

DISEÑO Y DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA EXPERIMENTAL DE EVALUACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS BASADOS EN PILAS DE COMBUSTIBLE

Proyecto Final

Tomás Tavella



Ing. Jorge L. Anderson

DIRECTOR

INSTITUTO LEICI
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNLP

Dr. Ing. Paul F. Puleston

CO-DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y a la banda

RESUMEN

Este trabajo consiste del estudio, diseño, implementación y validación de una plataforma experimental para la evaluación de sistemas híbridos de generación energía (SHGE) a partir de pilas o celdas de combustible de tipo PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*). Esta plataforma consiste en un sistema de conversión electrónico de tipo CC-CC conmutado y aislado, de topología puente completo; monitoreado mediante la medición de sus estados, y controlado por una excitación de tipo PWM (*Pulse-Width Modulation*) provista por un DSC (*Digital Signal Controller*) de alta performance. Este convertidor es requerido para poder adaptar la tensión variable que entrega una celda de combustible a una tensión de salida fija para conectar a un bus común de corriente continua.

En el desarrollo de este informe se detallan las tareas realizadas para cumplir este objetivo: el estudio y comprensión de las topologías de conversión CC-CC; la simulación de la topología elegida mediante herramientas de simulación circuitales; el diseño de circuitos auxiliares de excitación, sensado y protección; la implementación del sistema en una placa de circuito impreso mediante software EDA (*Electronic Design Automation*); la programación de los algoritmos de control del sistema; y, finalmente la validación experimental de la plataforma.

ABSTRACT

This work entails the study, design, implementation and validation of an experimental platform for the evaluation of hybrid energy generation systems based on Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC). This platform incorporates a full-bridge isolated switched-mode DC-DC electronic converter, monitored via the measurement of its state variables, and controlled by a pulse-width modulated (PWM) signal, generated using a high-performance Digital Signal Controller (DSC). This converter provides the adaptation from the variable output voltage of the PEMFC to the fixed voltage of the common DC bus at the system output.

This report details the process through which the goals were achieved: study and understanding of the different DC-DC converter topologies, simulation of the selected converter topology using circuit simulation tools, design process of auxiliary circuits, including driver, sensing and protection circuits, implementation of the system PCB (printed circuit board) through the use of electronic design automation (EDA) software, programming of system control algorithms, and experimental validation of the working platform.

ÍNDICE

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 7 |
| 1.1 | Sistemas Híbridos de Generación de Energía | 8 |
| 2 | ANÁLISIS DE LA PLATAFORMA | 11 |
| 2.1 | Celdas de Combustible | 12 |
| 2.1.1 | Principio de Funcionamiento. | 12 |
| 2.1.2 | De Celda a Pila de Combustible | 13 |
| 2.1.3 | Aspectos Constructivos. | 13 |
| 2.1.4 | Tipos de Celdas | 14 |
| 2.1.5 | Modelo Eléctrico de las PEMFC | 16 |
| 2.1.6 | Emulador de Celdas de Combustible | 19 |
| 2.2 | Convertidor CC-CC Conmutado. | 21 |
| 2.2.1 | Conceptos Básicos. | 21 |
| 2.2.2 | El Convertidor Reductor | 22 |
| 2.2.3 | Convertidores CC-CC Aislados | 26 |
| 2.2.4 | El Convertidor de Puente Completo | 30 |
| | REFERENCIAS | 32 |

INTRODUCCIÓN

CONTEXTO ENERGÉTICO Y CIENTÍFICO GLOBAL PARA LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO

El precipitado incremento de la población mundial en las últimas décadas, causado por el acelerado desarrollo tecnológico humano a partir de mediados del siglo XX, ha generado un exponencial aumento de demanda energética para poder satisfacer los constantemente crecientes requerimientos de la población. En respuesta a esta incrementada demanda del sistema energético mundial, los países comenzaron a crecer su capacidad instalada de plantas de generación en base a la quema de combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas, etc.), sin tener en cuenta el catastrófico impacto que tienen sobre la biósfera terrestre sus grandes emisiones de gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono y metano.

Hoy en día, más de medio siglo después, las consecuencias de este desmedido incremento del consumo global de combustibles fósiles se pueden observar claramente en la temperatura promedio del aire superficial de la Tierra, que ya es más de 1 °C mayor a temperaturas medidas a principio del siglo previo (figura 1.1)^[1], con algunos estimados conservadores de más de 2,5 °C para finales de siglo.^[2] Los efectos perjudiciales de este incremento de temperatura se pueden ver en muchas partes, como la extinción de especies, el retroceso de los glaciares, el aumento de incidencia e intensidad de fenómenos climatológicos extremos (tormentas, sequías, olas de calor, etc.), entre muchos otros.

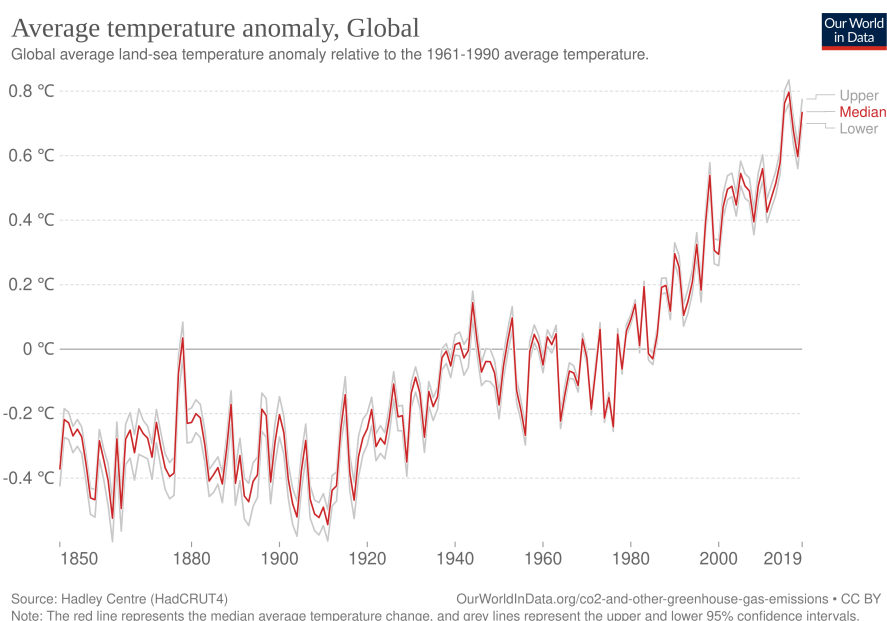


FIGURA 1.1 Temperatura superficial promedio del planeta, relativo a la del período 1961-1990, desde 1850 hasta 2019.

Sin embargo, los combustibles fósiles y fuentes de energía no renovables siguen conformando una mayoría en el panorama de generación energética global: en el año

2019, alrededor del 85 % de la energía producida mundialmente provino de fuentes no renovables (figura 1.2).^[3] Para frenar el avance del cambio climático, se debe acelerar el ritmo de adopción de energías alternativas como reemplazo de los combustibles fósiles, disminuyendo la emisión de CO₂ y metano en la atmósfera.



FIGURA 1.2 Consumo global de energía primaria según fuente, desde 1950 hasta 2019.

Con esta motivación, el Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales (LEICI) de la Facultad de Ingeniería de la UNLP se embarcó en el proyecto “Electrónica de Potencia y Sistemas de Control Avanzado Aplicados a Fuentes de Energía Alternativas”, dentro del cuál se enmarca el presente trabajo, que utiliza celdas de combustible en Sistemas Híbridos de Generación de Energía como fuente de energía alternativa.

1.1 SISTEMAS HÍBRIDOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

Un Sistema Híbrido de Generación de Energía (SHGE), en su descripción más general, es un sistema que combina distintas fuentes de energía, aprovechando las ventajas y suplementando las falencias de cada una de ellas. Generalmente, estos sistemas suelen combinar múltiples fuentes de energías alternativas, como pueden ser, por ejemplo, generación solar mediante paneles y eólica mediante turbinas.^[4]

En nuestro caso, el sistema consiste en el módulo de generación principal basado en celdas de combustible, un módulo de generación alternativo como podría ser un sistema eólico o solar, un Sistema de Almacenamiento de Energía (SAE) basado en un banco de supercapacitores, y adicionalmente un electrolizador para alimentar combustible a las celdas. Todos estos módulos son adaptados mediante sistemas de conversión eléctrica de potencia y conectados a un bus común de corriente continua (CC) con una tensión fija de 75 V (figura 1.3).^{[5][6]}

En este sistema, el módulo de generación por celdas de combustible se encarga de entregar el nivel de potencia necesario para satisfacer la potencia demandada por la carga en el bus de CC. Mientras tanto, el módulo de generación alternativo tiene el rol de proveer potencia a la carga cuando el módulo de generación principal no es capaz de satisfacer por completo la demanda. El SAE aprovecha la capacidad de rápida

de descarga de los supercapacitores junto con su alta capacitancia (almacena grandes cantidades de energía) para darle al SHGE velocidad de respuesta ante repentinos cambios de potencia demandada, a los que los módulos de generación no son capaces de responder a tiempo (luego, en momentos de menor demanda toma energía del sistema para cargar los supercapacitores). Finalmente, el electrolizador toma energía del sistema para generar el hidrógeno necesario para el funcionamiento de las celdas de combustible a partir de agua, mediante la reacción de electrólisis que se explicará en detalle más adelante.^[6]



FIGURA 1.3 Sistema Híbrido de Generación de Energía (SHGE), con flujos de potencia indicados para cada módulo.

En particular, este trabajo se enfoca en el estudio, diseño, implementación y validación de una plataforma experimental para la evaluación del Módulo de Celdas de Combustible para sistemas híbridos de generación de energía.

Todo lo que refiere a esta plataforma se va a tratar en detalle a lo largo del desarrollo de los siguientes capítulos de este informe. Se comienza por un estudio en profundidad de la teoría de funcionamiento de sus componentes, pasando por una simulación de toda la plataforma para verificar su funcionamiento. Luego, se describe el proceso por el cual se diseñó e implementó el sistema en una placa de circuito impreso (PCB, de *Printed Circuit Board* en inglés); y se concluye el trabajo con la validación del correcto funcionamiento de la plataforma terminada.

ANÁLISIS DE LA PLATAFORMA

PLANTEO Y ESTUDIO DE LA PLATAFORMA DE EVALUACIÓN DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

En este capítulo, se realiza un detallado análisis de la Plataforma Experimental de Evaluación de Módulos de Celdas de Combustible de la figura 2.1, la cuál consiste en cuatro subsistemas o bloques distintos:

- Emulador de Celdas de Combustible
- Convertidor CC-CC Conmutado
- Sistema de Control
- Carga Electrónica Variable



FIGURA 2.1 Diagrama de la plataforma experimental de evaluación, con sus cuatro bloques principales.

Esta plataforma, con sus distintos bloques, se encarga de evaluar la *performance* de celdas de combustible conectadas a un sistema híbrido de generación. Con este fin, un emulador de celdas de combustible toma el puesto de celdas de combustible reales, y una carga electrónica variable se utiliza para simular cualquier tipo de condiciones de carga que se deseen en el bus de CC. Para poder conectar el emulador a la carga, se debe implementar un subsistema (Convertidor CC-CC Conmutado) que adapte los niveles de tensión de salida del emulador de celdas a la tensión fija de salida en la carga, adicionando un módulo de control que monitorea los estados del convertidor, y los controla mediante los disparos de las llaves del puente completo.

El principal objetivo de este proyecto es el diseño e implementación de la etapa de adaptación de tensión (es decir, el convertidor con su sistema de control), pero se hace un estudio detallado de todas los componentes de la plataforma, de manera de obtener un entendimiento más completo de todo el sistema. Por esta razón, a continuación

se hace un análisis en profundidad de cada una de las partes individuales, comenzando por el emulador de celdas de combustible.

2.1 CELDAS DE COMBUSTIBLE

A pesar de que las celdas de combustible son una tecnología de hace más de un siglo y medio (desarrollada por primera vez por el físico galés Sir William Grove en 1842), hoy en día despiertan un particular interés en el campo de la generación renovable por su alta eficiencia, su dependencia en recursos obtenibles fácilmente de maneras ambientalmente amigables, y la generación de agua como único deshecho.

Por estas razones se eligió trabajar con esta tecnología, particularmente con el tipo de celda más común hoy en día, las Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico o PEMFC (del inglés *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), cuyo funcionamiento se profundiza más adelante.

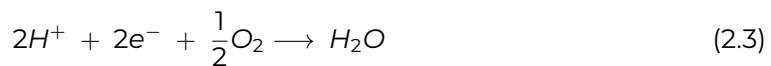
2.1.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Esencialmente, una celda de combustible es una celda galvánica o celda voltáica en la cual la energía libre de una reacción química redox (entre un combustible y un agente oxidante o *comburente*) se convierte a energía eléctrica mediante una corriente y una diferencia de potencial.^[7] En nuestro caso particular, el combustible es el hidrógeno molecular (H_2), el agente oxidante es el oxígeno (O_2) abundante en la atmósfera, y los productos son la energía eléctrica y el agua (H_2O) según indica la siguiente ecuación química balanceada.



La estructura interna de una celda de combustible, visible en la figura 2.2, consiste de un ánodo (electrodo negativo) al cual ingresan las moléculas de hidrógeno, un cátodo (electrodo positivo) en el que ingresa el oxígeno y se despiden el agua, y un electrolito como como interfaz entre ánodo y cátodo. La carga es conectada entre el ánodo y el cátodo.

La reacción redox de la ecuación 2.1, dentro de una celda de combustible como la del esquema, en realidad se separa en dos reacciones parciales distintas.



De esta manera, alimentado simultáneamente el terminal negativo con combustible (hidrógeno) y el terminal positivo con oxidante (oxígeno) se producen las dos reacciones en las superficies de contacto del electrolito:

- **En el ánodo ocurre la oxidación:** las moléculas de H_2 pierden sus electrones, bifurcándose los iones positivos de hidrógeno (H^+) por el electrolito y los electrones libres a través de la carga (ecuación 2.2). Es una reacción exotérmica (libera calor) que resulta en el calentamiento de la celda.
- **En el cátodo ocurre la reducción:** los iones H^+ del electrolito, los electrones libres, y las moléculas de oxígeno reaccionan para formar como producto el agua (ecuación 2.3).

Mediante este proceso electroquímico se generan dos corrientes distintas: una corriente interna de iones H^+ (cargas positivas) en el electrolito, desde el ánodo hacia el cátodo; y una corriente externa de electrones e^- (cargas negativas) circulando por la



FIGURA 2.2 Esquema de una celda de combustible, con todos sus componentes indicados (Placeholder).

carga, en el mismo sentido que la corriente de iones. Esta última corriente de electrones es la que nos resulta útil para poder alimentar algún tipo de carga.

2.1.2 DE CELDA A PILA DE COMBUSTIBLE

Sin embargo, una celda de combustible individual como en la figura 2.2 no es capaz de entregar una diferencia de potencial lo suficientemente alta para la gran mayoría de las aplicaciones, con una tensión de celda común situada entre 0,7 V y 1,3 V, dependiendo de varios aspectos constructivos específicos de la celda.

Entonces, para obtener un dispositivo con una tensión de salida de niveles utilizables, esta tecnología generalmente se comercializa en forma de pilas o *stacks* de celdas individuales conectadas en serie como se ve en la figura 2.3, generalmente de entre diez y cien celdas, cuya tensión es la suma de la tensión de cada celda que la compone.

Esto se logra, como dice su nombre, apilando todas las celdas de combustible para formar el *stack*, utilizando placas de interconexión para conectar electrodos de polaridad opuesta de dos celdas aledañas (es decir, se conecta el ánodo de una celda con el cátodo de la siguiente); además de cumplir la función de aislar el combustible de una celda del agente oxidante de la celda contigua. Este es el tipo de conexionado de celdas más común, llamado *Planar-Bipolar Stacking* o Apilado Planar-Bipolar.^[8]

2.1.3 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

Habiendo repasado el principio básico de funcionamiento de las celdas de combustible, ahora se realizará una breve descripción de los aspectos constructivos de las mismas. La utilización de distintos materiales y composiciones de las partes que las



FIGURA 2.3 Figura de un stack de celdas (Placeholder).

componen derivan en distintos tipos de celdas, que, a pesar de funcionar bajo el mismo principio básico, poseen cada una sus ventajas y desventajas que las hacen más o menos apropiadas para distintas aplicaciones.

Como las reacciones químicas ocurren en superficies microscópicas donde alguno de los electrodos está en contacto con el electrolito, generalmente los electrodos se fabrican de materiales porosos que aumentan la posible superficie de contacto entre ambas fases, acelerando las reacciones necesarias para producir energía. Sin embargo, en muchos casos, a temperaturas bajas los materiales de los electrodos no son capaces de producir la suficiente actividad electroquímica, por lo que suelen agregarse pequeñas cantidades de catalizador en las zonas de contacto para acelerar la reacción.

En tanto al electrolito, estos suelen estar hechos de materiales en estado líquido o sólido, dependiendo del tipo de celda, pero siempre deben tener una alta conductividad de iones positivos, de manera que los iones H^+ circulen solo por el electrolito y no por el circuito externo. Adicionalmente, este material debe actuar de barrera física para evitar que se mezclen los flujos de combustible y comburente.

En tanto a la geometría de las celdas, se ha experimentado con una gran variedad de formas para los electrodos y electrolitos pero, hoy en día las pilas que se producen son mayormente planas, y en algunos casos tubulares.

2.1.4 TIPOS DE CELDAS

Hay muchas formas de clasificar las distintas tecnologías de celdas, pero en nuestro caso nos vamos a enfocar en la distinción más común, que es la clasificación según el material usado como electrolito. Hoy en día, hay seis tipos distintos de celdas según electrolito, descritas a continuación, con una mayor profundización mayor en las del tipo PEMFC que se mencionaron anteriormente, ya que son este tipo de pilas las que nos interesa en nuestra aplicación particular.

Celda de Combustible Alcalina (AFC)

Las AFC fueron las primeras celdas de combustible en ser desarrolladas, alrededor de 1960, e incluso hoy en día son las celdas de combustible con la mayor eficiencia eléctrica. Sin embargo, resultan poco viables, principalmente porque requieren gases muy puros para funcionar correctamente. Este requerimiento se da por el material electrolítico utilizado, el Hidróxido de Potasio (KOH) (en concentraciones de 85 % para celdas de alta temperatura (250 °C), y entre 35 % y 50 % para celdas de baja temperatura (<120 °C)),

que reacciona fácilmente con el dióxido de carbono que abunda en el aire, transformándose en K_2CO_3 , destruyendo el electrolito y la celda en el proceso.^{[7][8]}

Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC)

Las PEMFC, también llamadas Celdas de Combustible de Electrolito Polimérico Sólido (SPEFC) son las celdas de combustible más utilizadas al día de hoy, habiendo conseguido usos en vehículos de combustible alternativo, lo que resultó en una gran inversión para su desarrollo. Estas celdas operan en rangos bajos de temperatura (entre 65 °C y 105 °C) y tienen un electrolito de estado sólido.

Este electrolito es una membrana de intercambio protónico: una membrana semipermeable que permite la conducción de protones y al mismo tiempo funcionando de aislación eléctrica entre los electrodos, y como barrera física para separar el combustible del comburente. Esta membrana solía fabricarse de sulfonato de poliestireno, pero hoy en día se usan materiales basados en Politetrafluoretileno (PTFE) como el Nafion de DuPont o el Dow de Dow Chemical, que son más estables y poseen mayor conductividad de protones.

Su baja temperatura de operación, uso de materiales no exóticos, capacidad de altas densidades de corriente, resistencia a la corrosión dada por el electrolito sólido y bajo tiempo de arranque han hecho a las PEMFC la opción más popular al elegir un tipo de celda de combustible para utilizar. Sin embargo tiene sus desventajas, como el angosto rango de temperatura en el que requiere operar.^{[7][8]}

Como esta es la tecnología de celda que nos interesa, se va a dedicar una sección para continuar más detalladamente la descripción de este tipo de celdas.

Celda de Combustible de Metanol Directo (DMFC)

Las DMFC son un tipo especial de celdas de baja temperatura basadas en tecnología de las PEMFC, operando a temperaturas ligeramente mayores a estas. A diferencia de otras tecnologías, estas celdas utilizan metanol como combustible directamente, ahorrándose el paso de reformarlo a hidrógeno. El metanol es un combustible atractivo, ya que se puede producir a partir de gas natural o biomasa renovable y tiene una elevada energía específica.^{[7][8]}

Celda de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC)

Las MCFC, desarrolladas a mediados del siglo XX, son celdas de combustible de alta temperatura de operación, entre 600 °C y 700 °C. Su electrolito está compuesto de carbonatos fundidos de litio y sodio (Li_2CO_3 y Na_2CO_3) estabilizados por una matriz de fibras de alúmina (Al_2O_3). Suelen tener ánodos de níquel y cátodos de óxido de níquel.

Estas celdas pueden operar con una amplia variedad de combustibles, y, por su alta temperatura, no son tan susceptibles a contaminación por CO o CO₂. Además, a diferencia del resto de las tecnologías, no son necesarios materiales catalizadores en los electrodos, ya que la combinación del níquel y las altas temperaturas proveen suficiente actividad electroquímica. Sin embargo, estas temperaturas generan problemas con los distintos materiales, reduciendo la vida útil de las celdas. Además tienen un electrolito altamente corrosivo y en estado líquido.^{[7][8]}

Celda de Combustible de Óxido Sólido (SOFC)

Las SOFC son celdas que llevan en continuo desarrollo desde mediados del siglo XX, y como indica su nombre, poseen un electrolito compuesto por un óxido en estado sólido, generalmente dióxido de zirconio (ZrO_2) o dióxido de cerio (CeO_2). Operan en rangos de temperatura muy elevados, de entre 600 °C y 1000 °C.

Estas celdas tienen la ventaja de tener un electrolito sólido, frenando la corrosión y permitiendo la fabricación en distintas geometrías. Además, todos sus materiales son de costo moderado. Como clara desventaja se encuentra la alta temperatura de operación, que trae problemas similares a los de las MCFC.^{[7][8]}

Celda de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC)

Las PAFC utilizan ácido fosfórico (H_3PO_4) con concentración de 100 % estabilizado por una matriz basada en carburo de silicio (SiC) como electrolito, y operan en un rango de temperaturas entre 150 °C y 220 °C. Estas celdas son relativamente modernas y se destacan por su alta potencia, pudiendo llegar hasta 20 MW, suficiente para una planta de generación intermedia.

Estas celdas son poco sensibles a contaminación de CO y CO_2 , y su baja temperatura de operación permite el uso de materiales comunes para su construcción. Sin embargo, su uso de ácido como electrolito requiere materiales más resistentes para sus electrodos.^{[7][8]}

2.1.5 MODELO ELÉCTRICO DE LAS PEMFC

Las celdas del tipo PEM, como se describió en la anterior sección, son celdas de combustible de baja temperatura, con un electrolito sólido compuesto por una membrana de intercambio protónico. Para este trabajo se eligió este tipo de celdas por su extensivo desarrollo, fácil disponibilidad, bajo precio comparado con otras tecnologías, además de las ventajas ya mencionadas en la sección 2.1.4.

Entonces, debemos obtener un modelo eléctrico que caracterice a un stack de celdas tipo PEM, pudiendo luego implementar este modelo (en forma de una ecuación y curva tensión-corriente) en una simulación por computadora para evaluar el comportamiento del sistema completo.

Para comenzar, se debe encontrar una forma de cuantificar la energía química de las reacciones redox que ocurren dentro de la celda, pero esto no es tan sencillo como parece. Con este fin se utiliza el concepto de la *energía libre de Gibbs*, que se podría definir como “la energía disponible para realizar trabajo externo” (en nuestro caso, el “trabajo externo” es mover los electrones por el circuito externo). Se define la *energía libre de Gibbs de formación* G_f como la energía de Gibbs tomando la energía cero a las condiciones normales de presión y temperatura.

Evidentemente, la energía entregada por la reacción es entonces la diferencia entre la energía G_f de los productos y la energía G_f de los reactivos, que por cuestiones de conveniencia se refieren a la energía por mol de producto y reactivo, indicado por una raya sobre la letra minúscula (\bar{g}_f).

$$\Delta \bar{g}_f = \bar{g}_{f_{productos}} - \bar{g}_{f_{reactivos}} \quad (2.4)$$

Entonces, teniendo en cuenta la reacción redox de la ecuación 2.1, donde el producto es un mol de H_2O y los reactivos son un mol de H_2 y medio mol de O_2 , para nuestro caso la ecuación anterior resulta

$$\Delta \bar{g}_f = \bar{g}_{f(H_2O)} - \bar{g}_{f(H_2)} - \frac{1}{2} \bar{g}_{f(O_2)} \quad (2.5)$$

Ahora, teniendo en cuenta que el trabajo eléctrico realizado es el producto de la carga por la tensión ($W_E = Q \cdot E$), y considerando un proceso sin irreversibilidades y con combustible y comburente puro, se puede decir entonces que el trabajo eléctrico es aproximadamente igual a la energía química entregada por la reacción de la celda, es decir que $W_E = \Delta \bar{g}_f$.

Lo que hace falta, entonces, es obtener la cantidad de carga que circula a través del circuito externo por cada mol de agua que se produce. Como se puede ver en las dos reacciones parciales de las ecuaciones 2.2 y 2.3, por cada mol de H_2O que se obtiene, dos átomos de hidrógeno pierden su electrón, y en consecuencia, dos electrones circulan a través de la carga. Entonces, si e es la carga de un electrón ($1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$) y N es el número de Avogadro ($6,022 \times 10^{23}$) que indica la cantidad de partículas en un mol, la carga por cada mol es

$$Q = -2 \cdot Ne = -2 \cdot F = 192\,970 \text{ C} \quad (2.6)$$

Donde F es la constante de Faraday, que indica la carga de un mol de electrones.

Reemplazando la ecuación 2.6 en la expresión del trabajo eléctrico (recordando que es equivalente a $\Delta \bar{g}_f$), se obtiene la siguiente expresión de energía obtenida por mol de producto.

$$W_E = \Delta \bar{g}_f = -2F \cdot E \quad (2.7)$$

Entonces, si despejamos la tensión de circuito abierto E (es decir corriente nula) de la ecuación anterior, podemos obtener una expresión para esta tensión en función de la energía de Gibbs de formación de la reacción, que para una temperatura de 80°C de una celda tipo PEM típica es de $-228,2 \text{ kJ mol}^{-1}$.^[9]

$$E = -\frac{\Delta \bar{g}_f}{2F} = 1,183 \text{ V} \quad (2.8)$$

Con esta ecuación, por lo tanto, se puede obtener la **tensión de circuito abierto de celda teórica** de una celda de combustible cualquiera; pero se debe tener en cuenta que este valor es ideal, y no tiene en cuenta múltiples factores que reducen la eficiencia (y la tensión de circuito abierto) del dispositivo: no es posible utilizar el 100 % del combustible disponible, algunas dinámicas de las reacciones utilizan parte de la energía química generada, entre otros. Además, en este desarrollo no se consideró la variación de la energía libre de Gibbs con la presión y concentración de gases.

Modelo Tensión-Corriente

Sin embargo, esto no es suficiente para un análisis eléctrico completo del dispositivo. Ahora se deben describir las distintas partes de una curva típica de tensión-corriente de una celda de combustible de baja presión y temperatura (como las PEMFC), y al mismo tiempo presentar las ecuaciones que la describen para poder obtener el modelo eléctrico completo que se busca. Se puede ver esta curva típica en la figura 2.4.

En esta curva se pueden señalar tres regiones de pérdidas bien marcadas: la región de **pérdidas de activación** cerca de corriente nula, seguida por la región de **pérdidas óhmicas**, y finalmente, acercándose a la máxima corriente, la región de **pérdidas de concentración**. Estas pérdidas se dan por algunas irreversibilidades de las reacciones que ocurren en la celda, que la alejan de su comportamiento ideal. A continuación se detallan estos componentes y se obtienen sus ecuaciones correspondientes.

Región de Pérdidas de Activación Como se puede ver, en la primera región hay una rápida caída de tensión de características no lineales. Esto ocurre por las llamadas *pérdidas de activación*, que se generan por la lenta velocidad de reacción en las superficies de los electrodos para bajas densidades de corriente. Una porción de la tensión generada se pierde al generar la reacción electroquímica, que transfiere los electrones

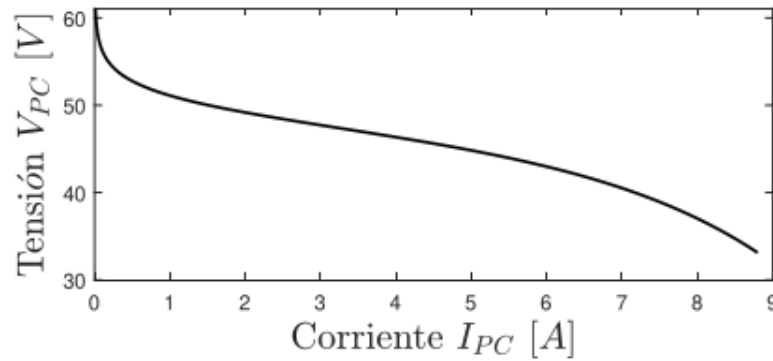


FIGURA 2.4 Curva de tensión vs. corriente típica de una celda de combustible tipo PEM (Placeholder).

desde o hacia los electrodos.

La ecuación asociada este comportamiento, formulada empíricamente por el químico suizo Julius Tafel en 1905, es una ecuación que describe la caída de tensión en un electrodo para una gran variedad de reacciones, incluida la reacción redox de agua que nos interesa. La ecuación de Tafel relaciona la caída de tensión en un electrodo ΔV_{act} con la densidad de corriente i que circula a través del mismo mediante una forma logarítmica.

$$\Delta V_{act} = A \cdot \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (2.9)$$

La constante i_0 (llamada *densidad de corriente de intercambio*) se puede considerar como la densidad de corriente para la cual la tensión de celda se comienza a alejar de la ideal de la ecuación 2.8, y su valor aumenta mientras más rápida sea la reacción. En contraste, la constante A que multiplica al logaritmo es mayor para una reacción electroquímica lenta.

En el caso particular del hidrógeno como combustible, las pérdidas se concentran casi únicamente en el ánodo (donde ocurre la oxidación), con la densidad i_0 del ánodo generalmente más de 10 000 veces mayor a la del cátodo, por lo que generalmente las pérdidas de activación de este último se pueden despreciar, teniendo en cuenta únicamente las del ánodo.

Región de Pérdidas Óhmicas Esta región es la que abarca el mayor rango de corrientes de celda, además de ser la más simple de modelar y entender. En este caso, las pérdidas se dan simplemente por la resistencia eléctrica al paso de corriente de ambos electrodos y la resistencia al paso de iones del electrolito, y por lo tanto, la caída de tensión ΔV_{ohm} está relacionada linealmente con la densidad de corriente i mediante la Ley de Ohm.

$$\Delta V_{ohm} = i \cdot r \quad (2.10)$$

Donde r debe ser la resistencia por unidad de área ($\Omega \text{ m}^2$) si se trabaja con i como densidad de corriente (A m^{-2}).

Región de Pérdidas de Concentración Esta última región de pérdidas viene dada, como dice su nombre, por la reducción de la concentración de combustible y comburente en el ánodo y cátodo respectivamente, condición que se ve exacerbada al trabajar con corrientes y cargas muy elevadas. Esta reducción en concentración se traduce a una reducción de la tensión de celda ΔV_{conc} .

En general, el consenso es que no existe una única ecuación analítica que sea capaz de describir este comportamiento para cualquier caso. Entonces, hoy en día es muy común el uso de una ecuación de bases empíricas que, con la correcta elección de constantes, se ajusta muy bien al comportamiento real observado experimentalmente, y relaciona ΔV_{conc} exponencialmente con la densidad de corriente i .

$$\Delta V_{conc} = m \cdot e^{ni} \quad (2.11)$$

Donde las constantes m y n suelen estar alrededor de $3 \times 10^{-5} \text{ V}$ y $8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ mA}^{-1}$ respectivamente.

Habiendo obtenido la ecuación para la tensión irreversible (ecuación 2.8) y las ecuaciones de cada una de las tres regiones (ecuaciones 2.9, 2.10 y 2.11), se pueden combinar todas en una única expresión que modela la tensión de una celda para cualquier densidad de corriente:

$$\begin{aligned} V_{celda} &= E - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{conc} \\ &= E - A \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) - i \cdot r - m \cdot e^{ni} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Sin embargo, todavía se pueden realizar algunas simplificaciones. Para la ecuación 2.9, que expresa la caída de tensión por activación, la densidad de corriente de intercambio i_0 es muy baja, mucho menor a la densidad de corriente i , por lo que esta ecuación se puede modificar de la siguiente manera:

$$\Delta V_{act} = A \cdot \ln(i) - A \cdot \ln(i_0)$$

Como el último término solo depende de i_0 , que es un valor constante, se lo puede agrupar con la tensión irreversible E , para obtener una tensión de circuito abierto real y reversible E_{oc} .

$$E_{oc} = E + A \cdot \ln(i_0) \quad (2.13)$$

Vale aclarar que, al ser la densidad de corriente de intercambio una magnitud muy chica, al calcular su logaritmo natural se obtiene un número negativo, por lo que la tensión de circuito abierto reversible E_{oc} resulta, como es esperable, menor a la tensión irreversible E . Entonces, la expresión final que describe la relación tensión vs. corriente de una celda de combustible se muestra en la siguiente ecuación.

$$V_{celda}(i) = E_{oc} - A \cdot \ln(i) - i \cdot r - m \cdot e^{ni} \quad (2.14)$$

Para obtener la tensión de una pila, solo es necesario multiplicar la tensión V_{celda} por la cantidad de celdas N del stack.

$$V_{stack}(i) = NV_{celda}(i) = N \cdot (E_{oc} - A \cdot \ln(i) - i \cdot r - m \cdot e^{ni}) \quad (2.15)$$

2.1.6 EMULADOR DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

Esta plataforma se basa en la utilización de un modelo comercial particular de pila de combustible: el módulo H-300 de la serie H de pilas de combustible de Horizon Fuel Cell Technologies de la figura 2.5. Esta es una pila de combustible de 300 W enfriada por aire del tipo PEMFC, que consiste en un stack de 60 celdas. Su desempeño nominal es de 36 V de tensión a 9 A de corriente y tiene una tensión de circuito abierto de aproximadamente 60 V.^[10]

Sin embargo, dado que este módulo no está presente en el laboratorio, como reemplazo se utiliza un **módulo de emulación de pilas de combustible**. Este módulo permite la reproducción de una curva tensión-corriente de una pila en condiciones de trabajo controladas.

Este módulo consiste de un convertidor CC-CC conmutado de tipo reductor, (que se explicará mas adelante) que impone una tensión de salida en función de la corriente suministrada a través de un lazo de control. El modelo que utiliza para obtener la



FIGURA 2.5 Pila de combustible tipo PEMFC, modelo Horizon Fuel Cell Technologies H-300.

tensión de salida en función de la corriente es el que se se obtuvo en la ecuación 2.15 y en el gráfico de la figura 2.4. El módulo se puede ajustar a distintos modelos de celdas mediante la variación de las constantes N , E_{oc} , A , r , m y n . Los valores de la curva se almacenan en una tabla de *look-up* implementada en un FPGA.

Adicionalmente a la característica tensión-corriente de la celda, este módulo permite simular el filtro pasabajos propio de la pila que se ve en el diagrama de la plataforma de la figura 2.1. Este filtro cumple la función de proteger a las celdas y evitar deterioro de las mismas mediante una reducción del rizado de corriente que puede generar la conmutación del convertidor.^[1]

2.2 CONVERTIDOR CC-CC CONMUTADO

Un convertidor CC-CC es un dispositivo electrónico que tiene como objetivo convertir una tensión continua, generalmente no regulada (es decir que no es fija), V_{in} a la entrada, a una tensión continua regulada V_{out} de distinta magnitud a la salida, transfiriendo la mayor cantidad de energía posible de la entrada hacia la salida. Dependiendo del tipo de convertidor, esta tensión de salida puede ser menor, mayor o tanto menor como mayor a la tensión de entrada.

Estos convertidores son de interés para nuestra aplicación, ya que la tensión V_{stack} que entrega la pila (ecuación 2.15) es una tensión continua no regulada, que varía apreciablemente con la corriente demandada; mientras que a la salida se demanda una tensión fija y regulada V_{bus} para conectar al bus de continua del sistema híbrido de la figura 1.3.

La forma más básica que se podría concebir para un dispositivo que cumpla esta función es la de un simple divisor resistivo, en el cual la tensión V_{out} depende de las resistencias R_1 y R_2 y la tensión de entrada V_{in} .

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Entonces, variando la relación entre R_1 y R_2 , se puede variar la tensión V_{out} entre tensión nula y V_{in} . Sin embargo, se necesita solo un análisis superficial de esta topología para ver que no es viable para ningún tipo de aplicación, más que nada por su pobre eficiencia energética (para obtener una tensión igual a la mitad de la entrada, se pierde la mitad de la potencia en disipación resistiva).

Los convertidores CC-CC se suelen separar en dos principales categorías: los **reguladores lineales**, que son un caso complejizado del divisor resistivo donde se utiliza un transistor como resistencia variable (además de un diodo para regular la tensión de salida); y los **convertidores conmutados**, en los cuales uno o más transistores, actuando como llaves, son conmutados a alta frecuencia y junto con dispositivos que almacenan energía (como inductores y capacitores) producen una tensión continua a la salida.

Dado que para esta plataforma se utiliza un convertidor conmutado (principalmente por su gran ventaja en eficiencia energética), se enfocará el análisis únicamente en éstos; comenzando por una explicación de los conceptos básicos necesarios para comprender su funcionamiento.

2.2.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Como se detalló más arriba, los convertidores CC-CC conmutados consisten, en su forma más básica, en una fuente de continua no regulada a la entrada; y un transistor (que puede ser BJT, MOSFET o IGBT) que, mediante una excitación en su tercer terminal, se conmuta entre los modos de alta impedancia e impedancia nula, actuando como llave abierta y llave cerrada respectivamente. La proporción del tiempo total de ciclo (T_s) en la que el transistor está conduciendo (t_{on}) se denomina **ciclo de trabajo** o **duty cycle** y se suele simbolizar con la **letra D**. Como se verá más adelante, este es un parámetro crucial para el funcionamiento de este tipo de convertidores, ya que controlándolo se puede variar el nivel de tensión y corriente de salida.

Los convertidores CC-CC conmutados se clasifican en dos grandes grupos, usando como criterio la existencia de aislación galvánica entre la entrada no regulada y la salida regulada:

- **Convertidores No Aislados:** son los convertidores que no tienen aislación galvánica entre entrada y salida, como por ejemplo los convertidores reductores y elevadores (*buck* y *boost*), y por lo tanto son los mas simples de los dos tipos.

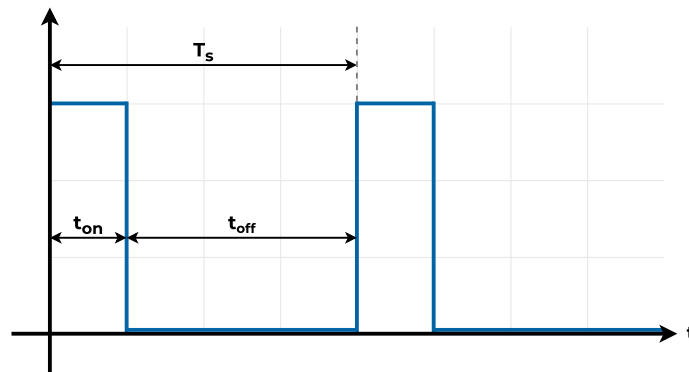


FIGURA 2.6 Una forma de onda cuadrada con ciclo de trabajo D del 25 %.

- **Convertidores Aislados:** son los convertidores que tienen su entrada y salida aisladas galvánicamente por medio de un transformador de alta frecuencia, por ejemplo los de tipo *flyback* y *forward*. El convertidor de esta plataforma, de tipo puente completo, cae dentro de esta categoría.

En la siguiente sección se va a detallar el funcionamiento del convertidor no aislado más sencillo, el convertidor reductor, a manera de introducir los principios de funcionamiento de convertidores conmutados que van a ser necesarios para luego poder entender las topologías más complejas que se utilizan en esta plataforma.

2.2.2 EL CONVERTIDOR REDUCTOR

La forma más básica posible de un convertidor conmutado tiene un esquema circuital similar al convertidor lineal mencionado más arriba, con la diferencia de que el transistor, (que previamente actuaba como una resistencia variable para conformar el divisor resistivo) en este caso, actúa como el interruptor del circuito, conmutando entre llave abierta y cerrada (figura 2.7). Para este análisis vamos a considerar que el dispositivo semiconductor actúa como una llave ideal, sin impedancia cuando está cerrado y con impedancia infinita cuando está abierto.

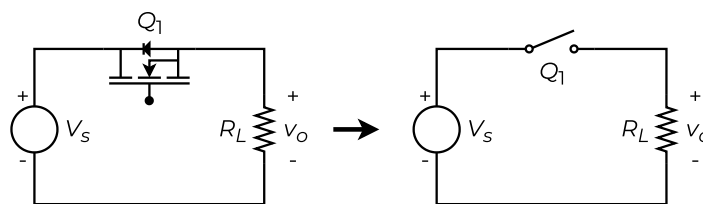


FIGURA 2.7 Circuito de un convertidor conmutado básico, y su equivalente con el transistor Q_1 como llave ideal.

Entonces, si se aplica una señal de control como la de la figura 2.6 al interruptor, durante un período T_s de la señal ocurren dos cosas distintas: ”

- **Durante el tiempo t_{on} ,** el transistor se comporta como una llave cerrada y permite la libre circulación de corriente. Entonces, esta corriente circula por la carga R_L , donde, por la Ley de Ohm, cae una tensión igual a la tensión de entrada, es decir, que la tensión de salida v_o es igual a la tensión de entrada V_s .
- **Durante el tiempo t_{off} ,** el transistor pasa a comportarse como una llave abierta, por lo que restringe completamente la circulación de corriente. Por lo tanto, la caída de tensión en la carga R_L es nula, es decir, que la tensión de salida v_o es nula.

Uniendo estos dos comportamientos, se puede ver que la forma de la tensión de salida es análoga a la forma de onda cuadrada que controla al interruptor (de la figura 2.6), oscilando entre 0 V y V_s .

$$\bar{v}_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_o(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} V_s dt = V_s \cdot D \leq V_s \quad (2.16)$$

Calculando el valor medio de v_o en la ecuación 2.16, este resulta ser directamente proporcional al ciclo de trabajo de la señal de control, variando entre 0 V y la tensión de entrada V_s , para ciclos de trabajo entre 0 y 1 respectivamente. Es decir, la **tensión media de salida es menor o igual a la de entrada** (esto se puede ver sin necesidad de cálculo, ya que si la salida es igual a la entrada por una proporción del tiempo total, su valor medio necesariamente debe ser menor, o como mucho igual, al valor de la entrada) y se controla directamente con la variación de D .

En principio, si se considera el transistor como interruptor ideal, la eficiencia de este dispositivo es del 100 %, ya que durante el tiempo t_{off} no circula ninguna corriente (por lo tanto no hay disipación de ningún tipo), y durante t_{on} no hay caída de tensión en el transistor. En la realidad, los transistores no actúan como llaves ideales, si no que tienen ciertas no idealidades que resultan en pérdidas de energía: no tienen impedancia perfectamente nula como llave cerrada, ni impedancia infinita como llave abierta, además de poseer pérdidas a la hora de conmutar.

Sin embargo, en muchos casos y aplicaciones (incluido el de este trabajo) no es suficiente obtener una salida de pulsos y controlar su tensión media, si no que se necesita obtener una tensión puramente continua directamente en la salida, como puede ser el caso para una fuente de alimentación.

Para solucionar este problema, se agrega un filtro pasa-bajos LC a la salida luego del interruptor, que se encarga de eliminar los componentes de alta frecuencia relacionados a la conmutación, dejando pasar únicamente los componentes de continua. El convertidor que resulta es la topología de convertidor CC-CC conmutado más sencilla: el **convertidor reductor o buck** de la figura 2.8, que obtiene su nombre porque, como se ve en la ecuación 2.16, reduce la tensión de entrada.



FIGURA 2.8 Circuito de un convertidor reductor o buck, con componentes ideales.

Además del filtro ya mencionado, se agrega un diodo de rueda libre o *flyback* en derivación entre el transistor y el inductor (diodo D_1 de la figura 2.8). Este dispositivo cumple la función de proveer un camino de circulación para la corriente i_L del inductor cuando el interruptor se encuentra abierto, que resulta necesario ya que la corriente sobre un inductor no puede variar abruptamente. Entonces, cuando el interruptor está abierto, el diodo entra en polarización directa y permite la circulación de corriente; mientras que cuando está el interruptor cerrado, el diodo se polariza con una tensión inversa V_s y actúa como un circuito abierto, eliminando su influencia sobre el convertidor durante t_{on} .

Durante su funcionamiento en estado estacionario, los convertidores reductores (y todos los convertidores CC-CC) tienen las siguientes propiedades:

- La corriente i_L sobre el inductor es periódica de período T_s , es decir, $i_L(t + T_s) = i_L(t)$.

- La tensión media \bar{V}_L que cae en el inductor es nula, ya que si no lo fuera su corriente crecería sin límite.
- La corriente media \bar{i}_C que circula por el capacitor es nula, ya que si no lo fuera su tensión crecería sin límite.
- La potencia absorbida por la carga es igual a la potencia entregada por la fuente. Para componentes no ideales, las pérdidas son entregadas por la fuente de entrada.

Análisis Detallado

Ahora se va a realizar un análisis más en profundidad de la topología. Pero antes, es necesario aclarar el conjunto de condiciones que se asumirán, necesarias para simplificar y facilitar la comprensión de esta explicación:

1. El circuito opera en estado estacionario, es decir que todas las respuestas transitorias ya se extinguieron.
2. La corriente del inductor es continua, es decir que circula siempre en la misma dirección.
3. El capacitor C es lo suficientemente grande como para mantener la tensión de salida constante.
4. El período de conmutación es T_s , con $t_{on} = DT_s$ y $t_{off} = (1 - D)T_s$.
5. Todos los componentes son ideales.

Para poder determinar la tensión de salida v_o del sistema, se va a determinar primero la corriente y tensión del inductor L del filtro de salida, para cada uno de los dos estados del circuito: **llave abierta** y **llave cerrada**. Para cumplir la condición de funcionamiento en estado estacionario, la corriente i_L debe tener una variación total nula durante un período T_s (es decir que la corriente debe ser la misma al principio y final de un ciclo), y, como se mencionó más arriba, su tensión media debe ser idénticamente nula.

Llave Cerrada Al estar la llave cerrada durante el tiempo $t_{on} = DT_s$, la tensión de entrada V_s cae directamente sobre el diodo D_1 , polarizándolo con una tensión inversa que no permite que circule corriente por el mismo, y en consecuencia, neutralizando su efecto sobre el circuito. Se puede ver el circuito equivalente para este estado en la figura 2.9.



FIGURA 2.9 Circuito equivalente de un convertidor reductor para llave cerrada.

Entonces, recordando que la tensión que cae sobre una bobina es proporcional a la corriente que circula sobre ella (con L como constante de proporcionalidad), la tensión sobre el inductor del circuito resulta

$$v_L = V_s - v_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.17)$$

Como la tensión, y por lo tanto la derivada de la corriente, son valores constantes y positivos, la corriente por el inductor es descrita por una recta de pendiente positiva. El cambio neto de corriente $(\Delta i_L)_{\text{cerrado}}$ mientras la llave permanece cerrada es entonces

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{(\Delta i_L)_{\text{cerrado}}}{\Delta t} = \frac{(\Delta i_L)_{\text{cerrado}}}{DT_s} = \frac{V_s - v_o}{L}$$

Reorganizando:

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT_s \quad (2.18)$$

Llave abierta Ahora, al abrirse la llave durante el tiempo $t_{\text{off}} = (1 - D)T_s$, el diodo entra en modo de polarización directa, permitiendo la circulación de la corriente acumulada en el inductor. La fuente queda desconectada y no entrega energía, conformándose el circuito equivalente de la figura 2.10.



FIGURA 2.10 Circuito equivalente de un convertidor reductor para llave abierta.

En este intervalo de tiempo, la tensión sobre el inductor es

$$v_L = -v_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.19)$$

Entonces, aplicando un razonamiento análogo al del período de llave cerrada, con la diferencia que en este caso, al ser la tensión v_L negativa, la recta de la corriente i_L es decreciente, se obtiene que el cambio neto de corriente $(\Delta i_L)_{\text{abierto}}$ mientras la llave está abierta es

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{(\Delta i_L)_{\text{abierto}}}{(1 - D)T_s} = \frac{-v_o}{L}$$

Reordenando:

$$(\Delta i_L)_{\text{abierto}} = - \left(\frac{V_o}{L} \right) (1 - D)T_s \quad (2.20)$$

Como se mencionó antes, para este análisis se asumió el funcionamiento en estado estacionario, por lo que la suma de los cambios netos de corriente de las ecuaciones 2.18 y 2.20 para ambos estados del circuito debe ser igual a cero.

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} + (\Delta i_L)_{\text{abierto}} = 0 \quad (2.21)$$

Reemplazando ambas variables por sus expresiones, se obtiene

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT_s - \left(\frac{V_o}{L} \right) (1 - D)T_s = 0$$

Despejando de la ecuación anterior, se consigue una expresión para la tensión de salida v_o de este convertidor.

$$v_o = V_s D \quad (2.22)$$

Este resultado es idéntico al de la ecuación 2.16 obtenido para el convertidor básico de la figura 2.7. En conclusión, **en un convertidor reductor, la tensión de salida siempre es menor o igual a la entrada.**

Evidentemente, por el resultado obtenido en la ecuación 2.22, la salida se controla únicamente con el ciclo de trabajo D del transistor. Por ejemplo, si aumenta la tensión de alimentación V_s pero se desea mantener v_o a un nivel constante, se compensa este aumento con una disminución del ciclo de trabajo (o viceversa). Si se agrega un sensor que mida la tensión de salida, se puede implementar un lazo de control automático que mantenga v_o fijada a una referencia mediante la variación de D .

2.2.3 CONVERTIDORES CC-CC AISLADOS

Habiendo entendido el funcionamiento del convertidor reductor en la anterior sección (que cae en la categoría de convertidores CC-CC no aislados), ahora vamos a pasar a los convertidores CC-CC aislados, categoría en la cual se encuentra el convertidor tipo puente completo de esta plataforma.

Los convertidores aislados son generalmente utilizados en fuentes de alimentación de corriente continua, y a diferencia de los no aislados, tienen un transformador de alta frecuencia de por medio, para generar una **aislación galvánica entre la entrada y la salida**. Además, como los transformadores solo conducen corriente alterna, a su salida debe incluirse algún tipo de circuito rectificador para transformarla a corriente continua para alimentar a la carga.

Es claro que el adiciónado de un transformador agrega una mayor complejidad al circuito. Entonces, ¿por qué se busca esta aislación galvánica? Sin la aislación interpuesta, nuestra salida va a compartir la conexión a tierra con la fuente de alimentación, (que suelen tener tierras muy ruidosas) introduciendo ruido no deseado a la salida. En muchas aplicaciones hay una gran sensibilidad al ruido en la carga, por lo que es deseable mantenerlo lo más bajo posible, incluso si agrega complejidad al diseño. Adicionalmente, la presencia de aislación galvánica presenta una ventaja en cuestiones de seguridad, tanto para proteger a quienes operan con el circuito como para protección de los componentes del mismo circuito.

Otra ventaja es la mayor flexibilidad que un transformador en la etapa de continua aporta al diseño, ya que variando la relación de vueltas entre bobinados (por ejemplo con el uso de múltiples bobinados) se puede variar la tensión de salida entre distintos niveles.

Ahora se procederá a derivar las distintas topologías de convertidores aislados, partiendo del convertidor reductor (no aislado) que se explico más arriba. Estos convertidores que obtendremos los vamos a llamar **convertidores aislados derivados del reductor** o *isolated buck-derived converters*^[14], comenzando por el convertidor *forward*.

El Convertidor Forward

Si tomamos el circuito del reductor de la figura 2.8, y le agregamos un transformador de alta frecuencia entre la llave Q_1 y el diodo D_1 , se obtiene la aislación galvánica buscada, como se observa en el circuito de la figura 2.11.

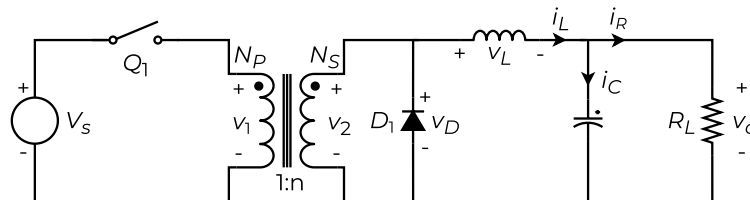


FIGURA 2.11 Convertidor reductor con un transformador interpuesto entre la llave Q_1 y el diodo D_1 .

Cuando la llave está cerrada, la tensión V_s de entrada se aplica sobre el bobinado primario del transformador, traduciéndose a una tensión de la misma polaridad (por la ubicación de los puntos homólogos) pero afectada por la relación de vueltas n . Esto genera que el núcleo ferromagnético del transformador se magnetice, y aumente su flujo de magnetización ϕ_m .

Cuando la llave se abre, la corriente del inductor de filtro circula por el diodo D_1 , cortocircuitando el bobinado secundario del transformador. Esto fuerza que la tensión y

la corriente del transformador se anulen, y por lo tanto, el flujo magnetizante se mantiene constante.

Entonces, durante un período de conmutación T_s , el flujo ϕ_m del núcleo del transformador tiene un incremento neto. Pasados suficientes períodos, este flujo aumenta lo suficiente como para saturar el transformador, cosa que no es deseable, ya que puede resultar en corrientes elevadas y eventualmente, la destrucción del transistor de potencia que actúa como llave.

Para solucionar este problema, se debe agregar algún circuito auxiliar de restablecimiento del núcleo que, durante el período en el que la llave está abierta, aplique una tensión negativa en el bobinado primario y permita una circulación inversa de corriente para restablecer el flujo magnetizante a su valor original.

Pero, al aplicar esta tensión negativa en el primario, se refleja en una tensión negativa del secundario que polariza en directa a D_1 , cortocircuitando este bobinado. Para arreglar este inconveniente, se puede agregar un diodo rectificador D_R en serie con el bobinado secundario, que no permita la circulación inversa de corriente.

Teniendo esto en cuenta, se ve en la figura 2.12 el circuito de un **convertidor forward** derivado de un reductor, dónde se agregaron el circuito de restablecimiento de núcleo, compuesto por un bobinado auxiliar y un diodo D_r en serie; en paralelo con el bobinado primario y la llave Q_1 (en posiciones invertidas); y el diodo rectificador D_R en el secundario (respecto a la figura 2.11).



FIGURA 2.12 Circuito de un convertidor aislado tipo forward, desarrollado a partir del circuito de un reductor.

Dado que este circuito es similar a un convertidor reductor, solo que con un transformador de relación de vueltas n interpuesto (y los circuitos auxiliares que no afectan la salida), se puede ver que su relación entrada-salida será similar a la del convertidor en el que se basa (ecuación 2.22) pero afectada por la relación de vueltas del transformador.^[12]

$$v_o = \left(\frac{N_S}{N_P} \right) V_s D = n V_s D \quad (2.23)$$

Con estos resultados se puede ver la flexibilidad aportada por el transformador: a pesar de ser muy similar a un circuito que solo permite reducir la tensión, con la relación de vueltas se puede obtener cualquier nivel de tensión que se desee a la salida. Sin embargo, al tener que restablecer la magnetización del núcleo, se suele limitar el ciclo de trabajo a 50 % para poder lograr la demagnetización completa.

Además, con el circuito de restablecimiento de flujo, el estrés de tensión sobre la única llave del circuito se duplica respecto al convertidor reductor: al estar la llave abierta, debe soportar una tensión de dos veces la tensión de entrada V_s (para bobinados N_P y N_R iguales). Esto puede ser problemático para aplicaciones de alta tensión, ya que los transistores de alta tensión que se requieren son mas caros y suelen tener desempeño degradado a altas frecuencias de conmutación.

Forward de Doble Llave Para solucionar este inconveniente, se puede diseñar un convertidor forward de dos llaves o *double-ended*, que disminuye el estrés de tensión de cada llave a V_s sin cambiar la tensión de salida, que se mantiene igual a la ecuación 2.23 del convertidor forward común.

Entonces, si agregamos una segunda llave Q_2 en serie a la llave original, ambas conmutando al mismo tiempo, la tensión de llave abierta se reparte entre ambas llaves, logrando lo que se buscaba. Para asegurar que en cada llave caiga la tensión V_s correspondiente, se agregan los diodos D_1 y D_2 , conectados entre el terminal negativo del transformador y V_s , y entre el terminal negativo de V_s y el terminal positivo del transformador respectivamente.

Estos diodos, durante el tiempo en que ninguna llave conduce, permiten el flujo inverso de corriente por el bobinado, cumpliendo el rol adicional de circuito de restablecimiento de ϕ_m . Esto hace redundante al bobinado N_R y su diodo D_R , por lo que se pueden remover, resultando en el circuito de la figura 2.13.



FIGURA 2.13 Circuito de un convertidor aislado tipo forward de doble llave o *double-ended*.

Una consecuencia que existe para ambos tipos de convertidores forward (normal y *double-ended*), es que al estar el ciclo de trabajo limitado a la mitad del período, los requerimientos de filtrado aumentan considerablemente. Esto requiere de la utilización de una bobina de mucha mayor inductancia, aumentando su costo y tamaño, además de introducir una gran cantidad de armónicos de la frecuencia de conmutación.^[14]

Entonces, se debe encontrar un circuito que sea capaz de obtener una tensión rectificada de secundario que supere el 50 % de ciclo de trabajo, disminuyendo los requerimientos del filtro y la presencia de armónicos no deseados. Vamos a obtener este circuito partiendo del circuito del convertidor forward de una llave de la figura 2.12.

El Convertidor Push-Pull

Una posible solución podría ser la conexión de dos convertidores forward en paralelo en el primario, que luego compartan el diodo D_1 y el filtro de salida LC del lado secundario. Los interruptores Q_1 y Q_2 deben operar de manera complementaria, con Q_1 conduciendo cuando Q_2 se abre y viceversa (ambos con el mismo ciclo de trabajo); obteniendo una tensión rectificada del doble de ciclo de trabajo de cada llave.

El circuito resultante de la figura 2.14, sin embargo, se puede simplificar. Si hacemos que ambos bobinados primarios compartan su núcleo magnético; entonces, se puede agregar un diodo en antiparalelo a cada llave, de manera que cada uno de estos diodos, junto con los bobinados que tienen en serie, pueden funcionar como circuitos de restablecimiento del núcleo cuando la otra llave esta conduciendo (es decir, cuando Q_2 conduce, el diodo antiparalelo de Q_1 y su bobinado restablecen la magnetización del núcleo, y viceversa).



FIGURA 2.14 Dos convertidores forward conectados en paralelo en el primario, compartiendo diodo y filtro de salida.

Entonces, los circuitos de restablecimiento heredados del convertidor forward son redundantes, y por lo tanto se pueden remover para simplificar el circuito, resultando en el **convertidor push-pull** que se observa en la figura 2.15. Además, el diodo de rueda libre D_{FW} se puede remover, ya que con el rectificador de punto medio conformado por D_{R1} y D_{R2} se forma un camino para la circulación de la corriente del inductor.

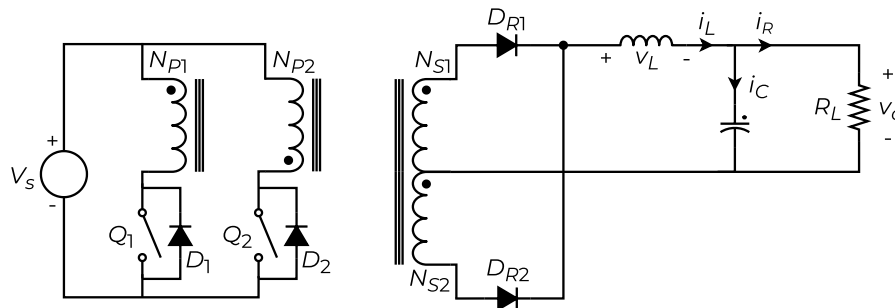


FIGURA 2.15 Circuito de un convertidor aislado tipo push-pull.

Para obtener su tensión de salida no es necesario realizar toda la deducción matemática. Al ser esta topología esencialmente dos convertidores forward que conducen de manera alternada (cada columna del primario es equivalente a un convertidor forward), el ciclo de trabajo de la onda rectificada es el doble del de cada una de las columnas. Entonces, es razonable decir que su tensión v_o es dos veces la del convertidor forward (ecuación 2.23)^[12], siempre que ambos bobinados primarios y secundarios sean iguales.

$$v_o = 2 \left(\frac{N_{S1}}{N_{P1}} \right) V_s D = 2 \left(\frac{N_{S2}}{N_{P2}} \right) V_s D \quad (2.24)$$

Esta topología soluciona los problemas de rectificación que tienen los convertidores forward, pero cada llave debe soportar $2V_s$ de tensión cuando está abierta (porque son dos forward intercalados), introduciendo de vuelta la problemática que se solucionó con el forward double-ended. Sería desable entonces, encontrar una topología aislada que sea capaz de solucionar ambos inconvenientes.

2.2.4 EL CONVERTIDOR DE PUENTE COMPLETO

Este tipo particular de convertidor aislado, que es el elegido para esta plataforma, es el más complejo dentro de su categoría: utiliza cuatro llaves distintas, y por lo tanto tiene un sobresaliente rendimiento para aplicaciones de alta potencia y tensión. Se va a obtener su circuito a partir de las topologías previamente explicadas, detallando sus ventajas y desventajas. Luego se va a desarrollar un modelo matemático para representarlo y se explicará la forma de controlarlo mediante el método *phase-shift*.

Si tomamos el circuito del convertidor forward de dos llaves de la figura 2.13, se puede concebir una conxión alternativa para el mismo, donde intercambiamos los lugares de la llave y el diodo en cada una de las dos columnas, e invertimos la posición del punto homólogo del secundario. Entonces, cuando ambas llaves están cerradas (recordando que en esta topología ambas llaves conmutan en conjunto) el núcleo se magnetiza negativamente, y una vez que se abren, la corriente (positiva) que circula por los diodos restablece los niveles de magnetización.

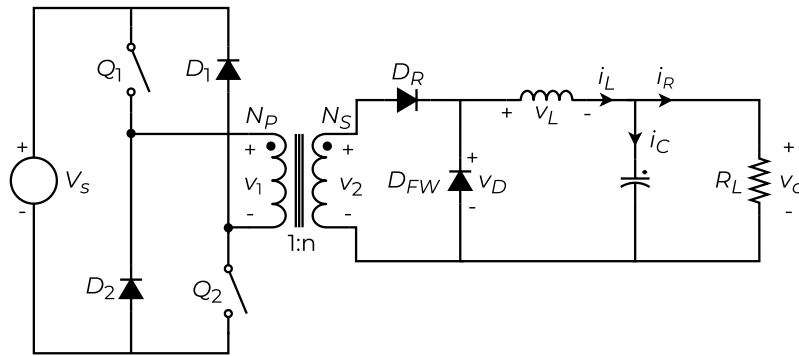


FIGURA 2.16 Dos variantes de convertidores forward de dos llaves conectados en paralelo (Placeholder).

Si conectamos ambas variantes del forward de dos llaves en paralelo, obtenemos el circuito de la figura 2.16, donde las llaves Q_1 y Q_4 conmutan en sincronía, y desfasadas un tiempo $T_s/2$ de Q_2 y Q_3 (que también conmutan en sincronía).

Siguiendo los pasos de la derivación del push-pull, si hacemos que ambos bobinados primarios compartan un solo núcleo magnético y conectamos diodos antiparalelos a cada una de las llaves, el flujo magnetizante del núcleo puede ser restablecido por los diodos de Q_1 y Q_4 y el bobinado primario N_{P1} , o bien por los diodos de Q_2 y Q_3 y el bobinado primario N_{P2} .

Entonces, los diodos D_1 a D_4 provenientes de los convertidores forward resultan redundantes por la utilización de los diodos antiparalelos, y pueden ser removidos del circuito. Lo que queda entonces, es notar que ahora ambos bobinados primarios tienen formas de onda de tensión y corriente idénticas, por lo que pueden unirse sus terminales positivos y sus terminales negativos, quedando, efectivamente conectados en paralelo. Si ambos bobinados están conectados en paralelo, uno de ellos es redundante y se puede remover sin consecuencias para el funcionamiento del circuito.

Entonces, si aplicamos todos estos cambios al circuito de la figura 2.16, obtenemos el circuito de un **convertidor aislado de puente completo** o **full-bridge** en la figura 2.17. Al igual que en el desarrollo del push-pull, el diodo D_{FW} también se puede eliminar ya que los diodos del rectificador de punto medio ya proveen un camino para la corriente del transistor.

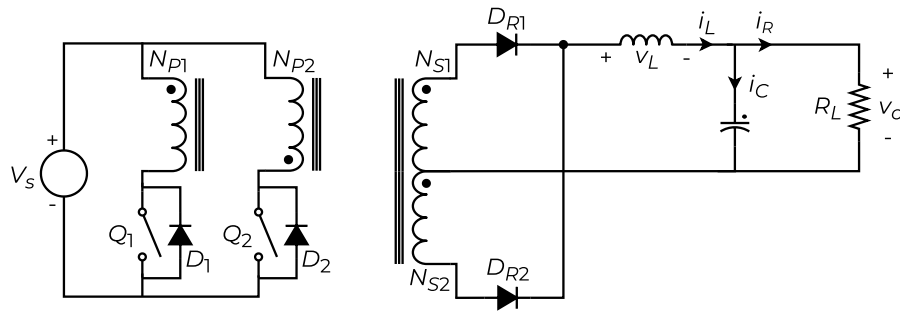


FIGURA 2.17 Circuito de un convertidor aislado tipo puente completo o full-bridge, con un rectificador de punto medio en el secundario (Placeholder).

Sin embargo, esta no es la topología exacta que se utiliza en este trabajo. Para simplificar la construcción del transformador de alta frecuencia y disminuir los requerimientos de desempeño impuestos a los diodos rectificadores del secundario, se utiliza un **rectificador de tipo puente completo** en el secundario como en la figura 2.18. Esta topología utiliza cuatro diodos en vez de dos, pero cada diodo debe soportar la mitad de la tensión inversa. Además, el transformador resulta más sencillo ya que solo tiene un bobinado secundario y no requiere tener punto medio.



FIGURA 2.18 Circuito de un convertidor aislado tipo puente completo o full-bridge, con un rectificador de puente completo en el secundario (Placeholder).

REFERENCIAS

- [1] Colin P. Morice et al. «Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set». En: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117.D8 (2012). doi: 10.1029/2011JD017187.
- [2] UNEP Copenhagen Climate Centre (UNEP-CCC) UNEP. «Emissions Gap Report 2021: The Heat Is On – A World of Climate Promises Not Yet Delivered – Executive Summary». En: *United Nations Environment Programme* (2021).
- [3] V. Smil. *Energy Transitions: Global and National Perspectives, 2nd Edition*. ABC-CLIO, LLC., 2016. ISBN: 978-1440853241.
- [4] Asmae Berrada y El Rachid Mrabet. *Hybrid Energy System Models*. Amsterdam: Academic Press, 2020. ISBN: 978-0-12-821403-9.
- [5] J.J. Talpone et al. «Experimental platform for development and Evaluation of hybrid generation systems based on fuel cells». En: *International Journal of Hydrogen Energy* 37 (2012), págs. 10346-10353.
- [6] Jorge L. Anderson, Paul F. Puleston y Pedro Fornaro. «Control de Sistema Híbrido de Energía Basado en Pilas de Combustible y Supercapacitores». En: ().
- [7] L. Carrette, K.A. Friedrich y U. Stimming. «Fuel Cells - Fundamentals and Applications». En: (2001).
- [8] EG&G Technical Services Inc. *Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)*. 2004.
- [9] Andrew L. Dicks y David A.J. Rand. *Fuel Cell Systems Explained*. John Wiley & Sons, Ltd, 2018. ISBN: 9781118706992. doi: 10.1002/9781118706992.
- [10] Horizon Educational. *H-Series Fuel Cell Stacks - Open-cathode PEM fuel cells*.
- [11] J.L. Anderson, J.J. Moré y P.F. Puleston. «Diseño y validación experimental de un Controlador Super-Twisting aplicado a un Módulo de Pila de Combustible». En: (2018).
- [12] Daniel W. Hart. *Power Electronics*. McGraw Hill, 2011. ISBN: 978-0-07-338067-4.
- [13] Muhammad H. Rashid. *Power Electronics Handbook*. Academic Press, 2007. ISBN: 978-0-12-088479-7.
- [14] Xinbo Ruan. *Soft-Switching PWM Full-Bridge Converters - Topologies, Control and Design*. John Wiley & Sons, Ltd, 2014. ISBN: 978-1-118-70220-8.