

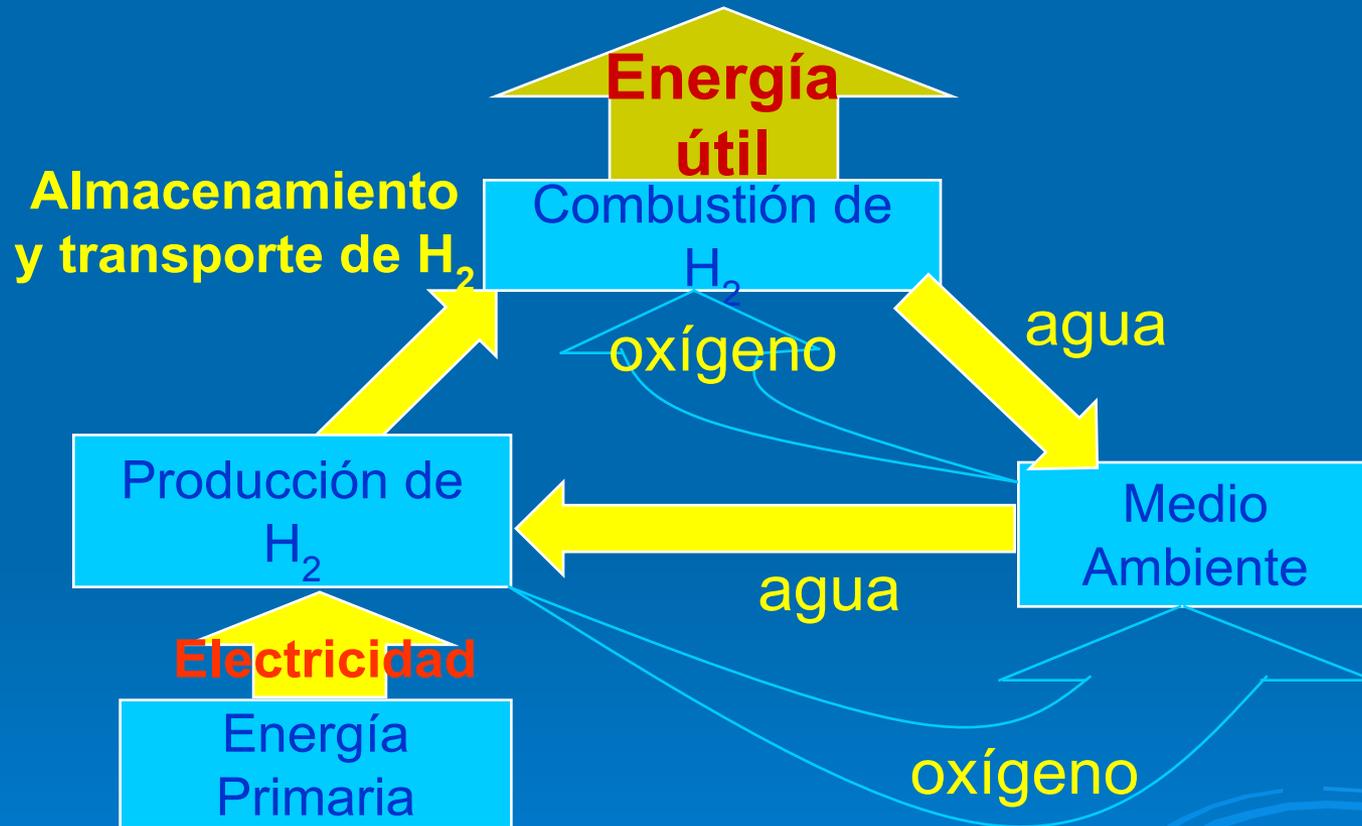
# CONVERSIÓN ELECTROQUÍMICA DE ENERGÍA BASADA EN TECNOLOGÍAS DE HIDRÓGENO

**Dr. WALTER E. TRIACA**

**Instituto de Investigaciones Físicoquímicas Teóricas y Aplicadas  
(INIFTA), Universidad Nacional de La Plata - CONICET**

**Jueves de Hidrógeno  
Gobierno de Río Negro  
24 de Junio de 2021**

# CICLO DEL HIDRÓGENO



**Las tecnologías de hidrógeno permiten almacenar la energía de las fuentes primarias y equilibrar el desfase entre generación y consumo.**

# ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

- **GAS:** a alta  $P \sim 200$  atm (recipientes de acero)

0.6 kWh/l a 170 atm.

Recipientes de aluminio reforzados externamente con fibras de carbono. Mayor relación masa  $H_2$ /peso recipiente (4 veces mayor que en recipientes de acero).

Alta  $P \sim 700$  atm (recipientes de materiales compuestos reforzados con fibras de carbono).

- **LÍQUIDO:** a  $T < -253^\circ C$ . Proceso de licuación y su mantenimiento insume 35-40% del contenido energético del hidrógeno.

2.4 kWh/l

- **ESTRUCTURAS SÓLIDAS:** hidruros metálicos, nanoestructuras de carbono.

3.3 kWh/l ( $LaNi_5$ )

# PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD

## □ Combustión térmica convencional



E.Q.  $\rightarrow$  calor  $\rightarrow$  trabajo mecánico  $\rightarrow$  electricidad

$$\epsilon_T = (T_1 - T_2)/T_1$$

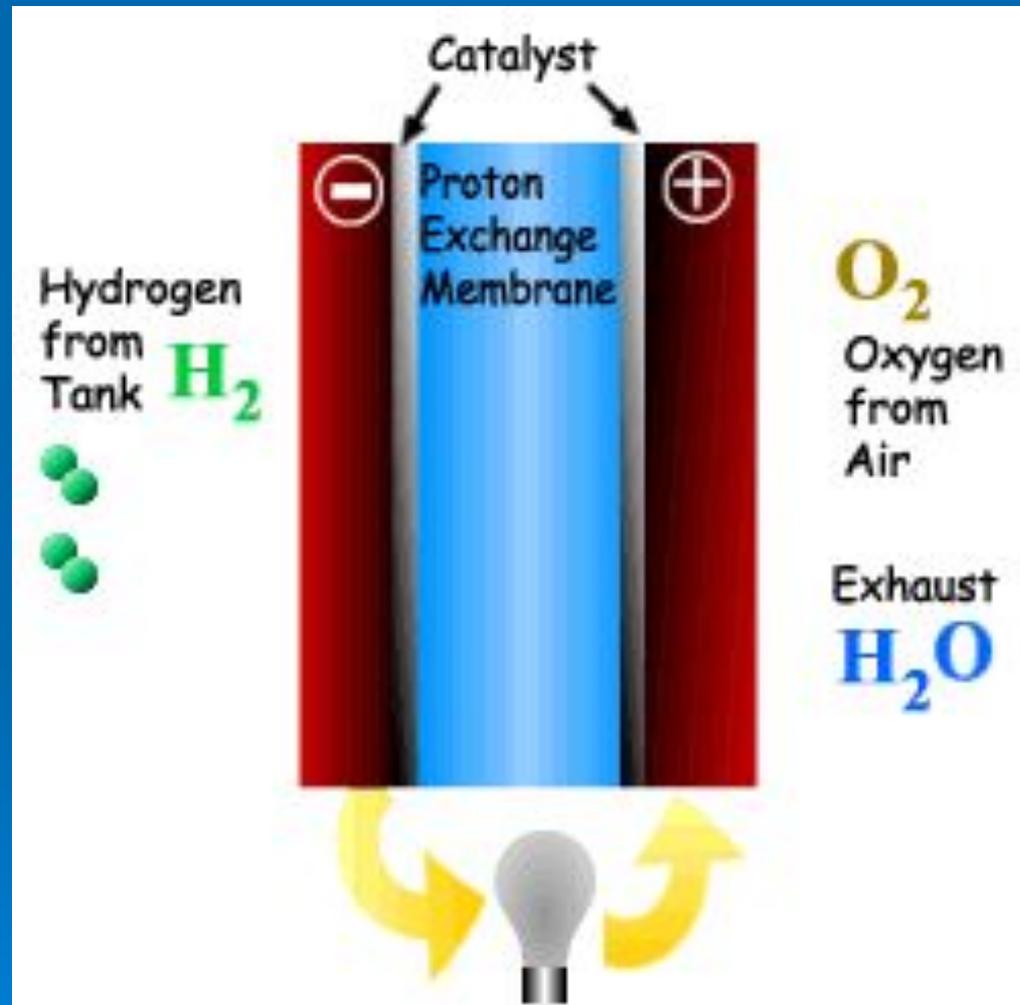
# COMBUSTIÓN DEL HIDRÓGENO

## ▣ Combustión térmica:



## ▣ Combustión electroquímica:





# CELIDAS DE COMBUSTIBLE

## ASPECTOS TERMODINÁMICOS Y CINÉTICOS

$$\Delta G = -nFE_r \quad \epsilon_T = \Delta G/\Delta H = -nFE_r/\Delta H$$

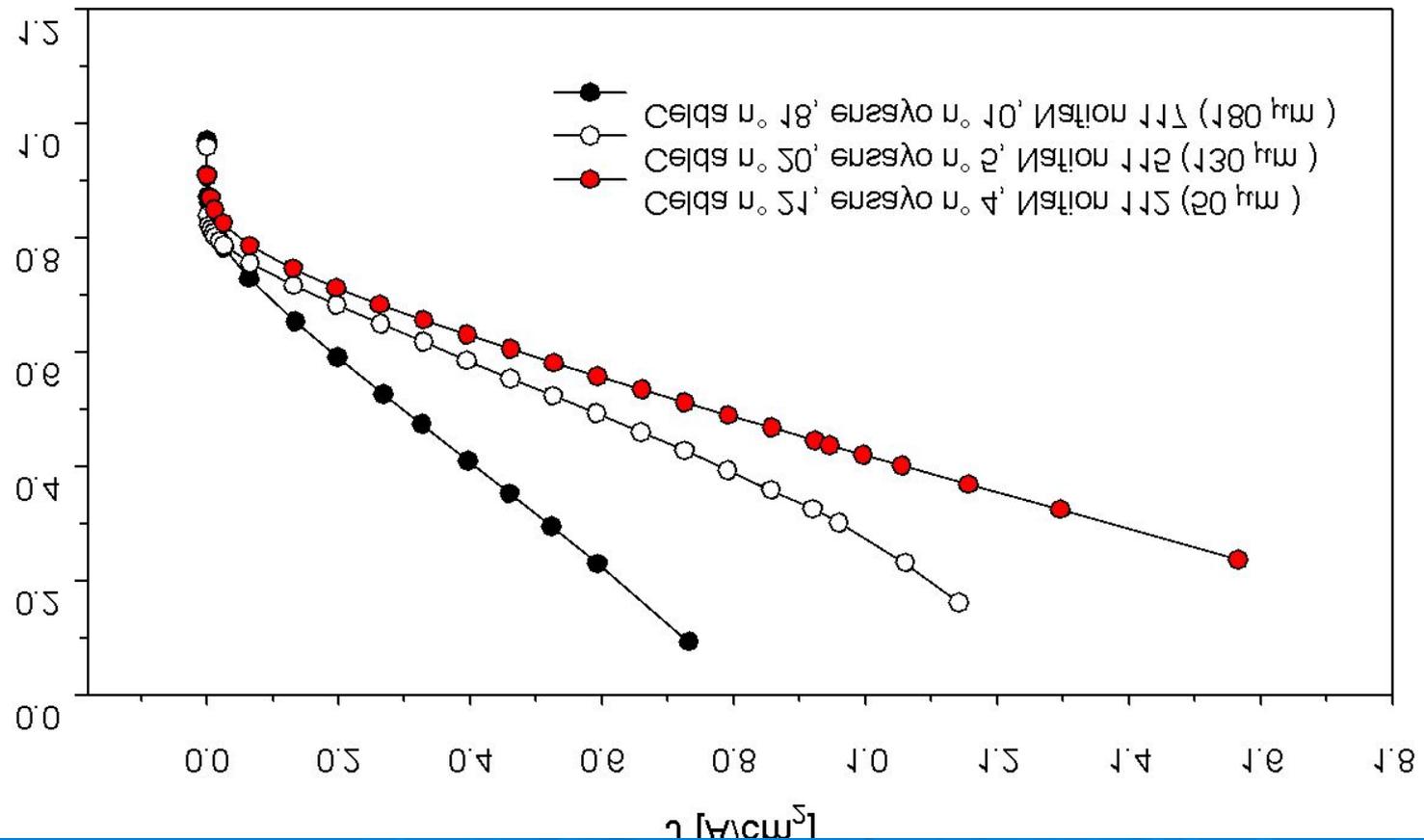
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$E < E_r \quad E = E_r - \Sigma\eta \quad E = E_r - \eta_{\text{ánodo}} - |\eta_{\text{cátodo}}| - IR$$

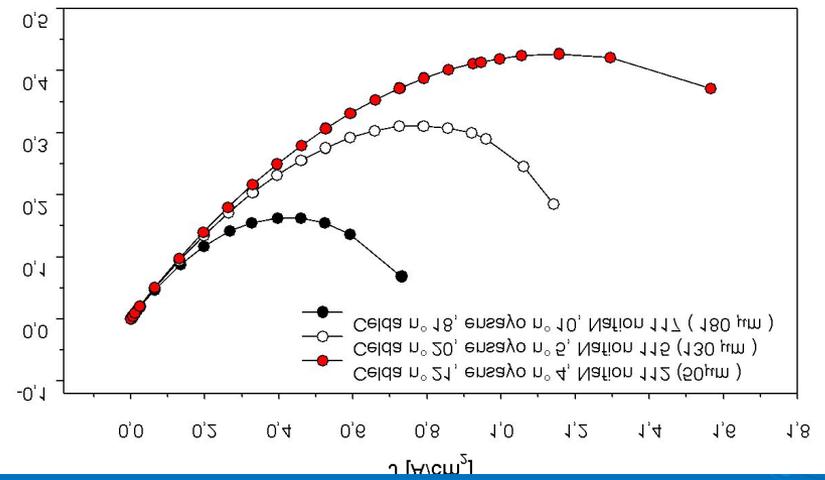
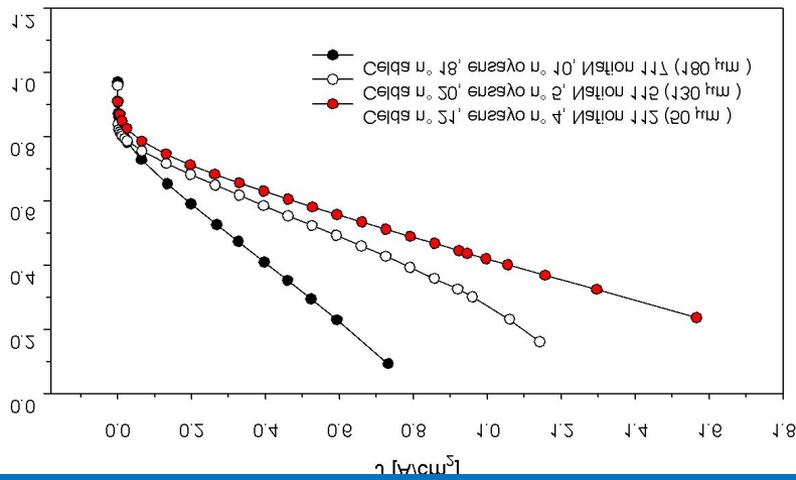
$$\epsilon_p = -nFE/\Delta H = -nF(E_r - \Sigma\eta)/\Delta H$$

$$P = IE = I(E_r - \Sigma\eta)$$

# CELDAS DE COMBUSTIBLE PEM INIFTA



# CELDAS DE COMBUSTIBLE PEM INIFTA



# GENERACIÓN DE CALOR EN CELDAS DE COMBUSTIBLE

$$Q = - (4.18 T \Delta S/nF) i + i \Sigma \eta + i^2 R$$

calor generado  
debido al cambio  
de entropía de la  
reacción de celda

calor generado  
por irreversibilidad  
de la reacción de  
celda

calor generado  
por pérdidas  
óhmicas

Reacción global de la celda de combustible



# CELIDAS DE COMBUSTIBLE

- Alta eficiencia de conversión de energía química en electricidad,  $\epsilon_t \approx 100\%$   $\epsilon_p \approx 60-70\%$
- No contaminan el medio ambiente
- Operan silenciosamente (no tienen partes móviles)
- Rápida entrada en servicio
- Flexibilidad respecto al tipo de combustible:  
    hidrógeno, biocombustibles, gas natural, gasificación de carbón, etc.
- Modularidad: (mW a MW)
- Mínimo mantenimiento (no hay desgaste mecánico)
- Capacidad de cogeneración (electricidad/calor)  
 $\epsilon_p = 80-85\%$

# TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

**TABLE 4.1 Typical Components and Operating Conditions of Fuel Cells**

| Parameter          | PEM                 | AFC <sup>a</sup> | AFC <sup>b</sup> | PAFC                                | MCFC  | SOFC                                      |
|--------------------|---------------------|------------------|------------------|-------------------------------------|---|---|
| Cell type          | B-FP                | B-FP             | B-FP             | B-FP                                | B-FP  | Tubular                                   |
| Anode              | Pt black<br>or Pt/C | 80% Pt-20% Pd    | Ni               | Pt/C                                | Ni-10% Cr   | Ni-ZrO <sub>2</sub><br>cermet             |
| Cathode            | Pt black<br>or Pt/C | 90% Au-10% Pt    | Li-doped NiO     | Pt/C                                | Li-doped NiO  | Sr-doped<br>LaMnO <sub>3</sub>            |
| Pressure (MPa)     | 0.1-0.5             | 0.4              | ~0.4             | 0.1-1                               | 0.1-1   | 0.1                                       |
| Temperature (°C)   | 80                  | 80-90            | 260              | 200                                 | 650   | 1000                                      |
| Electrolyte (mol%) | Nafion <sup>c</sup> | 35-45% KOH       | 85% KOH          | 100% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | 62 Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -<br>38 K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | Yttria-<br>stabilized<br>ZrO <sub>2</sub> |

*Abbreviations:* B, bipolar; FP, filter-press or flat-plate construction.

<sup>a</sup> Space shuttle *Orbiter*.

<sup>b</sup> Apollo program.

<sup>c</sup> Fluorinated sulfonic acid, registered trademark of E.I. du Pont de Nemours & Company, Inc.

**TABLE 4.2 Typical Electrochemical Reaction in Fuel Cells**

| Fuel Cell        | Anode Reaction                                   | Cathode Reaction                            |
|------------------|--|---|
| Proton exchange  | $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$                    | $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$       |
| Alkaline         | $H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$           | $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$      |
| Phosphoric acid  | $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$                    | $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$       |
| Molten carbonate | $H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ | $O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow 2CO_3^{2-}$ |
| Solid oxide      | $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$           | $O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$            |

# TECNOLOGÍA DE LOS ELECTRODOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

El diseño del electrodo debe cumplir con el requisito de minimizar las pérdidas de energía extrínsecas de la celda de combustible, optimizando los procesos de transporte de materia y de transferencia de carga.

## □ Estructuras porosas

Proporcionan una gran área interfacial con las fases gas y electrolito.

Alta disponibilidad de sitios de contacto S-G-L.

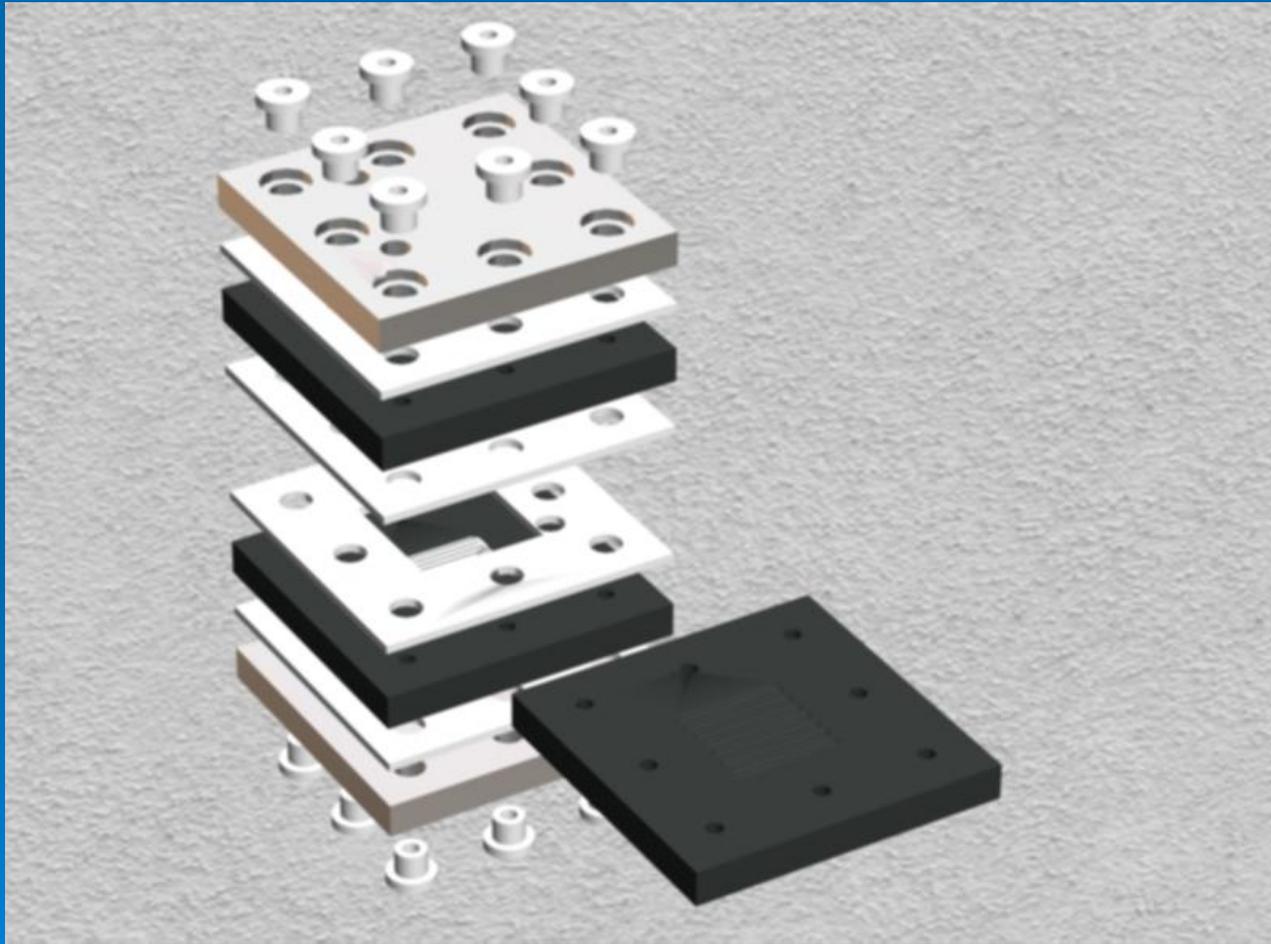
## □ Electrocatalizadores

Nanopartículas de metales nobles

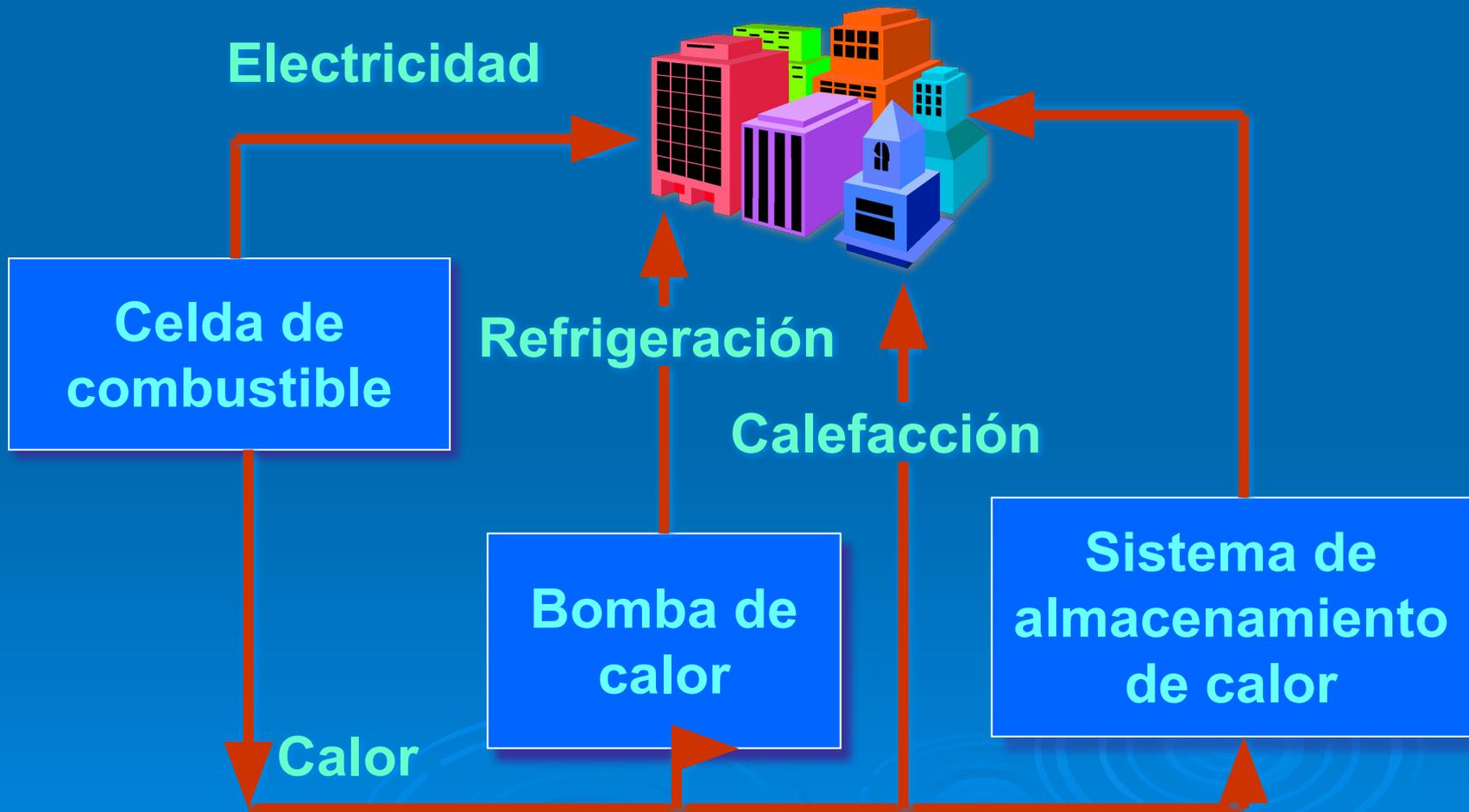
# CELDA DE COMBUSTIBLE PEM MULTIMÓDULO



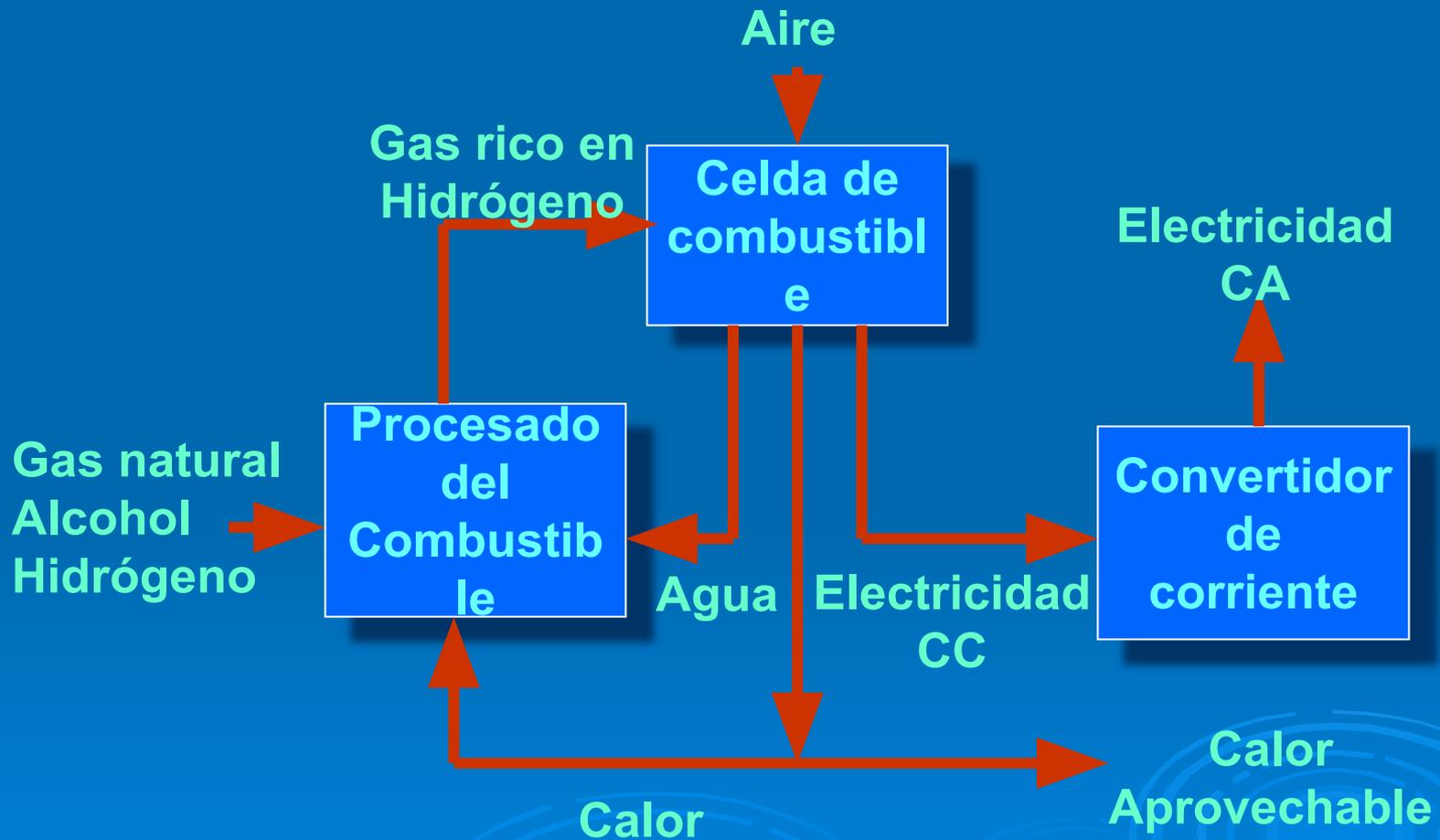
# CELDA DE COMBUSTIBLE PEM MULTIMÓDULO



# SISTEMA DE ENERGÍA ON-SITE GENERACIÓN DESCENTRALIZADA



# PLANTA DE CELDA DE COMBUSTIBLE



# GENERACIÓN DESCENTRALIZADA

- **Plantas descentralizadas de generación de electricidad (fuente primaria + CC)**

Alto impacto económico-social en Argentina y en la región latinoamericana como sistemas de abastecimiento de electricidad y calor en zonas rurales o aisladas, distantes de las centrales eléctricas de base.

- **Sistemas avanzados de conversión electroquímica de energía**

Más de 100 unidades de CC,  $P = 1-5$  kW (RWE Fuel Cells) se han testeado en USA y Alemania para cogeneración doméstica de electricidad y calor,  $\epsilon_e = 30-40$  % y  $\epsilon_t = 80-83$  %

# CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN GRANDES CIUDADES

## □ Fuente de contaminación:

Emisiones del escape de los vehículos con motor de combustión interna

Cada 160000 km, el automóvil promedio (gasolina) emite:

1300 kg contaminantes orgánicos gaseosos

1250 kg de CO

85 kg de NO<sub>x</sub>

## □ Vehículo con emisión cero de contaminantes:

Vehículo eléctrico

# ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

- El almacenamiento adecuado del hidrógeno resulta todavía un problema, particularmente para aplicaciones móviles, e.g., transporte vehicular, debido a su baja densidad volumétrica.
- Energía específica H<sub>2</sub>                      142 MJ/kg
- Energía específica HC liq.                47 MJ/kg
  - Vehículo con autonomía de 400 km
    - Vehículo c/motor CI                      24 kg gasolina
    - Vehículo c/motor CI                      8 kg hidrógeno
    - Vehículo eléctrico c/CC                3 kg hidrógeno

3 kg H<sub>2</sub> ≡ 34 m<sup>3</sup> (25°C, 1 atm)

# VEHÍCULO ELÉCTRICO

## TECNOLOGÍA PEM/METANOL REFORMADO



NECAR3.JPG

1997

Potencia: 50 kW

Tanque: 40 l

Autonomía: 400 km

Vmáx: 120 km/h

2000

Potencia: 75 kW

Tanque: 40 l

Autonomía: 450 km

Vmáx: 150 km/h



# Toyota Mirai 2021



Potencia: 134 kW (182 CV)  
Tanque: 5.6 kg @ 700 bar  
Autonomía: 650 km  
V<sub>máx</sub>: 175 km/h  
Aceleración: 0-100 km (9s)



MUCHAS GRACIAS  
POR SU ATENCIÓN

