

# PANELES SOLARES QUE GENERAN HIDRÓGENO QUE ALIMENTA UNA PILA PEMFC PARA UN CONJUNTO DE DISPOSITIVOS DE 2 KW.

**Autor<sup>(p)</sup><sup>1</sup> Antonio Creus Sole**

<sup>1</sup>*Profesor titular Departament Projectes d'Enginyeria UPC*

## *Abstract*

This is a system that, along the day, with an average of eight hours, collects the solar energy through the photovoltaic panels, that generate hydrogen by means of an electrolyser, storing it in a deposit of 25 bar. During the night, with an average of 12 hours, a fuel battery of H<sup>2</sup> consumes the hydrogen generated during the day, and feeds the consumption of 2Kw at an isolated house. An approximated cost of the installation is made, as well as a simplified economic study on the period required to recuperate the investment, the cost of the kW of power, and the kWh of energy.

## *Resumen*

Sistema que a lo largo del día y en 8 horas de promedio capta la energía solar a través de paneles fotovoltaicos, y genera hidrógeno mediante un electrolizador, almacenándolo en un depósito a 25 bar. Por la noche durante un promedio de 12 horas, una pila de combustible de H<sub>2</sub> consume el hidrógeno generado durante el día y alimenta el consumo de 2 Kw de una casa aislada. Se calcula el coste aproximado de la instalación y se realiza un estudio económico simplificado sobre el período de recuperación de la inversión, el coste del kW de potencia y el del kWh de energía.

## **Generalidades**

La energía solar fotovoltaica es muy adecuada en electrificación rural y en viviendas aisladas donde no llegan las líneas de la red eléctrica general. Representan una opción casi obligatoria ya que los costes de prolongar las líneas de alta tensión para llegar al punto de utilización serían demasiado elevados (figura 1).



Fig. 1 - Instalación solar fotovoltaica en una masia aislada y en un chalet  
Fuente: Jordi David Busom, Albert Fàbrega – PFC Dtor R.SanMartín - UPC 2002 y US Department of Energy

En esta comunicación en lugar de considerar un proyecto clásico de paneles solares que cargan baterías para que estas cedan la energía por la noche o durante los periodos sin sol, se opta por una pila de combustible de hidrógeno que funciona con el hidrógeno producido por un electrolizador alimentado durante el día por los paneles solares.

## Descripción de la instalación

Un grupo de paneles fotovoltaicos capta la energía solar a lo largo del día durante 8 horas de promedio y genera hidrógeno mediante un electrolizador, almacenándolo en un depósito a 25 bar. Por la noche durante un promedio de 12 horas, una pila de combustible de  $H_2$  consume el hidrógeno generado durante el día y alimenta la unidad de consumo de 2 Kw. Es opcional el empleo de una fuente de energía auxiliar (baterías) para alimentar los electrolizadores, en el caso de que los paneles solares no reciban suficiente energía por mal tiempo.

El esquema correspondiente al aprovechamiento de la energía solar en la producción de hidrógeno y el diagrama de flujo del  $H_2$  en la pila de combustible puede verse en la figura 2.

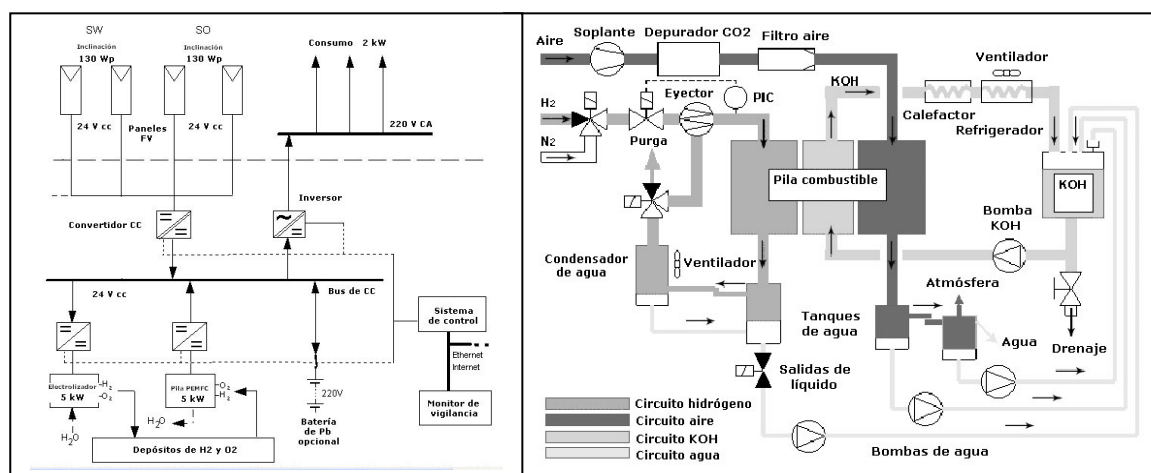


Figura 2 Circuito de producción de  $H_2$  y diagrama de flujo de la pila de combustible

Tabla 1 – Consumo de los equipos de la casa

Datos: Casa de campo dotada de los siguientes equipos

Equipo	Cantidad	Potencia W	Total parcial W	Horas/día	Energía Wh/día
Lámpara fluorescente	4	15	60	6	360
Radio	1	10	10	6	60
Televisor color 25"	1	150	150	6	900
Nevera-congelador	1	50	50	24	1200
Aire acondicionado central	1	1.500	1.500	4	6.000
Total necesario (Wh/día)					8.520

## Cálculos

Reserva de energía para 5 días sin sol y con el día del año de menor nº de horas de sol .

En las 12 horas de la noche el consumo promedio se reparte entre 3,5 h a 2 kW (todos los equipos) y 8,5 horas a 0,4 kW (grupo reducido). El **consumo total por día promedio** es:  $2 \cdot 3,5 + 0,4 \cdot 8,5 = 10,4 \text{ kWh}$  y en 1 año es  $10,4 \cdot 360 = 3.744 \text{ kWh/año}$ .

La energía de consumo la va a proporcionar una pila de H<sub>2</sub> PEMFC, a través de un electrolizador y un acondicionador de potencia. Los rendimientos de cada componente son:

Módulo fotovoltaico 14%, Electrolizador 74%, Pila PEMFC 47%, Acondicionador de potencia 92%. Luego:

$10,4 \text{ kWh} / (0,74 \cdot 0,47 \cdot 0,92) = 32,5 \text{ kWh/día}$  necesarios a la salida de las placas solares. En 8 horas promedio de sol son:  $32,5 / 8 = 4,06 \text{ Kw}$

Energía diaria paneles solares (a 24 V) =  $(32.500 \text{ Wh} / 24 \text{ V}) = 1.354 \text{ Ah}$ . Nº de horas de sol Pic = 8. Ah captadores =  $1354 / 8 = 169,25 \text{ Ah}$

En el peor día del año, Nº de horas de sol Pic = 5. Ah captadores =  $1354 / 5 = 270,8 \text{ Ah}$ .

Se considera falta de sol 5 días al año, la energía diaria de las placas es:  $(32,5 \cdot 370) / 360 = 33,4 \text{ kWh/día}$ .

Energía diaria paneles solares (a 24 V) =  $(33.400 \text{ Wh} / 24 \text{ V}) = 1.392 \text{ Ah}$ . Nº de horas de sol Pic = 5. **Ah captadores =  $1392 / 5 = 278 \text{ Ah}$**

un panel fotovoltaico de 120 Wp en un día caracterizado por una radiación de 5 kWh/m<sup>2</sup> que equivale a 5 Horas Solar Pico (HSP) (o sea 1000 W/m<sup>2</sup> durante 5 horas) recibe una energía de 5 horas \* 120 Wp = 600 Wh.

Se seleccionan módulos fotovoltaicos **Atersa A-130** o similar de **130 Wp (7,54 A, 17,2 V de 1.477 mm x 660 mm = 0,9748 m<sup>2</sup>)**.

Conectando en serie 2 paneles FV (24 V): Nº total paneles =  $2 \cdot (278 / 7,54) = 73,74$  o sea **75 paneles fotovoltaicos de 130 Wp**

Energía útil Electrolizador =  $33,4 \text{ kWh/día} \cdot 0,74 = 24,7 \text{ kWh}$  (5 h. sin sol en el peor día del año). **Potencia electrolizador =  $24,7 / 5 = 5 \text{ kW}$ ,**

Desde el punto de vista energético, 1 Kg H<sub>2</sub> = 33,5 kWh., 1 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> = 4,5 kWh

El electrolizador produce en 1h  $(5 \text{ kW} \cdot 0,74) / 33,5 \text{ kWh} = 0,11 \text{ Kg/h H}_2$

O bien:  $(5 \text{ kW} \cdot 0,74) / 4,5 \text{ kWh} = 0,82 \text{ m}^3/\text{h H}_2$

Producción durante 5 días sin sol =  $5 \text{ h} \cdot 5 \text{ días} \cdot 0,82 \text{ m}^3/\text{h H}_2 = 20,5 \text{ m}^3$

**Volumen depósito a 25 bar =  $20,5 / 25 = 0,82 \text{ m}^3 = 1 \text{ m}^3$**

El mayor consumo es de 2 kW durante 3,5 h por la noche, la potencia de la pila de H<sub>2</sub> debe ser:  $2\text{ kW}/0,47 = 4,25$ . Seleccionamos una **pila de H<sub>2</sub> de 5 kW**.

Tabla 2 - Resultado de los cálculos

Supuesto casa 4 personas	Paneles fotovoltaicos	Electrolizador	Depósito H <sub>2</sub>	Pila de H <sub>2</sub>
Consumo total por día promedio $2*3,5 + 0,4*8,5 = 10,4$ kWh. 1 año = $10,4*360 = 3.744$ kWh	75 paneles de 130 Wp Atersa A-130 <b>7,54</b> A, 17,2 V de 0,9748 m <sup>2</sup>	5 kW	1 m <sup>3</sup> a 25 bar	5 kW

### Subvención económica

Coste paneles =  $75 * 800 \text{ €/unidad} = 60.000 \text{ €}$ .

Al ser una instalación solar fotovoltaica aislada, se considera una subvención de 6 €/Wp sobre la potencia instalada, tomando como ejemplo, la ORDEN 1241/2004, de 2 de marzo, de la Consejería de Economía e Innovación Tecnológica de la Comunidad Autónoma de Madrid.

Subvención instalaciones aisladas de la red ( $6 \text{ €/Wp} = 6 * 75 * 130 = 58.500 \text{ €}$ )

Energía útil Electrolizador =  $33,4 \text{ kWh} * 0,74 = 24,7 \text{ kWh}$  (5 h.sol). Potencia electrolizador =  $24,7/5 = 5 \text{ kW}$ ,

### Electrolizadores

Los *electrolizadores* producen el hidrógeno por electrolisis del agua y la energía requerida se obtiene de placas solares. El hidrógeno se produce en el electrodo negativo (cátodo) y el oxígeno en el positivo (ánodo) y para mantener los gases separados, las dos áreas de reacción disponen de un diafragma que separa los iones conductores (figura 3).

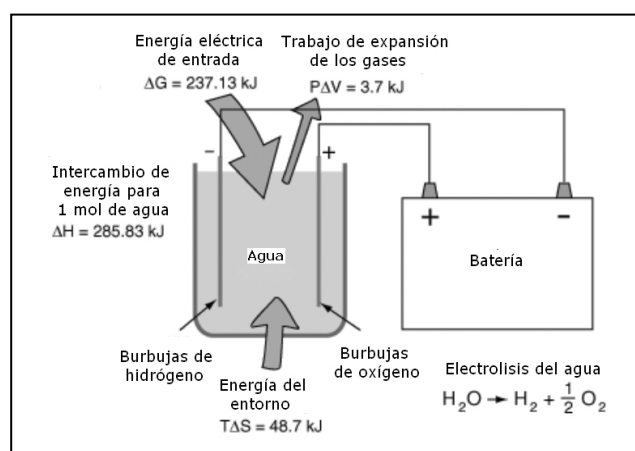


Fig. 3 Electrolizador

Los electrolizadores alcalinos emplean un electrolito, usualmente una solución de hidróxido potásico al 25% (figura 8.3).

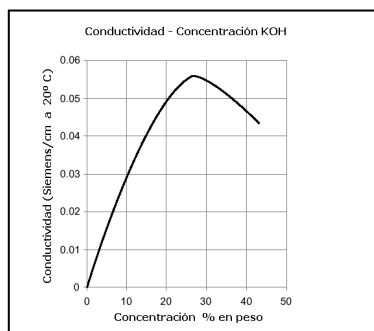


Fig. 4 Solución de KOH empleada como electrolito  
Fuente: Walt Pyle et al. Home Power #39 • March 1994

La pureza del hidrógeno obtenido directamente del electrolizador atmosférico o del de alta presión, es del  $9,9\% \pm 0,1\%$  y después de un proceso de purificación llega a 99,9998%.

## Valoración económica

El coste aproximado de la instalación es:

Tabla 3 Coste aproximado de la instalación

Item	Cantid.	Equipo	P/unitario (€)	P/Total (€)
<b>Instalación Solar-Pila H2 de potencia útil máxima 2 kW</b>				
1,00	75,00	Módulos fotovoltaicos a 12 V cc - Wp = 130 W con su estructura de soporte (Atersa A-300)	800,00	60.000,00
2,00	1,00	Electrolizador de 2 módulos - 5 kW - 0,82 Nm3/hora H2 a 25 bar	20.000,00	20.000,00
3,00	1,00	Depósito de 1 m3 para almacenar H2 a 25 bar	1.500,00	1.500,00
4,00	1,00	Sistema purificador de hidrógeno	1.235,00	1.235,00
5,00	1,00	Sistema purificador de oxígeno	455,00	455,00
6,00	1,00	Almacenamiento y transferencia del electrolito (KOH)	390,00	390,00
7,00	1,00	Sistema purificador de agua	358,00	358,00
8,00	1,00	Pila combustible PEMFC de 5 kW (1.771 €/0,7=2.951 = 3.000 €/kW)	15.000,00	15.000,00
9,00	1,00	Inversor CC/CA 5.000 W para alimentar los aparatos de consumo	1.250,00	1.250,00
10,00	1,00	Ordenador de control del sistema	2.000,00	2.000,00
		<b>Total, sin subvención, ni IVA</b>		<b>98.938,00</b>
		<b>Subvención (6 €/Wp = 6 * 75 * 130 = 58.500 €)</b>		<b>58.500,00</b>
		<b>Total con subvención</b>		<b>40.438,00</b>
		<b>IVA 16%</b>		<b>6.470,08</b>
		<b>Total con subvención e IVA</b>		<b>46.908,08</b>

El caso estudiado es un autoabastecimiento de energía eléctrica mediante placas fotovoltaicas. La central fotovoltaica puede estar integrada en un edificio cediendo su energía a la red y tomando de ella la energía necesaria cuando la necesite. Si se vendiera la energía a alguna compañía suministradora, el BOE nº75 del 27-03-2004 (RD 436/2004, de 12-03-2004), indica que la tarifa eléctrica media o de referencia para el año 2004, es de 7,2072 céntimos de euro/kWh.

Si la casa obtuviera su electricidad con un generador diesel de rendimiento 0,4, como 1 kWh equivale a la energía de 0,09524 litros de gasoil, el coste sería de:

$$\frac{0,09524 \text{ l} * 0,753 \text{ €/l}}{0,4} * 3744 \text{ kWh} + 1.230 \text{ € (amortizacion y mantenimiento)} \cong 1.500 \text{ €/año}$$

Que es el ahorro obtenido por año en la energía eléctrica a generar para el consumo de cuatro personas en la casa de campo.

El mantenimiento se considera el 0,5% de la inversión, dado que lo hacen los propios usuarios con intervenciones ocasionales de los electricistas y lampistas locales.

El ciclo de vida de estas instalaciones es de 20-25 años (incremento de costos 6% anual).

La rentabilidad de las instalaciones fotovoltaicas está muy ligada a las subvenciones de la administración, es decir, que la energía fotovoltaica no es viable por si misma, dependiendo del apoyo económico de las administraciones. (BOE nº75 del 27-03-2004 (RD 436/2004, de 12-03-2004),

Pueden presentarse dos casos:

- Potencias < 100 kW : Tarifa =  $5,75 * 0,072072 = 0,4144 \text{ €/kWh}$  los primeros 25 años después de la instalación y 460% después.
- Potencias > 100 kW: Tarifa =  $3 * 0,072072 = 0,2172 \text{ €/kWh}$  los primeros 25 años después de la instalación y 240 % después.

Y si el productor deseara ofrecer libremente esta energía en el mercado, el precio sería el del mercado mas la prima y el incentivo que pudieran aplicarse.

- Potencia > 100 kW : Prima =  $2,5 * 0,072072 = 0,18018 \text{ €/kWh}$  los primeros 25 años después de la instalación y 200 % después.
- Incentivo: 10%

En el grupo a.1.2, el resto de cogeneraciones (microgeneración, pilas de combustible de pequeño tamaño) hasta 1 MW se le aplica una tarifa del 90%, los primeros 10 años y 50% después. No hay prima para estas potencias < 1MW y si el incentivo del 10%.

Tabla 4 Valoración económica

Estado económico												
Inversión inicial	46908,00											
Ahorro gas-oil 1º año	1500,00											
AÑO	Inv. Inicial	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	
Ingreso		1500,00	1605,00	1717,35	1837,56	1966,19	2103,83	2251,10	2408,67	2577,28	2757,69	
Mantenimiento (0,5% inv.)		-234,00	-245,70	-257,99	-270,88	-284,43	-298,65	-313,58	-329,26	-345,72	-363,01	
Inversión	-46908,00											
cash-flow	-46908,00	1266,00	1359,30	1459,37	1566,68	1681,77	1805,18	1937,51	2079,41	2231,55	2394,68	2569,57
Pay-back	-46908,00	-45642,00	-44282,70	-42823,34	-41256,65	-39574,89	-37769,71	-35832,20	-33752,79	-31521,23	-29126,55	
Pay-back = 19 años												
		11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,00	19,00	20,00	
Ingreso		2950,73	3157,28	3378,29	3614,77	3867,80	4138,55	4428,25	4738,22	5069,90	5424,79	61493,24
Mantenimiento (1% inv.)		-381,16	-400,22	-420,23	-441,24	-463,30	-486,47	-510,79	-536,33	-563,15	-591,31	
cash-flow		2569,57	2757,06	2958,06	3173,53	3404,50	3652,08	3917,45	4201,89	4506,75	4833,48	
Pay-back		-26556,99	-23799,93	-20841,87	-17668,35	-14263,85	-10611,77	-6694,32	-2492,43	2014,32	6847,81	
VAN	-28502,42											
TIR 20 años	1,09%		TIR 5 años	-40,18%		TIR 10 años	-13,60%		TIR 15 años	-4%		
Ratio	1,31											

Coste €/kWh año											
Años	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	19º
Pago constante 46.908 al 5%	-3.881	-3.881	-3.881	-3.881	-3.881	-3.881	-3.881	-3.881	-3.881	-3.881	-3.881
Cash-flow anual	1.266	1.359	1.459	1.566	1.681	1.805	1.937	2.079	2.231	2.394	2.394
<b>Coste energía €/kWh</b>	<b>0,6986</b>	<b>0,6737</b>	<b>0,6470</b>	<b>0,6184</b>	<b>0,5877</b>	<b>0,5546</b>	<b>0,5193</b>	<b>0,4814</b>	<b>0,4408</b>	<b>0,3973</b>	<b>0,3973</b>

Así pues:

$$\text{Precio kW} = 46.908/2 = 23.454 \text{ €/kW}$$

Precio kWh = 0,698 € el 1º año hasta 0,397 € a los 10 años y 0,397 € a los 19 años