la peor condición. Así, I_{Q-max} será igual a $I_{L-max} = 60A$, según se determinó cuando fue dimensionado el inductor.

En cuanto al diodo D , la tensión inversa entre sus terminales V_{D-off} es la de salida V_o . Al igual que para el transistor, la máxima corriente que debe conducir es $I_{L-max} = 60A$, cuando la tensión de entrada y la corriente de salida son nominales.

- Los tiempos de conmutación t_{con} (encendido y apagado) del transistor deben ser pequeños comparados con el período de conmutación T_s . Asimismo, para el diodo el tiempo de recuperación inversa t_{rr} es un parámetro importante y deberá ser ($\ll T_s$).
- Las caídas de tensión, durante la conducción, en ambos dispositivos deben ser pequeñas respecto a la tensión de entrada del convertidor.

Como regla general, para el diseño de convertidores electrónicos de potencia, se recomienda utilizar márgenes de seguridad muy amplios, es decir, sobredimensionar los dispositivos de conmutación en la medida que el diseño no resulte excesivamente costoso. Una vez definidas las exigencias sobre la llave, es necesario seleccionar el tipo de transistor y diodo más adecuados para esta aplicación.

Los tipos de transistores actualmente disponibles para la implementación de la llave son los transistores de efecto de campo (MOSFET) de potencia ó los bipolares de compuerta aislada (IGBT). En la Tabla 6.6 se realiza una comparación entre ambas tecnologías.

Tecnología	MOSFET	IGBT
V_{max}	500 - 1000V	1200 - 2000V
I_{max}	20 - 100A	400 - 500A
f_{s-max}	300 - 400 kHz	75 kHz
V_{on}	$i_Q \cdot R_{on}$	1,5V

Tabla 6.6: Comparación entre las tecnologías de transistores MOSFET e IGBT.

Como la caída de tensión en el MOSFET depende de la corriente, para intensidades elevadas se suelen utilizar arreglos de transistores en paralelo.

Teniendo en cuenta que la frecuencia de operación elegida (20 kHz) no es muy elevada y que actualmente hay disponibles en el mercado módulos de potencia integrados que contienen tanto las llaves como los diodos, minimizando los problemas asociados a las inductancias parásitas del conexionado, se decidió emplear el pack comercial de *Semikron*[®], modelo *SKS-75F-B6CI-40-V12*. Su esquema eléctrico interno se muestra en la Figura 6.8.

Se observa que este módulo está formado por 3 columnas con dos IGBT en totem en cada una de ellas, en la que cada transistor incorpora un diodo de silicio en antiparalelo, formando una llave bidireccional. En la en la Tabla 6.7 se resumen sus principales características.

Este módulo satisface ampliamente los requerimientos de tensión y corriente del convertidor. La única desventaja que presenta en esta aplicación es que la caída de tensión en conducción es algo superior a la que se podría obtener, utilizando MOSFET.

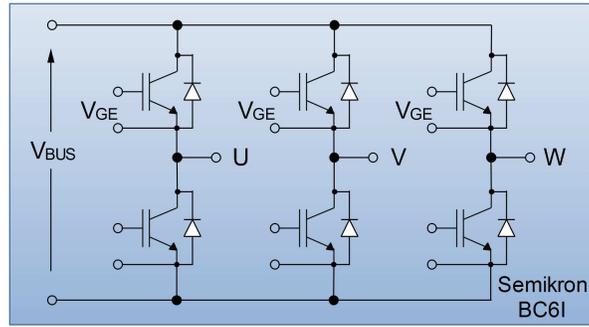


Figura 6.8: BC6I Semikron IGBT Pack.

Tensión Colector-Emisor máxima V_{max}	1200 V
Corriente de colector nominal I_{c-nom}	75 A
Frecuencia de conmutación máxima f_{s-max}	20 kHz
Tensión Colector-Emisor de saturación V_{ce-sat}	1,6 V
Tensión Gate-Emisor máxima V_{ge-max}	20 V

Tabla 6.7: Características principales del pack IGBT *Semikron*[®] BC6I 75F-V12.

A partir del circuito presentado en la Figura 6.8, se puede observar que cada columna del pack permite implementar un convertidor elevador. De esta manera, se utilizará una columna del pack para implementar el convertidor unidireccional de la PEMFC y otra columna para la implementación del convertidor bidireccional del SC, los cuales comparten un mismo Bus de CC. En particular, para el convertidor electrónico asociado a la FC se utilizó la columna “V” del pack de IGBT y para el SC la columna “U”, que se detallará mas adelante.

Filtrado de la corriente de entrada del convertidor de la PEMFC.

Como se mencionó anteriormente, de acuerdo a algunos autores (Gemmen, 2002; W. Choi, June 2004), el efecto de rizado de corriente de amplitud moderada y alta frecuencia no produce inconvenientes en el stack de la PEMFC. Sin embargo, en nuestro caso, el rizado presenta una amplitud considerable, por lo que no es posible determinar si el mismo puede producir un mal funcionamiento del stack. Se decidió entonces, añadir un filtro en la entrada del convertidor, para suavizar la corriente de la PEMFC. Como se muestra en la Figura 6.9 se empleó un filtro pasa-bajos de segundo orden, formado por L_f y C_f .

Para determinar los valores de los elementos del filtro se utilizó el siguiente criterio: El capacitor del filtro debe asegurar un bajo rizado en la tensión de entrada del

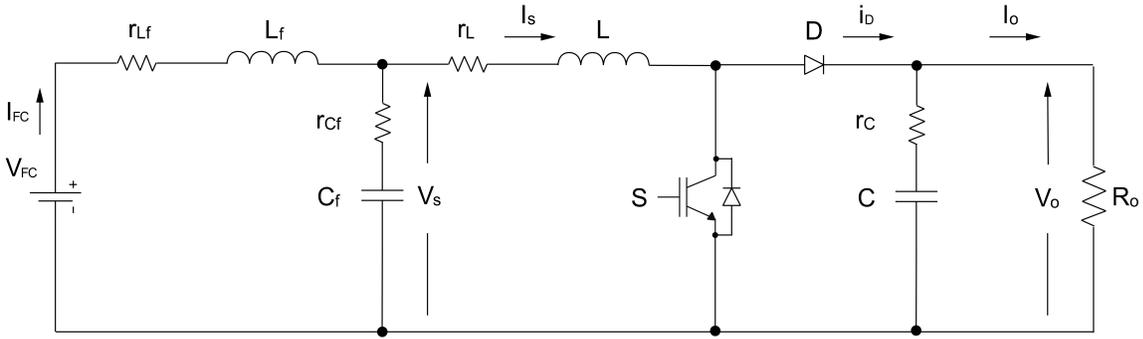


Figura 6.9: Topología del convertidor y filtro de entrada para la corriente.

convertidor, dado por la Ecuación 6.11 (Mohan, 1989).

$$\Delta V_s = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_s \cdot C_f} \quad (6.11)$$

Evaluando la expresión anterior para el caso mas desfavorable, que corresponde a la máxima amplitud del rizado (es decir $\Delta I_L = 30A$, cuando $P_s = 510W$) y estableciendo un rizado $\Delta V_s = 0,25\%$ se obtuvo $C_f = 2200\mu F$.

Como a la frecuencia de conmutación $X_{C_f} \ll X_{L_f}$, la atenuación del filtro está dada en forma aproximada por la Ecuación 6.12.

$$Att_{dB} = 20 \log \left(\frac{X_{C_f}}{X_{L_f}} \right) \quad (6.12)$$

Adoptando una atenuación Att_{dB} a f_s de $\simeq 60dB$, se obtuvo, a partir de la ecuación anterior, un valor de inductancia mínima necesaria $L_f \simeq 30\mu H$. Cabe aclarar que los requerimientos del inductor del filtro son mucho menos exigentes que los del convertidor, ya que el mismo opera con un rizado de amplitud muy pequeña. En la Tabla 6.8 se presentan los valores de los componentes utilizados para su implementación.

La frecuencia de corte del filtro está dada por la Ecuación 6.13.

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L_f \cdot C_f}} \quad (6.13)$$

Con los valores empleados, f_c resulta ser $\simeq 520Hz$.

Parámetro	Valor
Inductancia del filtro L_f	42 [μH]
ESR inductor r_{L_f}	20 [$m\Omega$]
Capacidad del filtro C_f	2200 [μF]
ESR capacitor r_{C_f}	8 [$m\Omega$]

Tabla 6.8: Parámetros del filtro L-C para la PEMFC.

Verificación del diseño del convertidor CC/CC.

Con el objetivo de verificar que el convertidor diseñado cumple con las especificaciones deseadas y los elementos que lo componen trabajan dentro de sus límites permitidos, se realizó una simulación utilizando SimPowerSystems[®] de MATLAB-Simulink[®]. El circuito empleado es el de la Figura 6.9, y el valor de los parámetros del mismo se presentan en la Tabla 6.12

Parámetro del modelo	Valor
Frecuencia de conmutación	$f_s = 20kHz$
Inductancia	$L = 35,1\mu H$
Resistencia equivalente serie de L	$r_L = 32m\Omega$
Capacidad de salida	$C = 1360\mu F$
Tensión de salida nominal	$V_o = 75V$
Tensión colector-emisor de saturación del IGBT	$V_{CE-sat} = 1,6V$
Tensión en directa del diodo	$V_{D-on} = 2V$
Resistencia equivalente serie de C	$r_C = 8m\Omega$

Tabla 6.9: Parámetros de simulación para ambos modelos.

En la Figura 6.10 se presentan las formas de onda del convertidor en el modo de conducción crítica, obtenidas con $D \simeq 0,566$ y una resistencia de carga equivalente $R_o = 11,26\Omega$ ($P_s \simeq 510W$).

Respecto a la corriente en el inductor en este punto de operación, se puede observar que se comporta tal como fue considerado durante la etapa de diseño, presentando una amplitud máxima del orden de $30A$ y un valor medio de $15A$. Luego, la corriente en la PEMFC presenta un rizado con una amplitud pico-pico inferior a $40mA$, correspondiendo a una atenuación $\simeq 58dB$, aún cuando el rizado de corriente en el inductor del convertidor presenta en este caso, su máxima amplitud.

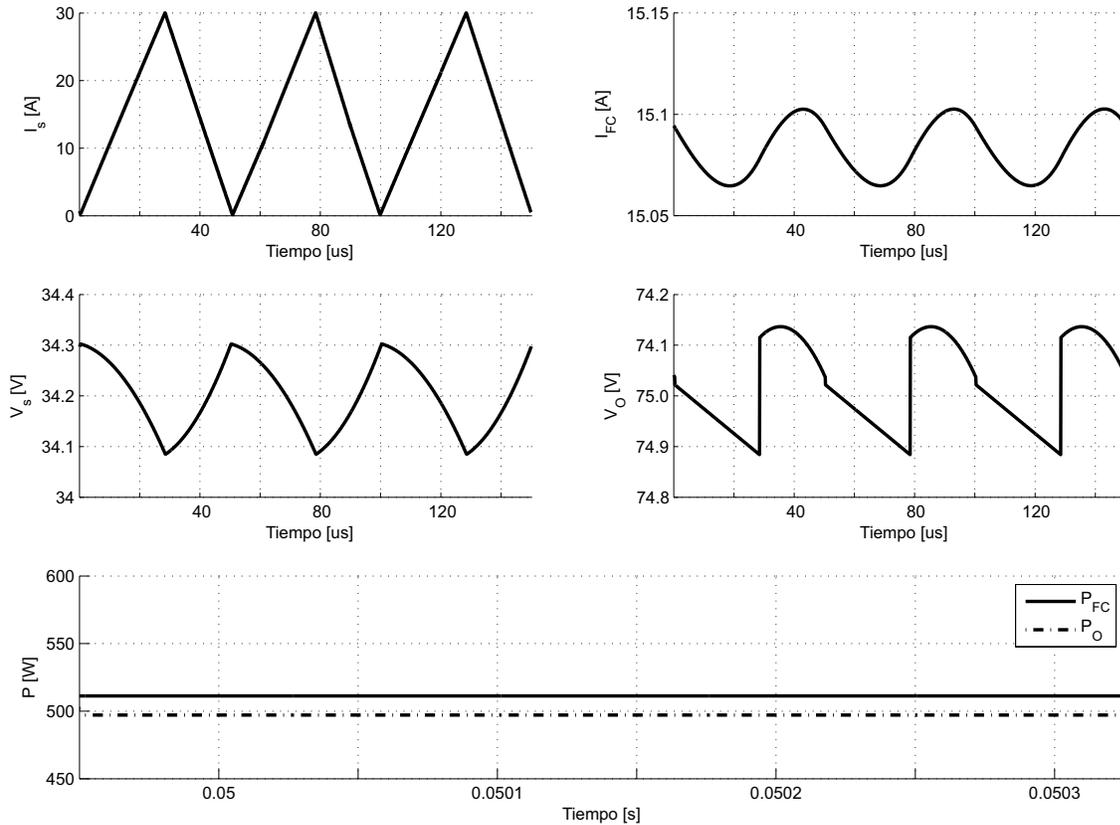


Figura 6.10: Formas de onda del convertidor para $P_s \simeq 510W$.

Por otro lado, la tensión en la entrada del convertidor presenta un rizado pico-pico de $\simeq 200mV$, valor superior al de diseño del filtro. Esto se debe a que en dimensionamiento no se consideró el efecto de la ESR de C_f . De cualquier manera, es un valor de rizado comparativamente bajo frente al valor medio y no afecta al funcionamiento del convertidor.

Por otro lado, el rizado en la tensión de salida resultó $\simeq 200mV$ pico-pico. Finalmente, en este punto el convertidor presenta un rendimiento $\eta\% \simeq 95\%$.

En la Figura 6.11 se muestran las mismas formas de onda que en la figura anterior pero para $D = 0,677$ y una resistencia de carga equivalente $R_o = 5,11\Omega$. Este punto corresponde al de operación nominal de la PEMFC ($V_s = 26V$, $I_s = 46A$, $P_s \simeq 1200W$).

Se puede observar que la corriente en el inductor tiene un valor medio de $45A$, con un rizado pico a pico $\simeq 30A$ y el máximo vale $60A$. El rizado pico-pico en la tensión de salida es de $\simeq 600mV$ (1%), el máximo para todo el rango de operación.

Las potencias de entrada y salida son $1200W$ y $1100W$ respectivamente, lo que da como resultado un rendimiento, en este punto, $\eta\% \simeq 90\%$.

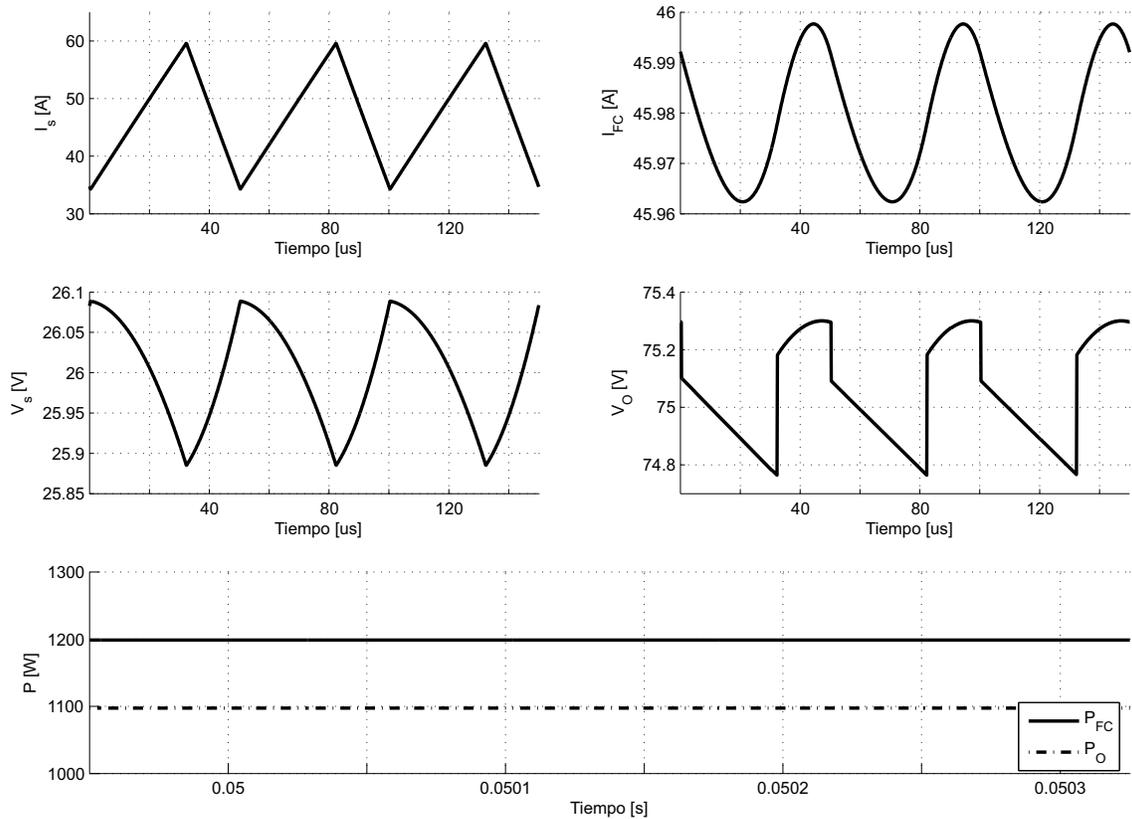


Figura 6.11: Formas de onda del convertidor para $P_s \simeq 1200W$.

6.4. Canal de Almacenamiento - Supercapacitor

En la siguiente sección se describe el canal de almacenamiento de energía (ESS), basado en un SC. En la Figura 6.12 se presenta un esquema del mismo.

Se puede observar que el SC se haya vinculado al Bus de CC a través de un convertidor CC/CC elevador, no aislado, bidireccional. Asimismo, este canal incorpora un módulo de protección para el SC y la Unidad de Acondicionamiento y Control (es la misma que emplea el canal de la PEMFC) encargada de generar las señales de control para el convertidor asociado.

6.4.1. Dimensionamiento y Selección del SC

Para dimensionar el C_{SC} se utilizó como criterio de cálculo que el mismo debía ser capaz de suministrar la potencia nominal de la PEMFC ($1200W$), durante un intervalo de 60 segundos. Esto corresponde a una energía almacenada de 20 [W h]. Como se

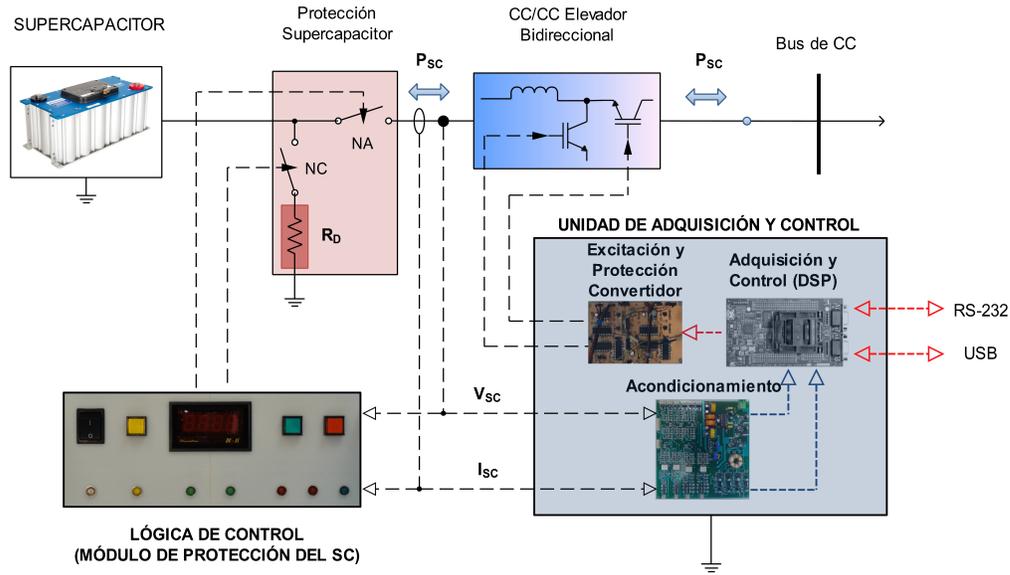


Figura 6.12: Canal de Almacenamiento (SC).

sabe, la energía que puede ser extraída de un SC está dada por la Ecuación 6.14.

$$E_{SC-eff} = \frac{1}{2} \cdot C_{SC} (V_{SC-max}^2 - V_{SC-min}^2) \quad (6.14)$$

Siendo V_{SC-max} y V_{SC-min} las tensiones correspondientes a su estado de máxima y mínima carga respectivamente. Para un correcto funcionamiento del SC y obtener una vida útil prolongada, es usual adoptar una tensión mínima del SC del 50% de su valor máximo ($V_{SC-min} = V_{SC-max}/2$), obteniéndose una variación de energía ΔE_{SC} del 75% de la energía almacenada máxima.

En este sentido, se adoptó una $V_{SC-max} = 45V$ de, por lo que la V_{SC-min} resulta de $22,5V$. Recordando que $V_{bus} = 75V$, esto significa que el convertidor operará con una relación de conversión máxima igual a $75/22,5 = 3,33$, inferior al límite práctico obtenible que es de 4 veces.

Para el cálculo de C_{SC} se siguió el procedimiento sugerido por el fabricante Maxwell Technologies® (Maxwell, 2009). El primer paso del mismo consiste en evaluar la variación de tensión en el SC considerando su resistencia equivalente serie R_{ESR-CC} , Ecuación 6.15.

$$\Delta V_{SC} = i_{SC} \cdot \frac{\Delta t}{C_{SC}} + i_{SC} \cdot R_{ESR-CC} \quad (6.15)$$

Para el cálculo, se considera una carga/descarga del SC a corriente i_{SC} de valor

constante y de una duración de Δt segundos. Teniendo en cuenta que $\tau = R_{ESR-CC} \cdot C_{SC}$ y despejando C_{SC} , resulta:

$$C_{SC} = \frac{i_{SC}}{\Delta V_{SC}} \cdot (\Delta t + \tau) \quad (6.16)$$

Para nuestro caso, se obtuvieron los siguientes valores:

- $\Delta V_{SC} = V_{SC-max} - V_{SC-min} = 22,5V$
- $i_{SC-max} = P_{SC}/V_{SC-min} = 54A$
- $i_{SC-min} = P_{SC}/V_{SC-max} = 27A$
- $i_{SC-prom} = (i_{SC-max} + i_{SC-min})/2 = 40,5A$
- $\Delta t_{SC} = 60s$

Considerando una constante de tiempo de 1 segundo, que es un valor típico para los SC, se obtuvo:

- $C_{SC} = 110F$
- $R_{ESR-CC} = 9m\Omega$

Consultando catálogos de fabricantes reconocidos, se eligió un SC Maxwell® modelo BMOD0165-P048, cuyas características más relevantes se presentan en la Tabla 6.10.

6.4.2. Diseño del Convertidor CC/CC asociado al SC

En la Figura 6.16 se muestra el convertidor asociado al SC.

El procedimiento de diseño de este convertidor es enteramente similar al del asociado a la PEMFC. Cabe solo agregar que, como fuera analizado en el Capítulo 5, el funcionamiento de éste es similar al de la PEMFC, solo que no presenta MCD. Por lo tanto, en este caso, el tamaño del inductor se elige para obtener un determinado valor del rizado de corriente en la entrada.

Debido a que los rangos de tensión y corriente del SC son similares a los de la PEMFC, se decidió utilizar el mismo valor de inductancia y capacidad y verificar que no fueran superados los límites máximos de los dispositivos semiconductores. Además, al SC no lo afecta el rizado de corriente de alta frecuencia, por lo que en este caso no fue necesario incluir un filtro de entrada.

Parámetro de Salida	Valor	Unidad
Capacidad nominal (C_{SC})	165	F
Tolerancia en la capacidad ($\Delta C/C\%$)	-5/+20	%
Tensión nominal (V_{SC-n})	48,6	V
Tensión máxima admisible (V_{SC-max})	50,2	V
Resistencia equivalente serie de CC (V_{SC-max})	6,3	$m\Omega$
Corriente máxima continua (I_{SC-max})	98	A
Corriente máxima durante 1 s ($\hat{I}_{SC\Delta t=1s}$)	1970	A
Corriente de cortocircuito (I_{SC-sc})	7700	A
Rango de temperatura de operación T_{SC}	-40/+65	$^{\circ}\text{C}$
Energía máxima disponible (@ V_{SC-n}).	54	[W h]
Energía disponible.	34,8	[W h]
Potencia eficaz P_{SC-eff}	45000	[W]

Tabla 6.10: Especificaciones SC Maxwell[®] modelo BMOD0165-P048.

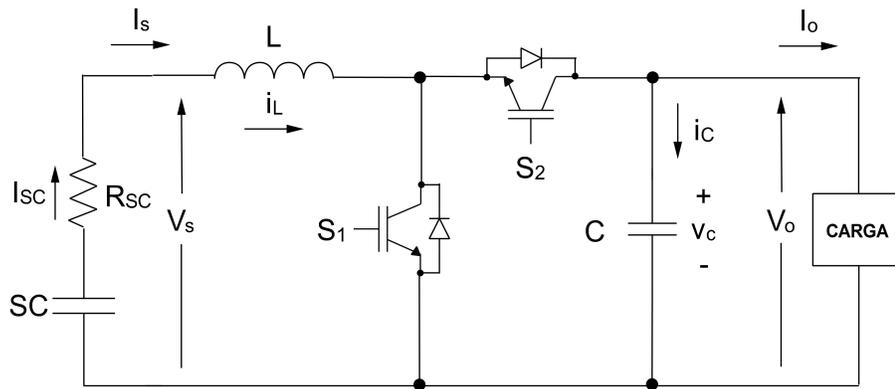


Figura 6.13: Circuito del convertidor CC/CC para el SC.

6.4.3. Módulo de protección del SC

Se añadió un módulo adicional de protección para el SC. Su objetivo es, en primer lugar, proteger el SC contra sobretensiones que puedan dañarlo; y en segundo lugar, como el SC almacena una gran cantidad de energía y puede entregarla en muy corto tiempo, se deben evitar corrientes de carga/descarga de intensidad muy elevada que pudiesen comprometer el funcionamiento del SC y el convertidor asociado.

Además, se implementó un mecanismo automático, con el fin de descargar el SC

cuando éste no está en uso o ha ocurrido alguna falla. En la Figura 6.14 se presenta un esquema del módulo construido.

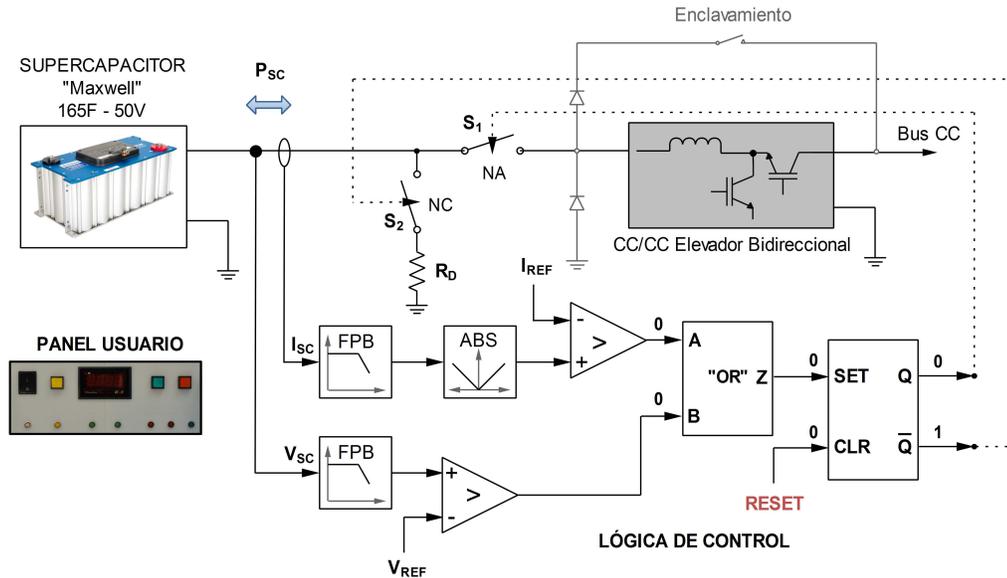


Figura 6.14: Esquema del Módulo de Protección del SC.

El mismo monitorea la tensión y corriente en los bornes del SC. Si el SC está en uso, la tensión debe permanecer por debajo de un valor límite establecido en 48V, correspondiente a la tensión nominal de operación dada por el fabricante e inferior a la máxima tensión admisible. Si por cualquier motivo la tensión excede dicho nivel, el SC es desconectado del resto del sistema (abre S_1) y se inicia el proceso de descarga a través de " S_2 " y " R_D ", tal como puede observarse en el esquema anterior. Por otra parte, ante una situación de excesiva corriente, la protección considera el valor absoluto de la misma y si su magnitud supera el nivel de seguridad establecido, el SC es también desconectado del resto del sistema y comienza nuevamente su proceso de descarga, a través de " R_D ".

Las llaves " S_1 " y " S_2 " se implementaron utilizando contactores capaces de manejar altas intensidades de corriente. Se tuvo especial cuidado en el diseño de la electrónica de acondicionamiento de las señales medidas, de forma de lograr un ancho de banda suficiente para no afectar la detección de variaciones rápidas de corriente. Asimismo, el control del módulo de protección fue implementado utilizando lógica discreta, ya que en este tipo de situaciones no es recomendable depender de un microprocesador. Ante un fallo, la lógica de control "avisa" además a la Unidad de Adquisición y Control para que ésta apague el CC/CC asociado. El módulo de protección desarrollado permite conocer el origen de la falla (sobre-corriente o sobre-tensión) y solamente puede ser reiniciado por el usuario en forma manual. Se añadieron diodos de enclavamiento para "descargar" el inductor del convertidor.

6.5. Excitación de las llaves de los convertidores

Para excitar los transistores se utilizaron drivers *Semikron*[®] modelo SKHI 20-opA, uno por columna. Las características principales del mismo se enumeran a continuación (Semikron, 2011).

- Capacidad para excitar ambos IGBT de una columna en forma independiente.
- Protección de cortocircuito para ambos transistores, midiendo V_{ce} .
- Lógica de control CMOS compatible.
- Tensión de columna (Bus de CC) de hasta 1000V.
- Resistencia de amortiguamiento de gate seleccionable.
- Tiempo muerto (“dead-band time”) programable (por defecto $t_{db} = 250ns$).
- Aislación óptica para la lógica de control.

Asimismo, en la Tabla 6.11 se resumen las características eléctricas de los drivers mencionados.

Tensión de alimentación lado lógica V_s	15 V
Tensión de alimentación lado IGBTs V_{ss}	24 V
Umbral de tensión estado alto V_{iT-on}	> 11,0 V
Umbral de tensión estado bajo V_{iT-off}	< 6,8 V
Tensión de gate estado encendido V_{g-on}	15 V
Tensión de gate estado apagado V_{g-off}	-8 V
Frecuencia de conmutación máxima f_{sd-max}	100 kHz

Tabla 6.11: Características principales drivers *Semikron*[®] SKHI 20-opA.

Para la alimentación de los drivers se emplearon fuentes de tensión de 15V para los circuitos de lógica de control y de 24V flotantes para los circuitos de excitación de los transistores.

En la Figura 6.15 se presenta el circuito del convertidor diseñado para la PEMFC con el circuito de excitación incorporado. Puede observarse que únicamente será excitado el transistor inferior de la columna (Q_{L-IN}), quedando permanentemente bloqueado el IGBT superior ($Q_{H-IN} = 0$).

De la misma forma, en la Figura 6.16 se presenta el circuito del convertidor asociado al SC. Pero, en este caso, ambas llaves son excitadas a través de Q_{H-IN} y Q_{L-IN} .

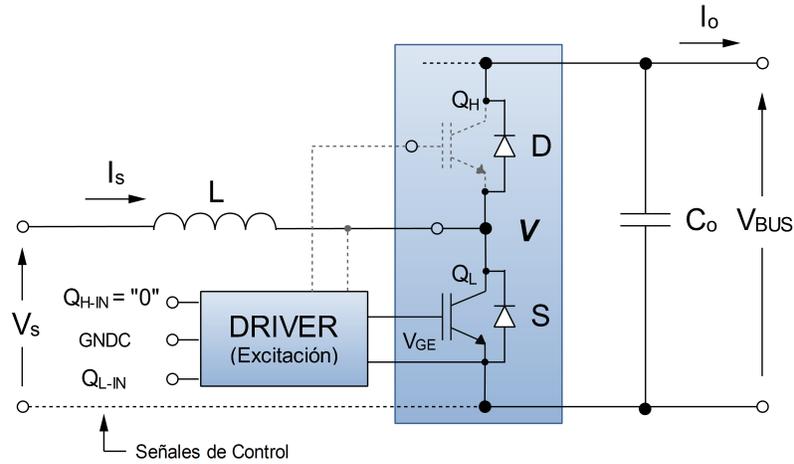


Figura 6.15: Circuito del convertidor CC/CC de la PEMFC con excitación.

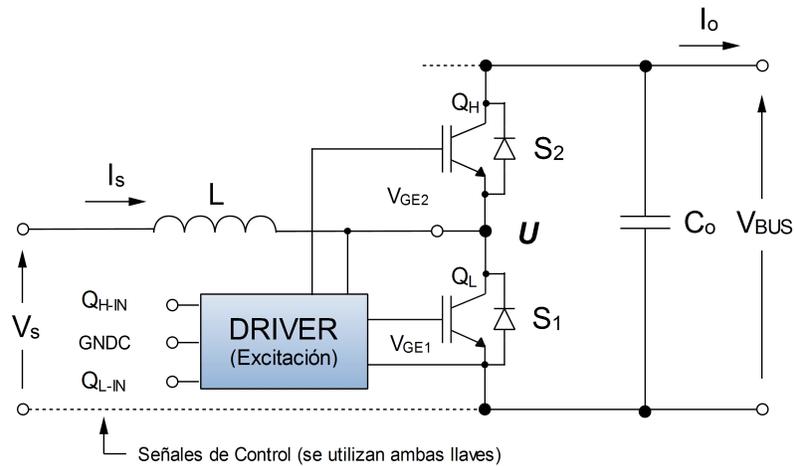


Figura 6.16: Circuito del convertidor CC/CC del SC con excitación.

6.5.1. Protección de las llaves del convertidor

Si las tensiones de control o excitación de alimentación caen por debajo de los valores mínimos necesarios, el driver apaga ambos IGBT. Asimismo monitorea la tensión colector-emisor de estos últimos, para detectar si el dispositivo ha entrado en zona activa ($V_{CE} > V_{CE-sat}$), debido a cortocircuitos o sobrecargas.

Por otra parte, estos módulos no incorporan una protección contra activación simultánea de ambos IGBT. Es decir, si el circuito de control envía la orden de activar ambas llaves simultáneamente, esto sucederá produciendo como consecuencia un peligroso cortocircuito en el Bus de CC. Además, los niveles de tensión de salida de los circuitos de generación de las señales lógicas de control de las llaves son TTL-3,3V o TTL-5V compatibles, resultando incompatibles con los niveles requeridos por

los drivers. Por estas razones se desarrolló un circuito de acondicionamiento de nivel de señal y protección contra activación simultánea de los IGBT de una misma columna. Un esquema simplificado del mismo se presenta en la Figura 6.17.

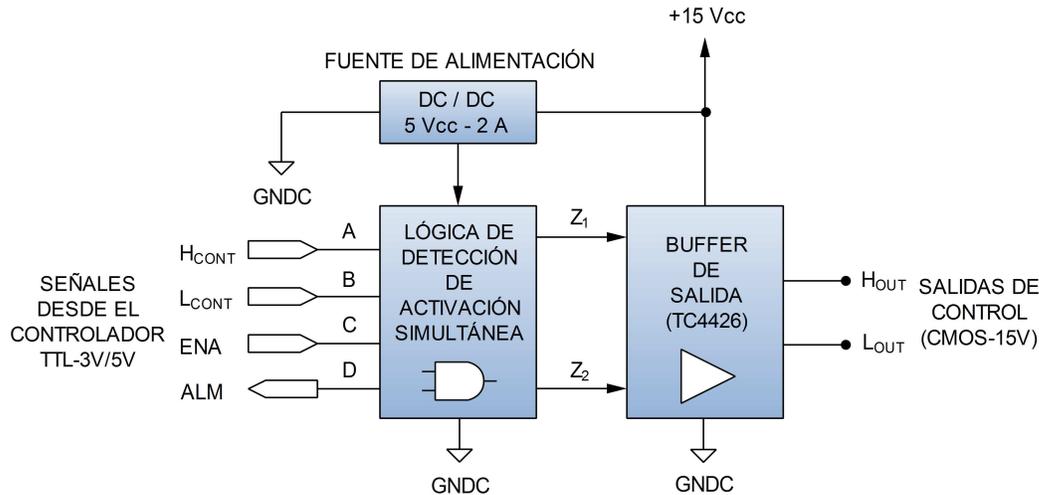


Figura 6.17: Esquema del módulo de acondicionamiento y protección controlador-driver.

Puede observarse que las señales provenientes del controlador (H_{CONT} , L_{CONT}) son procesadas en principio por la lógica de detección de activación de ambos transistores de una misma columna, evitando que Z_1 y Z_2 tomen un valor lógico alto en forma simultánea.

El módulo también posee una entrada de habilitación (ENA) que si está inactiva (estado lógico bajo) no permite la activación de sus salidas y una salida adicional de alarma (ALM) que indica al controlador que un intento de activación simultánea se ha producido. Luego, las señales Z_1 y Z_2 son adaptadas a los niveles de tensión de la lógica del driver previamente descrito, obteniéndose las señales de salida H_{OUT} y L_{OUT} . Esto último se implementó utilizando un buffer $TL2446$ de Microchip®.

En la Figura 6.18 se detalla el circuito lógico correspondiente a la protección contra cortocircuito de columna implementado y en la Tabla 6.12 se presenta su tabla de verdad correspondiente. Como puede observarse, se utilizó lógica discreta CMOS compatible para su implementación.

De acuerdo a la tabla, siempre que la entrada de habilitación (“ENA”) se encuentre en estado alto, las salidas Z_1 y Z_2 copiarán el estado de las entradas A y B respectivamente, excepto cuando estas dos últimas sean puestas en nivel alto en forma simultánea. En este caso, las salidas serán forzadas ambas a cero y la salida de alarma (“ALM”) permanecerá a estado alto mientras esto ocurra.

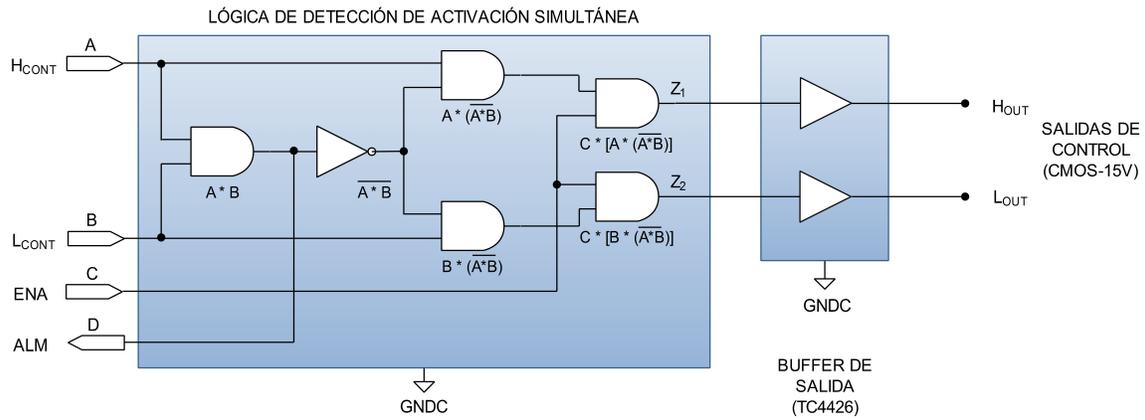


Figura 6.18: Detalle de la lógica de protección sintetizada.

A	B	ENA	Z ₁	Z ₂	ALM
0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1
0	0	1	0	0	0
0	1	1	0	1	0
1	0	1	1	0	0
1	1	1	0	0	1

Tabla 6.12: Tabla de verdad de la lógica de protección del circuito de acondicionamiento.

6.6. Unidad de Adquisición y Control

Para el control conjunto de los dos canales que forman el SH, se desarrolló una Unidad de Adquisición y Control (UAC). Esta se encarga, por un lado, de medir las variables eléctricas del sistema y, utilizando un sistema de cómputo de tiempo real, ejecutar el algoritmo de control para generar las señales de excitación adecuadas para ambos convertidores electrónicos.

Luego de acondicionar las señales provenientes de los sensores de tensión y corriente, éstas son adquiridas por un Procesador Digital de Señales (DSP) de punto flotante de altas prestaciones, que será descrito más adelante.

En la Figura 6.19 se muestran los puntos de medición de corriente y tensión.

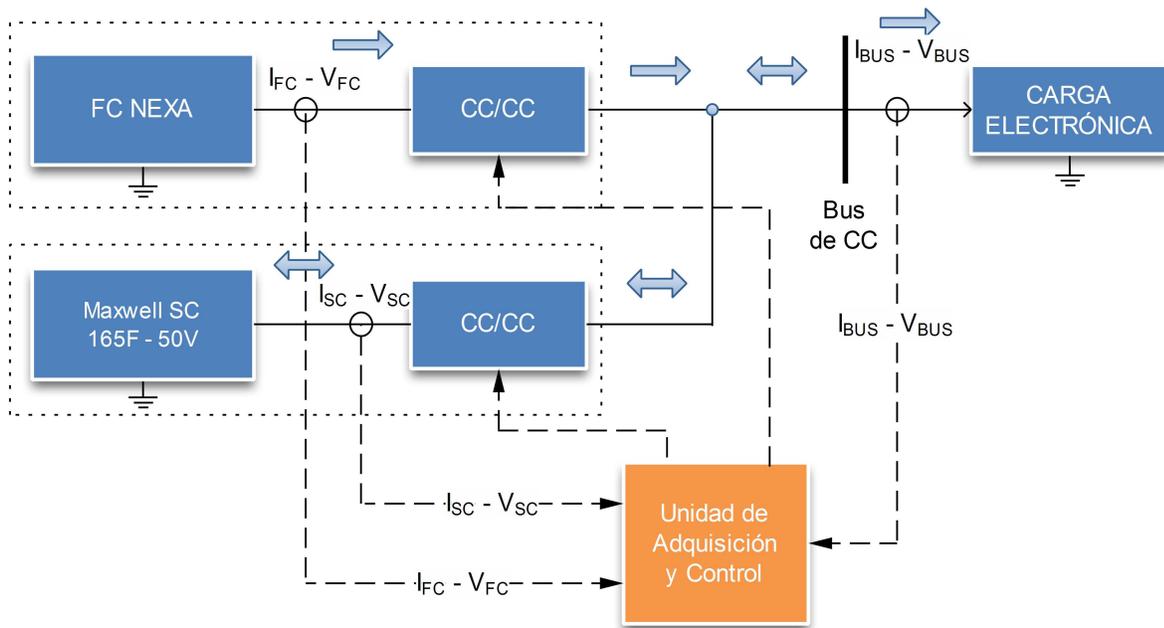


Figura 6.19: Puntos de medición de Corrientes y Tensiones del SH.

Como se observa en la figura, se mide la corriente y tensión del Bus de CC (I_{BUS} y V_{BUS}), de la FC (I_{FC} y V_{FC}) y del SC (I_{SC} y V_{SC})

6.6.1. Medición y acondicionamiento de corrientes y tensiones

Para la medición de corrientes se utilizan sensores de efecto hall, modelo CSNF-161 de HoneyWell®. Permiten medir corrientes de hasta 150A en ambos sentidos con muy bajo offset (solamente $\pm 0,2$ mA) y tienen un ancho de banda de -3 dB de 150 kHz, con un tiempo de respuesta $t_{resp} < 0,5\mu S$. Considerando que las corrientes a medir tienen una forma de onda triangular, no presentando discontinuidades abruptas y una frecuencia de $f_s = 20kHz$, el ancho de banda de los sensores resulta adecuado para medir el valor instantáneo de las corrientes con poca distorsión.

La medición de tensión se realiza a través de amplificadores de instrumentación aislados, modelo HCPL-788J de Avago®. Están diseñados específicamente para la medición de tensiones en aplicaciones de potencia, utilizando un divisor resistivo externo en su entrada. Poseen una tensión de aislación entre la entrada y la salida de 500Vcc y un ancho de banda de 30kHz. Dado que las tensiones a medir corresponden a los capacitores del sistema, las que presentan un rizado de una forma de onda “suave” y baja amplitud, el ancho de banda de los sensores resulta adecuado. No obstante, la conmutación de los convertidores puede inducir ruidos en la medición, por lo que se decidió incluir un filtro pasa-bajos de primer orden, previo a la conversión A/D, con una frecuencia de corte de 2kHz. En las Figuras 6.20 y 6.21 se presentan los diagramas en bloques correspondientes a los canales de medición de corrientes y

tensiones respectivamente.

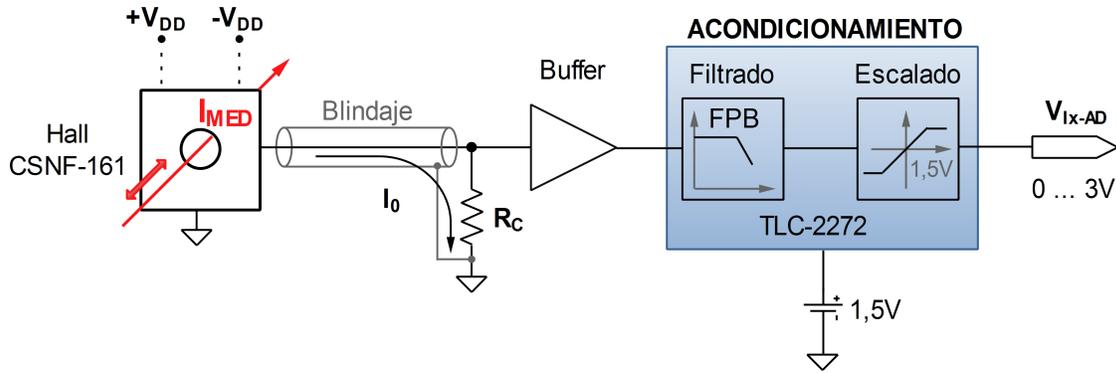


Figura 6.20: Canal de medición de Corriente.

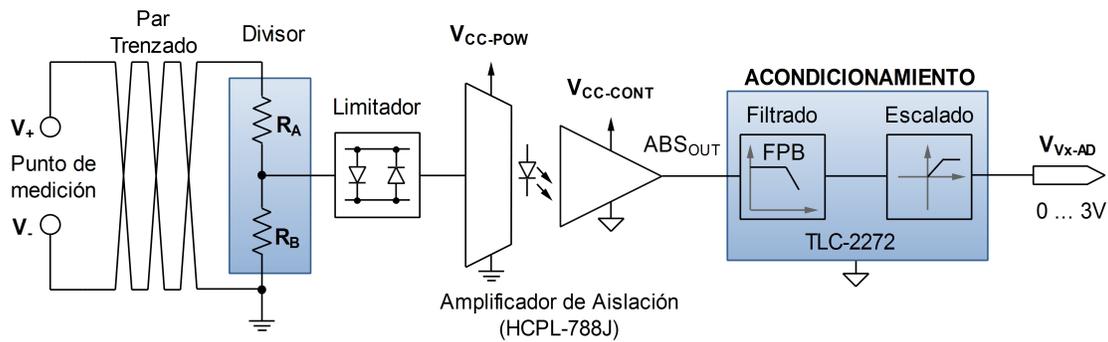


Figura 6.21: Canal de medición de Tensión.

Las corrientes y tensiones medidas por los sensores son posteriormente filtradas y acondicionadas al rango de tensión de entrada admisible por el módulo interno ADC del DSP. En ambos casos, esta tarea se logra mediante el uso de filtros pasa-bajos diferenciales analógicos, implementados con amplificadores operacionales de bajo ruido y entrada FET, modelo TLC-2272 de Texas Instruments®. El circuito de los filtros pasa-bajos, utilizados en la placa de medición y acondicionamiento de señales, se muestra en la Figura 6.22.

Dónde, convenientemente $R_3 = R_4$. Las Ecuaciones 6.17 y 6.18 corresponden a la ganancia en continua (G_{ccf}) y la frecuencia de corte respectivamente (f_{cf}) utilizadas para su diseño.

$$G_{ccf} = \frac{R_1}{R_3} \quad (6.17)$$

$$f_{cf} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_1} \quad (6.18)$$

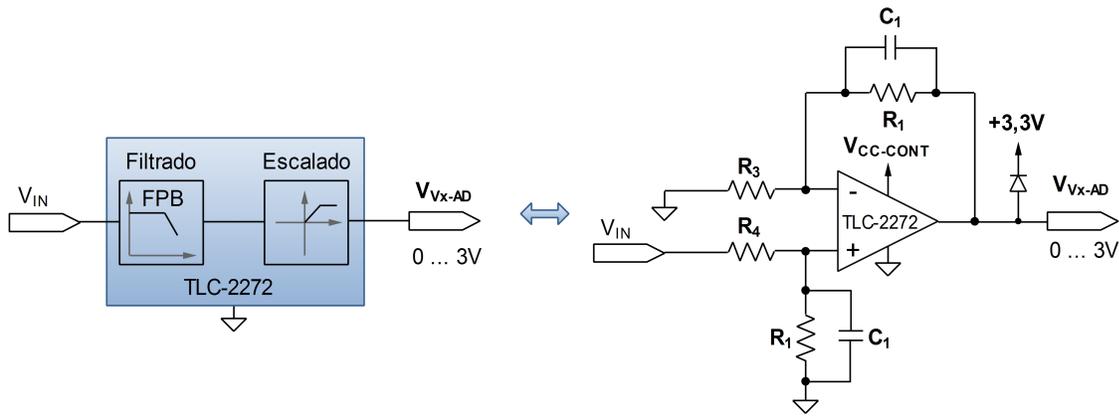


Figura 6.22: Canal de medición de Corriente.

Para obtener buenos resultados se diseñó y construyó un circuito impreso que contiene todos los canales de medición y las fuentes de alimentación de precisión. Como deben medirse diferentes rangos de corrientes y tensiones, cada entrada fue ajustada de acuerdo a las características de la señal a medir, de manera de obtener el mejor rango dinámico posible. Los rangos de medición y ancho de banda respectivos, se resumen en la Tabla 6.13.

Señal	Rango de medida	Ancho de banda
I_{BUS}	$\pm 100A$	150 kHz
I_{FC}	60A	
I_{SC}	$\pm 80A$	
V_{BUS}	80V	2 kHz
V_{FC}	50V	
V_{SC}	55V	

Tabla 6.13: Rangos de medición y ancho de banda de cada canal.

Finalmente, la conexión entre los sensores y la placa de acondicionamiento fue realizada empleando cables tipo “par trenzado” blindados. Las salidas de todos los circuitos de acondicionamiento son tipo single-ended con una excursión máxima compatible con el DSP de 3V (fondo de escala) y fueron concatenadas en un único conector que debe unirse al módulo de adquisición y control, que será descrito a continuación.

6.6.2. Módulo de Adquisición y Control

Como ya se ha mencionado, para la adquisición de las señales medidas y la ejecución de los algoritmos de control se utilizó un Procesador Digital de Señales.

Se empleó un DSC (Digital Signal Controller) de la familia TMS320 de Texas Instruments®. En particular, se utilizó el modelo TMS320-F28335, perteneciente a la familia de procesadores C2000 y diseñado para proveer soluciones de alto rendimiento en aplicaciones de control exigentes. El mismo se compone de un DSP y módulos periféricos integrados en un mismo chip, tales como conversores analógico-digital (ADC), digital-analógico (DAC), generación de señales PWM, entre otros. Sus características principales, se resumen a continuación:

- Frecuencia de operación de 150 MHz.
- CPU de 32 bits con punto flotante.
- Controlador DMA de 6 canales para acceso a memoria a alta velocidad.
- Memoria 256KB x 16 Flash, 34KB x 16 SRAM.
- 1KB x 16 OTP (once time programmable) ROM.
- Boot ROM (8KB x 16).
- 64 pines I/O digitales (GPIO0 a GPIO63).
- Bloque de expansión de interrupciones periféricas (PIE).
- Código de seguridad de 128 bits.
- 18 salidas PWM.
- 3 temporizadores de la CPU de 32 bits.
- ADC de 12 bits con 16 canales y tiempo de conversión de 80 ns.

Para simplificar el desarrollo se adquirió una tarjeta de evaluación modelo eZdsp TMS320-F28335 de Spectrum Digital®. Permite desarrollar y ejecutar aplicaciones en tiempo real en forma rápida ya que es posible implementar los programas de usuario desde el entorno MATLAB-Simulink®.

Las ventajas de poder utilizar una aplicación tan completa y difundida en el ámbito científico y tecnológico para ejecutar, en tiempo real, dentro del DSC los algoritmos de control, provee al SH una excelente versatilidad. Por el contrario, esto no podría lograrse tan sencillamente si se tuviese que utilizar algún lenguaje estructurado conocido como C, C++, entre otros.

Esta razón fue la que impulsó la decisión de elegir este módulo de entre otras opciones comerciales disponibles, con capacidades de cómputo y desarrollo similares.

Entre las características mas destacadas de este módulo se encuentran las siguientes:

Hardware:

- CPU DSC TMS320-F28335.
- Zócalo de presión para la conexión del DSC (permite reemplazarlo si el DSC se daña).
- Memoria SRAM externa adicional de 256 KB.
- Interfase RS-232 con drivers de línea incorporados.
- Interfase CAN 2.0 con drivers de línea incorporados.
- Conector de expansion multiple para acceso a los GPIO del DSC.
- Controlador USB JTAG embebido para supervisión y depuración en tiempo real.

Software:

- TI F28xxx Code Composer Studio version 3.3 (Generación Código Máquina DSC).
- Soporte F28335 APIs.
- Archivos de encabezamientos y ejemplos de software F28335.

Características de los periféricos del TMS320-F28335

Convertor Analógico Digital (ADC).

El DSC cuenta con un ADC de 12 bits y 16 canales. Cada canal dispone de un Sample and Hold (S/H) y el resultado de conversión puede ser leído individualmente a través de un único registro por canal.

El ADC admite un rango de tensiones de entrada comprendido entre 0 y 3 V.

Es importante destacar que el módulo ADC necesita una tensión de referencia para realizar la conversión de las señales muestreadas. Esta referencia puede ser provista desde una fuente interna o externa. En el modo interno, el ADC lee el valor de esta tensión desde un registro de memoria interno; mientras que en modo externo, lo hace

a partir de una entrada al DSC (el mismo admite tres valores de tensión externa de referencia diferentes: 2,048V, 1,5V y 1,024V).

La frecuencia de reloj de conversión de este módulo es de 12,5 MHz y puede ser modificada a partir de la configuración de un registro interno. Existen tres configuraciones posibles para la adquisición y conversión:

- *Software*: A partir de una instrucción se produce una interrupción indicándose el disparo de comienzo de adquisición de las señales de entrada y conversión de las mismas.
- *PWM*: Consiste en realizar una interrupción mediante el módulo ePWM.
- *Externa*: A partir de una señal de interrupción en un pin dedicado del DSC (XINT2).

Por otro lado la interrupción de fin de conversión (EOC) de los canales del módulo ADC puede realizarse mediante una petición de interrupción en cada conversión finalizada o después de finalizar varias conversiones.

Respecto al modo de operación, existen dos posibilidades. Los 16 canales del ADC son multiplexados y están divididos en dos grupos de 8. Es posible muestrear en simultáneo, uno a uno, cada canal de cada grupo. Esto resulta útil al medir señales diferenciales, pero reduce la cantidad de canales disponibles a 8 en total. O bien, utilizando los registros de control es posible utilizar los registros “secuenciadores”, que permiten realizar 16 “autoconversiones” secuenciales en una sola sesión (tiempo dado entre la conversión del primer canal y el último), donde cada conversión es guardada en cualquier registro previamente seleccionado (internamente utiliza las ventajas del DMA para aumentar la velocidad de conversión).

Entradas / Salidas Digitales (GPIOs).

Los pines de entrada-salida de propósito general (GPIO) pueden configurarse como entrada o salida, según sea conveniente. Todos ellos funcionan con lógica TTL-3.3V y algunos poseen una protección interna por enclavamiento para evitar que, en caso de utilizarse como entradas, sean dañados si la señal supera los límites de tensión máximos admisibles especificados. Cada vez que el DSC es reiniciado, los pines GPIO se configuran automáticamente como entradas y algunas cuentan con “Schmitt Trigger”. Las señales GPIO de entrada también pueden utilizarse para despertar al DSC de modos de funcionamiento de bajo consumo de energía.

Módulo PWM.

El DSC cuenta con seis módulos PWM (denominados “ePWM”), con dos salidas cada uno: “ePWMAx” y “ePWMBx”. Cada módulo contiene un registro de memoria para la configuración de la base de tiempo, independiente y con una resolución de 16

bits. Esta base de tiempo puede ser especificada por el usuario en forma absoluta en segundos o como cantidad de ciclos de reloj. Es posible configurar las dos salidas PWM de cada módulo como simétricas, asimétricas o independientes.

Programación del TMS320-F28335

Para su programación, se utilizan dos aplicaciones de manera conjunta: MATLAB® y Code Composer Studio® (CCS). MATLAB ofrece un entorno de desarrollo denominado Embedded Coder® que permite la generación de código C y C++ en forma rápida y compacta para la programación de procesadores embebidos. En particular, ofrece la capacidad de integrarse con el software Code Composer Studio® (CCS), que Texas Instruments® ha diseñado para la programación del controlador TMS320-F28335.

Los pasos necesarios para cargar el algoritmo de control en el DSC pueden resumirse del siguiente modo:

1. **Generación del código fuente:** Inicialmente se genera el código fuente dentro del entorno MATLAB-Simulink®, que permite la programación en forma sencilla mediante empleando diagramas de bloques. Su utilización en forma conjunta con el entorno Embedded Coder® permite seleccionar la tarjeta de prueba eZdsp F28335 para así poder representar los módulos a utilizar del DSC y configurar su operación adecuadamente. Una vez terminado el diagrama de bloques, se ordena a MATLAB® la compilación en lenguaje C del programa.
2. **Código objeto y ejecutable:** Mediante el software CCS se realiza la traducción del programa en C a lenguaje ensamblador. Luego, se genera el archivo ejecutable *.out para su posterior carga en memoria.
3. **Carga del programa en el DSC:** El ejecutable generado es transferido fácilmente a la memoria del DSC mediante las herramientas provistas por el ambiente de desarrollo CCS. Es importante destacar que desde MATLAB® es posible probar y verificar el algoritmo en ejecución dentro del controlador, intercambiar información con él en tiempo real, analizar tiempos de procesamiento del programa y simplificar la optimización del código entre otras tareas, gracias a la comunicación continua entre MATLAB®, Code Composer® y el DSC.

6.7. Fuentes Auxiliares del Sistema Híbrido

Como se describió al principio del capítulo el SH posee adicionalmente una fuente electrónica programable y una carga electrónica programable. Ambos equipos

fueron incorporados con el objetivo de incrementar la versatilidad del SHGEE desarrollado. La primera, tal como se mencionó permite emular una fuente de generación alternativa adicional (eólica, solar-fotovoltaica, diesel, entre otras). Por otra parte, la carga electrónica programable permite implementar perfiles de carga de diferentes características. A continuación se describen ambos módulos. Cabe aclarar que, como se mencionó al principio del capítulo, no se realiza un análisis detallado puesto que como se destacó en varias oportunidades son equipos comerciales.

6.7.1. Canal Auxiliar - Fuente Electrónica Programable

Este canal constituye una eventual segunda fuente de generación de energía. Está basado en una fuente de potencia programable comercial de la compañía *H&H*[®]. Su tensión de salida nominal es de 80V y su potencia máxima de 5 kW. En la Figura 6.23 se presenta un esquema de este canal.

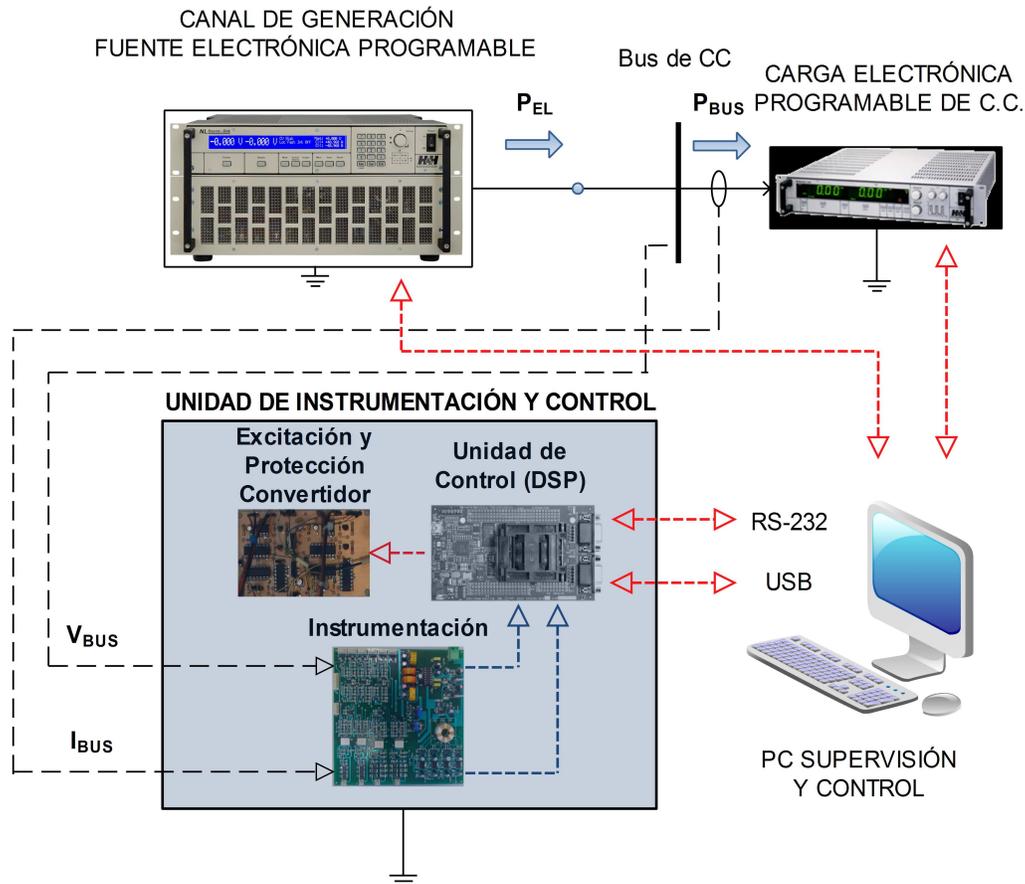


Figura 6.23: Canal de generación adicional basado en fuente electrónica programable.

Como se puede observar, la conexión de la fuente programable al Bus de CC se hace en forma directa, sin ningún tipo de interfaz electrónica intermediaria. Esto es posible ya que la misma es compatible con la tensión máxima impuesta al Bus de CC (75V).

Se puede programar, mediante una PC a través de una interfaz serie RS-232, un perfil de inyección de potencia determinado.

6.7.2. Carga Electrónica Programable

La carga asociada al Bus de CC del SH es una carga electrónica programable del mismo fabricante de la fuente electrónica descrita en la sección anterior. La misma fue construida a medida y en la Tabla 6.14 se presentan sus características técnicas principales. Al igual que la fuente electrónica programable posee una interfaz serie RS-232/USB a PC y su programación se hace mediante LabView[®], utilizando unas librerías provistas por el mismo fabricante.

Parámetro	Valor
Tensión nominal de entrada V_{Ln}	80 [V]
Potencia nominal P_{Ln}	4,2 [kW]
Resolución Control Δ_x	8 bits (255 pasos)

Tabla 6.14: Características principales de la Carga Electrónica Programable.

La tensión en bornes y corriente de la carga son medidas por el propio equipo y enviadas hacia la PC para poder almacenarlas, o bien conocer su valor durante la operación del sistema. Se pueden programar alarmas e implementar mecanismos de seguridad que desconecten la carga en caso de que algún parámetro supere cierto límite preestablecido por el usuario, entre otras opciones interesantes.

6.8. Supervisión del Sistema Híbrido

La Unidad de Adquisición y Control incorpora diferentes elementos de monitoreo para que el usuario de la plataforma pueda conocer el estado general del sistema y detectar alguna anomalía, sin necesidad de una PC. Así, una vista del panel del módulo mencionado se presenta en la Figura 6.24.

Entre las opciones, la interfaz incorpora principalmente:

- Indicador testigo de encendido (“POWER”), de DSP activo y corriendo (“STATUS”) y del estado de cada uno de los convertidores: Activado/Desactivado (“EN 1” y “EN 2”).
- Voltímetros digitales para monitorear las tensiones de la FC, el SC y el Bus de CC.



Figura 6.24: Vista frontal del panel interfaz de usuario de la Unidad de Acondicionamiento y Control.

- Luces testigo de falla en los convertidores ante intentos de excitación simultánea de ambas llaves o pérdida de excitación de las llaves (“FLT 1” y “FLT 2”) y de falla en la conmutación en los IGBT (“VCERR 1” y “VCERR 2”).
- Pulsador para generar una interrupción programable (“INTERRUPT”). Por ejemplo, se puede utilizar para poner en marcha o detener en forma segura el funcionamiento de los convertidores y el conjunto completo.
- Conexión RS-232 a PC o equipo supervisor externo para el intercambio de información con el DSP (referencias de los lazos de control, monitoreo de parámetros y alarmas, entre otras posibilidades).

Por otra parte, todo el conjunto puede ser también supervisado a través de una PC. Utilizando una aplicación desarrollada en LabView[®], la PC interactúa con un computador de tiempo real de National Instruments[®], conectado a los diferentes módulos (UAC, Fuente electrónica Programable y Carga Electrónica Programable). Así, adquiere valores de corrientes, tensiones y potencias del sistema y permite visualizarlas en tiempo real. La aplicación permite graficar y almacenar las señales, así como también establecer alarmas para monitorear límites y detener el sistema automáticamente en caso de que alguna anomalía así lo requiera. En esta tesis no se detalla el desarrollo de esta aplicación puesto que fue realizada en conjunto con Técnicos del Laboratorio IRII y constituye un elemento adicional. El SH puede operarse sin necesidad de esta herramienta puesto que el control de los convertidores se realiza íntegramente desde el DSC. La PC de supervisión permite programar el DSC a través de una conexión USB. En la Figura 6.25 se muestra un diagrama en bloques que muestra de que manera lo diferentes módulos del sistema se vinculan con la PC de supervisión.

Finalmente, en las Figuras 6.26, 6.27 y 6.28 se muestran fotografías del Sistema

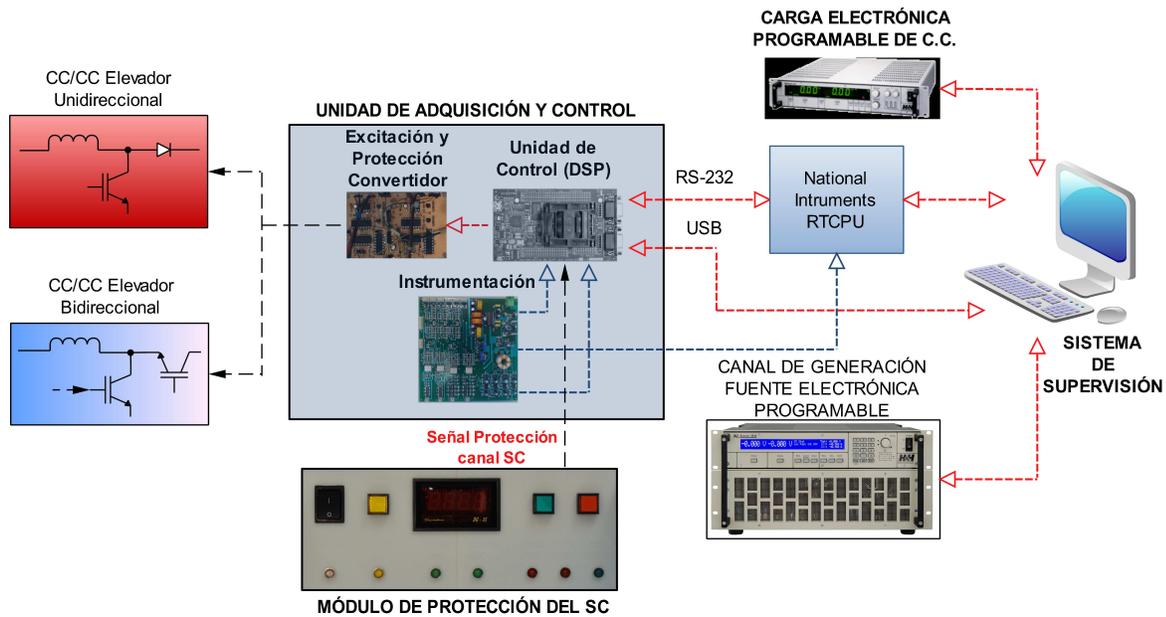


Figura 6.25: Diagrama en bloques de comunicación entre módulos del SH[®].

Híbrido. En cada una de ellas se indican las partes que los constituyen y que fueron descritas a lo largo de este capítulo.



Figura 6.26: Fotografía del Sistema Híbrido desarrollado (frente).

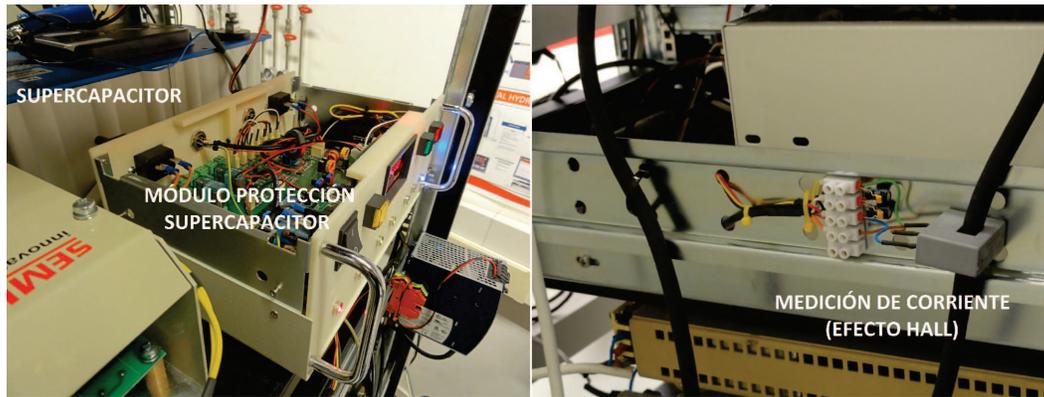


Figura 6.27: Detalles del Sistema Híbrido (conexionado UAC y Bus de CC).

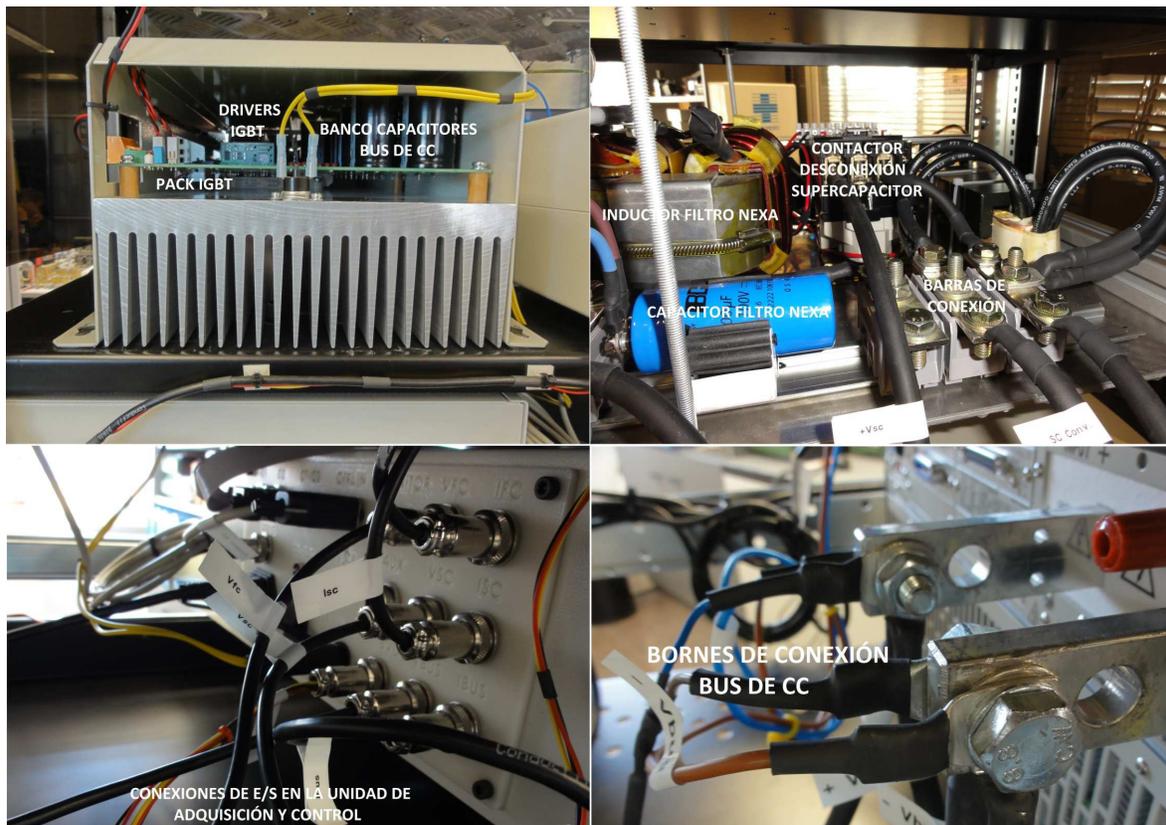


Figura 6.28: Detalles del Sistema Híbrido (CC/CC, SC).

6.9. Resumen del Capítulo

Tal como fue presentado en este capítulo, el SH desarrollado está basado en una PEMFC comercial de 1,2 kW, modelo Nexa[®] de la compañía Ballard[®], como fuente de generación principal y un SC Maxwell[®] de 165F, como sistema de almacenamiento de energía. En este sentido, para la estructura seleccionada, se abordó el dimensionamiento

y selección del SC y el diseño e implementación de los convertidores electrónicos de potencia y el hardware de adquisición de datos, procesamiento y control asociado. Durante el desarrollo del convertidor asociado a la PEMFC surgió la necesidad de incluir un filtro L-C para la corriente de la PEMFC cuyo objetivo es evitar que sea sometida a un rizado de alta frecuencia y gran amplitud. También se describió el diseño de la protección asociada al SC y los circuitos de excitación y protección de los convertidores CC/CC.

Asimismo, a los efectos de “emular”, si fuese necesario, una turbina eólica, un sistema solar fotovoltaico o cualquier otra fuente de interés se incorporó un canal de generación adicional, basado en una fuente electrónica programable. Por último, como carga, emplea una del tipo electrónica programable, que ofrece gran versatilidad permitiendo implementar múltiples perfiles para evaluar el funcionamiento del conjunto.

En el próximo capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, a los efectos de verificar el correcto funcionamiento del SH desarrollado.

CAPÍTULO 7

OPERACIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO DESARROLLADO

7.1. Introducción

Habiéndose detallado el diseño e implementación del Sistema Híbrido de Generación de Energía Eléctrica, basado en tecnologías PEMFC/SC, en este capítulo se presenta su operación y analiza su desempeño, a partir de resultados experimentales obtenidos de pruebas realizadas sobre el sistema.

Para el desarrollo de las pruebas, primero se presentan modelos dinámicos correspondientes a los módulos y al sistema en su conjunto. Asimismo, se describen los lazos de control implementados, basados en controladores lineales clásicos, con el objetivo de hacer un seguimiento de un perfil de potencia de carga, preestablecido. Luego, previo a las pruebas experimentales, el conjunto es simulado a los efectos de comprobar si el diseño cumple las especificaciones deseadas.

Finalmente, se describen algunas características relativas a la implementación del control y puesta en marcha del SH y muestran los resultados obtenidos de las pruebas experimentales realizadas. En este sentido, a los efectos de demostrar el excelente desempeño del conjunto, se evalúan, primero, los convertidores electrónicos de potencia para ambos canales y luego el conjunto completo alimentando una carga de perfil variable, mientras se regula la tensión del Bus de CC en su valor deseado. En particular, esta última prueba expone las ventajas del SH desarrollado, para producir energía eléctrica en forma continua con una adecuada respuesta dinámica, sin exigir la PEMFC.

7.2. Modelo dinámico del Sistema Híbrido

En esta sección, se presentan los modelos dinámicos empleados para la PEMFC, el SC y ambos convertidores electrónicos asociados, necesarios, como paso previo, a las pruebas experimentales.

7.2.1. Modelo dinámico de la PEMFC

Como se describió en el Capítulo 6, la Nexa[®] consiste en un stack tipo PEM y subsistemas auxiliares que incluyen el compresor, los dispositivos de regulación de hidrógeno, el sistema de refrigeración y el de manejo de agua producto de reacción.

Las características mencionadas hacen que, para tareas de análisis y diseño específicas de esta PEMFC y sus subsistemas internos, se requiera de modelos no lineales considerablemente complejos. Afortunadamente, en esta aplicación, se la puede considerar como un módulo cerrado, constitutivo de un SHGEE. En este sentido, la Nexa[®] puede ser modelada en forma relativamente simple, a través de la función no lineal que caracteriza su relación tensión-corriente de salida. Esta última, dada por la expresión de la Ecuación 3.51, se reproduce a continuación.

$$v_{FC} = f(i_{FC}) = N_{FC} \cdot [E_0 - A \cdot \ln(i_{FC}) - i_{FC} \cdot R_{FC} - m \cdot \exp^{n \cdot i_{FC}}] \quad (7.1)$$

Dónde, los valores de los parámetros de la expresión anterior se presentan en la Tabla 7.1.

Parámetro	Valor	Unidad
Cantidad de celdas del stack (N_{FC})	43	-
Tensión de circuito abierto por celda (E_0)	1,031	V
Resistencia equivalente “lineal” de la PEMFC (R_{FC})	$2,45 \cdot 10^{-4}$	Ω
Pendiente de la ecuación de Tafel (A)	0,03	-
Constante de caída de tensión (“ m ”)	$3 \cdot 10^{-5}$	V
Constante de caída de tensión (“ n ”)	$8 \cdot 10^{-3}$	$cm^2 mA^{-1}$

Tabla 7.1: Parámetros del modelo de estado estacionario V-I de la Nexa[®].

Los mismos, fueron obtenidos de diferentes trabajos (Kirubakaran, 2009a; Azib, 2008) y de ensayos experimentales y mediciones sobre la PEMFC, realizados previamente en el laboratorio de pilas de combustible del IRII, UPC.

7.2.2. Modelo dinámico del Supercapacitor

Un modelo dinámico completo para el SC se presenta en la Figura 7.1. En éste, R_1 representa la ESR-CC, descrita en el Capítulo 6, y C_1 es la capacidad entre ambos electrodos y el electrolito (C_{SC}). Luego, el conjunto $R_1 - C_1$ constituyen la rama principal del modelo (conocida también como “rama rápida”), que determina la evolución de energía en el SC durante los ciclos de carga y descarga.

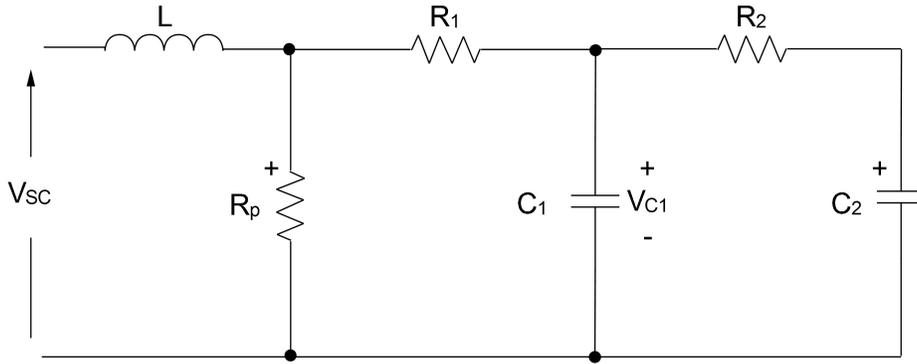


Figura 7.1: Modelo eléctrico completo de un SC.

Asimismo, el conjunto $R_2 - C_2$, que completa el modelo, corresponde a la “rama lenta” y describe la distribución interior de energía durante el tramo final de carga (o descarga). Por otra parte, R_p considera el efecto de “auto-descarga” y sólo tiene un impacto considerable en largos períodos de almacenamiento. Adicionalmente, el modelo incorpora una inductancia serie L_{SC} cuyo efecto puede aparecer en aplicaciones dónde el SC deba entregar pulsos muy rápidos y de gran energía.

Considerando estos parámetros, un modelo dinámico adecuado para describir el comportamiento del dispositivo en aplicaciones como la desarrollada en esta tesis, solo debe considerar la rama rápida $R_1 - C_1$ (Shah, December 2008). Sin embargo, considerando que la ESR es muy pequeña y solo limita, fundamentalmente por razones térmicas, la corriente máxima que el mismo puede entregar u absorber, también puede ser despreciada. De esta manera, el SC se puede modelar dinámicamente simplemente por su capacidad C_{SC} , dónde sus parámetros se relacionan por la conocida Ecuación 7.2.

$$\dot{v}_{SC} = \frac{dv_{SC}}{dt} = -\frac{i_{SC}}{C_{SC}} \quad (7.2)$$

Siendo $C_{SC} = 165F$ Esto es válido y representa el comportamiento dinámico del dispositivo en aplicaciones de potencia dónde no es “exigido” en términos de corrientes máximas de carga / descarga y límites de operación, como ocurre en el sistema aquí tratado. El signo “-” de la expresión \dot{v}_{SC} establece que la corriente a través del

dispositivo se considera positiva cuando entrega energía al sistema (y por lo tanto se descarga).

7.2.3. Modelo dinámico de los convertidores CC/CC.

Los convertidores electrónicos deben ser adecuadamente controlados a los efectos de suministrar la corriente, tensión o potencia de salida deseada, de acuerdo a los objetivos de control buscados en cada caso.

Con este propósito, se puede utilizar el modelo dinámico paramétrico promediado, considerando el período de conmutación T_s ya establecido (Erickson, 1999). De esta manera, a continuación, se presentan el conjunto de Ecuaciones 7.3 - 7.4 y 7.6 - 7.7 que representan el comportamiento dinámico de cada convertidor CC/CC.

Modelo del convertidor CC/CC canal FC:

$$\dot{i}_{Lfc} = \frac{di_{Lfc}}{dt} = -\frac{R_{Lfc}}{L_{fc}} \cdot i_{Lfc} + \frac{\delta + D_{fc}}{L_{fc}} \cdot v_{FC} - \frac{\delta}{L_{fc}} \cdot v_{Cfc} \quad (7.3)$$

$$\dot{v}_{Cfc} = \frac{dv_{Cfc}}{dt} = \frac{\delta}{C_{fc}(D_{fc} + \delta)} \cdot i_{Lfc} - \frac{i_{ofc}}{C_{fc}} \quad (7.4)$$

Dónde, δ considera ambos modos de operación (MCC y MCD) y vale:

$$\delta = \begin{cases} 1 - D_{fc} & \frac{2 \cdot L_{fc} \cdot i_{Lfc}}{D_{fc} \cdot T_s \cdot v_{FC}} \geq 1 \\ \frac{2 \cdot L_{fc} \cdot i_{Lfc}}{D_{fc} \cdot T_s \cdot v_{FC}} - D_{fc} & \frac{2 \cdot L_{fc} \cdot i_{Lfc}}{D_{fc} \cdot T_s \cdot v_{FC}} < 1 \end{cases} \quad (7.5)$$

Modelo del convertidor CC/CC canal SC:

$$\dot{i}_{Lsc} = \frac{di_{Lsc}}{dt} = -\frac{R_{Lsc}}{L_{sc}} \cdot i_{Lsc} + \frac{1}{L_{sc}} \cdot v_{SC} + \frac{1 - D_{sc}}{L_{sc}} \cdot v_{Csc} \quad (7.6)$$

$$\dot{v}_{Csc} = \frac{dv_{Csc}}{dt} = \frac{1 - D_{sc}}{C_{sc}} \cdot i_{Lsc} - \frac{i_{osc}}{C_{sc}} \quad (7.7)$$

En las expresiones anteriores, los sufijos “fc” y “sc” denotan los parámetros conocidos, correspondientes a los convertidores asociados a la PEMFC y al SC, respectivamente.

El desarrollo de estos modelos puede encontrarse detalladamente en bibliografía especializada como (Mohan, 1989) y (Erickson, 1999) y en el trabajo de (Sun, 2001). Como comentario, es importante mencionar que se considera únicamente como parámetro no ideal la resistencia del inductor R_L de cada convertidor ya que éstas tienen un peso relativo considerable en el desempeño dinámico del conjunto (Erickson, 1999).

7.2.4. Modelo Dinámico Completo del SH.

En la Figura 7.2 se presenta el esquema del SH con todos sus módulos. El modelo dinámico promediado completo, considerando obtenido a partir de los descriptos anteriormente, se presenta en las Ecuaciones 7.8 a 7.12.

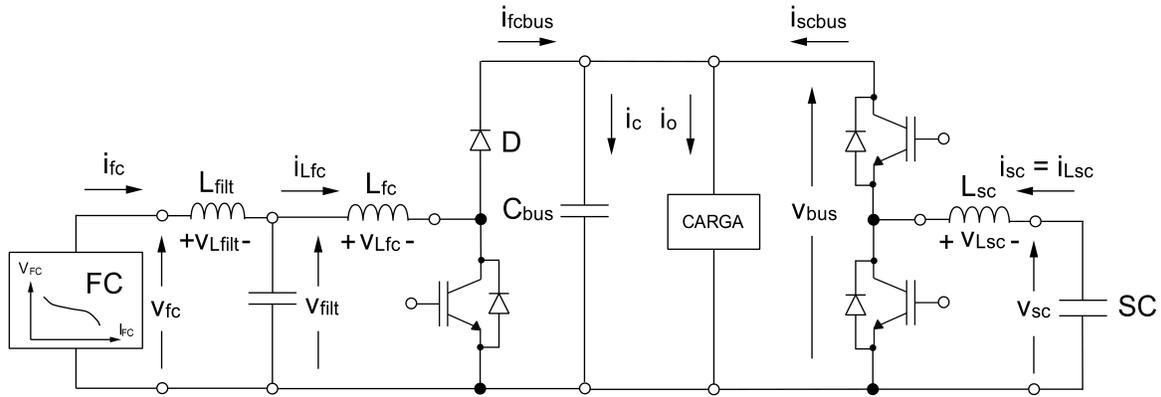


Figura 7.2: Modelo dinámico completo del SH.

Como se puede observar, a izquierda se encuentra el canal de generación basado en la PEMFC, a la derecha el canal de almacenamiento que emplea el SC y al centro el Bus de CC, común a ambos, dónde se encuentra conectada la carga. El modelo propuesto, además de los módulos ya descriptos, considera el filtro L-C entre la PEMFC y el CC/CC descripto en el capítulo previo.

$$\dot{i}_{L_{fc}} = -\frac{r_{L_{fc}}}{L_{fc}} \cdot i_{L_{fc}} + \frac{\epsilon + D_{fc}}{L_{fc}} \cdot v_{filt} - \frac{\epsilon}{L_{fc}} \cdot v_{bus} \quad (7.8)$$

$$\dot{i}_{L_{sc}} = -\frac{r_{L_{sc}}}{L_{sc}} \cdot i_{L_{sc}} + \frac{1}{L_{sc}} \cdot v_{SC} + \frac{1 - D_{sc}}{L_{sc}} \cdot v_{bus} \quad (7.9)$$

$$\dot{v}_{bus} = -\frac{i_o}{C_{bus}} + \frac{\epsilon}{C_{bus}(D_{fc} + \epsilon)} \cdot i_{Lfc} + \frac{1 - D_{sc}}{C_{bus}} \cdot i_{Lsc} \quad (7.10)$$

$$\dot{v}_{SC} = -\frac{i_{SC}}{C_{SC}} \quad (7.11)$$

$$\dot{v}_{filt} = \frac{i_{FC}}{C_{filt}} - \frac{i_{Lfc}}{C_{filt}} \quad (7.12)$$

Dónde:

$$i_o = \frac{P_o}{v_{bus}} \quad (7.13)$$

Siendo, i_o la corriente equivalente a través de la carga igual a la suma $i_{fcbus} + i_{scbus}$ y C_{bus} la capacidad total, suma de $C_{fc} + C_{sc}$ (capacidades individuales de ambos convertidores).

7.3. Control del Sistema Híbrido

En la Figura 7.3 se presenta un esquema del SH experimental implementado, con el sistema de control utilizado para realizar las pruebas de operación. En este sentido, el objetivo de control propuesto consiste en asegurar que el SH entregue eficientemente en cada instante la potencia demandada por la carga asociada, considerando principalmente las limitaciones dinámicas de la Nexa[®] y manteniendo constante la tensión del Bus de CC.

En el esquema se distinguen: dos lazos de control de corriente, un lazo de control de tensión, y un lazo de control supervisor de potencia. Los dos primeros actúan directamente sobre cada interfaz de potencia respectivamente, mientras que los dos segundos generan las señales de referencia de control para los dos primeros.

1. **Lazo de control de corriente para el convertidor CC/CC de la PEMFC:** Permite controlar la corriente de entrada al convertidor, equivalente a la corriente de salida de la Nexa[®]. Su diseño se basa en un controlador lineal clásico tipo proporcional-integral (PI) y actúa sobre el ciclo de trabajo del CC/CC (D_{fc}).

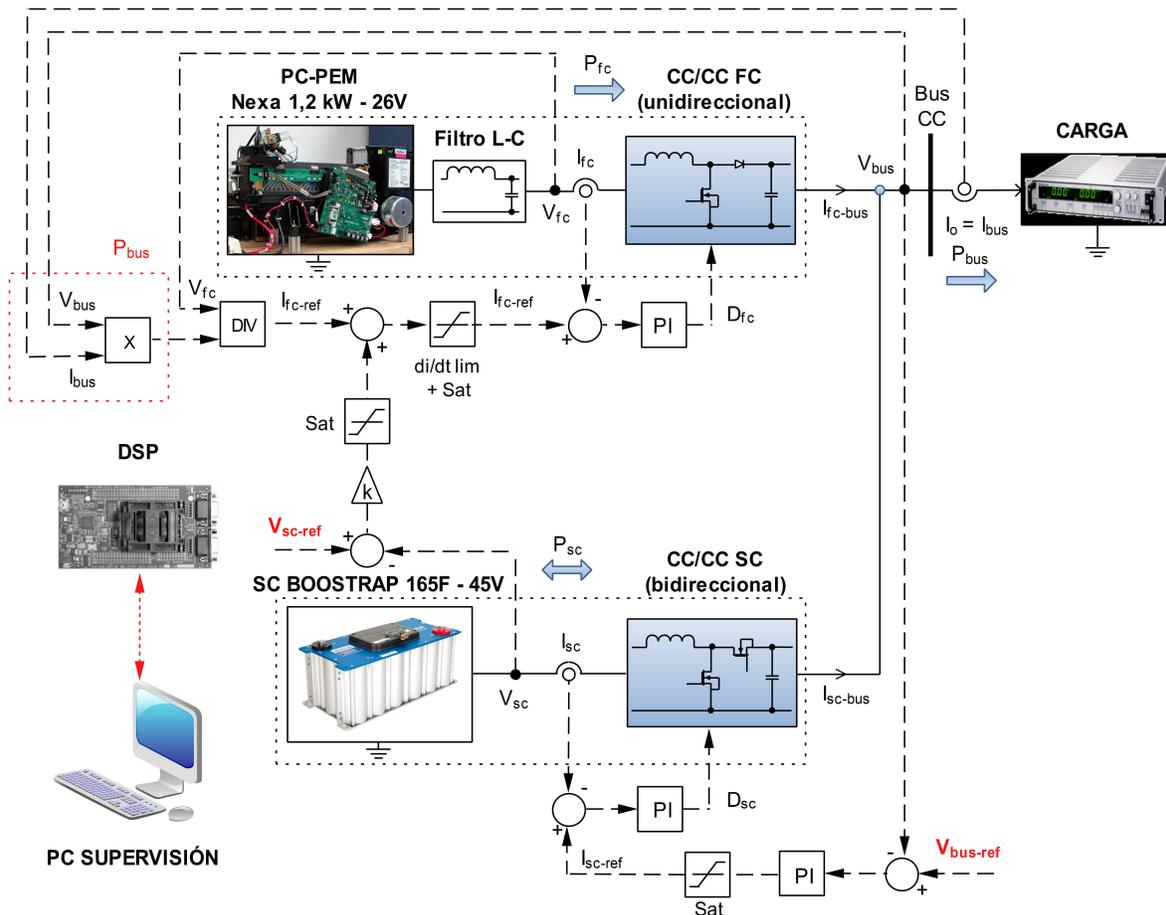


Figura 7.3: SH experimental y Control.

2. **Lazo de control de corriente para el convertidor CC/CC del SC:** Permite controlar la corriente a través del SC. Al igual que en el otro lazo, su diseño se basa en un controlador PI y actúa sobre el ciclo de trabajo del CC/CC (D_{sc}).
3. **Lazo de control de tensión del Bus de CC:** Este lazo mantiene constante la tensión del Bus de CC ($V_{bus-ref}$) del SH actuando sobre la referencia del lazo de corriente del SC (I_{sc-ref}). De esta manera, la tensión de salida del SH (V_{bus}) es controlada utilizando el canal de almacenamiento. Más adelante se explicarán las ventajas de esta implementación. Al igual que en ambos casos anteriores, este también utiliza un controlador tipo PI.
4. **Lazo supervisor de control de potencia de salida:** Este lazo supervisor de nivel superior, por un lado, mide la potencia de salida de carga (P_{bus}) y calcula la corriente que debe entregar la PEMFC para lograr abastecer la demanda. Actúa sobre la señal de referencia de corriente del convertidor electrónico del canal de generación (I_{fc-ref}). Por otro lado, permite que la PEMFC entregue una corriente adicional para mantener el SC cargado a un valor cercano de referencia (V_{sc-ref}).

El sistema completo es monitoreado por una PC que se comunica con el controlador

digital de señales (DSC) y permite establecer un vínculo con el usuario, de manera de que éste pueda conocer el estado del SH en todo momento. Además permite realizar la adquisición de las variables que intervienen en el sistema, para su posterior procesamiento.

7.3.1. Comentarios relativos al Control del SH

Tal como se ha establecido, el objetivo de esta tesis se centra en el diseño e implementación de un nuevo SHGEE basado en PEMFC/SC, sin pretender adentrarse en la síntesis de algoritmos de control avanzado y de altas prestaciones. No obstante, para poder valorar en forma integral el desempeño del SH desarrollado, se requirió de la utilización de una estructura de control sencilla pero suficientemente efectiva, que permitió operar el sistema a lazo cerrado, cumpliendo adecuadamente con las especificaciones básicas de funcionamiento. Es así que en esta subsección se introducirán sucintamente los conceptos esenciales asociados al sistema de control implementado para tales efectos.

En este contexto, a partir del esquema, se puede observar, que el lazo de control de potencia incorpora límites en la tasa de variación y rango de valores permitidos de su salida. El primero, limita la tasa de variación de corriente de la Nexa[®] a $1A/s$, teniendo en cuenta las ya mencionadas limitaciones dinámicas de esta fuente. El segundo, limita los valores de corriente permitidos entre $0A \leftrightarrow 45A$, siendo éste el rango de operación de la PEMFC, especificado por el fabricante.

Por otro lado, la salida del lazo de control de tensión del Bus de CC también está limitada. Los valores de corriente del SC deben estar entre $-55A \leftrightarrow +55A$, a los efectos de evitar daños en los componentes del SH. Estos valores límites (extremos) de corriente corresponden a la máxima corriente que deberá entregar/absorber el SC, de acuerdo a las especificaciones de diseño del Capítulo 6, para este dispositivo.

En un punto de operación estable, la PEMFC entrega la potencia media que demanda la carga y el SC permanece en “reposo”, sin entregar energía. Con el control implementado, ante un cambio abrupto en la potencia de salida, será el SC quien, en primera instancia, suministre/absorba la energía necesaria/excedente, a los efectos de evitar cambios en la tensión del Bus de CC. Luego, la PEMFC alcanzará lentamente el nuevo valor de potencia demandada y el SC volverá a su condición de “reposo”.

Por otra parte, si la potencia media de salida supera la nominal de la PEMFC, el exceso será suministrado temporalmente por el SC a fin de garantizar una tensión constante en el Bus de CC, hasta que la condición de sobrecarga haya desaparecido. En esta situación, es importante tener en cuenta que, en caso de una sobrecarga prolongada, el SC puede agotarse alcanzando el valor mínimo de carga permitido, especificado en la etapa de diseño (V_{SC-min}). En este punto, para que el SC pueda continuar suministrando la misma potencia, la corriente debería aumentar por encima de los $+55A$, pero esto no será posible y el sistema será desconectado por la PC de

monitoreo.

Finalmente, los controladores PI de los lazos de control, fueron sintonizados utilizando técnicas tradicionales de la teoría de control lineal. En la Tabla 7.2 se resumen los valores de los parámetros de cada controlador.

Controlador PI	K_p	K_i
Corriente en la PEMFC	$2,66 \cdot 10^{-4}$	0,16
Corriente en el SC	$2,66 \cdot 10^{-4}$	0,13
Tensión del Bus de CC	$2,66 \cdot 10^{-4}$	0,0013

Tabla 7.2: Parámetros de sintonía de los controladores PI.

Se buscó obtener una respuesta temporal de lazo cerrado aceptable, de acuerdo con los objetivos buscados, definida por parámetros típicos tales como sobrepaso, factor de amortiguamiento y tiempo de establecimiento.

Nótese que, con un adecuado diseño del control, es posible cumplir con los requerimientos dinámicos de la carga, permitiendo que la PEMFC opere siempre dentro de sus especificaciones de ancho de banda.

7.3.2. Simulaciones del SH, previas a las pruebas experimentales

En una etapa previa a las pruebas experimentales de funcionamiento, fue necesario llevar a cabo simulaciones para analizar y evaluar el comportamiento del SH, a los efectos de ajustar apropiadamente el sistema de control y la sintonía de los controladores asociados. En este sentido, en esta subsección se presentan algunos resultados representativos del funcionamiento del SH logrado en esta etapa. Para la realización de las simulaciones se utilizó el ambiente MATLAB-Simulink[®], dada su versatilidad para el desarrollo de estas tareas.

Simulación del Control de Corriente de la FC.

En la Figura 7.4 se presentan respuestas de lazo cerrado, para cambios del tipo escalón de referencia del control de corriente de salida de la Nexa[®]. Se consideró una tensión de salida V_{bus} constante de 60V, próxima al valor nominal de diseño (75V) y una corriente inicial de estado estacionario $i_{fcref} = 20A$. De esta manera, se aplicaron cambios de +20A (izquierda) y de -10A desde el estado inicial y -5 desde una corriente de 10A (derecha).

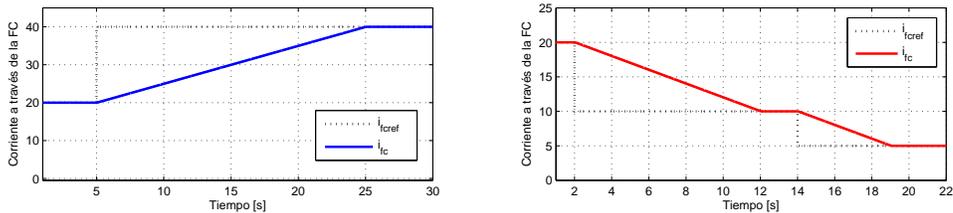


Figura 7.4: Simulación Δi_{fcref} de $+20A$ (izquierda) y $-10A$ y $-5A$ (derecha).

La línea negra a trozos muestra la señal de referencia de corriente, mientras que las líneas azules y rojas muestran las respuestas para cambios en la corriente del SC positivos y negativos respectivamente. Se puede verificar que en todos los casos se alcanzará error de estado estacionario cero y, tal como fue diseñado, la tasa de variación de corriente de la Nexa[®] estará acotada a $1A/s$. De esta manera, la corriente que entregará la PEMFC alcanzará el valor final deseado sin variaciones abruptas.

Simulación del Control de Corriente del SC.

En las Figuras 7.5, 7.5 y 7.5 se presentan respuestas de lazo cerrado, obtenidas para cambios tipo escalón en i_{scref} . En todos los casos $V_{bus} = 60V$, $V_{SC} = 22V$ (cerca al estado de mínima energía) y la corriente inicial es $i_{scref} = 0A$. A partir de las especificaciones del SC (ver Capítulo 5), para la tensión inicial dada, la corriente media se puede mover en el rango $[-55, 55]A$. Entonces, con el convertidor funcionando en estado estacionario se aplicaron de la corriente de referencia i_{scref} de $\pm 10A$, $\pm 25A$, $\pm 55A$.

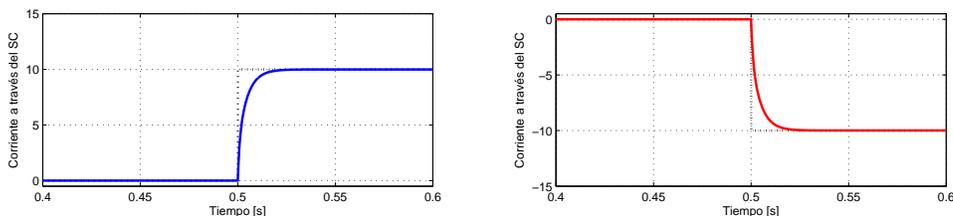


Figura 7.5: Simulación Δi_{scref} de $+10A$ (izquierda) y $-10A$ (derecha).

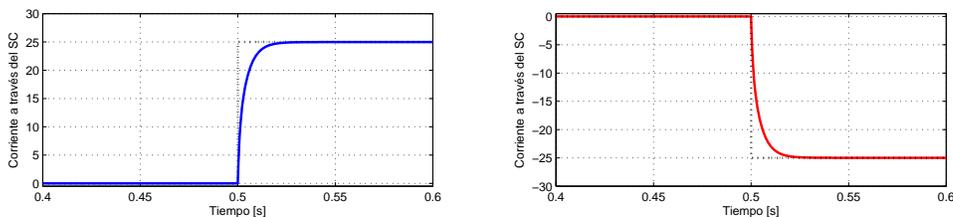


Figura 7.6: Simulación Δi_{scref} de $+25A$ (izquierda) y $-25A$ (derecha).

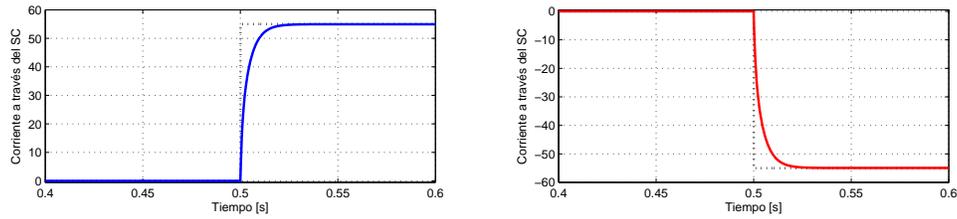


Figura 7.7: Simulación Δi_{scref} de $+55A$ (izquierda) y $-55A$ (derecha).

Al igual que en el caso de la PEMFC, la línea negra a trozos corresponde a i_{scref} , mientras que las líneas azules y rojas muestran las respuestas obtenidas en cada caso respectivamente. Las variaciones de corriente positivas ocurrirán durante la descarga del SC (entrega potencia), mientras que las negativas durante su carga (absorbe potencia).

Simulación del Control de Tensión del Bus de CC.

En las Figura 7.8 se presenta la respuesta de lazo cerrado al evaluar el control de tensión del Bus de CC, cambiando la referencia de tensión $V_{bus-ref}$. Considerando $V_{sc} = 30V$ (intermedia entre los estados de mínima y máxima energía), manteniendo la carga constante en el Bus de CC y partiendo de un valor $V_{bus} = 30V$, se efectuaron cambios del tipo escalón de $V_{bus-ref}$. Luego, tal como se observa en la figura, se aplicaron escalones de cambio de $+40V$, $+20V$ y $+15V$, sucesivamente .

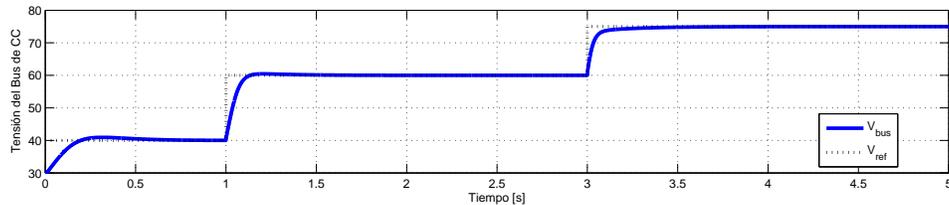


Figura 7.8: Simulación de cambio escalonado en $V_{bus-ref}$.

La línea negra a trozos representa el cambio en $V_{bus-ref}$ y la azul el cambio en V_{bus} , obtenido como respuesta. De acuerdo a estos resultados, la tensión cambiará rápidamente ($t_{establecimiento} \simeq 200ms$), alcanzando el valor final sin oscilaciones o sobrepaso importante ni error de estado estacionario. El controlador lineal fue diseñado en un punto de operación cercano a la V_{bus} nominal de diseño del SH, por esta razón puede aparecer un pequeño sobrepaso para valores de tensión mucho más bajos.

Por otra parte, en la Figura 7.9 se presenta la respuesta obtenida de evaluar el mismo lazo de control, pero ahora, manteniendo constante V_{bus} en $60V$ y cambiando la corriente I_{bus} . Entonces, partiendo de una corriente de salida inicial de $1A$, se efectuaron variaciones tipo escalón secuenciales a $3A$, $8A$, $16A$ y $5A$. De esta forma, se buscaba

analizar como dichas perturbaciones afectarán a la tensión V_{bus} y a la corriente en el SC. Se consideró una tensión inicial para el SC del mismo valor que el utilizado anteriormente.

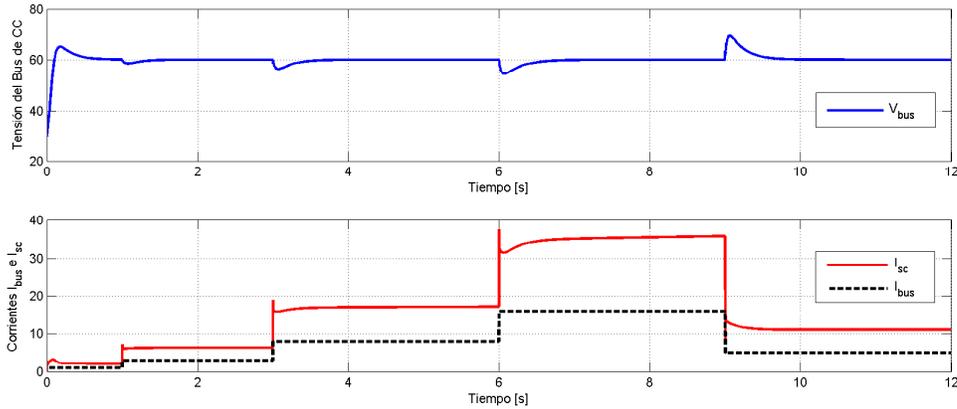


Figura 7.9: Simulación de cambio escalonado en I_{bus} .

En la figura se muestran dos resultados: el primero corresponde a las perturbaciones en V_{bus} y el segundo al cambio en las corrientes I_{SC} e I_{bus} . Como era de esperarse un cambio en I_{bus} producirá una perturbación en V_{bus} cuya amplitud depende de la magnitud del cambio efectuado. En este sentido, en la simulación, la peor condición ocurre al saltar de $16A$ a $5A$ ($\Delta V = 11A$), dónde la tensión del Bus de CC sufre una perturbación de unos $10V$, cifra que representa aproximadamente una variación relativa del 17% de su valor de estado estacionario. Si bien es un porcentaje elevado, también ocurre que el cambio de potencia fue considerable ($\Delta P_{bus} = 660W$). Por otra parte, se observa que, el control eliminará la perturbación en aproximadamente un segundo, tiempo que resulta aceptable, considerando la magnitud del cambio que dio su origen.

En la Figura 7.10 se presenta un acercamiento de la Figura 7.9 en $t = 6s$ y $t = 9s$, dónde ocurren los cambios de mayor magnitud y con objeto de observar el transitorio en I_{sc} .

Se aprecia un sobrepaso y oscilación en i_{bus} . Sin embargo, su amplitud porcentual será baja y se extinguirá rápidamente, no representando un problema para el desempeño del sistema.

Simulación del SH completo.

El SH completo fue simulado con el objetivo de evaluar la respuesta dinámica de ambos canales, ante cambios de potencia de carga. Con esto, se buscaba saber si, con el control empleado, el SH entregará en cada instante la potencia demandada por la carga, cumpliendo con las especificaciones deseadas. Se estableció $V_{bus} = 60V$ y las

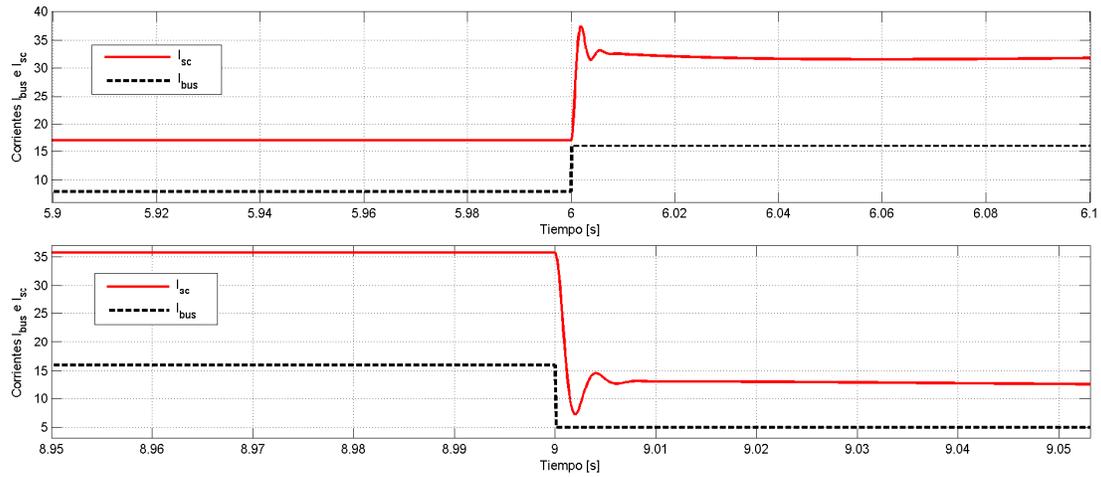


Figura 7.10: Acercamiento de I_{bus} en $t = 6s$ y $t = 9s$.

siguientes condiciones iniciales: Tensión inicial para el SC y regulada en 30V y corriente $I_{bus} = 10A$ ($P_{bus} = 600W$).

Entonces, se realizaron cambios en la potencia demandada por la carga, estableciendo I_{bus} en diferentes valores. En una primera parte y para observar la respuesta dinámica de ambas fuentes y algunas variables se realizaron dos cambios: Uno desde el valor inicial a una corriente de 15A (aumentando la potencia demandada en un 50%) y otro desde este último a 5A (reduciéndola ahora a un tercio). En la Figura 7.11 se presentan los resultados obtenidos.

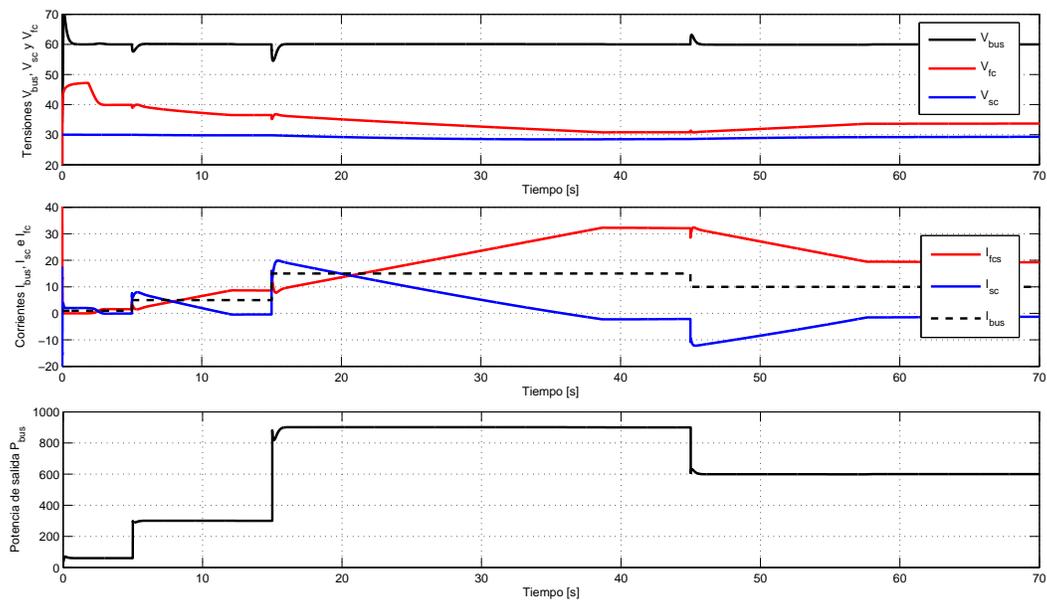


Figura 7.11: Resultados de simulación del SH ante cambios en I_{bus} .

En el primer gráfico, se presentan resultados correspondientes a V_{bus} , V_{fc} y V_{sc} .

En ellos se puede observar, como cambios en la potencia de salida producirán perturbaciones en V_{bus} , tal como sucedía cuando se simuló el control de tensión anteriormente. Sin embargo, estas serán eliminadas y la tensión regresará rápidamente a su valor nominal de 60V. De acuerdo a las condiciones impuestas, V_{fc} cambiará lentamente y su relación con la corriente que está entregando en cada instante estará dada por la característica V-I de la Nexa[®]. De las curvas de simulación se puede observar que la tensión V_{sc} sufre una variación mínima, decreciendo a partir del escalón de potencia positivo ($t = 15s$) y aumentando nuevamente durante el negativo ($t = 15s$).

En el segundo gráfico se muestran las corrientes del Bus de CC, la PEMFC y el SC. Se observa que ante una perturbación en la carga, i_{sc} reaccionará inmediatamente para entregar rápidamente la potencia requerida, mientras i_{fc} variará de acuerdo a las condiciones que le permite el control ($\Delta i_{fc} = 1A/s$), hasta alcanzar la nueva potencia media exigida. Por último, el tercer gráfico, corresponde a la potencia de salida P_{bus} . Se puede observar una adecuada respuesta dinámica del SH, gracias a las “propiedades” de ambos canales.

En la Figura 7.12 se muestran resultados del SH bajo una condición de sobrecarga, es decir, la potencia demandada supera a la máxima que puede entregar la Nexa[®], requiriendo del “apoyo” del SC.

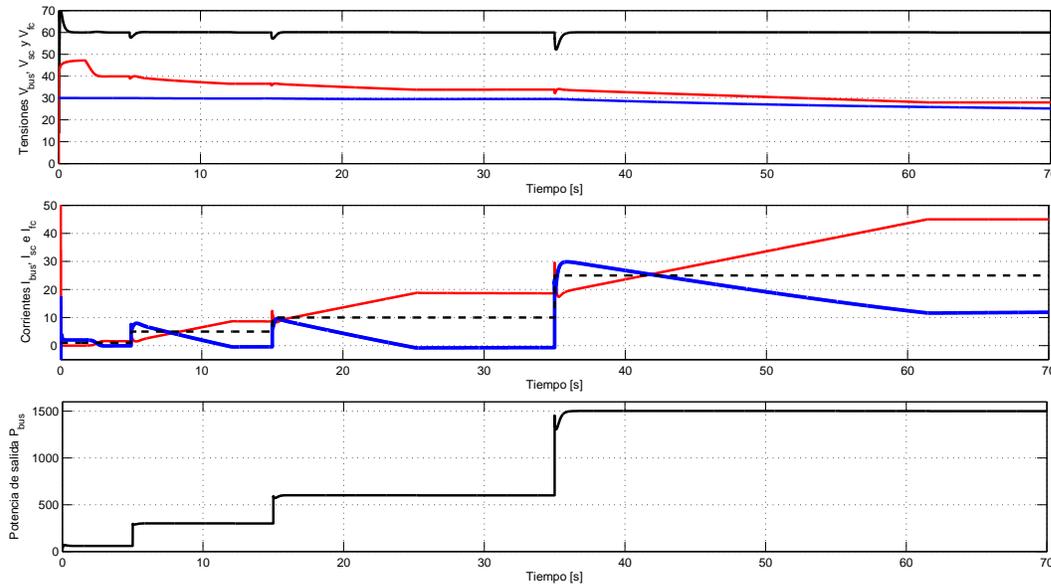


Figura 7.12: Resultados de simulación del SH con sobrecarga.

Se observa como la PEMFC alcanzará su potencia nominal y el SC entregará la corriente necesaria para suministrar la potencia de salida requerida. Esta condición no puede perdurar en el tiempo indefinidamente puesto que produce la descarga del SC hasta alcanzar la mínima tensión (energía) permitida.

Por último, el SH fue simulado para pequeñas perturbaciones en la potencia de salida. Los parámetros de simulación corresponden a los mismos del caso anterior. Se

produjeron saltos escalonados de la corriente de salida de 1A, 2A y 3A hacia arriba y hacia abajo respecto al valor inicial de estado estacionario. En la Figura 7.13 se presentan los resultados.

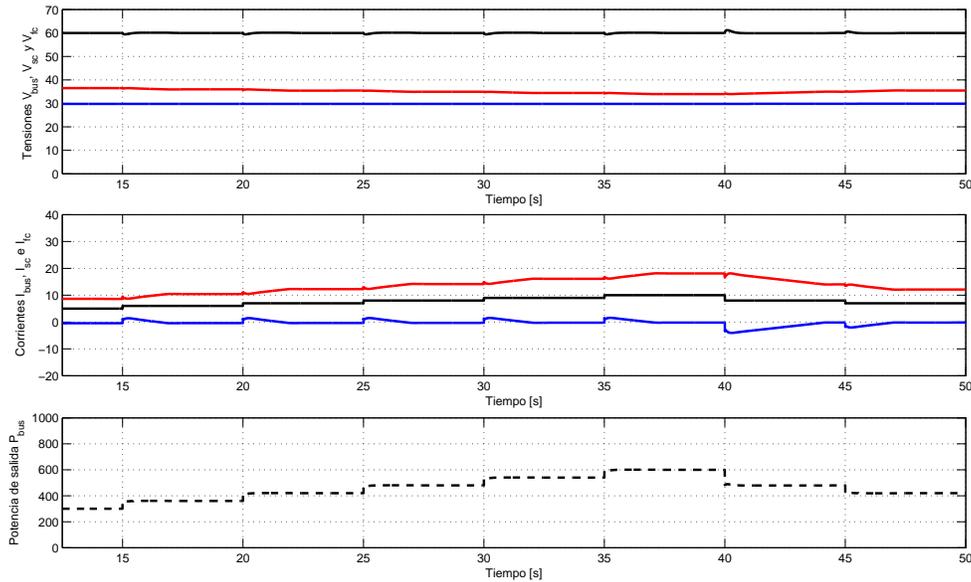


Figura 7.13: Resultados de simulación del SH completo para pequeñas perturbaciones.

En este caso se puede observar que pequeñas perturbaciones en I_{bus} no producirán perturbaciones significativas en V_{bus} .

7.4. Implementación y Pruebas Experimentales

Para demostrar el correcto desempeño del Sistema Híbrido desarrollado, el mismo fue probado experimentalmente. A continuación, se describen primero, algunas consideraciones generales que se tuvieron en cuenta respecto a la implementación del mismo y puesta en marcha.

7.4.1. Detalles de implementación de hardware y software

En este sistema, los convertidores de potencia operan aplicando PWM en las llaves controladas. El PWM para cada convertidor es generado por un módulo específico interno del DSC (TMS320F28335), basado en un esquema de modulación complementario. El período de actualización (sincronización) del ciclo de trabajo puede ser de un múltiplo entero del ciclo de conmutación ($k \cdot T_s$) o a partir de una interrupción interna de software. La frecuencia de conmutación utilizada es de $f_s = 20kHz$, tal

como especificó durante el diseño de hardware. Las salidas PWM, se envían al módulo de excitación y protección que, tal como se explicó en el Capítulo 6, se encarga de acondicionar los niveles lógicos de señal a los del driver y evitar la excitación simultánea de ambas llaves. En la Figura 7.14 se presenta el esquema de modulación utilizado. Se puede observar que se ha incluido un tiempo muerto que permite evitar conducción simultánea de ambas llaves, debida a la conmutación no instantánea (real) de las mismas.

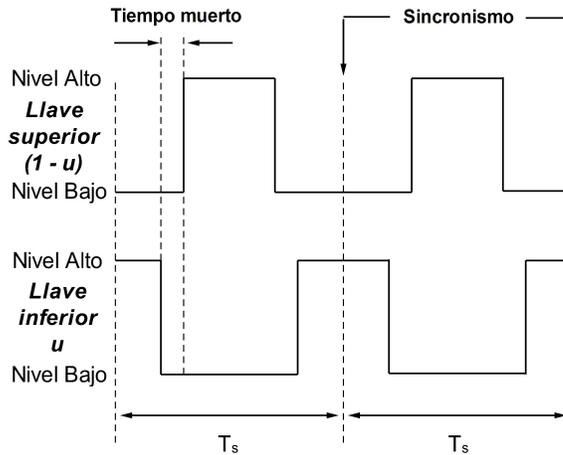


Figura 7.14: Esquema PWM utilizado.

El algoritmo de control completo del sistema fue programado utilizando MATLAB-Simulink[®] a través de bloques interconectados. El MATLAB[®] incluye una librería que contiene los módulos internos del DSC facilitando el desarrollo de aplicaciones. Luego, con el CODE COMPOSER Studio[®] se genera el código de máquina correspondiente y realiza su descarga en el DSC.

Para medir las tensiones y corrientes externas, se eligió una frecuencia de muestreo de $5\mu s$, es decir, 10 veces menor que T_s . El ADC interno del DSC se utilizó en modo de adquisición simultánea, donde las señales son muestreadas de a pares, por período de adquisición, permitiendo optimizar el tiempo de ejecución del código y disponer de todas ellas en $15\mu s$ (tres pares). El módulo PWM se configuró para que su sincronización sea realizada al inicio de cada período de conmutación ($k \cdot T_s$) y que a su vez en dicho instante se dispare una nueva adquisición del ADC. Las tensiones y corrientes son adquiridas, el código es ejecutado y finalmente se generan los nuevos valores de ciclo de trabajo D para el PWM de cada llave de los CC/CC. De esta manera, para un óptimo desempeño, es importante disponer del nuevo valor de D antes del nuevo período de conmutación ($(k + 1) \cdot T_s$).

Respecto al tiempo de ejecución del código, esto no representa un problema puesto que, como se sabe, el DSC tiene una frecuencia de reloj de 150 MHz y dispone de unidades de punto flotante y módulos de hardware para multiplicación y división que permiten realizar las operaciones necesarias muy rápidamente. En la Figura se describe la secuencia de ejecución del programa.

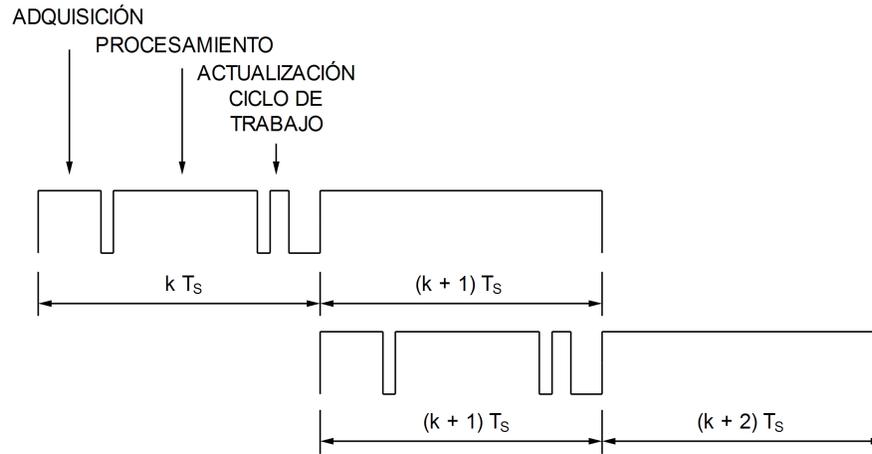


Figura 7.15: Adquisición, procesamiento y sincronización del PWM.

7.4.2. Algunas consideraciones necesarias para la puesta en marcha

Para la puesta en marcha del SH, evitando provocar daños en sus módulos, es necesario considerar una secuencia de inicio adecuada, estableciendo algunas condiciones. Los puntos principales a considerar se enumeran a continuación:

1. Posición inicial de las llaves de los convertidores.
2. Tensiones iniciales y niveles de corriente de la Nexa[®], el SC y el Bus de CC.
3. La secuencia y orden apropiados en la que los convertidores son inicializados.
4. Los valores iniciales para las referencias de los lazos de control.

La primera que puede tenerse en cuenta es el orden en el cual los convertidores electrónicos son “encendidos”. En este sentido, primero la tensión de operación del Bus de CC V_{bus} debe alcanzar un valor de estado estacionario inicial antes que el resto de los módulos comiencen a funcionar. Para esto, puede utilizarse como primera opción la Fuente Electrónica Programable, descrita en el Capítulo 6, de manera de utilizarla para cargar los capacitores del Bus de CC a un valor de tensión deseado y luego, desconectarla; o bien, utilizar la PEMFC a través del diodo del convertidor CC/CC tal como se muestra en la Figura 7.16.

Con ambos convertidores electrónicos “apagados”, si se enciende la PEMFC los capacitores del Bus de CC se cargarán al valor de la tensión de vacío de la misma. El diodo del CC/CC impide, además, que la corriente solo fluya desde la Nexa[®] hacia el Bus de CC.

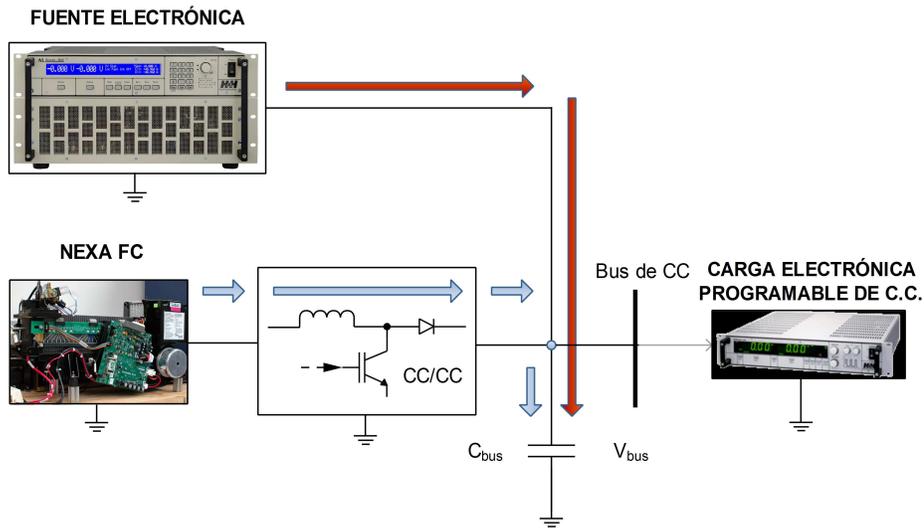


Figura 7.16: Circuito de inicialización de la tensión del Bus de CC.

Por otra parte, es necesario que el SC esté cargado a un valor de tensión seguro, menor o igual al del Bus de CC. Para cargarlo inicialmente, se puede utilizar nuevamente la Fuente Electrónica Programable y el circuito de la Figura 7.17 cerrando manualmente “ S_2 ”, o incorporando un algoritmo de pre-carga en el software del DSC que utilice el CC/CC del canal. Por razones de seguridad e integridad, condición necesaria para trabajar con este dispositivo que el Módulo de Protección esté encendido.

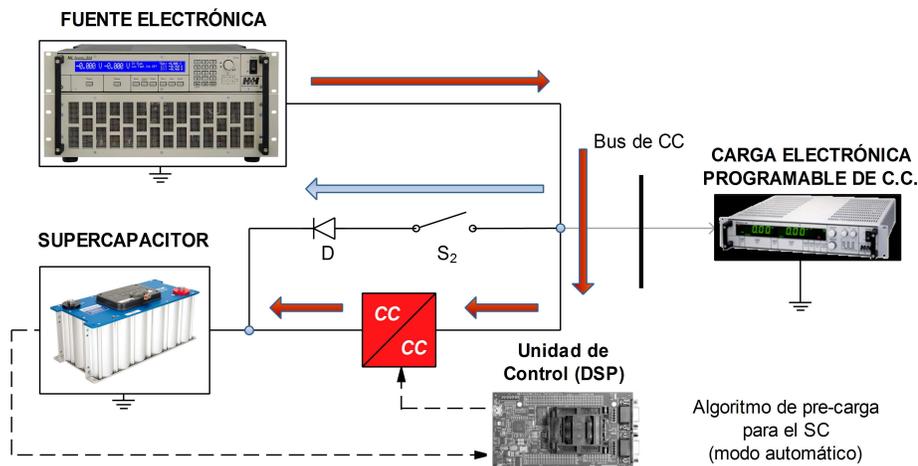


Figura 7.17: Circuito de inicialización de la tensión del SC.

Otros dos factores importantes son la posición inicial de las llaves de los convertidores y el valor inicial del ciclo de trabajo del PWM al momento en el que los mismos comenzarán a funcionar. En el arranque, la llave inferior de ambos convertidores debe estar abierta. Esta condición puede lograrse fácilmente ajustando la configuración del módulo PWM del DSC. Asimismo, este último debe comenzar a funcionar solamente después que el algoritmo de control provea una salida válida y

segura. Para el convertidor bidireccional, asociado al SC, es importante que la llave superior de la columna se encuentre inicialmente abierta (antes de energizar el sistema o con el mismo en reposo), puesto que de lo contrario podría producirse un cortocircuito entre el SC y el Bus de CC.

Finalmente, inicialmente para el “arranque”, después que la Nexa[®] se ha encendido y se encuentra en estado estable con todos sus circuitos funcionando correctamente y el SC se ha pre-cargado a un valor de tensión inicial, es necesario llevar la tensión del Bus de CC lentamente desde el valor inicial a la tensión deseada en el Bus de CC. Esto último, activando primero el control de corriente de los convertidores CC/CC. y luego, el control de tensión que actúa sobre el canal del SC. Una vez que se ha alcanzado este estado, se puede iniciar, el lazo de control de potencia y conectar carga al SH.

Al detener el sistema, es importante llevarlo a un valor seguro. Esto es, principalmente que ambos convertidores se encuentren apagados (todas sus llaves abiertas) y el SC sea descargado completamente.

7.4.3. Pruebas experimentales y Resultados

Para una clara presentación de los resultados, los mismos fueron organizados en dos grupos. En el primero se realizaron pruebas sobre los canales en forma independiente, para verificar el funcionamiento de los convertidores electrónicos de potencia. El segundo grupo, el SH completo fue probado, siguiendo los objetivos de control de la Sección 7.3, a los efectos de demostrar que el conjunto funciona satisfactoriamente.

Prueba de funcionamiento de los convertidores electrónicos del SH.

Para ambos CC/CC, utilizando un osciloscopio digital Tektronik[®] con capacidad de almacenamiento, se observaron, para diferentes puntos de operación de estado estacionario y a lazo abierto: la tensión de entrada, de salida y la corriente de entrada en cada uno de ellos. Se buscaba verificar si cumplían, en dichos puntos, especificaciones de rizado de corriente y relación de conversión. Para el análisis, las pruebas fueron recreadas en simulación, en condiciones de operación equivalentes utilizando los modelos y parámetros de diseño desarrollados en el capítulo anterior, a los efectos de sacar conclusiones por comparación.

En las Figuras 7.18, 7.19, 7.20 y 7.21 se muestran capturas de osciloscopio, obtenidas para diferentes puntos de operación del convertidor electrónico del canal de la PEMFC.

En estas curvas se muestran la corriente de entrada al convertidor y las tensiones en la Nexa[®] y en el Bus de CC, para diferentes valores de corriente de salida I_o y de D . A la izquierda, se encuentran los resultados de simulación y a la derecha los experimentales. Se puede observar que en todas ellas el rizado en i_{L-FC} posee una

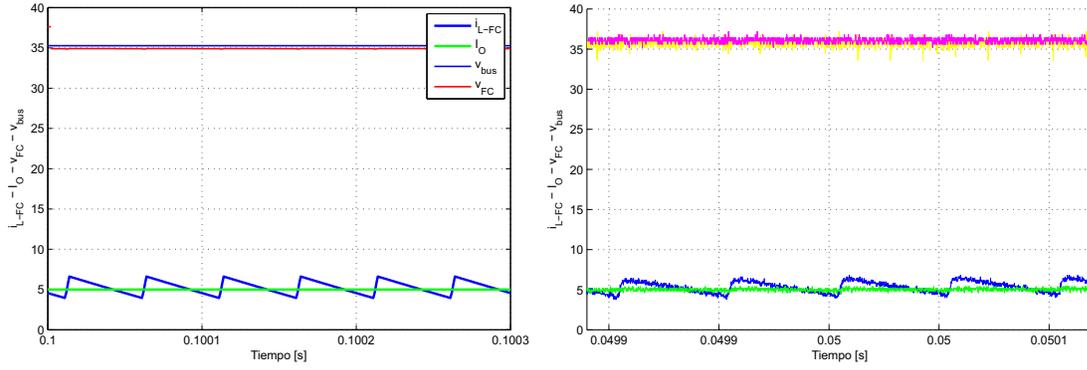


Figura 7.18: i_{L-FC} , v_{FC} y v_{bus} para $I_o = 5A$ y $D = 0,05$.

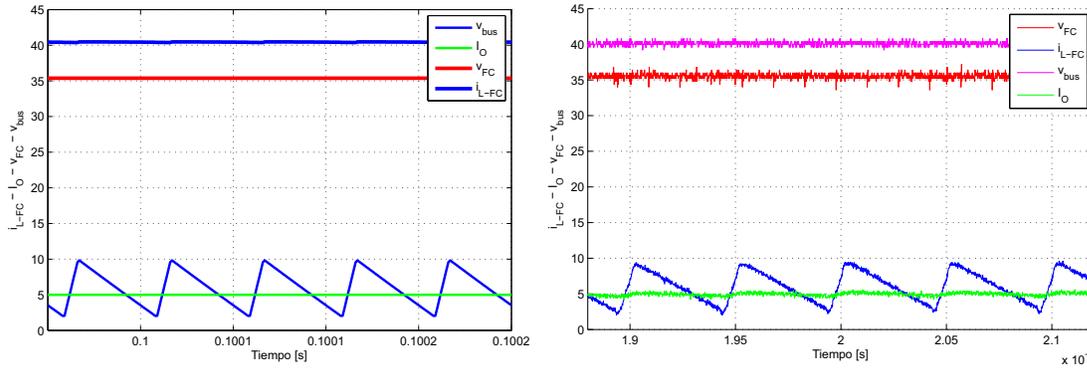


Figura 7.19: i_{L-FC} , v_{FC} y v_{bus} para $I_o = 5A$ y $D = 0,15$.

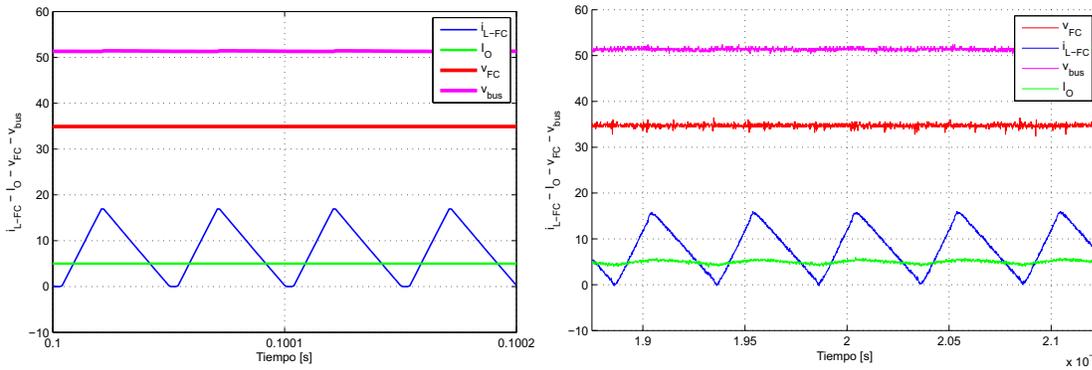


Figura 7.20: i_{L-FC} , v_{FC} y v_{bus} para $I_o = 5A$ y $D = 0,35$.

período de $T_s = 1/f_s = 50\mu s$ tal como era de esperarse. Como primera conclusión, el lector puede encontrar que en todos los casos las curvas de simulación y experimentales, para condiciones equivalentes, presentan un alto grado de coincidencia, verificando que el comportamiento real es el esperado para los valores de diseño especificados.

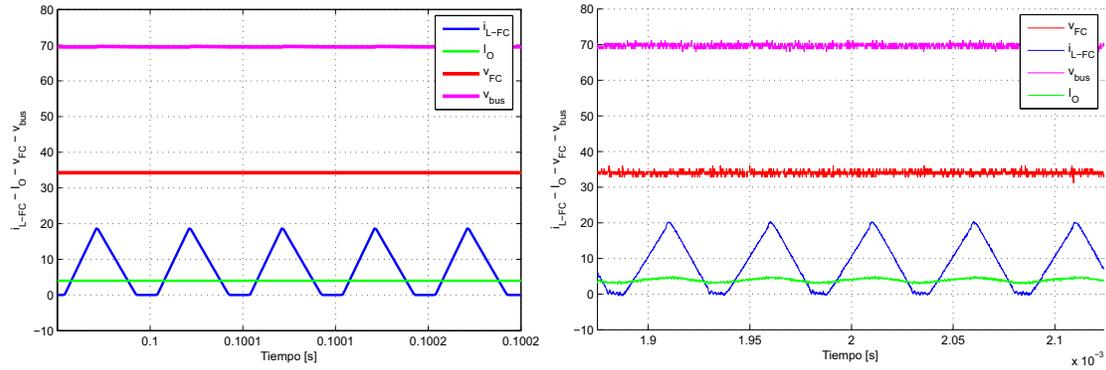


Figura 7.21: i_{L-FC} , v_{FC} y v_{bus} para $I_o = 4A$ y $D = 0,45$.

Comparando las Figuras 7.18, 7.19 y 7.20, donde I_o es la misma y solo se ha incrementado el D , se puede apreciar como el rizado ha aumentado en cada caso, tal como se esperaría, considerando la Ecuación 5.38. Asimismo, al aumentar D , para una corriente de salida constante, debe aumentar necesariamente la tensión de salida v_{bus} y el valor medio de la corriente de entrada i_{L-FC} , tal como sucedió.

Por último, en la Figura 7.21 se ha reducido I_o y aumentado D permitiendo que el convertidor opere en modo de conducción discontinua. Para el diseño implementado y este punto de operación, de acuerdo a la Ecuación 5.34, esta condición debería ocurrir para corrientes de salida menores a $I_{oc} = 6A$, como es este caso, verificándose el resultado obtenido.

En la Figura 7.22 se muestran curvas experimentales de corriente de entrada al convertidor i_{L-FC} y de salida de la Nexa[®], I_{nexa} , con el filtro L-C, presentado en el Capítulo 5, conectado entre ambos. Las figuras corresponden a resultados de simulación para valores medios de i_{L-FC} de 10A y 20A. Tal como sucedía en las simulaciones realizadas en este capítulo previo, el rizado en la corriente de la PEMFC se ha reducido a un valor despreciable evitando así que la misma sea sometida a un rizado de alta frecuencia y gran amplitud pero sin afectar su desempeño.

A continuación, en las Figuras 7.23, 7.24 y 7.25 se presentan los resultados de pruebas similares realizadas para diferentes puntos de operación del convertidor electrónico del canal del SC. Debe recordarse que el mismo, a pesar de tener valores de diseño similares al de la PEMFC, es bidireccional en corriente, operando siempre en MCC y permitiendo que pueda extraerse/inyectarse energía desde/hacia el SC.

Al igual que en los primeros resultados, las curvas de la izquierda corresponden a simulaciones realizadas en condiciones de operación idénticas a las de las pruebas reales (derecha).

En la primera figura se observa que el valor medio de la corriente a través del SC i_{SC} es cero, con valores instantáneos positivos y negativos, tal como era de esperarse para

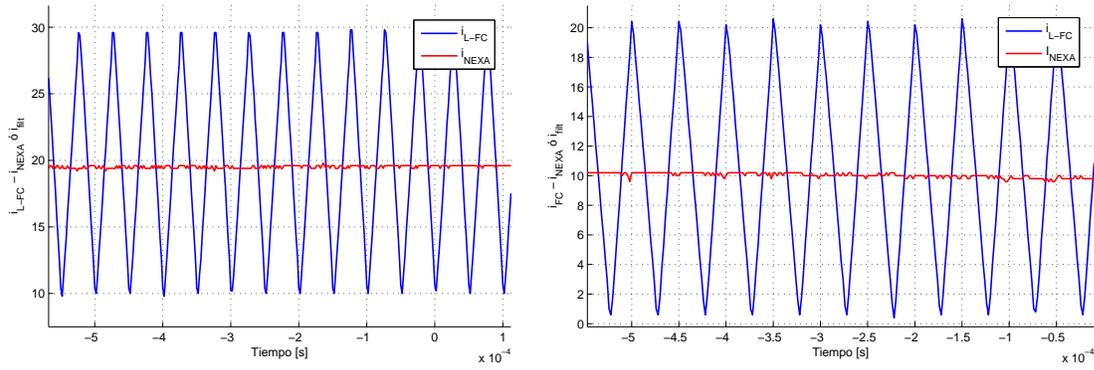


Figura 7.22: Efecto del filtro L-C en la corriente de la Nexa[®].

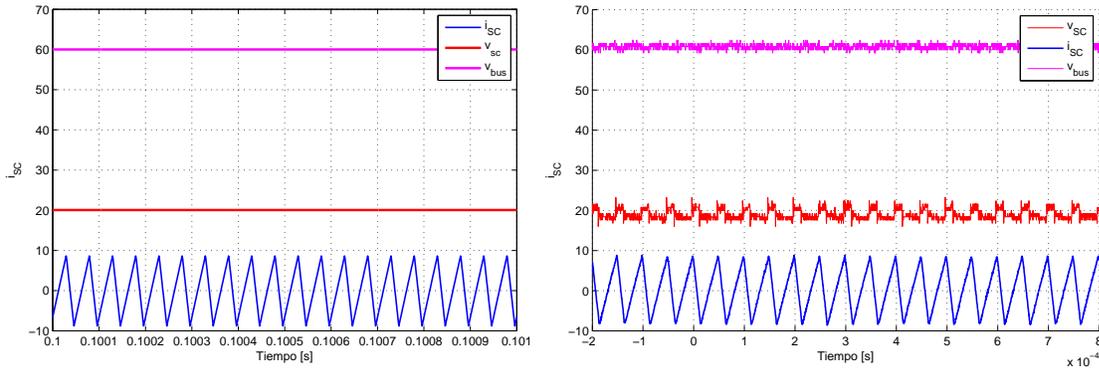


Figura 7.23: i_{L-FC} para $I_{SC} = 0A$.

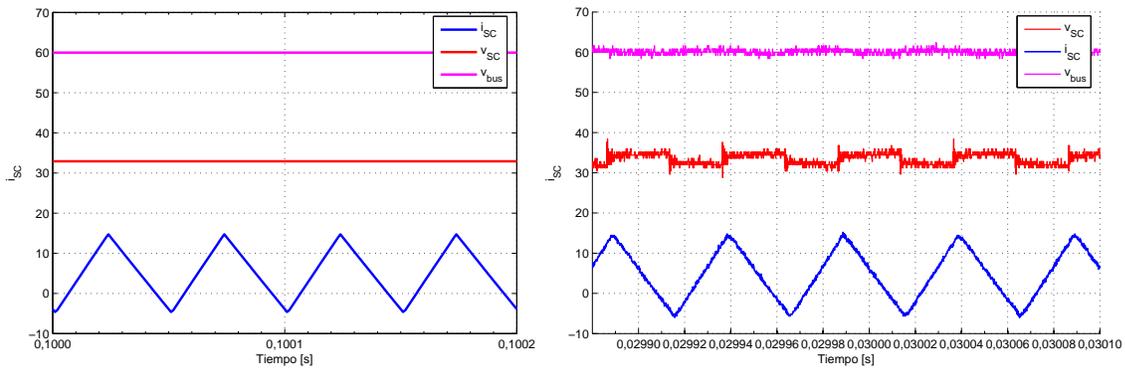


Figura 7.24: i_{SC} para condición de descarga del SC a $I_{SC} = 5A$.

dicha condición de operación. En este punto el SC no está entregando ni absorbiendo energía, se encuentra cargado con una tensión $v_{SC} = 20V$, la tensión de salida $V_{bus} = 60V$ y el $D \simeq 0,66$. Además, se puede observar que el rizado en i_{SC} es de unos $20A$ pico a pico, tal como podría verificarse a partir de la Ecuación 5.38. Para el

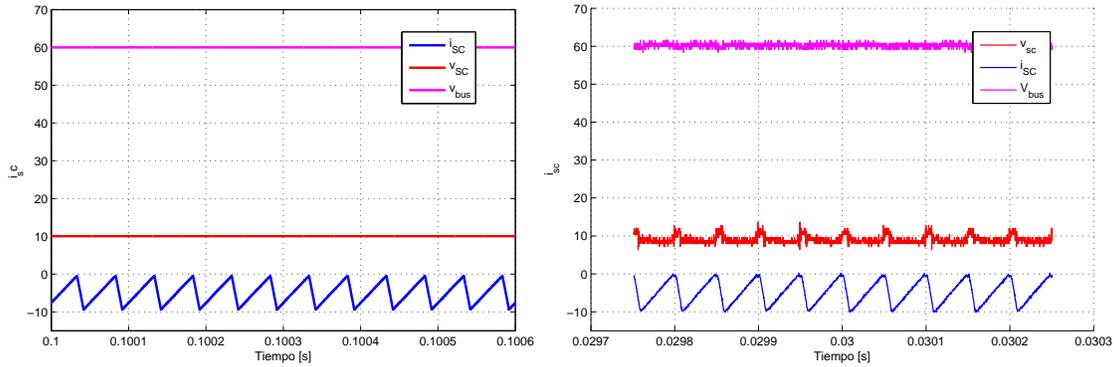


Figura 7.25: i_{SC} para condición de carga del SC a $I_{SC} = 5A$.

SC, el rizado en la corriente no representa un problema ya que dadas sus características es capaz de funcionar perfectamente bajo su efecto sin sufrir un daño o pérdida de vida útil. En las Figuras 7.24 y 7.25 se presentan otras dos posibles condiciones de operación: la primera, donde el SC entrega energía hacia el Bus de CC (descarga) y la segunda cuando recibe energía desde este último (carga). En ambos casos, el valor medio de la corriente es de $5A$ y $V_{bus} = 60V$, pero para la condición de descarga $v_{SC} = 33V$ mientras que para la de carga $v_{SC} = 10V$. Respecto al rizado en la i_{SC} en cada caso, es de aproximadamente $20A$ pico-pico para el caso de descarga y la mitad para el de carga. Estos valores pueden verificarse de la misma forma que en el primer caso analizado, considerando que éste será mayor para un producto $D \cdot V_{SC}$ más grande.

Como sucedía en el caso del canal de la PEMFC, aquí también puede verse como los resultados de simulación obtenidos utilizando los parámetros de diseño son idénticos en las tres situaciones a los resultados experimentales, permitiendo concluir que en este caso el sistema funciona de acuerdo a las especificaciones de diseño.

Por último, se presentan algunas pruebas a lazo abierto aplicando escalones en el ciclo de trabajo D y observando el transitorio en la corriente de entrada al CC/CC. Las mismas fueron realizadas por razones de facilidad sobre el CC/CC asociado a la Nexa[®] y los resultados se presentan en las Figuras 7.26 y 7.27.

Se puede observar que, en ambos casos, el comportamiento real observado es similar al obtenido por simulación, desafiando en este último caso el rizado de alta frecuencia, que no ha sido tenido en cuenta. El tipo de respuesta de segundo orden obtenida se debe fundamentalmente a la presencia de un par de polos complejos conjugados en la dinámica del sistema linealizado (Erickson, 1999). Obsérvese que en ambos casos el sobrepaso y amortiguamiento son similares tanto en simulación como en las pruebas reales.

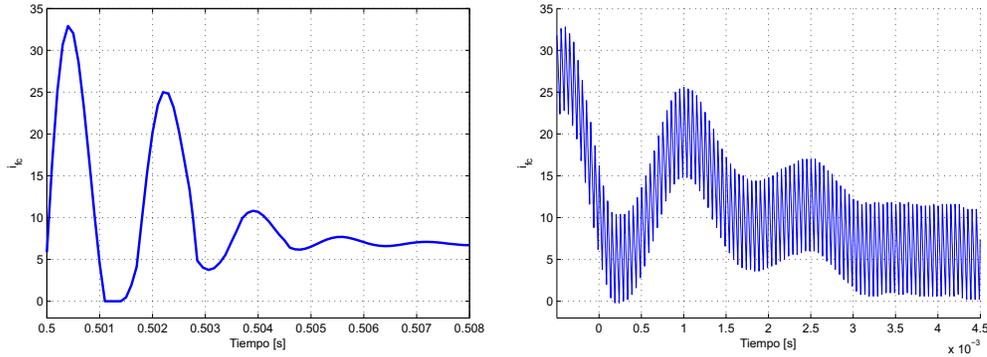


Figura 7.26: i_{L-SC} para escalón $D = 0,15 \rightarrow 0,25$.

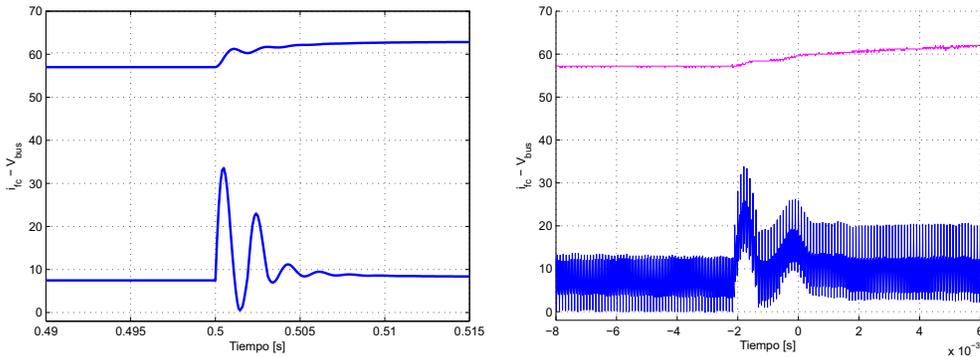


Figura 7.27: i_{L-SC} para escalón $D = 0,35 \rightarrow 0,45$.

Prueba del Sistema Híbrido completo.

En esta prueba se ha evaluado el Sistema Híbrido desarrollado en esta tesis, funcionando con ambos canales en forma simultánea y de acuerdo a los objetivos planteados en la Sección 7.3. En este contexto, la prueba demuestra el correcto desempeño del conjunto, manteniendo una tensión regulada en el Bus de CC y entregando instantáneamente la potencia demandada por la carga en forma eficiente, aprovechando las ventajas de cada una de las fuentes que lo componen.

Se estableció una tensión del Bus de CC regulada en 60V y se evaluó el funcionamiento del sistema utilizando un perfil de corriente de carga variable. Al igual que en las oportunidades anteriores, los resultados experimentales fueron contrastados con resultados de simulación en condiciones de operación idénticas para comprobar por comparación el desempeño de la implementación. En la Figura 7.28 se presenta el perfil de carga utilizado y en las Figuras 7.29 a 7.33 los resultados obtenidos.

En todas las figuras se presentan a la derecha, en color rojo, las respuestas obtenidas del ensayo experimental y, a la izquierda, en azul, las correspondientes a simulación.

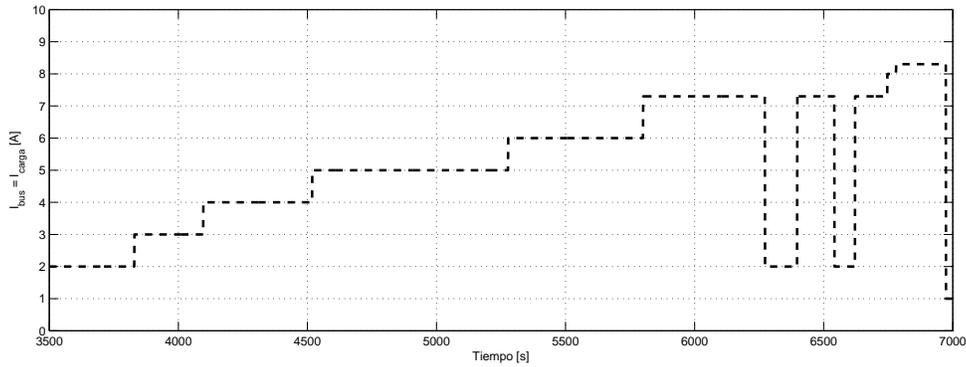


Figura 7.28: Perfil de carga utilizado para la prueba del SH completo.

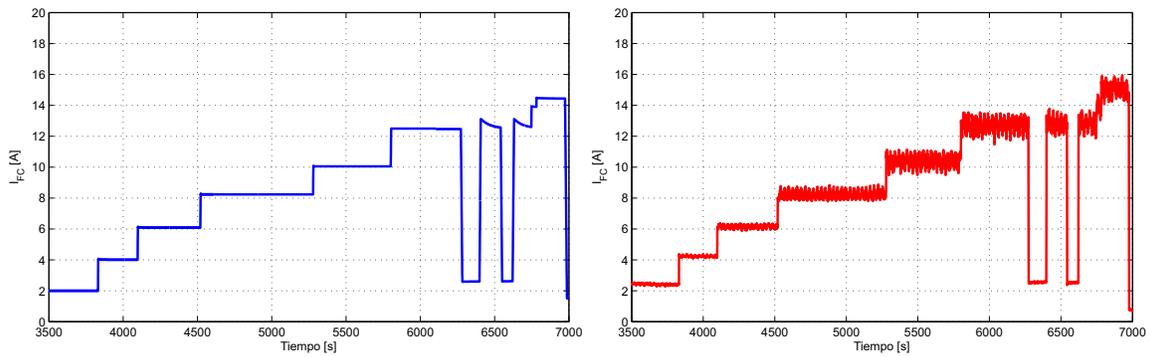


Figura 7.29: Corriente entregada por la Nexa[®].

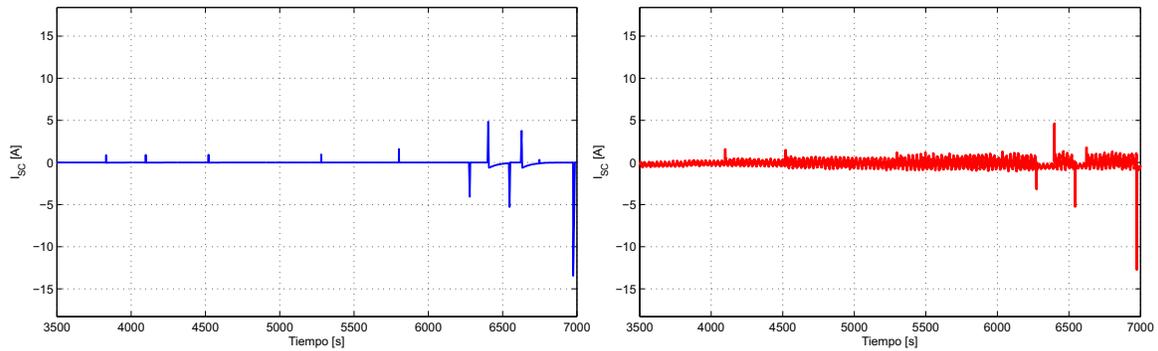


Figura 7.30: Corriente a través del SC.

Dadas las características del sistema de adquisición disponible, el muestreo de las señales durante la prueba fue realizado en intervalos de 1s, por lo que no será posible visualizar resultados en cuanto a dinámica se refiere. Sin embargo, en esta instancia, es de interés mostrar que la potencia demandada por la carga es entregada por las fuentes, respetando los objetivos especificados en cada caso.

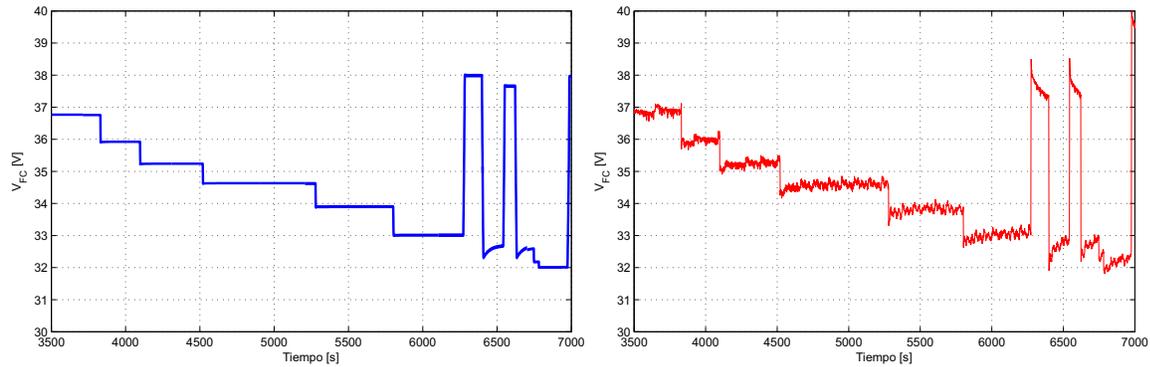


Figura 7.31: Tensión en la Nexa[®].

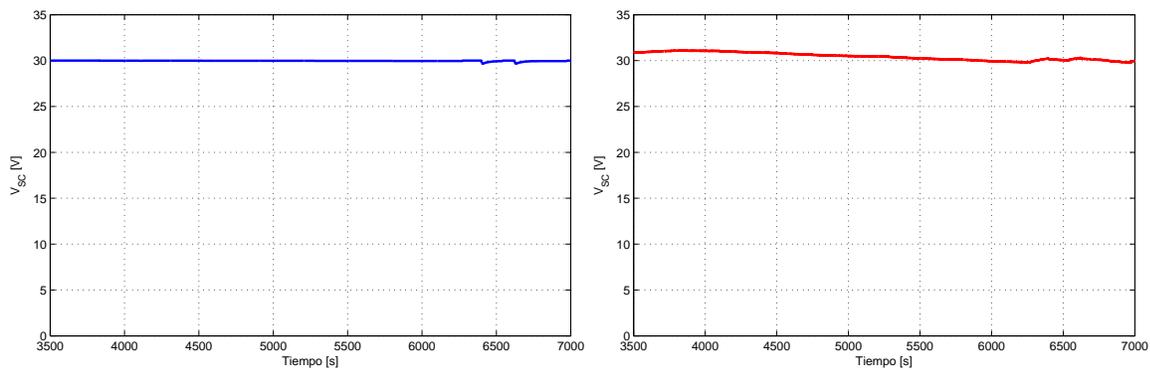


Figura 7.32: Tensión en el SC.

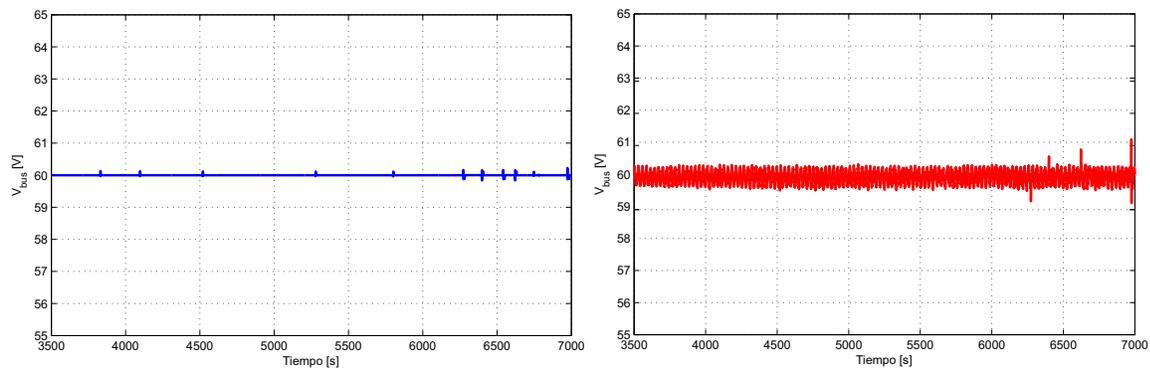


Figura 7.33: Tensión en el Bus de CC.

En la Figura 7.29 se presenta la corriente que entrega la PEMFC en cada instante. En la misma, no se observan picos abruptos en i_{fc} durante las transiciones, demostrando una característica “lenta” como era de esperarse, de acuerdo al diseño realizado.

Ante un cambio de demanda, la potencia es instantáneamente entregada por el SC, tal como puede observarse en la Figura 7.30, a partir de los picos de corriente en los instantes de tiempo dónde ocurren dichas perturbaciones.

En las Figuras 7.31 y 7.32 se presentan las tensiones para la PEMFC y el SC respectivamente. Nótese como la tensión en la Nexa[®] varía, de acuerdo al punto de operación, según su característica de estado estacionario. Como contraparte, tal como era de esperarse, la tensión en el SC no varía sustancialmente puesto que su alta densidad de energía le permite entregar los picos de corriente en las transiciones sin sufrir consecuentes variaciones de carga apreciables.

Finalmente, la Figura 7.33 muestra la tensión del Bus de CC. Se puede observar que la perturbación en cada transición desaparece, regresando rápidamente al valor de referencia y manteniéndose en dicho punto.

Los resultados de las pruebas realizadas demuestran como el SH desarrollado, en su conjunto, responde satisfactoriamente a los cambios en las condiciones de carga, asegurando la potencia demandada en cada momento y manteniendo regulada la tensión del Bus de CC, respetando las limitaciones de la PEMFC. De esta manera, el sistema cumple con las especificaciones, demostrando una excelente performance, considerando los objetivos buscados.

7.5. Resumen del Capítulo

En el presente capítulo se presentaron los resultados experimentales obtenidos de las pruebas realizadas sobre el nuevo Sistema Híbrido basado en tecnologías PEMFC/SC desarrollado en esta tesis. Cabe destacar, que la arquitectura y fuentes elegidas para el sistema se consideran de relevancia y en los últimos años, gracias a sus excelentes características individuales y combinadas, han despertado gran interés en el ámbito especializado.

Para la realización de las pruebas, se utilizaron lazos de control diseñados de acuerdo a las especificaciones de las fuentes intervinientes, pero intentando obtener una muy buena performance del sistema en su conjunto.

Finalmente, los resultados demuestran el excelente desempeño del Sistema Híbrido y su gran versatilidad, permitiendo implementar estrategias de gestión de energía en estructuras paralelas de esta configuración, obteniendo un muy buen desempeño. Asimismo, tal como fue mencionado oportunamente, es posible añadir fácilmente otro tipo de fuentes de generación y/o almacenamiento, ya sea conectándolas directamente al Bus de CC o emulándolas mediante la Fuente Electrónica Programable incluida, sin que ello requiera de grandes cambios en la estructura del conjunto.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES

En la presente tesis se abordó específicamente el análisis, diseño e implementación de un versátil Sistema Híbrido de Generación, constituido por un canal de generación principal basado en una Pila de Combustible tipo PEM y un canal de almacenamiento que utiliza Supercapacitores.

En una primera etapa, se realizó el estudio y evaluación de la problemática energética mundial, asociada principalmente a una economía fuertemente dependiente de combustibles fósiles (particularmente hidrocarburos). El uso de estos recursos de carácter no renovable en el contexto actual, donde el desarrollo industrial y tecnológico crece continuamente y con ello su demanda, refleja dos desventajas principales: (1) su agotamiento y (2) la contaminación ambiental. Motivado por esto surgió la necesidad de diversificar la matriz energética, incorporando fuentes alternativas no contaminantes de energía. En este escenario, a partir del análisis realizado se determinó el potencial de las fuentes de energía renovables y el hidrógeno como fuente de almacenamiento, a los efectos de asegurar un futuro energético sustentable.

Específicamente se estableció que el hidrógeno puede ser producido empleando agua y electricidad generada a partir fuentes de origen renovable (por ejemplo, eólica y solar, que son especialmente abundantes en nuestro país), almacenado y/o transportado. Habiéndose demostrado la importancia de este elemento como vector energético, el paso siguiente en el desarrollo de la tesis fue el estudio del funcionamiento de las Pilas de Combustible, como dispositivo que permite producir energía eléctrica a partir del mismo en forma eficiente y no contaminante.

De los diferentes tipos de FC, se consideraron las de tecnología PEM, dado que por su baja temperatura de operación, tamaño y robustez, permiten el empleo en

múltiples aplicaciones, ya sean estacionarias o móviles. Por lo tanto, en una segunda etapa, se evaluaron las características de estos dispositivos. Asimismo, se introdujeron y expusieron las principales ventajas y desventajas de diferentes estructuras que utilizan PEMFC con fuentes adicionales de generación o almacenamiento de energía.

Esto último conllevó a reconocer la importancia que representa en estos sistemas la combinación híbrida de PEMFC y modernos sistemas de almacenamiento, en el caso particular de esta tesis, Supercapacitores. En este contexto, se concluyó que gracias a su alta densidad de potencia, estos dispositivos resuelven problemas asociados a la lenta dinámica de las PEMFC, aventajando ampliamente a otras tecnologías de almacenamiento tradicionales.

El análisis efectuado en las primeras dos etapas resultó en la elección de una estructura paralela que vincula PEMFC y SC alrededor de un bus de corriente continua común, empleando un convertidor electrónico de potencia por cada fuente involucrada. Las razones que justifican esta elección corresponden a la gran flexibilidad y escalabilidad que presentan estos sistemas, admitiendo la incorporación de fuentes adicionales de generación/almacenamiento con mínimas modificaciones y permitiendo su uso en múltiples aplicaciones como fuentes de alimentación de potencia de excelentes prestaciones.

Es así, que la última etapa de esta tesis se centró en el diseño y la implementación de los módulos que conforman el SH desarrollado. Partiendo de una PEMFC comercial, se dimensionó el canal de generación y el canal de almacenamiento de energía basado en SC. Específicamente se diseñaron los convertidores electrónicos, el hardware de control y supervisión, y los sistemas de protección asociados. Para validar el correcto diseño del sistema, se realizaron simulaciones, tanto de estado estacionario, como dinámicas. Por último, el SH fue ensayado experimentalmente, demostrando un desempeño altamente satisfactorio de sus módulos a lazo abierto y del sistema en su conjunto, operando a lazo cerrado.

Lo expuesto a lo largo de la tesis y finalmente los resultados experimentales obtenidos, permitieron resaltar las excelentes propiedades de los Sistemas Híbridos con la estructura elegida como fuentes de alimentación de potencia eficientes y versátiles, en un contexto mundial donde las energías alternativas no contaminantes constituyen un área de investigación prioritaria. En particular, la combinación de PEMFC con SC, ha demostrado la capacidad de alimentar en forma continua una carga de perfil variable con una excelente respuesta dinámica. Por estas razones el sistema presentado constituye una excelente solución por un lado, en el campo de generación de energía eléctrica sustentable y por otro, como una potente herramienta para la evaluación de avanzadas estrategias de gestión de energía en ámbitos de laboratorio.

8.1. Propuestas Futuras

En relación al trabajo realizado quedan abiertas distintas propuestas de investigación:

- La primera de ellas consiste en añadir fuentes de generación de origen renovable adicionales para aumentar la versatilidad del sistema y evaluar estrategias de gestión de energía mas complejas. En particular, interesan la eólica y solar fotovoltaica, dado su carácter complementario y amplio desarrollo que han tenido estas tecnologías en los últimos 20 años.
- De la misma manera, es posible adicionar otros dispositivos de almacenamiento, a los efectos de comparar estructuras con diferente grado de hibridización y evaluar su desempeño para una misma aplicación o en diferentes condiciones de operación.
- Finalmente, en la actualidad resulta un campo de investigación novedoso el diseño óptimo de Sistemas Híbridos. Esto consiste, a partir de una aplicación particular, en determinar cual debería ser la estructura híbrida y el tamaño adecuado de las fuentes que la componen, de manera de obtener un Sistema Híbrido “óptimo” para los objetivos que se persiguen. En este contexto, el SH desarrollado constituye una valiosa herramienta para el estudio de diferentes opciones de diseño, dada la facilidad con que es posible modificar su estructura.

BIBLIOGRAFÍA

- Andujar, F., J.; Segura. Fuel cells: history and updating. a walk along two centuries. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 13:2309–2322 (2009).
- Arbizzani, M., C.; Bisio. Safe, high energy supercapacitors based on solvent-free. *Journal of Power Sources* (2008).
- Azib, O., T. ; Bethoux. Supercapacitors for power assistance in hybrid power source with fuel cell. *IEEE* (2008).
- Babir, F. *PEM Fuel Cells: theory and practice*. Elsevier Academic Press (2005).
- Ball, M., M.; Wietschel. The future of hydrogen-opportunities and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34:615–627 (2009).
- Ballard. *Nexa Power Module User's Manual (MAN5100078)*. Ballard Power Systems, 0e edición (2003).
- Bolcich, D. J. C. Hidrógeno, desarrollo estratégico de un nuevo vector de energías. *Sociedad Argentina de Hidrógeno* (2011).
- Burke, A. Ultracapacitors: Why, how and where is the technology. *Journal of Power Sources*, 91(1):37–50 (2000).
- Claudio Carpio, M. F. C. *Situación y Perspectivas de la Eficiencia Energética en America Latina y el Caribe*. LC/W.280 Naciones Unidas (2009).
- Cárdenas, G. J. Matriz energética argentina. situación actual y posibilidades de diversificación. *Revista de la Bolsa de Comercio de Rosario* (2011).
- Davat, S., B.; Astier. Fuel cell-based hybrid systems. *IEEE - Electromotion - EPE Chapter 'Electric Drives' Joint Symposium* (2009).

- Dutton, B. J. D. H. F. M. H. W. P. D. R. A., AG. Experiences in the design, sizing, economics, and implementation of autonomous windpowered hydrogen production systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 25:705–722 (2000).
- EIA. Annual energy outlook (2006).
- Erickson, R. W. *Fundamentals of Power Electronics*. Kluwer Academic Publishers (1999).
- Feroldi, D. *Control and Design of PEM Fuel Cell-Based Systems*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya (2009).
- Fontela, A., P.; Soria. Airport electric vehicle powered by fuel cell. *Journal of Power Sources*, 169:184–193 (2007).
- Gemmen, R. "analysis for the effect of inverter ripple current on fuel cell operating condition. *Power Electronics for Fuel Cells Workshop* (2002).
- Godfrey, B. *Renewable Energy - Second Edition*. Oxford University Press (2004).
- Henson, W. Optimal battery/ultracapacitor storage combination. *Journal of Power Sources* (2008).
- HFCIT. Hfcit hydrogen storage: Gaseous and liquid hydrogen storage. us department of energy. (2007).
- Hui, C. "carrying capacity, population equilibrium, and environment's maximal load". *Ecological Modelling*, 192:317–320 (2006).
- Kirubakaran, A. The pem fuel cell system with dc/dc boost converter: Design, modeling and simulation. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1 (3) (2009a).
- Kirubakaran, A. A review on fuel cell technologies and power electronic interface. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 13:2430–2440 (2009b).
- Larminie, A., J.; Dicks. *Fuell Cell Systems Explained, Second Edition*. Wiley and Sons (2003a).
- Larminie, J., J.; Lowry. *Electric vehicle technology explained*. Wiley and Sons (2003b).
- Lewis, N. Basic research needs for solarenergy utilization (2005).
- Liu, H., D.; Li. A zvs bi-directional dc-dc converter for multiple energy sotorage elements. *IEEE Transactional Power Electronics*, 21:1507–1513 (2006).
- Maxwell. Application note - boostcap ultracapacitor cell sizing (2009).
- Miño, S. J. S. *Energías Renovables, Conceptos y Aplicaciones*. WWWF - Fundación Natura (2003).
- Mohan, N. *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. John Wiley and Sons (1989).

- Moré, J. Multi input sliding mode control of an autonomous fuel cell-supercapacitor hybrid system. *12th International Workshop on Variable Structure Systems* (2012).
- Payman A.; Pierfederici, S. Energy control of supercapacitor/fuel cell hybrid power source. *Energy Conversion Management*, 49:1637–1644 (2008).
- Paynter, L. N. F. J., R.J.H. The potential of hydrogen and electricity production from wind energy. *Energy Research Unit, Rutherford Appleton Laboratory* (1991).
- Pede, A., G.; Iacobazzi. Fc vehicle hibridisation: an affordable solution for an energy-efficient fc powered drive train. *Journal of Power Sources*, 125(2):280–291 (2004).
- Perez, W., A.; Gao. Fuzzy logic energy management strategy for fuel cell/ultracapacitor/battery hybrid vehicle with multiple-input cc/cc converter. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (2009).
- Pressman, A. I. *Switching Power Supply Design. Second Edition*. Mc Graw Hill (1998).
- Said Al-Hallaj, C. K. *Hybrid Hydrogen Systems, Stationary and Transportation Applications*. ISBN 978-1-84628-467-0. Springer, 1 edición (2011).
- Semikron. *SEMIX SKHI 20opA Semidriver IGBT Datasheet*.. Semikron, 1 edición (2011). Driver Electronic – PCB Drivers.
- Shah, V. J. A. Review of ultracapacitor technology and its applications. *15th National Power Systems Conference (NPSC), IIT Bombay* (December 2008).
- Singhal, K., S. C.; Kendall. *High Temperature Solid oxide Fuel Cells. Fundamentals, Design and Applications*. Elsevier (Oxford 2004).
- Society, A. T. Health effects of outdoor air pollution. part 1. *American Journal of Respiration Critical Care Medics*, 153:3–50 (1996). American Thoracic Society, Committee of the Environmental and Occupational Health Assembly.
- Sorensen, B. *Renewable Energy*. Roskilde University (2000).
- Stewart, A., E.; Lutz. Modeling, analysis and control system development for the italian hydrogen house. *International of Hydrogen Energy*, 34:1638–1646 (2009).
- Sun, J. Averaged modeling of pwm converters operating in discontinuous conduction mode. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 16 (2001).
- Thounthong, S., P.; Rael. Control strategy of fuel cell and supercapacitors association for a distributed generation system. *IEEE Transactional Industrial Electronics*, 54:3225–3233 (2007).
- Thounthong, S., P.; Rael. Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 193:376–385 (2009a).

- Thounthong, V., P.; Chunkag. Comparative study of fuel-cell vehicle hybridization with battery or supercapacitor storage device. *IEEE Transactional Vehicular Technology*, 58:3892–3903 (2009b).
- UKG. Digital image [mutli-walled carbon nanotube]. university of karlsruhe germany,. <http://www.ipc.uni-karlsruhe.de/mik/download/nt1.jpg> (2007).
- Unidas, N. Protocolo de kyoto. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>, pág. 25 (1998).
- US Environmental Protection Agency, E. Air quality criteria for particulate matter. 2 (2001).
- U.S. International Energy Agency, I. World energy outlook (2006).
- Uzunoglu, O., M.; Onar. Parallel operation characteristics of pem fuel cell and microturbine power plants. *Journal of Power Sources*, 168:469–476 (2007).
- Valenciaga, F. *Control de Estructura Variable en Sistemas Híbridos de Generación de Energía*. Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (2001).
- W. Choi, J. H., P. N. Enjeti. Development of an equivalent circuit model of a fuel cell to evaluate the effects of inverter ripple current. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 13:257–264 (June 2004).
- Wang, M., C.; Nehir. Power management of a stand-alone wind/photovoltaic/fuel cell energy system. *IEEE Transactional Energy Conversion*, 23:957–967 (2008).
- Wildi, T. *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*. Prentice Hall (2007).
- wwl.org. <http://www.worldwildlife.org/climate/basic.cfm>. (2005).