

Recubrimientos PVD para pilas de combustible de hidrógeno PEM

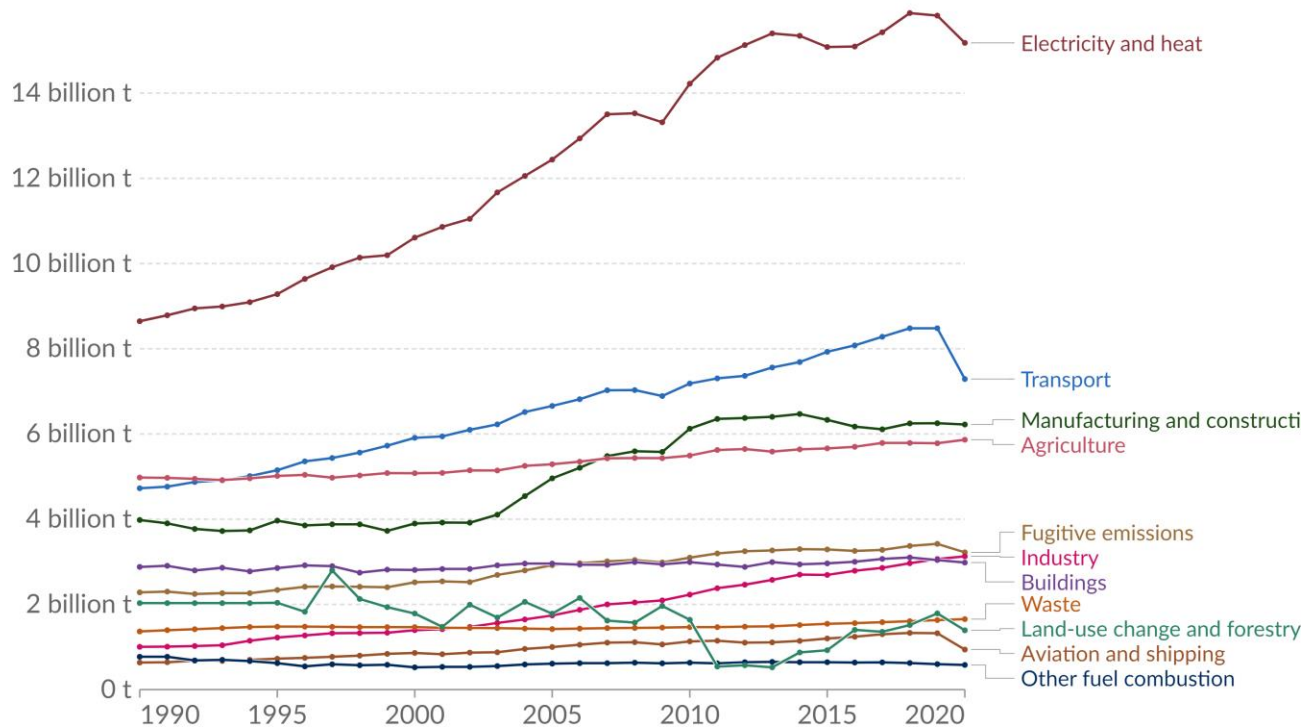
Dr. Jordi Orrit

Unidad de Materiales Metálicos y Cerámicos. Eurecat-Manresa



Greenhouse gas emissions by sector, World

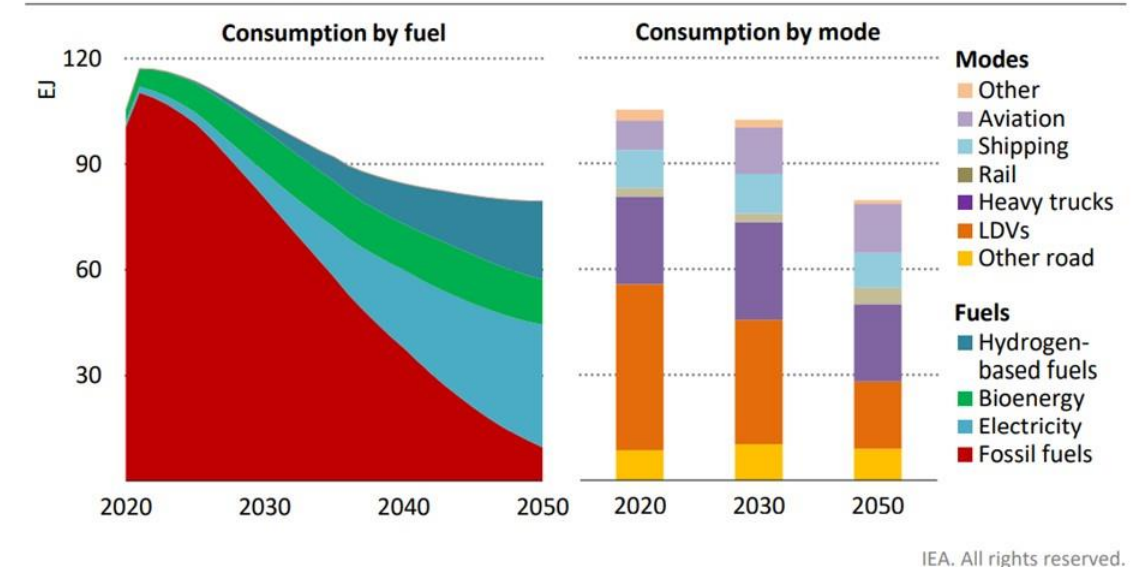
Emissions are measured in carbon dioxide equivalents (CO₂eq). This means non-CO₂ gases are weighted by the amount of warming they cause over a 100-year timescale.



Data source: Climate Watch (2023)

[OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions](https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions) | CC BY

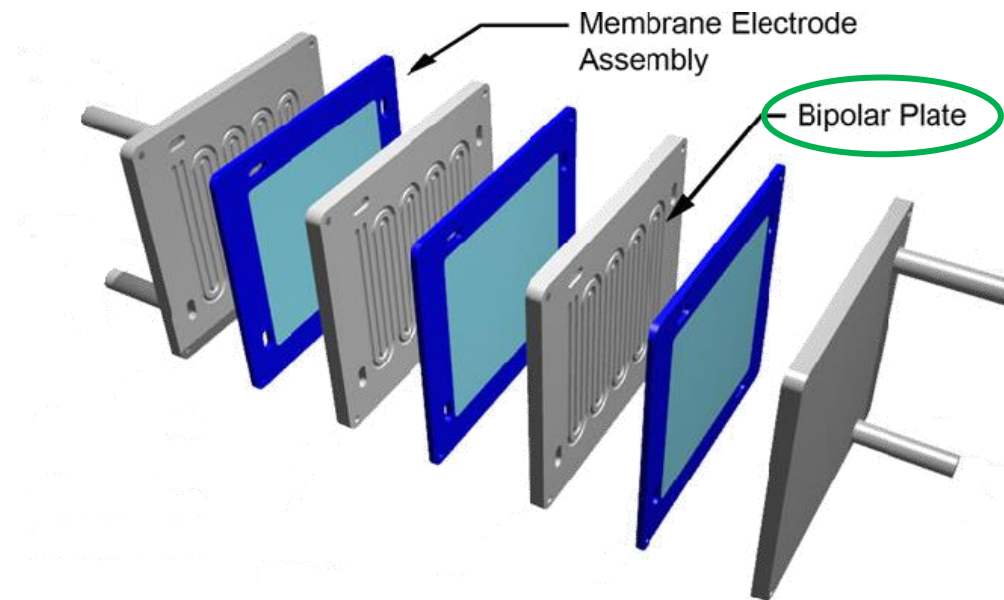
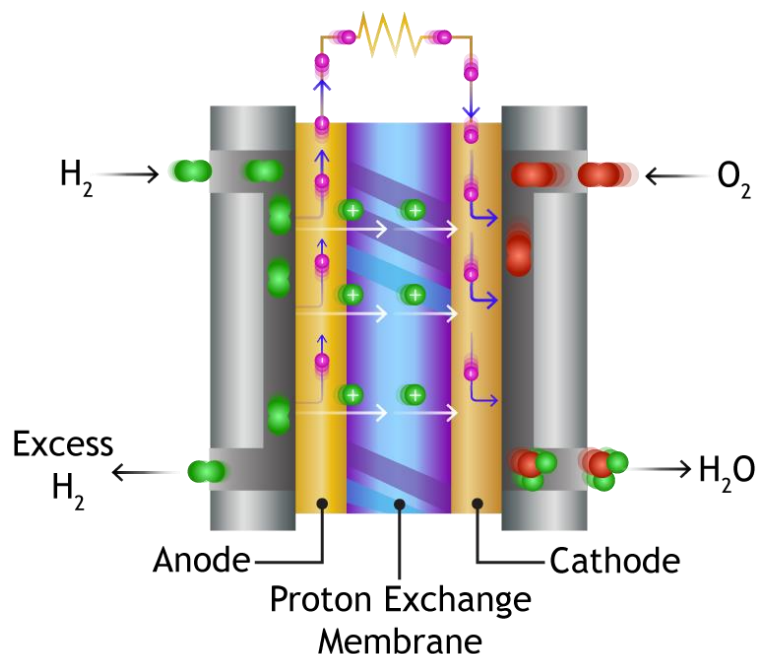
Figure 3.22 ▶ Global transport final consumption by fuel type and mode in the NZE



Electricity and hydrogen-based fuels account for more than 70% of transport energy demand by 2050

Net Zero by 2050, IEA (2021), Paris. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

El hidrógeno generado a partir de fuentes renovables (hidrógeno verde) está llamado a ser un vector energético clave para la descarbonización, especialmente en el sector del transporte, el cual constituye uno de los principales responsables de las emisiones de efecto invernadero

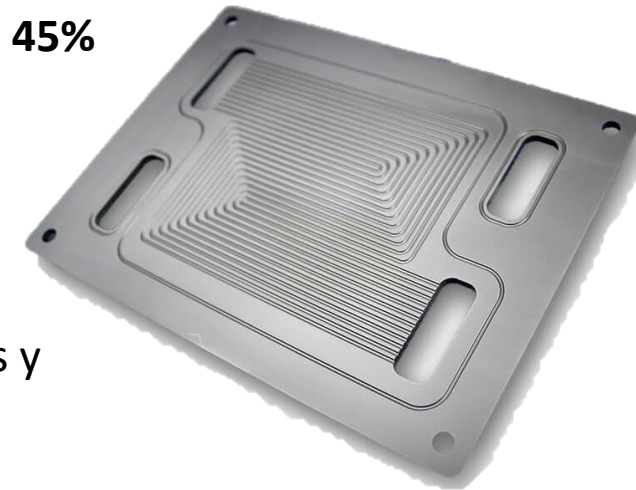


Para **aplicaciones de transporte**, en especial para automoción, se requiere poder **reducir al máximo el peso y volumen del conjunto de la pila**, es decir, **aumentar la densidad volumétrica de potencia**. Este hecho comporta el uso inevitable de **placas bipolares metálicas**, principalmente de **acero inoxidable**

La importancia de las placas bipolares

Las placas bipolares juegan un papel importante en el **rendimiento**, la **durabilidad** y el **coste** de las pilas de combustible, llegando a constituir hasta el **80% del peso total** y hasta el **45% del precio total** de una pila de combustible. Sus principales funciones son:

- Distribución homogénea los gases reactantes
- Colectores de corriente
- Gestión y evacuación del agua y calor generados
- Separación de las celdas individuales que forman una pila, evitando fugas de gas y soportando el conjunto.



El principal problema que limita la durabilidad de las placas bipolares metálicas es la **escasa resistencia a la corrosión**:

- Aumento de la resistencia interfacial de contacto
 - Contaminación de la membrana polimérica de intercambio de protones
- **Disminución de la eficiencia energética y durabilidad de la pila**

La solución a este problema pasa por la aplicación de **recubrimientos conductores de la electricidad con buena resistencia a la corrosión**

Requisitos técnicos y económicos para placas bipolares marcados por el DOE

Alta resistencia a la corrosión

Characteristic	Units	Status	2025 Target
Plate cost ^a (guideline)	\$/kW	5.40 ^{b,c}	2
Plate weight (guideline)	kg/kW	<0.4 ^{c,d}	0.18
Plate H ₂ permeation	Std cm ³ /(sec cm ² Pa) @ 80°C, 3 atm 100% RH	<2 × 10 ^{-6 f}	2x10 ⁻⁶
Corrosion anode ^g	μA/cm ²	no active peak ^h	<1 and no active peak
Corrosion cathode ⁱ	μA/cm ²	<0.1	<1
Electrical conductivity	S/cm	>100 ^j	>100
Areal specific resistance ^k	Ohm cm ²	0.006 ^h	<0.01
Flexural strength ^l	MPa	>34 (carbon plate)	>40
Forming elongation ^m	%	20-40 ⁿ	40 ^m

Baja resistencia interfacial de contacto

USDRIE: Fuel Cell Technical Team Roadmap. November 2017
https://www.energy.gov/sites/default/files/2017/11/f46/FCTT_Roadmap_Nov_2017_FINAL.pdf

Recubrimientos protectores para placas bipolares

Los recubrimientos obtenidos por **técnicas de evaporación física en fase vapor PVD** (*Physical Vapor Deposition*) ofrecen una buena resistencia a la corrosión, conductividad eléctrica y adhesión sobre placas bipolares metálicas

Metales nobles	Ta, Au, Nb, Pt, Ag, Zr
Recubrimientos base Ti	TiN, TiN+C, AlN+TiN, TiAlN, Ti-C, Ti ₂ N/TiN, Ti/(Ti,Cr)N/CrN
Recubrimientos base Cr	CrN, CrC, CrNC, CrN+CrC, CrTiN, CrAlN, Cr-C, CrN/CrNC/C, CrN+Cr ₂ N, CrN+(Ti, Cr)N+Ti, CrMoN+CrN+Cr, CrN/Cr ₂ O ₃ , Cr-O+Cr-N
Recubrimientos base Zr	ZrN, ZrC/C, ZrCN
Recubrimientos base Ta	TaN, Ta/TaN,
Recubrimientos base Nb	NbN, NbC, Nb+N
Recubrimientos base C	C, C/CrN, CCrN, Zr-C/a-C, CNT, a-C+ZrC, a-C+Ti, a-C+Nb
Otros	Pt+N, MoN, Cr+Mo ₂ C, Al-Cr-Mo-N, SnO ₂ : F

Recubrimientos protectores de placas bipolares obtenidos por técnicas de deposición PVD

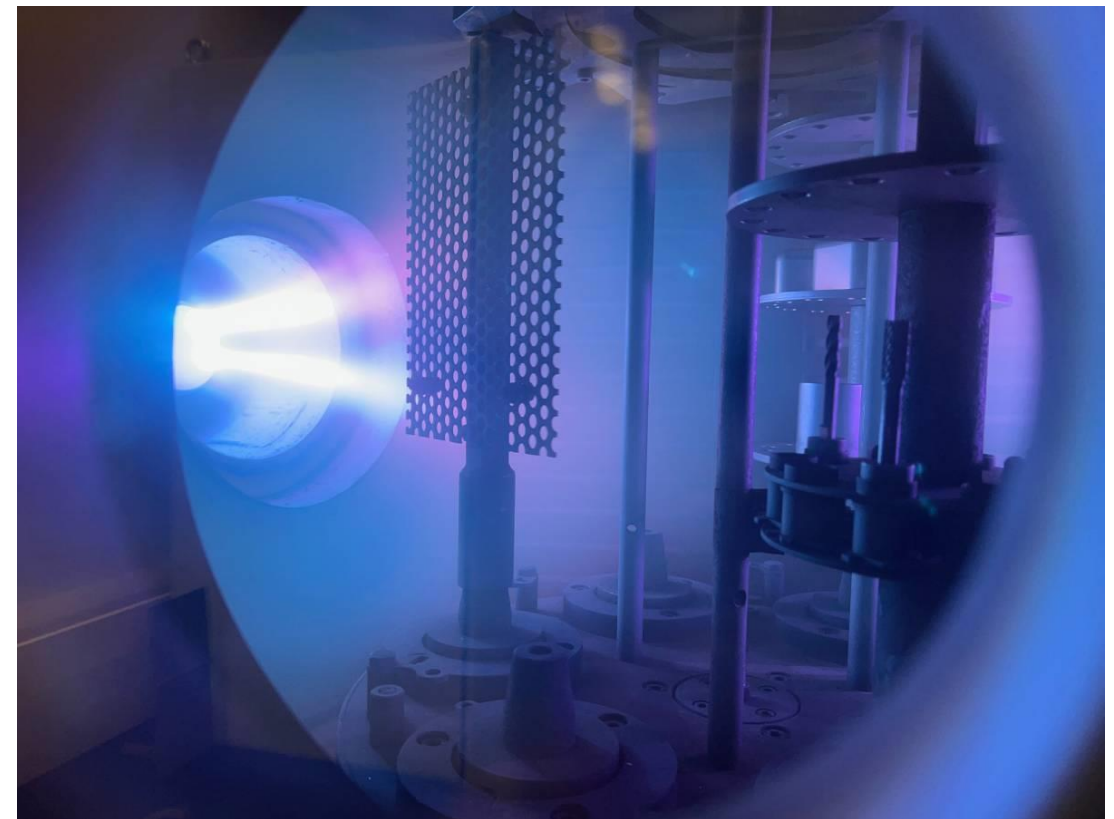
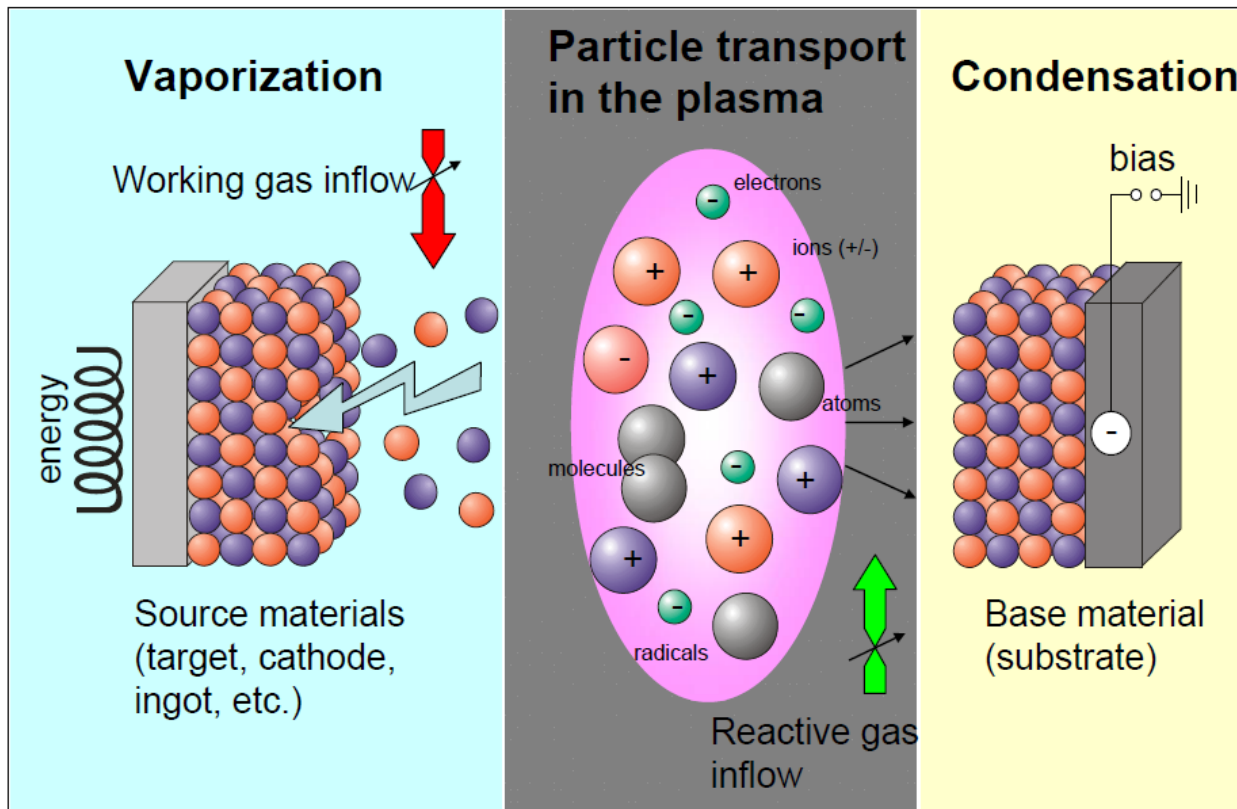
Se han explorado otras técnicas de recubrimiento y tratamiento superficial: **cementación**, **nitruración**, recubrimientos **electroquímicos** y **deposición química en fase vapor (CVD)**

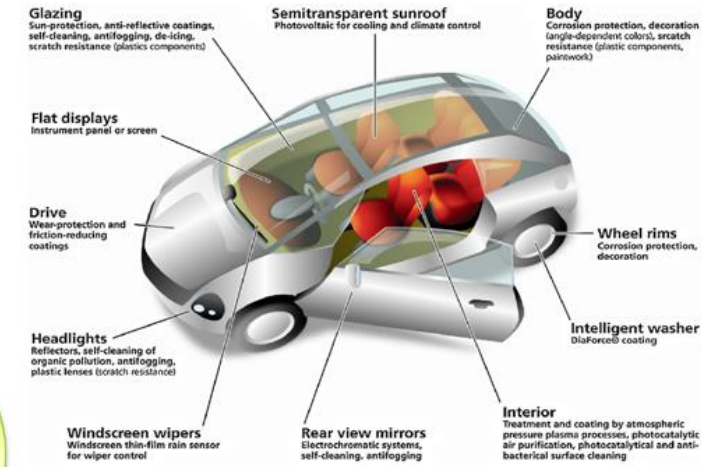
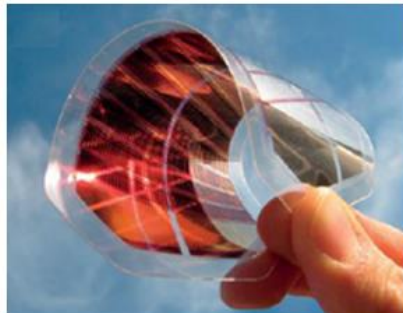
Tecnología PVD

Tecnología de deposición basada en plasma en vacío $\sim 10^{-4}$ - 10^{-6} mbar

Principales técnicas aplicadas a nivel industrial  *Magnetron sputtering*
Arco catódico

The three phases of coating formation

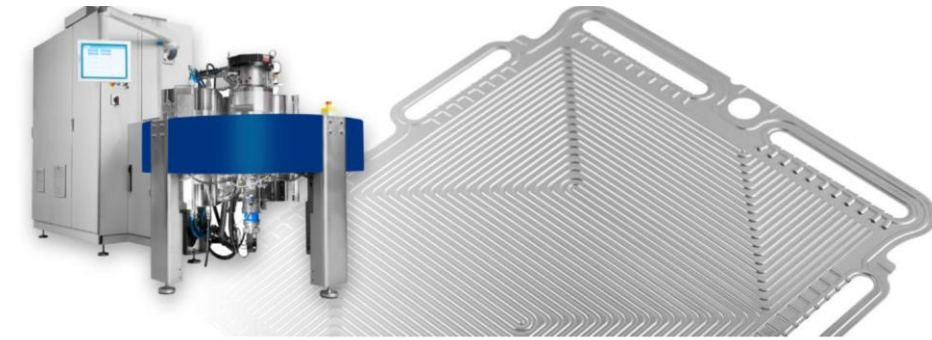
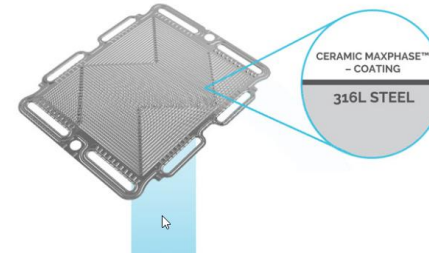






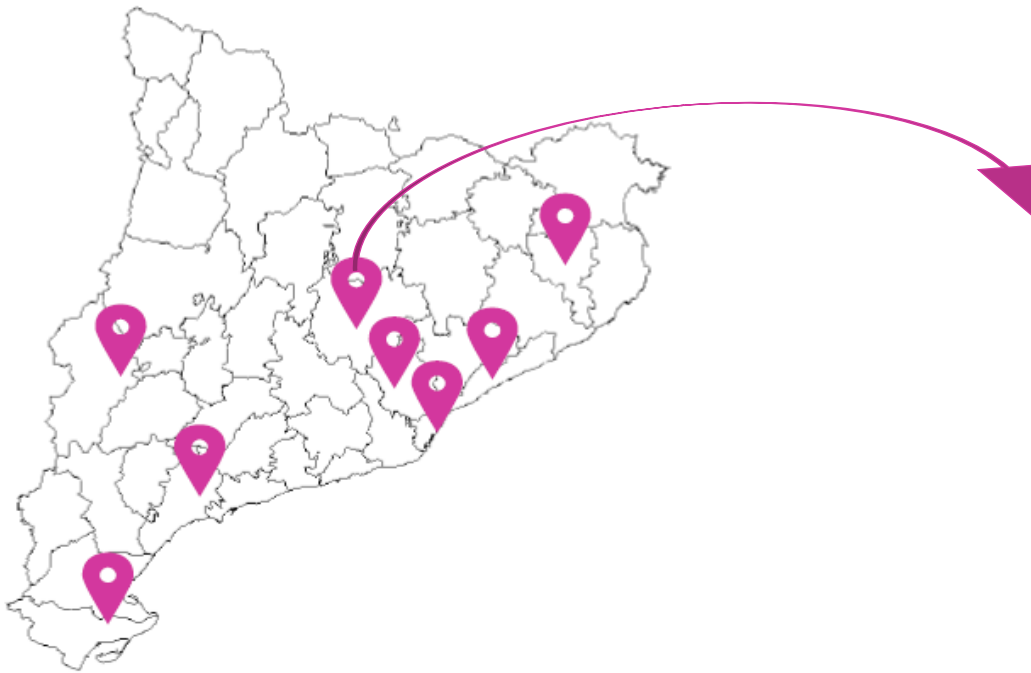
Ceramic MAXPHASE™ – coating for durable performance and low cost

The patented Ceramic MAXPHASE™ coating for LT-PEMFC metal bipolar plates provides superior power output and durability for the fuel cell stack. The material is an electrically conductive ceramic without noble metals, making it insensitive to high and volatile metal prices. High-productivity coating of Ceramic MAXPHASE is performed using PVD.



INLINECOATER™

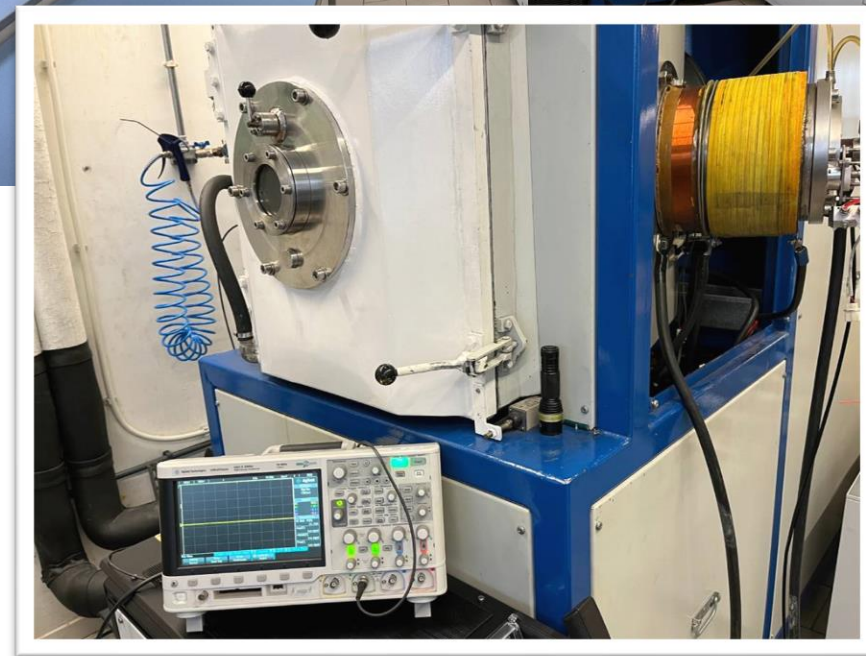




Unidad de Materiales Metálicos y Cerámicos

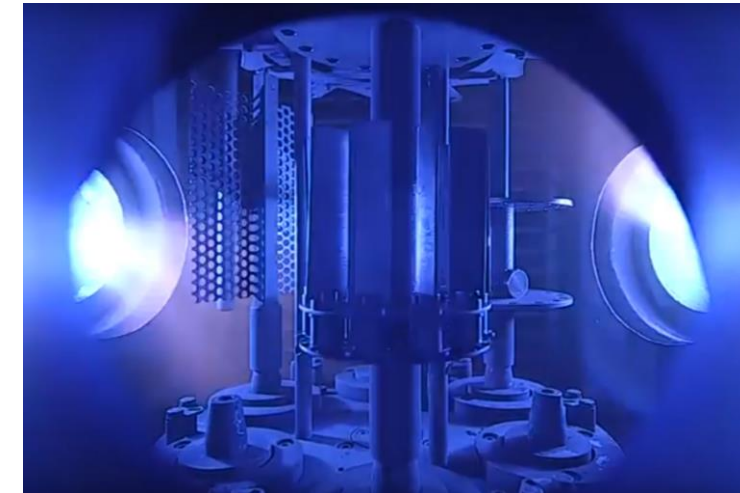
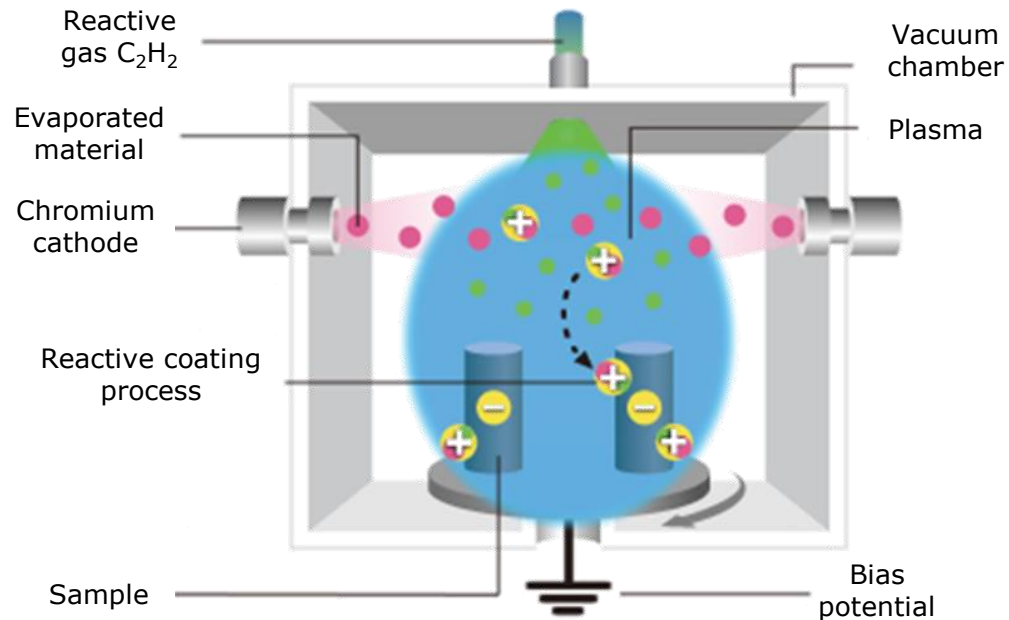
- Comportamiento mecánico, fatiga y fractura de materiales
- Nuevos procesos para materiales avanzados
- Tecnología de superficies
- Aleaciones ligeras
- Corrosión y degradación
- Tribología

- ✓ Desarrollo de **recubrimientos** PVD sobre metales, plásticos y cerámicas
- ✓ Desarrollo de **tratamientos superficiales** mediante implantación iónica
- ✓ **Desarrollo de recubrimientos para múltiples aplicaciones**
 - Recubrimientos duros y de baja fricción para aplicaciones tribomecánicas
 - Protección contra la corrosión
 - Aplicaciones biomédicas
 - Energías renovables: pilas de combustible, termosolar, etc.
 - Recubrimientos alternativos al cromado electrolítico
 - Recubrimientos decorativos
- ✓ **Caracterización avanzada de recubrimientos y superficies**



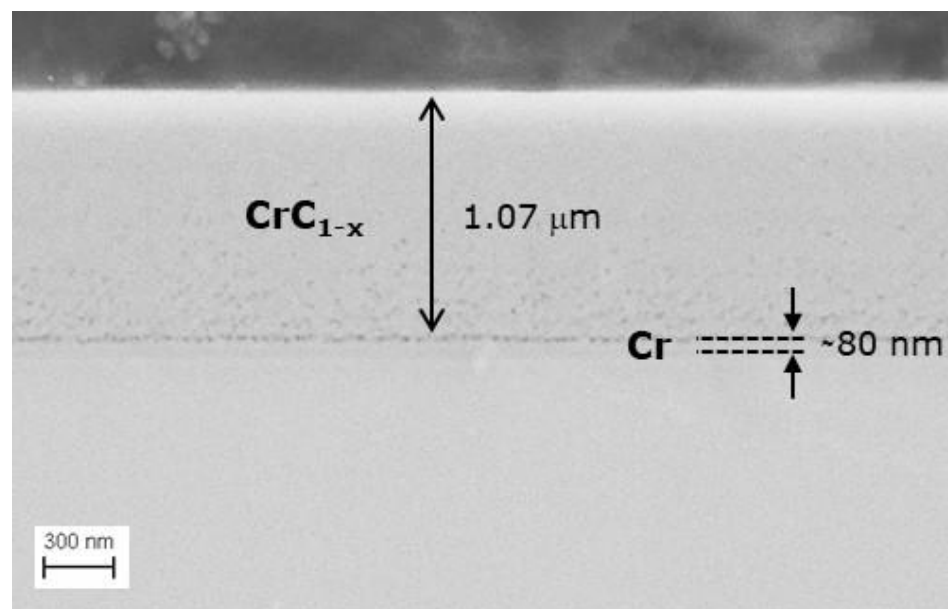
Recubrimiento base CrC obtenido por PVD arco catódico

Proyecto **INNPLÁGENO**

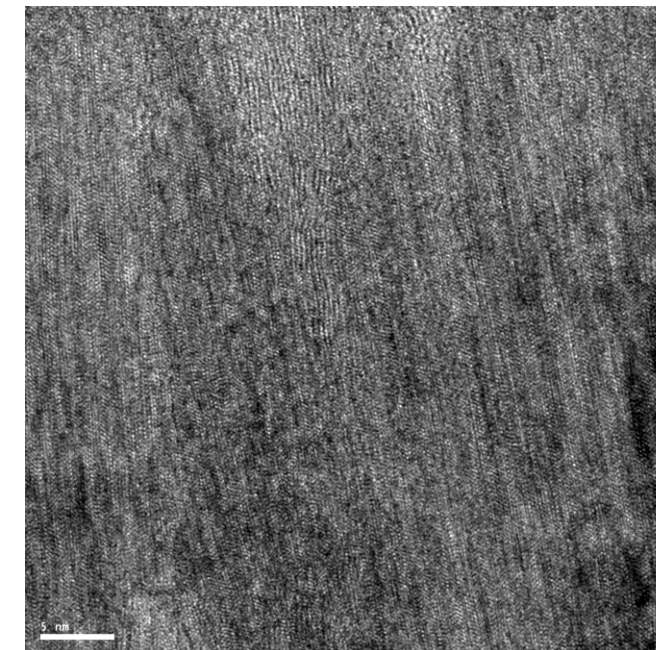
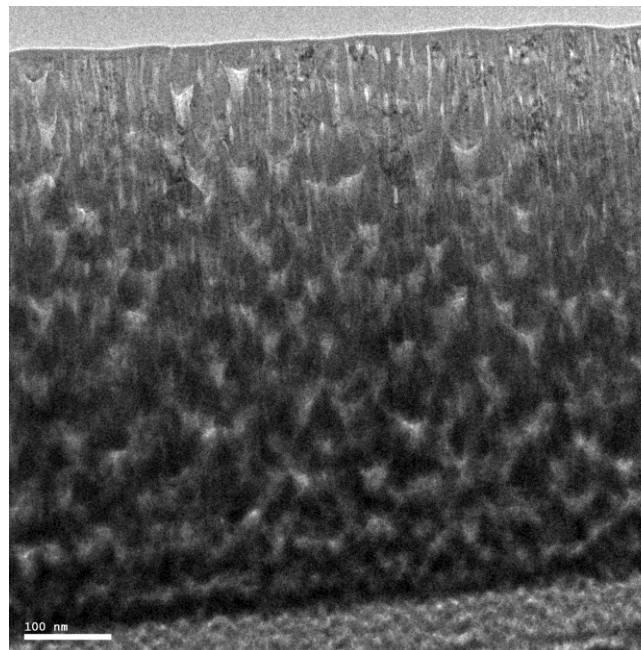


Recubrimiento base CrC obtenido por PVD arco catódico

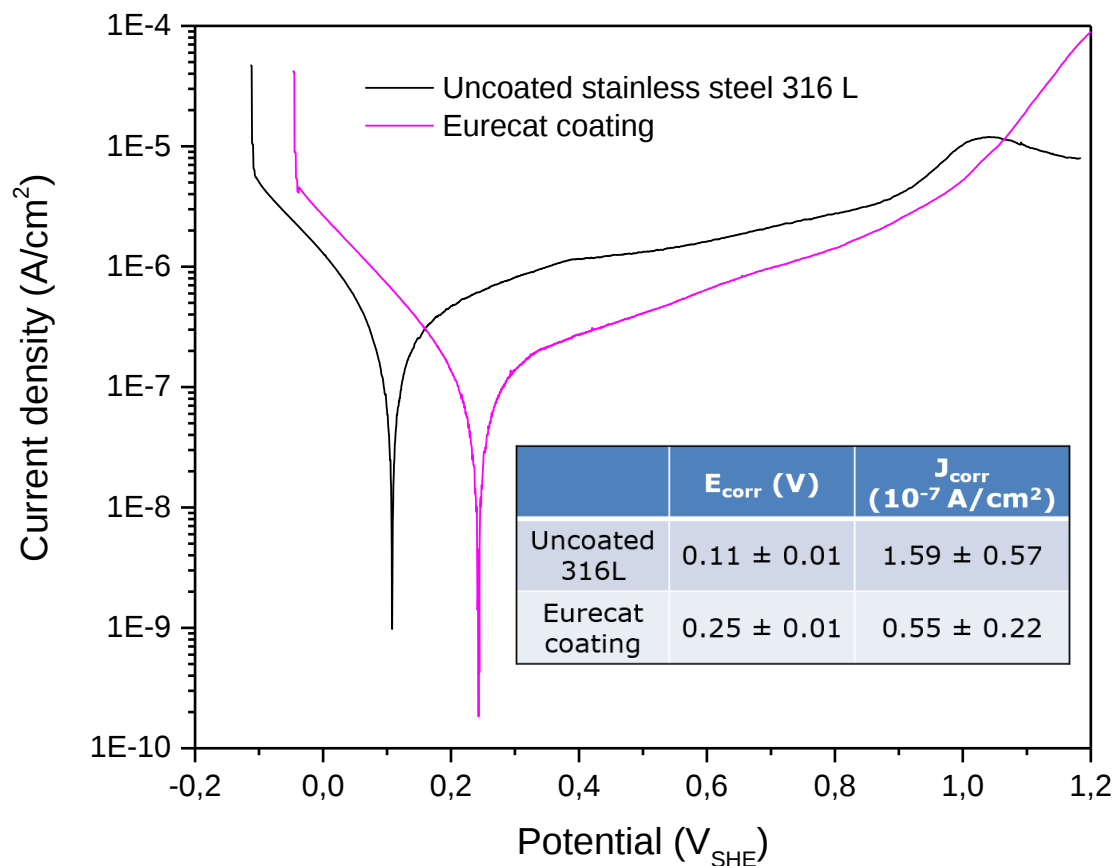
Caracterización química y estructural



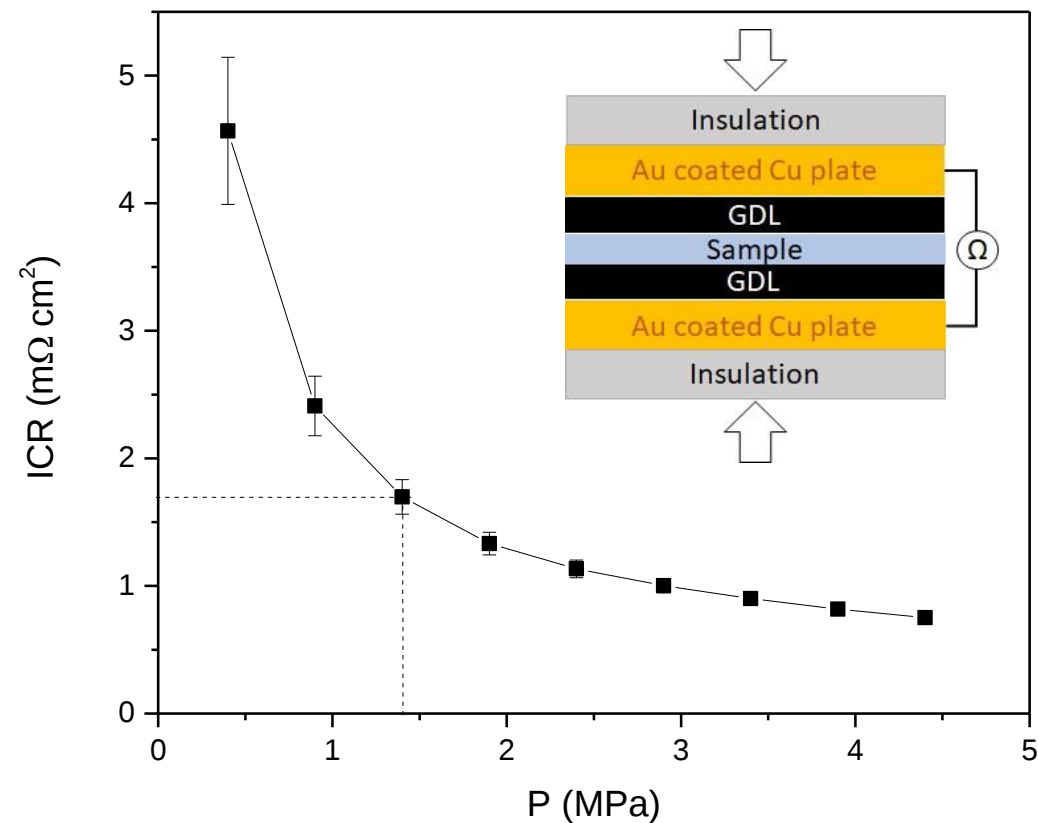
Cr/C (% at.) $\approx 60/40 - 50/50$, dependiendo de la posición en el reactor



Granos nanocristalinos altamente orientados ($10\text{-}40 \times 50\text{-}80\ \text{nm}$) con distancias interplanares de $0.14\ \text{nm}$ compatibles con las reflexiones medidas de XRD: $d_{002}(\text{Cr}_3\text{C}_2)=0,1414\ \text{nm}$ o $d_{220}(\text{CrC})=0,1430\ \text{nm}$



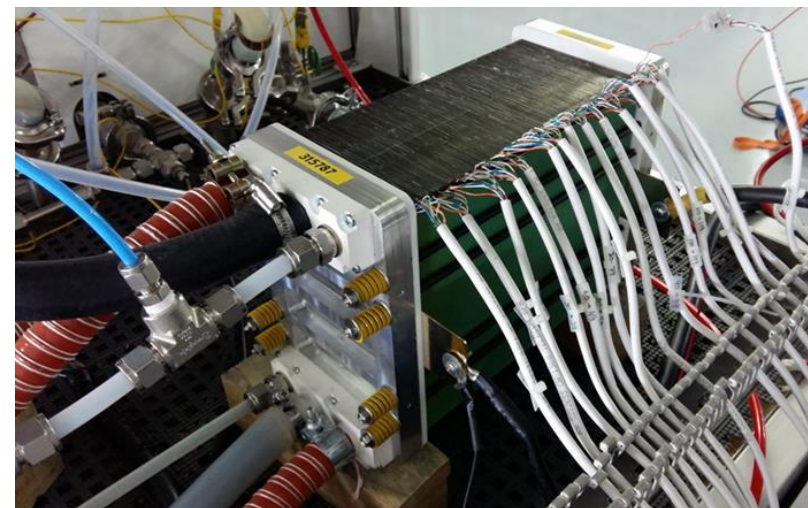
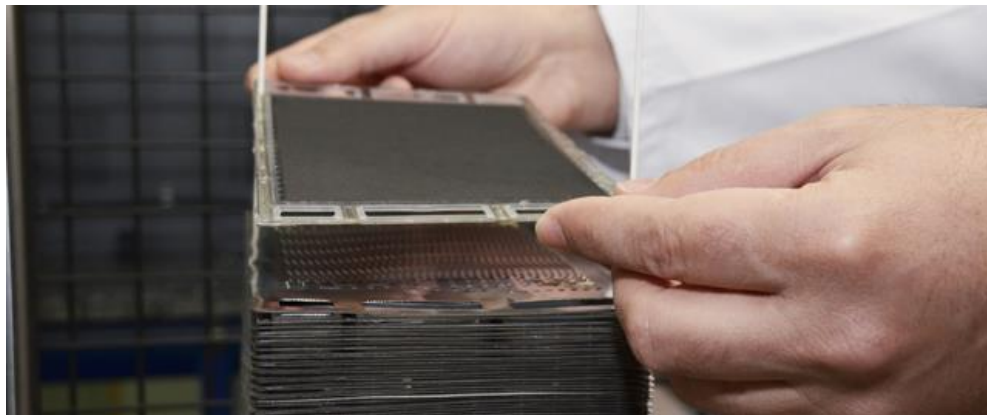
Condiciones de ensayo: pH 3 H₂SO₄ + 0.1 ppm HF solución a 60°C



ICR (@1.4 MPa) = 1.70 ± 0.14 mΩ·cm²

Recubrimiento base CrC obtenido por PVD arco catódico

Test en pila de 10 kW



Característica	Valor
Resistencia de Contacto Superficial (ICR) para la doble interface presente en la celda electrolítica	7 - 13 mΩ.cm ² @ 1,14 MPa (700 h-pila)
Densidad de potencia inicial (por cm ² de área activa)	500 mW/cm ² @0,6V
Corrosión de la placa separadora en ambiente de pila	7 μA/cm ² @1V
Potencia de pila	10 kWe
Densidad volumétrica de potencia pila	1.060 W/l
Volumen de pila	9,4 litros
Vida esperada pila (funcionamiento a corriente constante)	5.048 h

¡Gracias por su atención!

