

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

Proyecto Final

**AUTOR:**

Tomás Tavella  
N° 68371/4

**DIRECTOR:**

Ing. Jorge Anderson Azzano

**CO-DIRECTOR:**

Dr. Ing. Paul F. Puleston



*Facultad de Ingeniería*  
*Universidad Nacional de La Plata*



# AGRADECIMIENTOS

A la banda, DNI N° de integrantes? 11



# 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 conversor 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 circuital; 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

<b>1. Introducción</b>	<b>6</b>
1.1. Sistemas Híbridos de Generación de Energía . . . . .	7
<b>2. Plataforma de Evaluación</b>	<b>9</b>
2.1. Celdas de Combustible . . . . .	10
2.1.1. Principio de Funcionamiento de las Celdas de Combustible . . . . .	10
2.1.2. De Celda a Pila de Combustible . . . . .	11
2.1.3. Aspectos Constructivos de Celdas . . . . .	12
2.1.4. Tipos de Celdas . . . . .	12
2.2. Conversor CC-CC Conmutado . . . . .	12



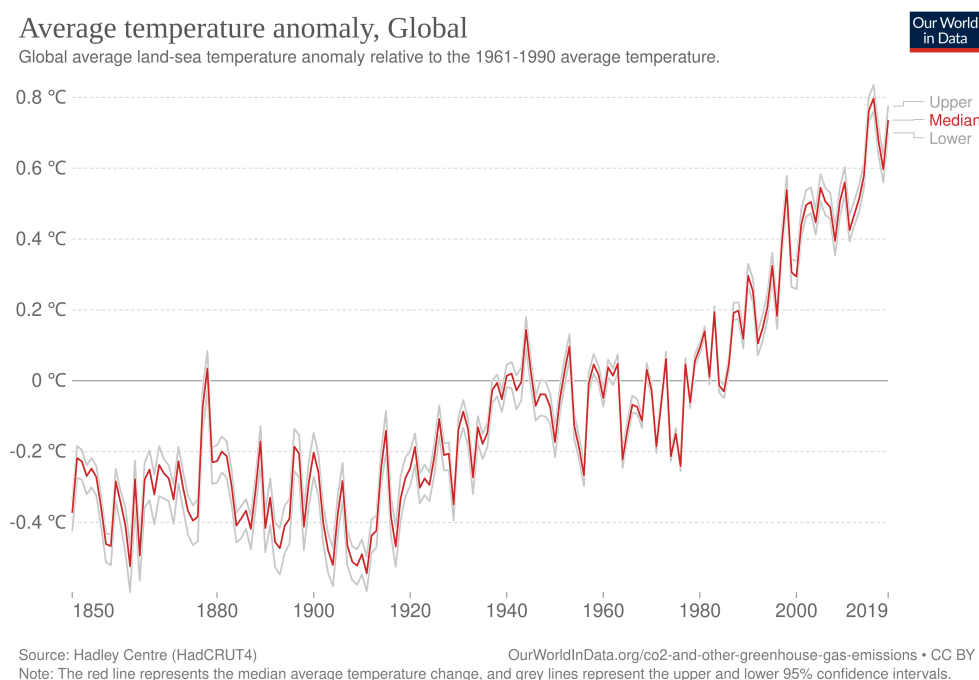


# 1. INTRODUCCIÓN

## CONTEXTO GLOBAL E INVESTIGATIVO 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  $1^{\circ}\text{C}$  mayor a temperaturas medidas a principio del siglo previo (figura 1.1)<sup>[OWID-CO2AndGreenhouseEmissions]</sup>, con algunos estimados conservadores de más de  $2.5^{\circ}\text{C}$  para finales de siglo<sup>[ref12Wikipedia]</sup>. 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.

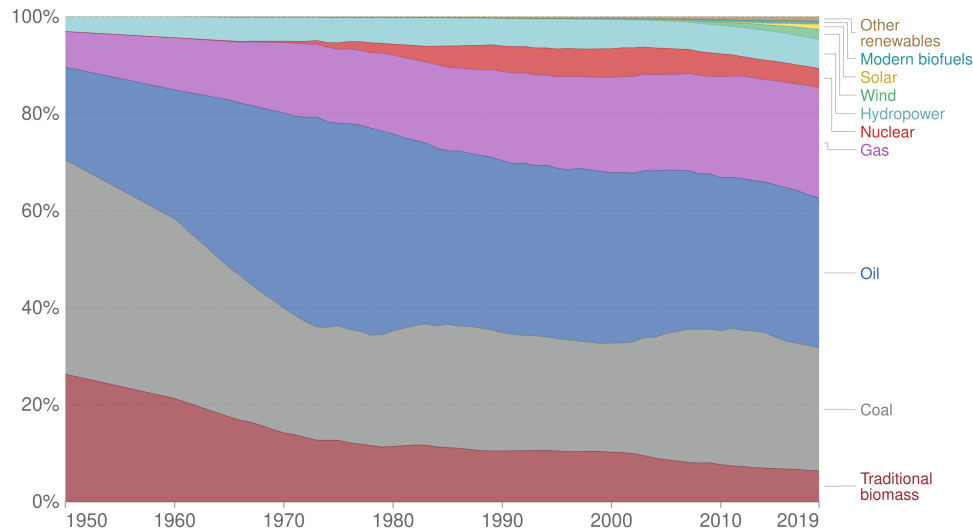


**Figura 1.1:** Temperatura superficial promedio del planeta, relativo a la del período 1961-1990, desde 1850 hasta 2019.

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<sup>[OWID-EnergyProduction]</sup> (figura 1.2). 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  $\text{CO}_2$  y metano en la atmósfera.

## Global primary energy consumption by source

Primary energy is calculated based on the 'substitution method' which takes account of the inefficiencies in fossil fuel production by converting non-fossil energy into the energy inputs required if they had the same conversion losses as fossil fuels.



Source: Vaclav Smil (2017) & BP Statistical Review of World Energy

OurWorldInData.org/energy • CC BY

**Figura 1.2:** Consumo global de energía primaria según fuente, desde 1950 hasta 2019.

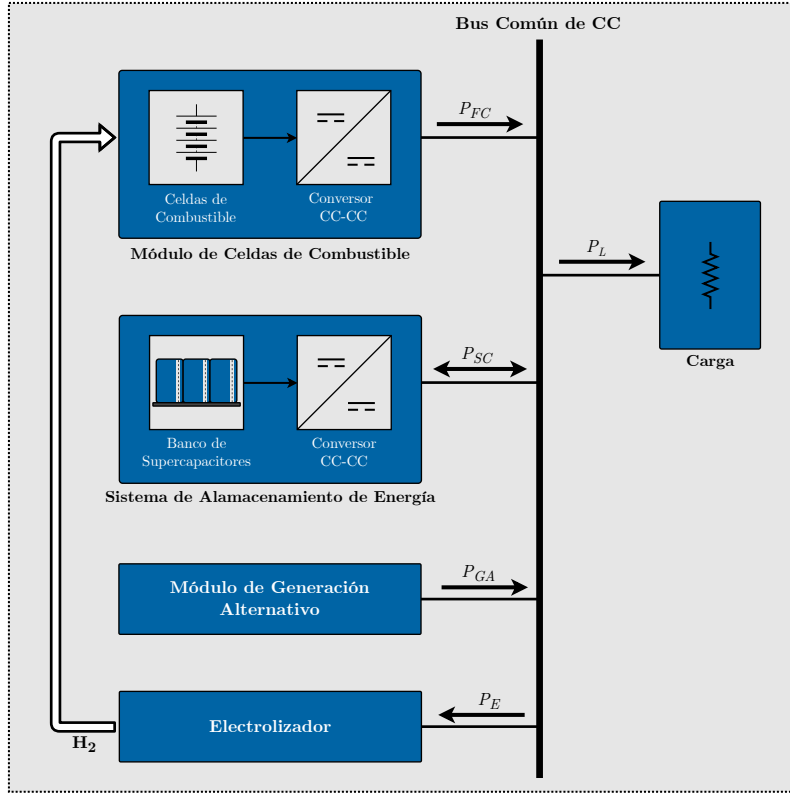
Con esta motivación, el Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales (LEICI) de la Facultad de Ingeniería de la UNLP se embarcó en el proyecto “Electrónica de Potencia y Sistemas de Control Avanzado Aplicados a Fuentes de Energía Alternativas”, dentro del cual se enmarca 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<sup>[HybridEnergySystemModels]</sup>.

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).<sup>[2012Talpone][2019FIAAnderson]</sup>.

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<sup>[2019FIAAnderson]</sup>.



**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.

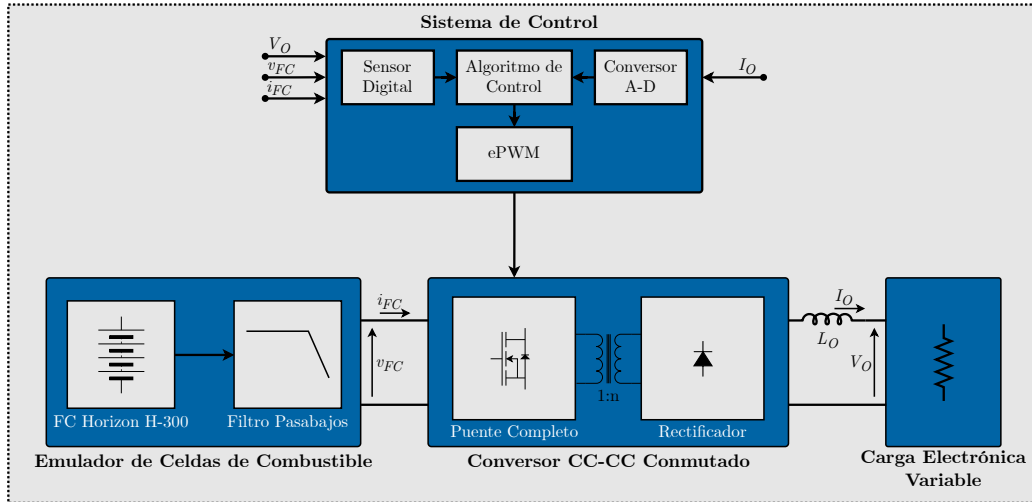
Todo lo que refiere a esta plataforma se va a tratar en detalle a lo largo del desarrollo de los siguientes capítulos de este informe. Se comienza por un estudio en profundidad de la teoría de funcionamiento de sus componentes, pasando por una simulación de toda la plataforma para verificar su funcionamiento. Luego, se describe el proceso por el cuál 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.

## 2. PLATAFORMA DE EVALUACIÓN

### ANÁLISIS 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
- Conversor 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 (Conversor 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 conversor, 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 conversor con su sistema de control), pero se hace un estudio detallado de todas las 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 por la generación de agua como único deshecho.

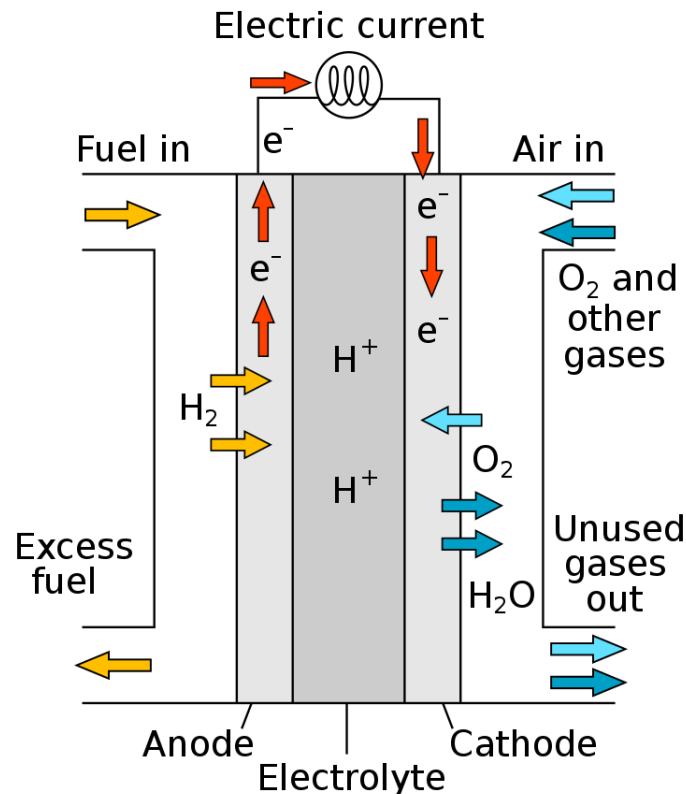
Por estas razones se eligió trabajar con esta tecnología, particularmente con el tipo de celda más común hoy en día, las Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico o PEMFC (del inglés *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), cuyo funcionamiento se profundiza más adelante.

### 2.1.1. Principio de Funcionamiento de las Celdas de Combustible

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<sup>[FC-FundamentalsAndApplications]</sup>. 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 interfaz entre ánodo y cátodo. La carga es conectada entre el ánodo y el cátodo.



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

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** 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** los iones  $H^+$  del electrolito, los electrones libres, y las moléculas de oxígeno reaccionan para formar como producto el agua (ecuación 2.3).

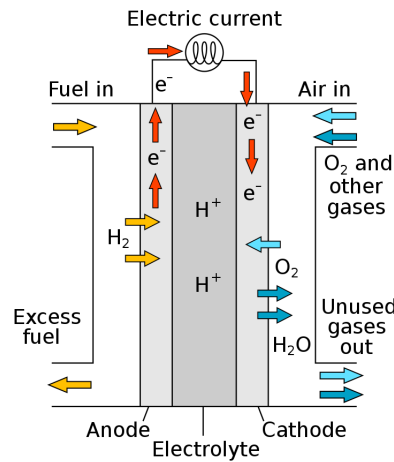
Mediante este proceso electroquímico se generan dos corrientes distintas: una corriente interna de iones  $H^+$  (cargas positivas) en el electrolito, desde el ánodo hacia el cátodo; y una corriente externa de electrones  $e^-$  (cargas negativas) circulando por la carga, en el mismo sentido que la corriente 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<sup>[FCHandbook]</sup>.



**Figura 2.3:** Figura de un stack de celdas.

### 2.1.3. Aspectos Constructivos de Celdas

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 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 dónde 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)**  
Hola
- **Celda de Combustible de Metanol Directo (DMFC)**  
Hola
- **Celda de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC)**  
Hola
- **Celda de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC)**  
Hola
- **Celda de Combustible de Óxido Sólido (SOFC)**  
Hola
- **Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC)**  
Hola

## 2.2. Conversor CC-CC Conmutado