



Laboratorio de Trenes de Potencia Basados en Pilas de Combustible para el Ámbito Marítimo

Elena Posada, Antonio Villalba-Herreros, Vladimir L. Meca, Diego Díaz-Cuenca,
Rafael d'Amore-Domenech, Teresa J. Leo

GREENH2CM LIA7 PT1



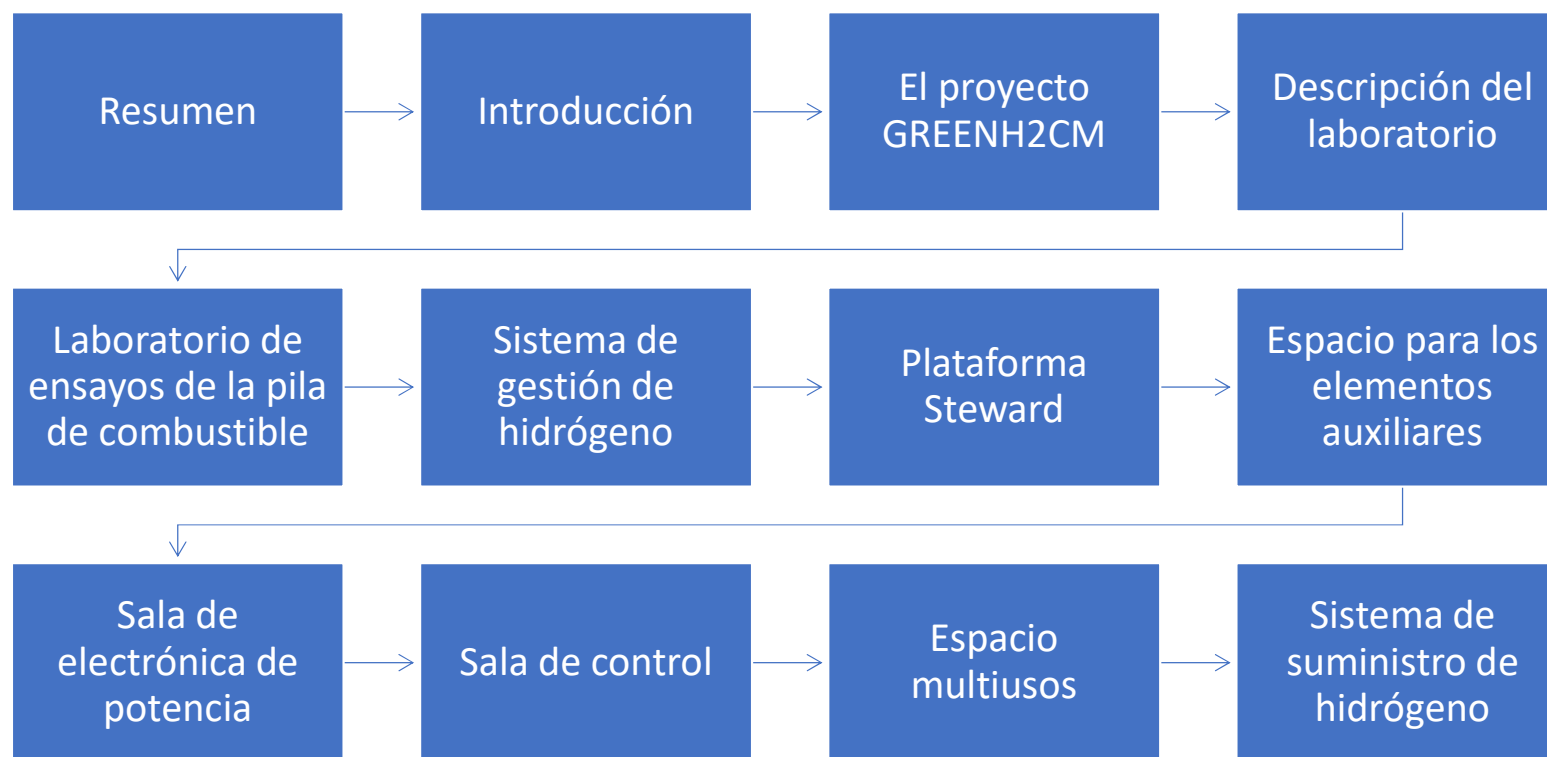
Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Índice



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Introducción

La Organización Marítima Internacional (OMI) se ha marcado como objetivo la neutralidad climática para 2050



Reglamento de seguimiento, notificación y verificación de emisiones que desde 2018 obliga a los operadores marítimos a hacer seguimiento u notificar las emisiones de sus viajes que tengan como origen o destino un Puerto de la UE



Reciente inclusion del sector en el comercio de derechos de emisiones de la UE.

Barcos de más de 5.000 toneladas brutas (400 toneladas brutas a partir de 2025)

50% de las emisiones de viajes entre un Puerto de la UE, Noruega e Islandia y otro Puerto fuera

100% de las emisiones de viajes entre dos puertos de la UE, Noruega e Islandia

100% de las emisiones de barcos atracados en puertos de la UE, Noruega e Islandia



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Introducción

- EEUU
 - Southwest Research Institute ofrece servicios para ensayos de trenes de potencia con pilas de combustible para la industria automovilística.
 - NASA posee un laboratorio para ensayar pilas de combustible con potencias mayores de 125 kW.
- Europa
 - El Centro Nacional del Hidrógeno en España cuenta con instalaciones para el ensayo de pilas de combustible de tipo PEM de hasta 30 kW.
 - JRC Laboratorio de Ensayo de Pilas de Combustible y Electrolizadores en Holanda dispone de una estación de ensayos para pilas de combustible de hasta 84 kW.
- China
 - El Centro Nacional para la Inspección y Ensayo de la Calidad de la Energía del Hidrógeno fue fundado en 2023.

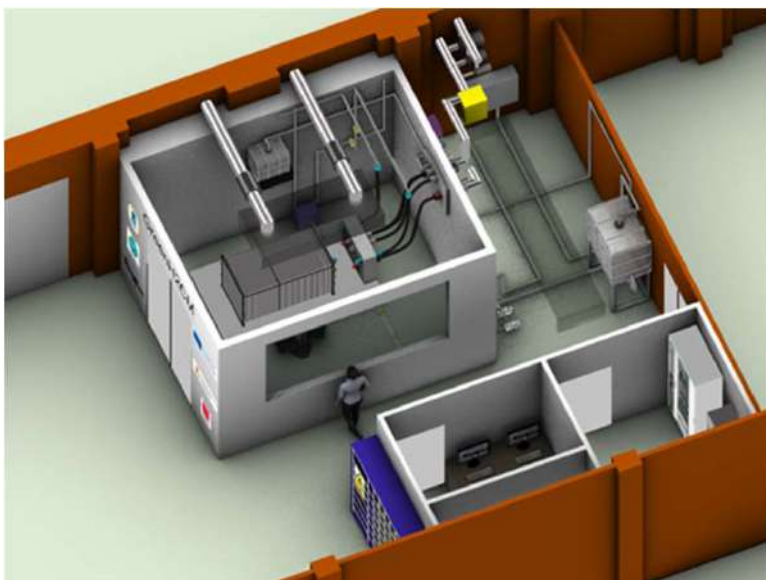


Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Introducción



Centro Nacional del Hidrógeno y otros laboratorios

Disponen de una mesa de vibración para analizar el efecto de las **vibraciones** en las pilas de combustible

Desarrollo de pilas de combustible para el **transporte por carretera**



ETSIN-UPM

Estudiar el efecto de **movimientos de baja frecuencia** en barcos

Cabeceo, balanceo y guiñada

Importante para aplicar esta tecnología en el **ámbito naval**



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU

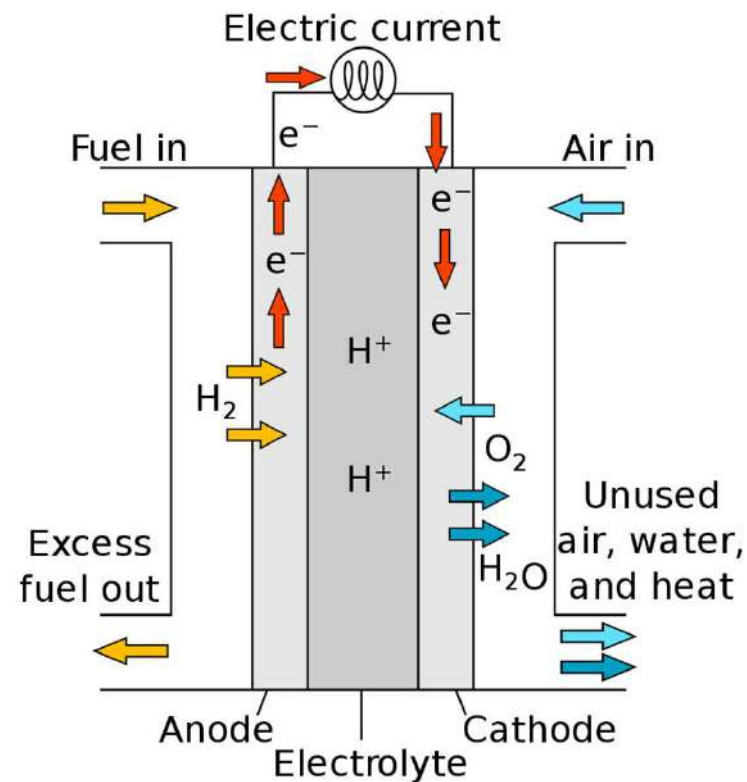


UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Introducción

¿Qué son las pilas de combustible?

- Las pilas de combustible son dispositivos que convierten energía química directamente en energía eléctrica.
- Esto se logra mediante la combinación electroquímica de un combustible y un oxidante.
- Son una alternativa eficiente y sostenible a los combustibles fósiles en aplicaciones de transporte y generación de energía.



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

El proyecto GREENH2CM

- Objetivos principales del proyecto
 - Desarrollar tecnologías innovadoras para la producción de hidrógeno
 - Incrementar la eficiencia de la producción de hidrógeno
 - Desarrollar tecnología para la integración de las pilas de combustible
 - Desarrollar tecnología para la combustión segura del hidrógeno
- Enfoque en el sector marítimo
 - Capacidad de simular movimientos a bordo de un barco
 - Capacidad de hibridar la pila de combustible con otras fuentes de energía

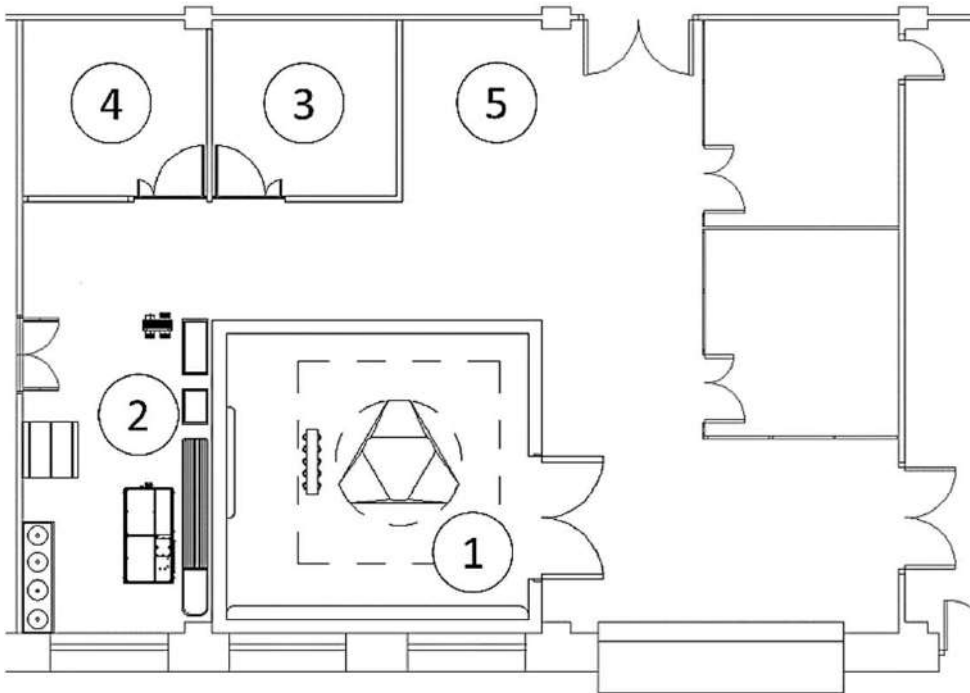


Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

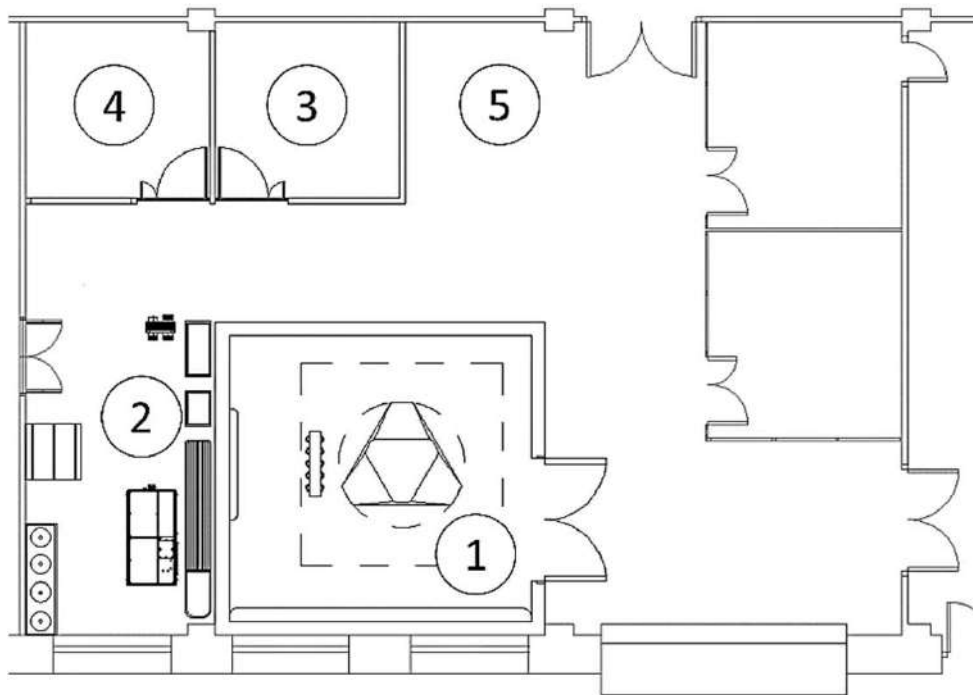
Descripción del laboratorio



1. Laboratorio de ensayos de la pila de combustible
2. Espacio para los componentes auxiliares
3. Sala de electrónica de potencia
4. Sala de control
5. Espacio multiusos



Laboratorio de ensayos de la pila de combustible



- Recinto principal
 - Localización de la pila de combustible, Sistema de Gestión de Hidrógeno y Plataforma Steward
 - Realización de ensayos
- Reducción de riesgos
 - Espacio cerrado con ventilación continua e independiente
 - Sensores de hidrógeno estratégicamente localizados
- Sistema de Gestión de Hidrógeno
 - Suministro de hidrógeno a la pila de combustible
 - Corriente de hidrógeno con flujo de 18 kg/h
 - Presión máxima de 1,5 MPa
 - Regulación de temperatura entre 325 K y 338 K
 - Contenedor sellado con ventilación forzada e independiente



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Sistema de gestión de hidrógeno



Suministra hidrógeno a la pila de combustible en estudio

Administra una corriente de hidrógeno con un flujo de 18 kg/h

Presión máxima de 1,5 MPa

Permite regular la temperatura de la corriente de hidrógeno entre 325 K y 338 K



Mayor seguridad

Se encuentra en un contenedor sellado con ventilación forzada e independiente

Con sensores de hidrógeno



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Plataforma Steward

- 6 grados de libertad
 - Permite ángulos máximos de balanceo y cabeceo iguales a 28°
 - Velocidad máxima de balanceo y cabeceo iguales a 40 %s
 - Aceleración máxima de oleaje igual a $9,81 \text{ m/s}^2$
- Reproduce el movimiento y las condiciones de posición de la pila de combustible similares a las de un barco



Espacio para los elementos auxiliares



Sistema de refrigeración de la pila de combustible

Regula la temperatura del fluido entre 333 K y 363 K

Estudia el efecto de la temperatura sobre el rendimiento de las pilas de combustible

Utiliza agua desionizada como fluido

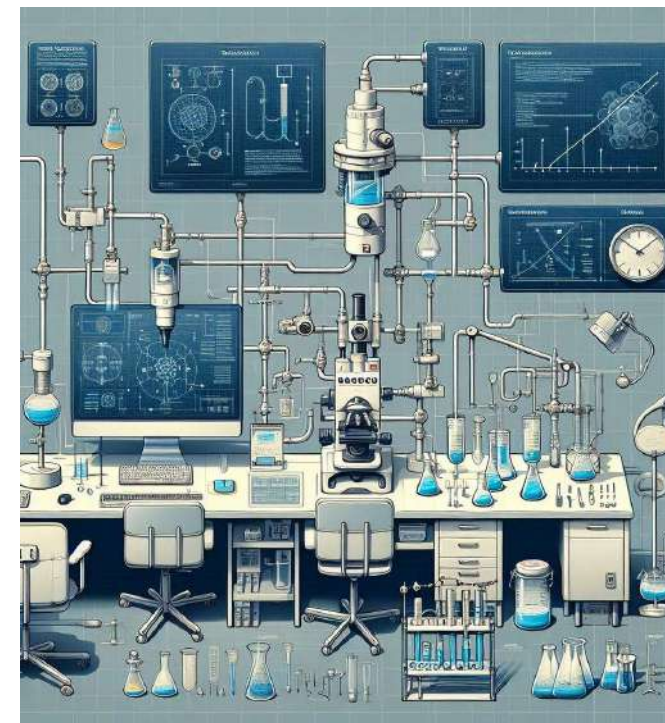


Sistema de tratamiento y suministro de aire a la pila de combustible

Regula la temperatura del aire entre 308 K y 373 K

Mantiene la presión de la corriente de aire entre 94 kPa y 600 kPa

Puede suministrar un exceso de aire de hasta el 200 % con respecto a la proporción estequiométrica de la pila PEM



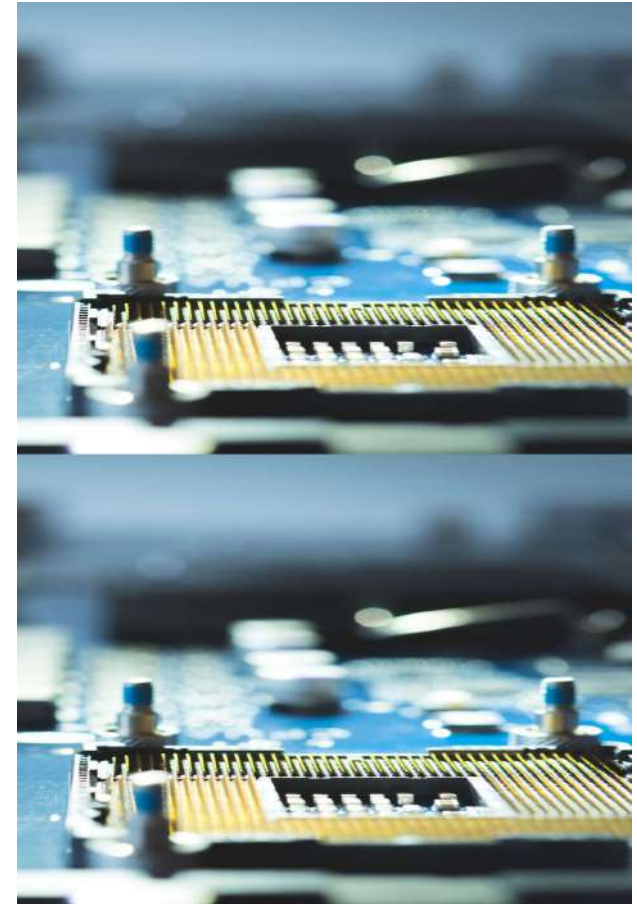
Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Sala de electrónica de potencia

- Sistema Electrónico de Drenaje de Potencia
 - Modelo EA-ELR 10000 suministrado por Elektro-Automatik
 - Cargas electrónicas DC programables
 - Capacidad de recuperar energía para emplearla en la red eléctrica del edificio
 - Voltajes < 2000 V y corrientes < 1000 A
- Sistema de Gestión de Potencia
- Equipamiento para la comunicación entre ambos sistemas y el Control del Banco de Ensayos
- Monitorización y control desde la Sala de Control ④
 - Estación de control que integra todas las señales y sistemas
 - Evita errores y problemas de seguridad



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



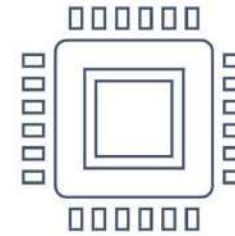
UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Sala de control



Sensores distribuidos en la instalación

Generan información



Almacenamiento de información

A través de un sistema de adquisición
Con posibilidad de muestreo de más de 10 kHz

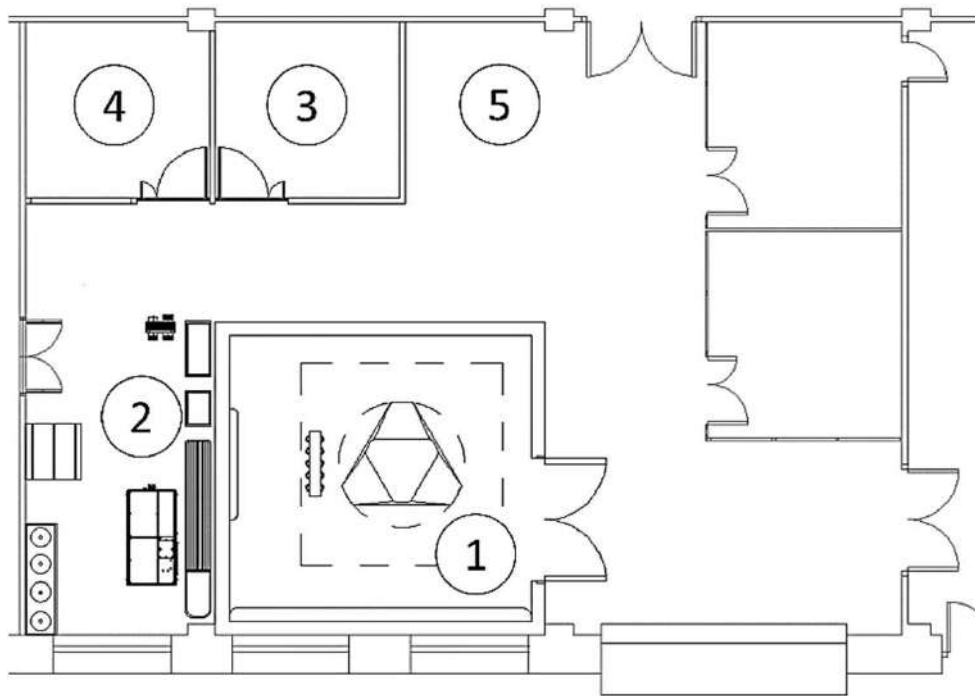


Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Espacio multiusos



- Utilidades del espacio multiusos
- ⑤
 - Situación de sistemas de potencia secundarios
 - Simulación del funcionamiento de pilas de combustible en trenes de potencia híbridos
 - Bancos de baterías y otros sistemas adicionales



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Sistema de suministro de hidrógeno

- Ubicación en el exterior del laboratorio
 - Consiste en dos racks de 16 cilindros
 - Cada cilindro tiene un volumen de 50 L y una presión de 20 MPa
- Masa de hidrógeno en cada rack
 - 12 kg, suficiente para alimentar una pila de combustible de 90 kW
 - Tipo PEM con una eficiencia media de 45 % durante 4 horas
- Configuración de dos racks
 - Permite la operación en continuo de la instalación
 - El rack fuera de servicio puede ser reemplazado mientras el otro está en funcionamiento



Capacidades del laboratorio

Investigación en trenes de potencia basados en pilas de combustible para ámbitos naval y aeronáutico

- Ensayos relacionados con pilas de combustible tipo PEM
- Ensayos relacionados con la integración de trenes de potencia basados en pilas de combustible

Banco de ensayos para caracterizar el comportamiento electroquímico de los stacks y sistemas de pilas de combustible

- Determinación de eficiencia, degradación y efectos del diseño
- Estudio del efecto de movimientos marinos sobre las características y eficiencia de las pilas de combustible

Técnicas electroquímicas para estudiar el comportamiento y eficiencia de las pilas de combustible



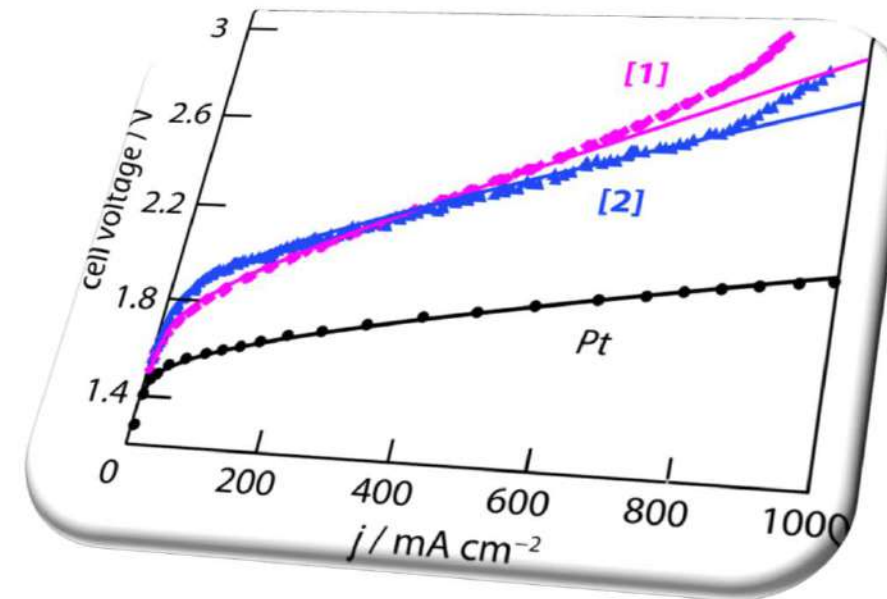
Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Técnicas electroquímicas: Curva de polarización

- La Curva de Polarización es el ensayo electroquímico principal
 - Permite caracterizar el rendimiento y determinar las capacidades y eficiencia de una pila de combustible
- El estudio de la Curva de Polarización es indispensable
 - Permite determinar la eficiencia de la conversión de la energía de la pila de combustible en unas condiciones dadas
 - Permite identificar los parámetros óptimos de funcionamiento
 - Permite diagnosticar y mitigar problemas con la degradación de los electrodos y las limitaciones de transporte de masa
- Fundamental para mejorar la eficiencia y la vida útil de las pilas de combustible
 - Permite desarrollar soluciones específicas para abordar estos retos



Esta figura de Autor desconocido está bajo licencia [CC BY-NC](#)



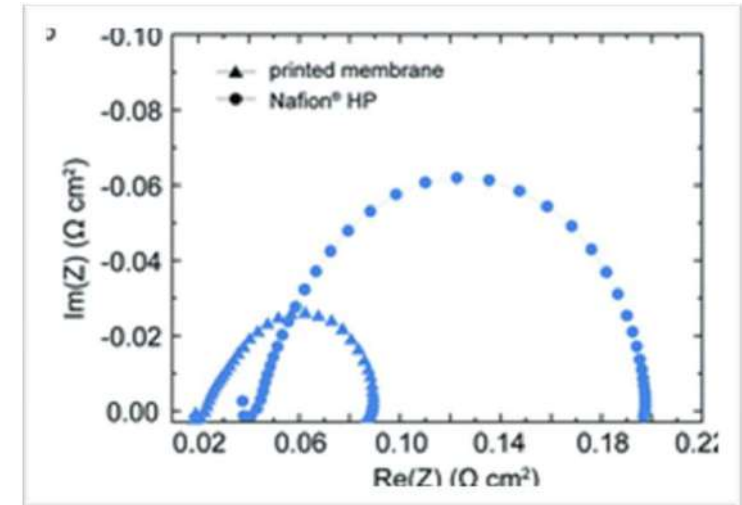
Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Técnicas electroquímicas: Espectroscopía de impedancia compleja

- La Espectroscopía de Impedancia Compleja (EIS) es una herramienta de diagnóstico no destructiva
 - Se utiliza para evaluar el efecto individual de los distintos procesos en una pila de combustible
- Permite estudiar el efecto de fenómenos como la resistencia por transferencia de carga
 - También permite estudiar limitaciones por transporte de masa y cinética de los electrodos
- Es adecuada para detectar cambios en el sistema a lo largo del tiempo
 - Es útil para controlar y diagnosticar problemas relacionados con la degradación o funcionamiento de las pilas de combustible
- La información obtenida permite optimizar el funcionamiento de las pilas de combustible
 - Identifica factores limitantes del rendimiento y establece estrategias de desarrollo



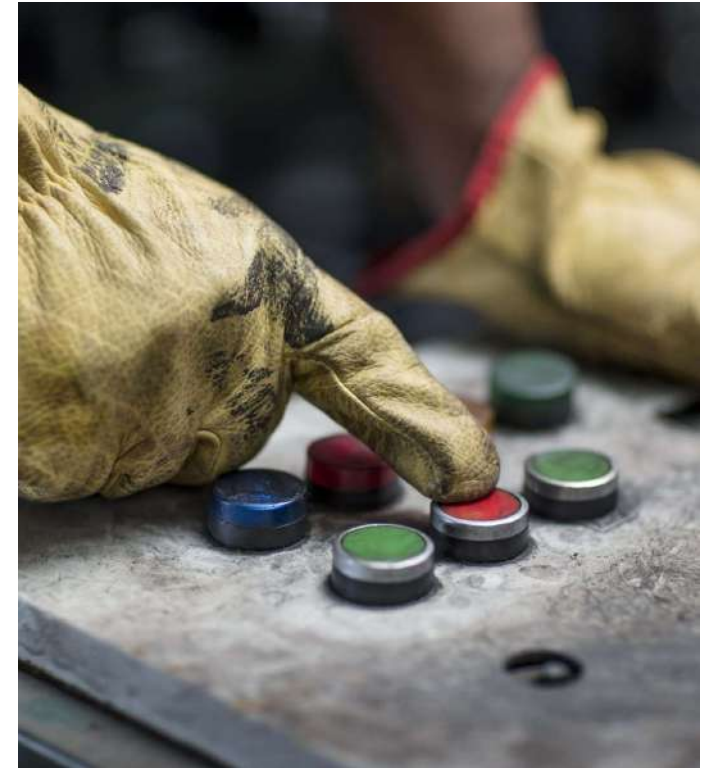
Esta figura de Autor desconocido está bajo licencia [CC BY](#)



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Técnicas electroquímicas: Interrupción de corriente

- Interrupción de Corriente: Método para evaluar el comportamiento dinámico de las pilas de combustible
 - Se interrumpe intencionadamente la corriente aplicada a la pila de combustible
 - Se monitoriza la respuesta de voltaje
- Objetivo: Evaluar la habilidad de la celda para soportar cambios abruptos en la corriente y su capacidad para recuperar la estabilidad
 - Se analiza el comportamiento transitorio de voltaje durante y después de la interrupción
- Beneficios: Obtener datos valiosos para optimizar las estrategias de control, determinar el impacto del diseño y los componentes sobre la eficiencia del sistema y desarrollar tecnologías de pilas de combustible robustas para diferentes aplicaciones



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Técnicas electroquímicas: Ensayos de durabilidad



Medición de la estabilidad a largo plazo y la eficiencia del dispositivo de conversión de energía

Las pilas de combustible son sometidas a condiciones de operación propias
Se determina su habilidad para adaptarse al estrés y mantener la eficiencia del sistema con el tiempo



Factores aplicados en los ensayos

Variaciones de temperatura
Aplicación continua de ciclos
Variación de condiciones de carga



Análisis de parámetros

Permite identificar diferentes mecanismos de degradación
Evaluar la durabilidad de los materiales
Anticiparse a posibles problemas de la pila de combustible



Importancia de los ensayos



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Cromatógrafo de gases

- Uso del cromatógrafo de gases Agilent 990 MicroGC
 - Permite obtener información sobre la composición de la corriente gaseosa que sale del sistema
- Estudio de procesos de degradación
 - La composición del gas a la salida del dispositivo permite estudiar diferentes procesos de degradación de los componentes de la pila de combustible durante el funcionamiento



Futuras ampliaciones

- Investigación y desarrollo de tecnologías de pilas de combustible y trenes de potencia híbridos para barcos y aeronaves
 - Ampliación de la instalación para cubrir ensayos con pilas de combustible tipo PEM de hasta 270 kW
 - Flexibilidad del sistema
 - Ensayo de pilas de combustible de mayor tamaño para aplicaciones marinas
 - Adaptación para pilas de combustible de diferente tipo
 - Integración con motores de diésel en el banco de ensayos



Conclusiones

Enfoque en transporte marítimo y aeronáutico

- Desarrollo de trenes de potencia innovadores y eficientes

Flexibilidad y capacidades técnicas avanzadas

- Pruebas de pilas de combustible de tipo PEM en distintos estadios de desarrollo
- Evaluación en condiciones del mundo real

Plataforma Stewart de 6 Grados de Libertad

- Pruebas dinámicas que imitan las condiciones operativas del sector naval

Cromatógrafo de gases

- Análisis de la eficiencia del dispositivo en estudio

Abierto a la colaboración internacional

- Proyectos públicos y privados
- Enfoque colaborativo para avanzar en la investigación y la innovación



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del Proyecto GreenH2CM financiado por la **Comunidad de Madrid y el Gobierno de España** a través del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR) financiado por la **Unión Europea – NextGenerationEU**. Además, ha contado con el apoyo de la **Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid**.



Muchas gracias

Rafael d'Amore-Domenech
r.damore@upm.es

