

## Valoración macroscópica de las tecnologías del hidrógeno, ¿están claros los caminos ?

Dr. Ing. José Ignacio Linares

*Director de la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías  
Energéticas*

*Profesor Propio Agregado del Departamento de Ingeniería Mecánica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería - ICAI*

*UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS DE MADRID*

¿ Qu'est-ce que l'on brûlera à la place du charbon si celui-ci venait à manquer ?

De l'eau répondit Pencroft. L'eau, décomposée en ses éléments par l'électricité. Oui mes amis, je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables.

L'eau est le charbon de l'avenir.

Jules Verne  
L'île mystérieuse (1874)

¿Qué es lo que van a quemar en lugar de carbón?. Agua, respondió Pencroft. El agua, descompuesta en sus elementos por la electricidad. Sí, amigos míos, creo que algún día se empleará el agua como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno de los que está formada, usados por separado o de forma conjunta, proporcionará una fuente inagotable de luz y calor. El agua será el carbón del futuro.

Julio Verne. La isla misteriosa (1874)



1. El hidrógeno
2. Pilas de combustible
3. Combustión directa
4. Aspectos sociopolíticos

<http://www.upcomillas.es/catedras/crm/publicaciones.html>

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado



### ¿ Será necesario el hidrógeno ?

- El  $H_2$  es un vector energético, no una energía primaria
- Una vez producido, presenta dificultades de almacenamiento
- ¿Por qué la apuesta de la UE y USA?
  - Eficiencia energética: conversión directa de energía
  - Reducción de la dependencia energética: renovables, nuclear y carbón
  - Ausencia emisiones  $CO_2$ :
    - Procedencia de renovables y nuclear o carbón con CCS
    - Lleva al transporte las energías renovables, nuclear y carbón

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado

Dificultades en el almacenamiento:

	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Energía almacenada		
		volumen [kWh/m <sup>3</sup> ]	volumen [kWh/Nm <sup>3</sup> ]	masa [kWh/kg]
H <sub>2</sub> Líquido (1 bar; -252,8°C)	70,71	2375	3	33,59
H <sub>2</sub> Gas (300 bar; 25°C)	20,55	690		
H <sub>2</sub> Gas (700 bar; 25°C)	47,96	1611		
Gas natural (1 bar; 25°C)	0,65	9,1	10	13,93
Butano Líquido (25°C)	550	7000	33	12,73
Gasolina	750	9270	---	12,36

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado

**PRODUCCIÓN:**  
*la versatilidad*

**Fuentes  
y  
Tecnologías**

		AGUA						SÓLIDOS	
		Electrólisis ambiente	Electrólisis de alta temperatura	Ciclos termoquímicos	Reducción de óxidos metálicos	Biofotólisis	Fotoelectrólisis	Reformado, pirólisis, gasificación	Fermentación
RENOVABLES	Eólica								
	Biomasa							C	C
	Solar térmica con concentración							C	
	Solar FV								
	Luz solar								
FÓSILES	Combustibles fósiles							C	
NUCLEAR	Nuclear Gen II y III								
	Nuclear Gen IV							C	

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado

### Implantación de fuentes

Tipo	Origen	Margen de costes de producción (\$/MWh)
Centralizado	Solar ciclo SI	92 ± 17%
Descentralizado	Electrólisis	69 ± 31%
Centralizado	Nuclear ciclo SI	54 ± 41%
Centralizado	Gasificación de biomasa	51 ± 7%
Descentralizado	Gas Natural (no CCS)	45 ± 20%
Centralizado	Carbón (CCS)	33 ± 11%
Centralizado	Gas Natural (CCS)	27 ± 19%
Centralizado	Gas Natural (no CCS)	24 ± 23%

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado

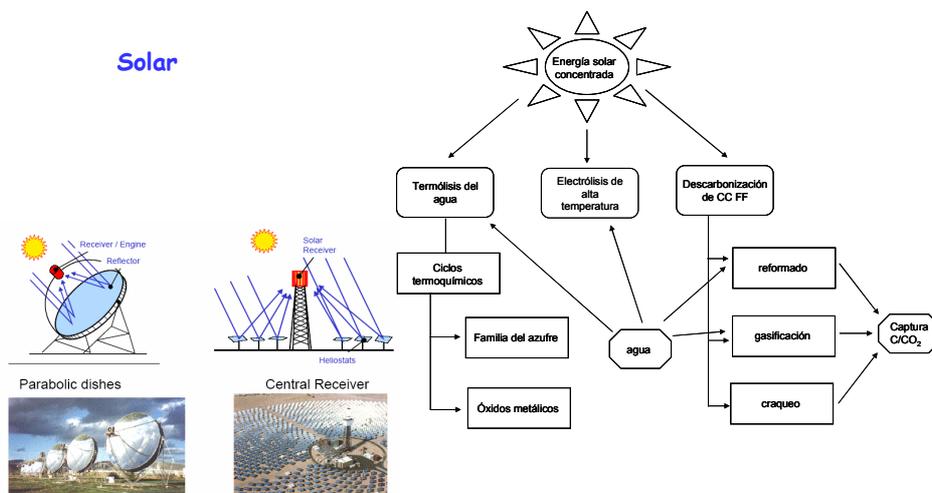
- **Gas natural:**
  - tecnología madura, mayoritaria hoy
  - agotamiento medio plazo
  - requieren CCS, sólo posible en instalaciones centralizadas
  - requieren adaptación para instalaciones descentralizadas
- **Carbón:**
  - GICC es muy interesante
  - reducido coste de producción
  - grandes inversiones (similar LWR)
  - cogeneración: H<sub>2</sub> y electricidad

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado

• **Nuclear:**

- Generación IV
  - menores costes de inversión: 1000 a 1500 \$/kWe
  - mayor seguridad
  - reducción de residuos
  - no proliferantes
- Ausencia de emisiones de  $CO_2$
- Cogeneración:  $H_2$  y electricidad
- Tres vías principales: electrólisis AT, ciclo SI, SMR

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado

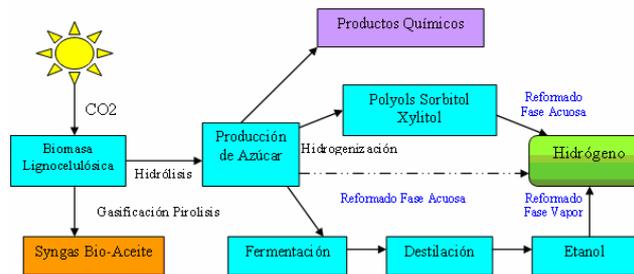


Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado



### Biomasa

- procesos químicos: gasificación y pirólisis; centralizados
- procesos biológicos: descentralizados; lentos
- competencia con biocombustibles
- recomendada captura  $CO_2$ : balance negativo



Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO

Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado



### Eólica

- electrólisis de baja temperatura
- disponible hoy día
- regulación de la aleatoriedad eólica: vender en punta lo generado en valle
- sin embargo:
  - se recupera un **43%** de la energía eléctrica aportada por la eólica
  - más apropiado eólica con hidráulica de bombeo (si posibilidad orográfica)

$$\left( 3,5 \frac{\text{kWhe aportados al electrolizador}}{\text{Nm}^3 \text{H}_2} \right) \left( \frac{1 \text{ Nm}^3 \text{H}_2}{3 \text{ kWh}} \right) \left( \frac{100 \text{ kWh consumidos H}_2}{50 \text{ kWhe producidos por la pila}} \right) = \frac{2,33 \text{ kWhe aportados}}{1 \text{ kWhe producido}}$$

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO

Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado



## ALMACENAMIENTO

- **H<sub>2</sub> comprimido**
  - Sencillo: 200 bar a 700 bar
  - Consumo: 10% a 200 bar; 15% a 700 bar
  - tecnología madura 200 bar; investigación 700 bar
  - 350 bar común en transporte con depósitos de composites
- **H<sub>2</sub> líquido**
  - Temperaturas criogénicas (-253°C a 1 bar)
  - Uso industrial; manipulación robótica en hidrogeneras
  - Alto consumo energético: 30%

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado



- **Hidruros metálicos**
  - Proceso de carga: adsorción, retirada de calor y reducción de temperatura; 30 a 55 bar
  - Proceso de descarga: desorción, aporte de calor y aumento de temperatura; 0,7 a 10 bar
  - Si el calor para desorción es residual, consumo 13%
- **Estructuras porosas (baja presión):**
  - Nanotubos de carbono; 80 K
  - Carbón activado
  - Clatratos: agua a 2000 bar y -24°C
  - Estructuras nanoporosas de moléculas organo-metálicas a temperatura ambiente

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado

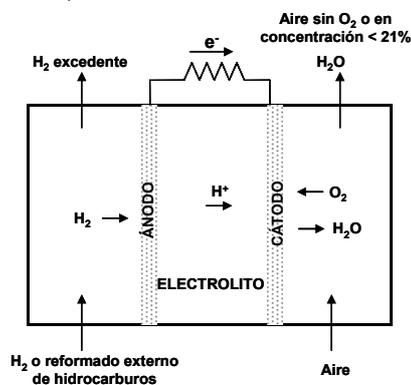
## TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN

- Hidrogeneras con hidrógeno presurizado: mercado masivo de vehículo privado, autobuses, ...
- Hidrogeneras con hidrógeno líquido: motocicletas, suministro en cartuchos
- Hidrógeno canalizado: aplicaciones estacionarias, en sector residencial/comercial (< 200 kW) y GD (> 200 kW)
- Botellas a presión: aviación y vehículos de gran uso; incluso en aplicaciones portátiles (¿DMFC?)

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado

## PILAS DE COMBUSTIBLE

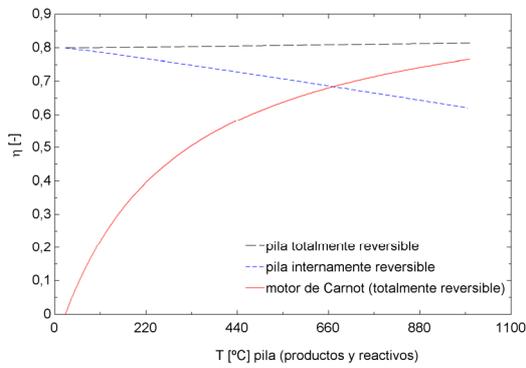
- Proceso electroquímico
- Producción de calor y electricidad



Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado



### Comportamiento ideal



Rendimiento  
INTERNAMENTE reversible  
(típico):

$$\eta = \frac{\Delta g(T)}{\Delta h(T_0)} = \begin{cases} \frac{\Delta g(T)}{h_{f,(g)}^0} \\ \frac{\Delta g(T)}{h_{f,(l)}^0} \end{cases}$$

Rendimiento  
TOTALMENTE reversible:

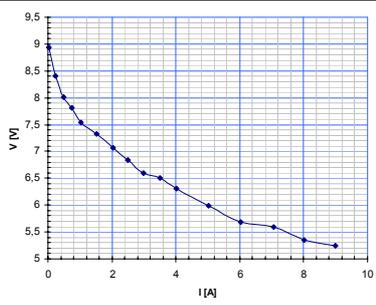
$$\eta = \frac{w_{rev}^{tot}}{|\Delta h(T_0)|} = \begin{cases} \frac{w_{rev}^{tot}}{-h_{f,(g)}^0} \\ \frac{w_{rev}^{tot}}{-h_{f,(l)}^0} \end{cases}$$

**ii No existe el límite de Carnot, pero sí el del Segundo Principio !!**

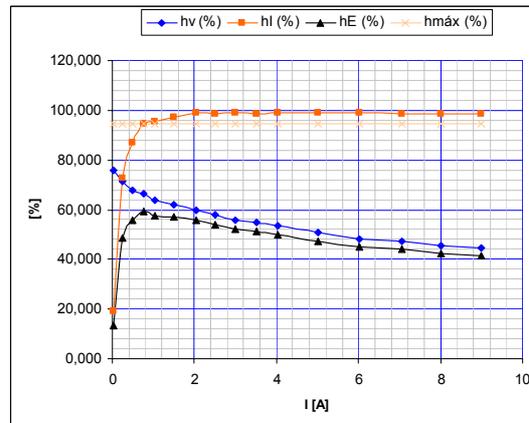
Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado



### Comportamiento real



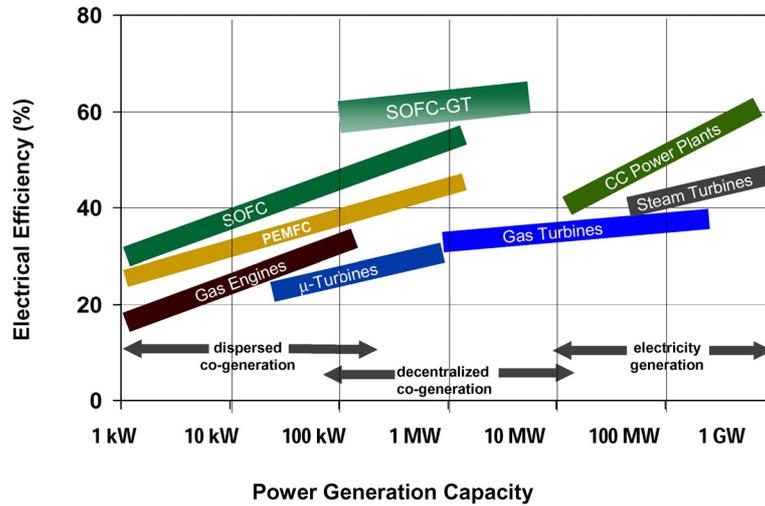
- Ensayo de una PEMFC de 50 W
- Eficiencia máxima al 8% de carga



Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado



Aplicaciones estacionarias: eficiencias



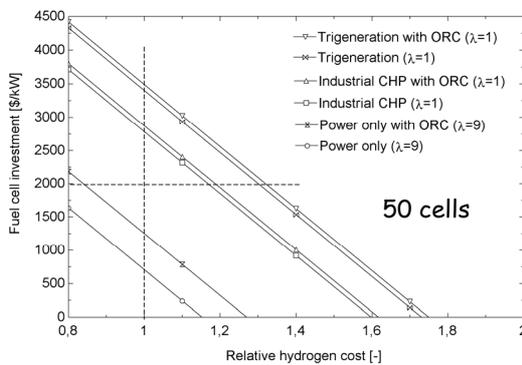
Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado



Aplicaciones estacionarias

Caso de estudio: hibridación PAFC + ciclo ORC/co- o tri-generación

Inversiones



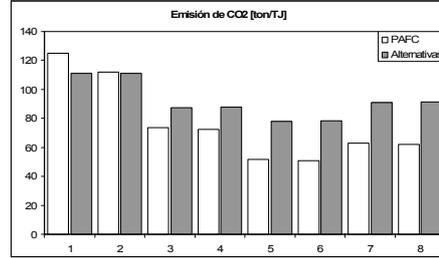
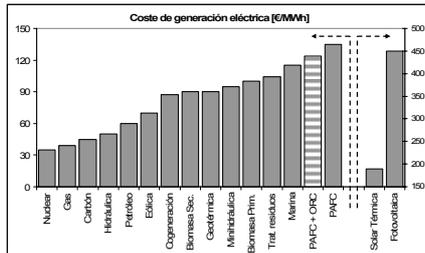
- Las inversiones de las pilas son muy elevadas
- En aplicación estacionaria requieren de la co- y tri-generación para ser rentables
- La hibridación mejora mucho si no hay co- o tri-generación

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado



### Costes y emisiones

- La hibridación reduce el coste de generación
- El coste de generación es muy alto, sólo superado por la solar



1. Sólo eléctrico
2. Sólo eléctrico + ORC
3. Cogeneración residencial
4. Cogeneración residencial + ORC
5. Cogeneración industrial
6. Cogeneración industrial + ORC
7. Trigeneración
8. Trigeneración + ORC

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO

Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado



### Aplicaciones al transporte

- En 2001 el 72% del petróleo consumido en USA fue al sector transporte
- Hasta el 2025 el consumo de petróleo se mantendrá, polarizándose hacia el sector transporte
- El sector transporte tiene un gran peso en emisiones de CO<sub>2</sub>
- Apuesta de USA y UE

Consideraciones del indicador:

- coste vehículo
- autonomía
- coste combustible
- emisiones GEI
- emisiones contaminantes

(Granovskii, Dincer, Rosen, 2006)

Escenario producción eléctrica	Tipo de vehículo	Indicador
100% EE RR & Nuclear	Convencional	0,0651
	Híbrido	0,370
	<b>Eléctrico</b>	<b>1</b>
50% EERR & Nuclear 50% GN	Pila de combustible	0,0336
	Convencional	0,176
	<b>Híbrido</b>	<b>1</b>
100% GN	Eléctrico	0,252
	Pila de combustible	0,0832
	Convencional	0,197
100% GN	<b>Híbrido</b>	<b>1</b>
	Eléctrico	0,0903
	Pila de combustible	0,0728

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO

Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado

### Previsiones UE para 2020

	Aplicaciones portátiles (para dispositivos electrónicos portátiles)	Generadores portátiles y pequeños mercados	Aplicaciones estacionarias (cogeneración CHP)	Aplicaciones de transporte por carretera
Unidades vendidas por año (proyección a 2020)	~ 250 millones	~ 100.000 (~ 1 GWe)	0,1 a 02, millones (2 - 4 GWe)	0,4 a 1,8 millones
Ventas acumuladas (proyección hasta 2020)	---	~ 600.000 (~ 6 GWe)	400.000 a 800.000 (8 a 16 GWe)	---
Situación del mercado en 2020	Establecido	Establecido	En crecimiento	En el umbral del mercado en masa
Potencia media	15 W	10 kW	3 kW (micro CHP) 350 kW (CHP industrial)	
Coste	1 - 2 €/W	500 €/kW	2.000 €/kW (micro CHP) 1.000 a 1.500 €/kW (CHP industrial)	< 100 €/kW (para 150.000 uds/año)

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado

### ASPECTOS SOCIOPOLÍTICOS

- Necesidad de soluciones:
  - agotamiento de combustibles fósiles
  - presión de países productores de combustibles fósiles
  - niveles crecientes de contaminación
  - cambio climático
  - economías emergentes
- Economía del H<sub>2</sub>:
  - desplazar el modelo energético de CC FF por H<sub>2</sub>
- Apoyos gubernamentales:
  - UE desde V PM
  - USA desde 2002

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado



- Posiciones críticas:
  - el H<sub>2</sub> es un modo de almacenar energía: requiere energía primaria
  - las pilas de combustibles tiene elevada eficiencia, pero hay que considerar el global:  $0,75 \times 0,5 = 0,38$
  - la electricidad también es un vector energético
  - éxito del H<sub>2</sub> en el transporte:
    - no despreciar opciones híbridas
    - muy interesantes DMFC, con metanol desde biomasa
    - llevar al transporte la eólica, carbón y nuclear

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado



### CONCLUSIONES

- El H<sub>2</sub> por si solo no es solución al problema energético
- Hay que considerar el proceso global, desde la producción al uso final
- Necesidad de investigación para:
  - conversiones más eficientes
  - menor consumo en la producción
  - almacenamiento más eficaz
- Producción racional de H<sub>2</sub>:
  - renovables
  - nuclear
  - gasificación de carbón con captura de CO<sub>2</sub>
- Solución al problema: mix energético. La economía del hidrógeno realmente es la economía de las energías primarias que lo producen

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado



### BIBLIOGRAFÍA

- Linares, J.I. y Moratilla, B.Y., **El hidrógeno y la energía**, Editan Universidad Pontificia Comillas y Asociación de Ingenieros del ICAI, Madrid, 2007 (<http://www.upcomillas.es/catedras/crm/publicaciones.html> )
- Linares, J.I. y Moratilla, B.Y., *El hidrógeno como vector energético (I y II)*, Anales de Mecánica y Electricidad, Vol. 84 (II y III), 2007 (<https://www.icaei.es/contenidos/secciones.php?seccion=1>)
- IV Jornada Anual de la Cátedra Rafael Mariño: **"El hidrógeno: estado actual y perspectiva inmediata"** (24 y 25 de mayo de 2007, <http://www.upcomillas.es/catedras/crm/congresos.html>)
- J. Larminie, A.Dicks, *Fuel cell systems explained*, 2nd edition, Wiley, 2003, Chichester

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado



**MUCHAS GRACIAS  
POR SU ATENCIÓN**

[linares@upcomillas.es](mailto:linares@upcomillas.es)

Seminario sobre CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO  
Madrid, 17 de octubre de 2007 - Dr. Ing. José Ignacio Linares Hurtado