

# 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 energías renovables a partir de pilas o celdas de combustible de tipo PEM-FC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*). Esta plataforma consiste en un sistema de conversión electrónico de tipo CC-CC 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 renewable energy systems based on Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEM-FC). This platform incorporates a full-bridge isolated 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 PEM-FC to the fixed voltage of the common DC bus at the 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, the implementation of the system PCB (printed circuit board) through the use of electronic design automation (EDA) software, programming of system control algorithms, and the 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>10</b>



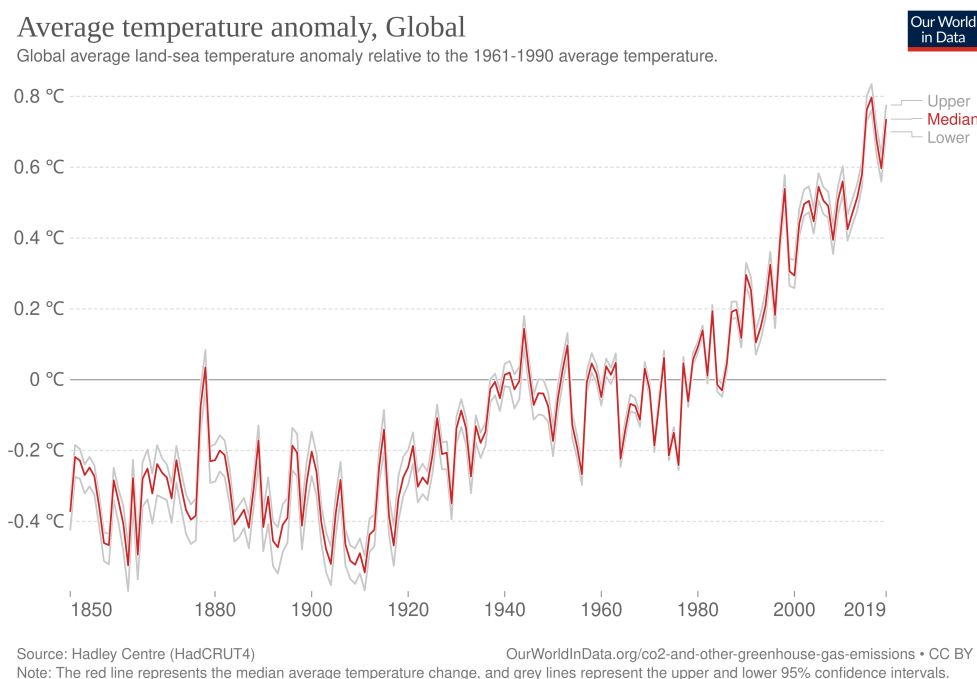


# 1. INTRODUCCIÓN

## 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.

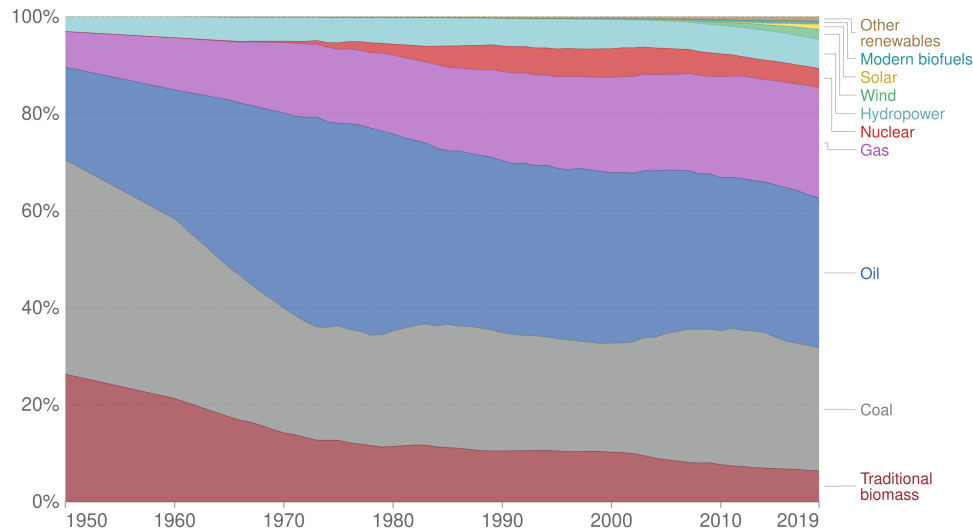


**Figura 1.1:** Temperatura superficial promedio del planeta, relativo a la del período 1961-1990, desde 1850 hasta 2019.

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.

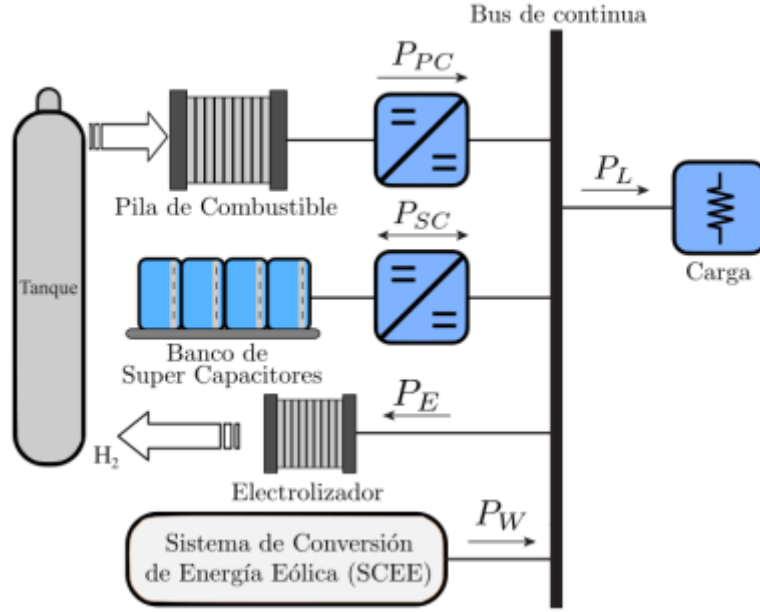
Con esta motivación, el Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales (LEICI) de la Facultad de Ingeniería de la UNLP se embarcó en el proyecto “Electrónica de Potencia y Sistemas de Control Avanzado Aplicados a Fuentes de Energía Alternativas”, dentro del cual se enmarca 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][2019FIAnderson]</sup>.

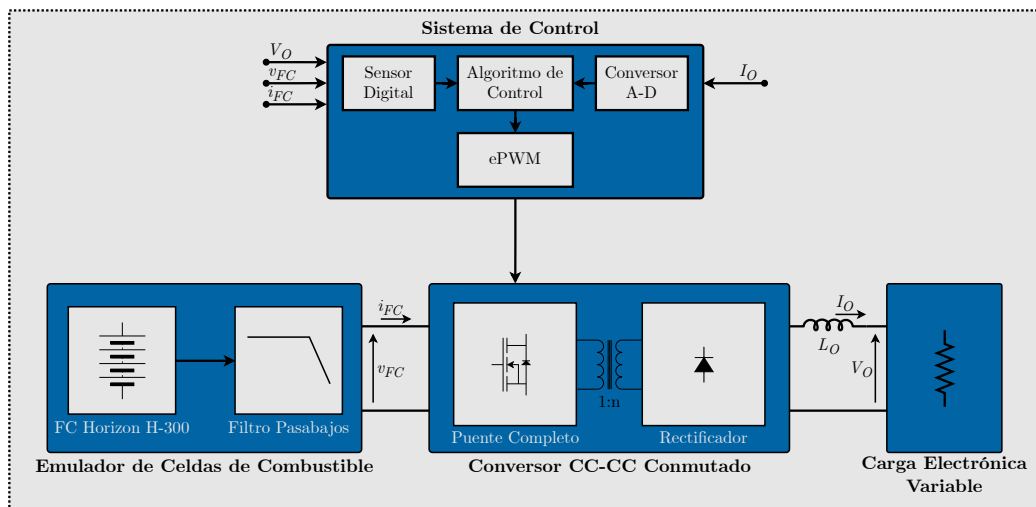
Resumiendo el funcionamiento brevemente, en este sistema el módulo de generación por celdas de combustible se encarga de entregar el nivel de potencia necesario para satisfacer la potencia demandada por la carga en el bus de CC. Mientras tanto, el módulo de generación alternativo tiene el rol de proveer 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>[2019FIAnderson]</sup>.



**Figura 1.3:** Diagrama esquemático del SHGE en estudio (placeholder).

En particular, este trabajo se enfoca en el estudio, diseño, implementación y validación de una plataforma experimental para la evaluación de módulos de celdas de combustible para Sistemas Híbridos de Generación de Energía (figura 1.4). Esta plataforma se compone de cuatro partes principales:

- El **Emulador de Celdas de Combustible**, usado en lugar de las celdas de combustible.
- **Conversor CC-CC Conmutado**, el sistema de conversión de potencia encargado de adaptar los niveles de tensión de entrada y salida.
- El **Sistema de Control**, que se encarga de monitorear y controlar el correcto y seguro funcionamiento de la plataforma.
- La **Carga Electrónica Variable**, utilizada para simular distintas condiciones de carga del bus de CC.



**Figura 1.4:** Diagrama de la plataforma experimental en estudio.

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

---

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Nec ultrices dui sapien eget mi. Placerat orci nulla pellentesque dignissim enim sit amet venenatis urna. Ridiculus mus mauris vitae ultricies. Id diam maecenas ultricies mi eget mauris. Viverra ipsum nunc aliquet bibendum enim facilisis gravida neque convallis. Netus et malesuada fames ac. Condimentum mattis pellentesque id nibh tortor id. Diam sit amet nisl suscipit adipiscing bibendum est ultricies integer. Pellentesque eu tincidunt tortor aliquam nulla facilisi. Vel orci porta non pulvinar. Ac tortor dignissim convallis aenean et tortor at risus. Elit dui tristique sollicitudin nibh sit amet commodo nulla. Molestie ac feugiat sed lectus vestibulum.

Adipiscing elit dui tristique sollicitudin nibh sit amet commodo nulla. Risus feugiat in ante metus dictum. Fermentum et sollicitudin ac orci phasellus egestas tellus rutrum. Morbi tristique senectus et netus. Faucibus et molestie ac feugiat sed lectus vestibulum mattis. Tellus id interdum velit laoreet id donec ultrices. Malesuada fames ac turpis egestas. Neque gravida in fermentum et. Curabitur gravida arcu ac tortor dignissim convallis aenean. Posuere ac ut consequat semper viverra. Phasellus egestas tellus rutrum tellus pellentesque eu tincidunt. Tortor condimentum lacinia quis vel eros donec ac odio tempor. Ut consequat semper viverra nam libero justo laoreet. Sit amet est placerat in egestas erat. Vitae sapien pellentesque habitant morbi tristique. Habitant morbi tristique senectus et. Phasellus vestibulum lorem sed risus ultricies tristique nulla aliquet enim. Ornare arcu dui vivamus arcu felis. Interdum velit euismod in pellentesque massa.