

# Nociones elementales y problemas docentes sobre la producción y utilización de hidrógeno electrolítico obtenido mediante fuentes renovables de energía



R. Valdés<sup>1</sup>, L. R. Rodríguez<sup>1</sup>, V. Tricio<sup>2</sup>, J. H. Lucio<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física, Universidad de Burgos, Calle Villadiego s/n. CP 09001, Burgos, España.

<sup>2</sup>Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Burgos, Plaza Misael Bañuelos s/n. CP 09001, Burgos, España.

E-mail: rvaldes@ubu.es

(Recibido el 20 de junio de 2018; aceptado el 29 de junio de 2018)

## Resumen

Las tecnologías del hidrógeno emergen como una de las vías para solucionar la problemática de producir energía sin emisiones de CO<sub>2</sub> y contribuir a mejorar la calidad de vida de las personas. El hidrógeno tiene amplias posibilidades de utilización en la producción de electricidad con pilas de combustible y mediante fusión nuclear. La investigación e innovación en este campo permite incorporar elementos de algunos de sus resultados a la formación universitaria. En apretada síntesis describimos el contexto social y el estado de la investigación e innovación que convierten a las tecnologías del hidrógeno en un aspecto a considerar en los objetivos y el contenido de los cursos de Física. Exponemos resumidamente la estructura de un sistema para la producción de hidrógeno con energías eólica y fotovoltaica. Enunciamos y solucionamos algunas tareas docentes que pueden ser de interés en los cursos de Física.

**Palabras clave:** hidrógeno como combustible y enseñanza de las ciencias, energías renovables y enseñanza de las ciencias.

## Abstract

Hydrogen technologies are emerging as one of the ways to solve the problem of producing energy without CO<sub>2</sub> emissions. At the same time those technologies contribute to improving the people's quality of life. Hydrogen usage has wide possibilities in the production of electricity by mean of fuel cells and nuclear fusion. Research and innovation in this field allows to incorporate some elements of new technologies in higher education. We summarize the social context and status of research and innovation that make hydrogen technologies one item in goals and content of physics courses. We briefly describe the structure of a system for hydrogen production using wind and solar energy. We enunciate and solve some problems that may be of interest in physics courses.

**Keywords:** hydrogen as fuel and science education, renewable energies and science education.

**PACS:** 01.40.-d, 01.55.+b, 01.40.Ha, 88.05.Lg

**ISSN 1870-9095**

## I. INTRODUCCIÓN

Los niveles actuales y previsibles de producción y consumo de mercancías imponen límites al empleo de los combustibles fósiles. Por una parte, se ha tomado conciencia de la posibilidad real de una catástrofe medioambiental irreversible [1, 2] debida al efecto invernadero aumentado. La causa principal de dicho efecto es la combustión de sustancias orgánicas, acompañada siempre de la emisión de CO<sub>2</sub>. Por otra parte, las principales fuentes de energía utilizadas hasta hoy no son renovables y una economía de mercado y de crecimiento exponencial, conducirá inexorablemente a la dramática disminución de las reservas y a la drástica elevación de los precios de los combustibles tradicionales. No hay dudas de que semejante situación influye y repercutirá

decisivamente en la calidad de vida de las personas. La investigación e innovación en torno a fuentes de energía renovables y limpias es una vía ineludible de actuación para evitar un desastre natural y social en el planeta [3, 4].

Una de las limitaciones que tienen las energías renovables (eólica, solar fotovoltaica, solar térmica, hidráulica o maremotriz) es su dependencia respecto a las condiciones atmosféricas y a la ubicación geográfica del lugar de utilización. Para superar esa dificultad se trabaja en diseños que permiten emplear esas energías no solamente en la obtención directa de electricidad, sino también en la producción de un combustible limpio capaz de sustituir a los contaminantes.

A mediados de los años 70 del pasado siglo se crearon las condiciones para desarrollar un movimiento científico internacional en torno al empleo del hidrógeno como

combustible [5]. Entre los principales logros científico-tecnológicos de ese movimiento se encuentran los siguientes:

- **Fabricación de pilas de combustible.** Las pilas de combustible utilizan el hidrógeno convenientemente almacenado y el O<sub>2</sub> atmosférico en la producción de electricidad. La sustancia que resulta del proceso electroquímico indicado es agua y no un desecho contaminante. Por otra parte, esos equipos no son una máquina térmica y, en consecuencia, el ciclo de Carnot no les limita el rendimiento.
- **Utilización del hidrógeno como combustible en medios de transporte.** Actualmente se fabrican motores de combustión interna de hidrógeno. Esos motores, aunque producen pequeñas cantidades de NO<sub>2</sub>, son mucho menos contaminantes que los convencionales y tienen elevada eficiencia durante la parada-arrancada propia de los vehículos de carretera en las ciudades. Se han diseñado modelos demostrativos de coches, autobuses y camiones movidos totalmente por la electricidad suministrada con pilas de combustible y supercondensadores, que ya circulan experimentalmente por carreteras de distintos países [9–12].
- **Empleo de hidruros.** Hoy son ampliamente utilizadas las baterías de hidruros metálicos. Los hidruros se emplean además en bombas de calor y en equipos de aire acondicionado sustituyendo a los clorofluorocarbonos, sin perjuicio para la capa de ozono. Particularmente se estudian los hidruros como compuestos que permiten el almacenamiento de hidrógeno.
- **Desarrollo de tecnologías para la producción de electricidad mediante síntesis termonuclear.** Las instalaciones de tipo TOKAMAK son actualmente las más prometedoras para lograr aplicaciones industriales [6–8]. Se prevé que este camino de obtención de electricidad elevará significativamente la seguridad de las centrales nucleares y permitirá superar, entre otras, una de las grandes limitaciones que ha caracterizado el uso de la energía nuclear: el almacenamiento de residuos radiactivos de larga duración.

Un giro radical hacia las nuevas tecnologías del hidrógeno tendría un impacto positivo inestimable sobre el ambiente y la calidad de vida de las personas [5]:

- Disminución significativa de la generación de los principales gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>).
- Reducción de las emisiones de SO<sub>2</sub>, debidas al quemado de carbón en la producción de electricidad.
- Descenso de la cantidad de CFC que pasan a la atmósfera debido a la utilización de equipos de refrigeración. Contribución al restablecimiento de la capa de ozono y con ello, a la reducción de los casos de cáncer.
- Eliminación de la inhalación de agentes cancerígenos debidos a la combustión de la gasolina por los coches.
- Contribución al desarrollo sostenible.

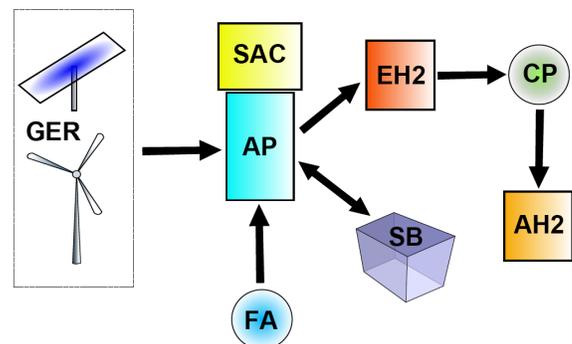
En numerosos países se han constituido asociaciones nacionales dedicadas al problema de la producción y aprovechamiento del hidrógeno. Actualmente se editan

más de ocho revistas científicas internacionales de reconocido prestigio que tratan específicamente la temática. Han culminado o se desarrollan con éxito gran cantidad de proyectos demostrativos de la producción de hidrógeno con energías renovables [13–17]. Dentro de unas dos décadas, muy posiblemente se establezcan las instalaciones de producción industrial [3] y [4]. Crece la cantidad de libros, vídeos de divulgación y sitios de Internet que abordan el asunto. Ante el contexto descrito la educación universitaria comienza a tratar el tema de la denominada economía del hidrógeno.

Entre los proyectos demostrativos que han abordado la producción y aprovechamiento de hidrógeno electrolítico se encuentra 'Hydrosolar' 21, desarrollado por miembros del grupo de investigación ERYMAA de la Universidad de Burgos desde 2005 hasta 2009 [18]. Uno de sus objetivos fue la divulgación de conceptos relacionados con el tema de investigación y, en particular, incorporar dichos conceptos a la formación universitaria.

## II. DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA PARA LA PRODUCCIÓN Y APROVECHAMIENTO DEL HIDRÓGENO

La electrólisis del agua es la vía idónea para obtener hidrógeno de elevada pureza. La Fig. 1 esquematiza una planta para la producción de hidrógeno electrolítico utilizando las energías eólica y fotovoltaica. El generador de electricidad GER (eólico - fotovoltaico), el sistema de baterías SB y la fuente auxiliar de electricidad FA están acoplados al acondicionador de potencia AP. Este último se encuentra conectado al electrolizador EH2, que descompone el agua en hidrógeno y oxígeno gaseoso. A la salida del electrolizador está el compresor CP encargado de introducir el combustible en el almacén AH2, formado por un conjunto de bombonas. El sistema de control automático SAC se encarga de regular todo el funcionamiento de la instalación.



**Figura 1.** Un esquema de planta de producción de hidrógeno electrolítico.

Con la finalidad de que la obtención de hidrógeno sea altamente ecológica, la producción de electricidad se basa en el uso de fuentes renovables de energía. Considerando la intermitencia de las fuentes eólica y fotovoltaica, se utiliza el sistema de baterías SB para garantizar la estabilidad del consumo eléctrico. Existen períodos con la

posibilidad de que la potencia de generación eléctrica supere la demanda del electrolizador. Entonces la energía excedente se almacena en las baterías. En cambio, hay etapas en que la radiación solar y la velocidad del viento son insuficientes para generar la potencia eléctrica apropiada. Por ejemplo, durante un día nublado y una noche sin suficiente energía eólica. En esos casos, la producción de hidrógeno continúa a expensas de la energía almacenada en el acumulador. No obstante, es imposible construir un sistema de baterías que garantice con probabilidad 1 el consumo eléctrico en cualesquiera situaciones de variación aleatoria de la velocidad media del viento y de la irradiación diaria. Por ello existe la posibilidad de que durante algún tiempo el electrolizador no disponga de la potencia eléctrica necesaria para su funcionamiento. Ello hace indispensable la inclusión de la fuente auxiliar FA. Ese papel lo puede desempeñar una conexión a la red eléctrica o, en el caso de una instalación aislada, un grupo electrógeno.

El acondicionador de potencia AP es un equipo preparado para realizar diversas funciones. Entre sus componentes tiene un cargador de baterías, un rectificador de corriente alterna y un reductor/amplificador de la tensión de salida, necesario para acoplar el electrolizador.

Todo el sistema de producción está sometido al control automático. Con la finalidad de disminuir el sistema de baterías y reducir los costes de la instalación es conveniente utilizar un software inteligente. Este software ha de ser capaz de predecir, dadas las condiciones de irradiación solar y velocidad del viento precedentes, la potencia eléctrica media que se puede generar durante un tiempo determinado. Justamente con esa potencia se hace funcionar el electrolizador.

El hidrógeno obtenido en la planta es utilizado por los consumidores en pilas de combustible, motores de combustión interna, procesos de soldadura, destilación criogénica de deuterio, etc. La mayor parte de los residuos de la producción y del consumo del combustible son oxígeno y agua, que pueden ser almacenados o emitidos al ambiente.

### III. PLANTEAMIENTO Y RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

A continuación presentamos cuatro tareas docentes que permiten actualizar la enseñanza de la Física atendiendo a los logros de la investigación e innovación en el campo de las tecnologías del hidrógeno. Las situaciones de análisis propuestas corresponden a estimaciones hechas durante el diseño y optimización de la planta de producción de hidrógeno del proyecto Hydrosolar' 21.

En el planteamiento y la resolución de las actividades de aprendizaje que presentamos, habitualmente se utiliza la unidad de medida  $\text{Nm}^3$ . Se trata de una unidad empleada en aplicaciones tecnológicas y significa metros cúbicos de gas en condiciones normales de presión y temperatura.

#### Problema 1. Utilización de pilas de combustible en el transporte.

Actualmente un coche movido con pila de combustible tiene una autonomía de aproximadamente 400 km al cabo de los cuales debe repostar unos 4 kg de  $\text{H}_2$ .

- Estimar cuántos vehículos pueden ser abastecidos por una planta de producción de hidrógeno electrolítico, capaz de satisfacer la demanda media anual de  $1,7 \text{ Nm}^3/\text{h}$  de gas de esa sustancia.
- Estimar al cabo de cuánto tiempo es necesario reabastecer de combustible un coche si con una carga se introducen  $m = 4 \text{ kg}$  del combustible.

Suponer que la distancia media recorrida al día por un automóvil es  $L_m \leq 30 \text{ km}$ .

**Resolución.** Sea  $\varphi = 10^{-2} \text{ kg/km}$  el consumo medio de combustible de un coche. Entonces, según las condiciones indicadas, un vehículo tiene al día un gasto medio horario de combustible

$$Q = \varphi \frac{L_m}{T_d} \quad (1)$$

donde  $T_d = 24 \text{ h}$  y  $Q$  está expresado en  $\text{kg/h}$ .

De conformidad con el modelo de gas ideal, para abastecer un coche se necesita producir permanentemente un flujo volumétrico que, en condiciones normales es

$$\Phi = \frac{Q}{M} \frac{RT_0}{P_0} = \varphi \frac{L_m}{T_d} \frac{RT_0}{MP_0} \quad (2)$$

donde  $\Phi$  está dado en  $\text{Nm}^3/\text{h}$ ,  $M = 2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$ ,  $T_0$  y  $P_0$  representan la temperatura y la presión de las condiciones normales. La temperatura crítica de esa sustancia es  $32,94 \text{ K}$ .

Manteniendo un flujo medio  $\Phi_0$  de producción de hidrógeno gaseoso es posible abastecer la demanda de combustible de  $n = \frac{\Phi_0}{\Phi}$  coches. Si  $\Phi_0 = 1,7 \text{ Nm}^3/\text{h}$  la planta puede generar  $\text{H}_2$  para unos 12 automóviles.

El tiempo medio que demora un vehículo en gastar 1 kg de  $\text{H}_2$  es

$$t = \frac{1}{Q} \quad (3)$$

donde  $t$  está dado en horas.

Si al recargar un vehículo se suministran  $m = 4 \text{ kg}$  de combustible, el reabastecimiento debe tener lugar al cabo de intervalos de duración media

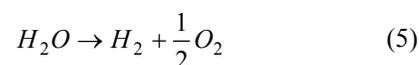
$$T = mt = \frac{m}{Q} \quad (4)$$

Considerando los datos numéricos dados  $T = 320 \text{ h} \approx 13 \text{ días}$ .

#### Problema 2. Consumo de agua en un electrolizador.

Estimar el gasto de agua  $Q_{\text{H}_2\text{O}}$  que supone producir un flujo  $\Phi_0 = 1,7 \text{ Nm}^3/\text{h}$  de hidrógeno gaseoso.

**Resolución.** La electrólisis del agua se describe mediante la ecuación



R. Valdés

De conformidad con la ecuación anterior el número de moles de agua  $n_{H_2O}$  utilizados por unidad de tiempo durante la electrólisis es igual al de hidrógeno producido  $n_{H_2}$ .

Utilizando la ecuación del gas ideal tenemos

$$n_{H_2} = \Phi_0 \frac{P_0}{RT_0} = n_{H_2O} \quad (6)$$

El gasto de agua correspondiente al número de moles indicado es

$$\begin{aligned} Q_{H_2O} &= n_{H_2O} M_{H_2O} = \Phi_0 \frac{P_0}{RT_0} M_{H_2O} = \\ &= 1,35 \text{ kg/h} \end{aligned} \quad (7)$$

donde  $M_{H_2O}$  es la masa molar del agua.

A la temperatura ambiente el gasto de agua en volumen resulta

$$\Phi_{H_2O} = 1,35 \text{ dm}^3/\text{h} \quad (8)$$

### Problema 3. Almacenamiento de hidrógeno gaseoso.

Un almacén de hidrógeno gaseoso está constituido por  $n = 200$  botellones de capacidad  $V_B = 0,1 \text{ m}^3$  cada uno. La presión máxima a que puede ser almacenado el gas es  $P_{max} = 200 \text{ bar}$  ( $1 \text{ bar} \approx 10^5 \text{ Pa}$ ) y la temperatura máxima estimada de almacenamiento es  $t_{max} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ . ¿Qué masa mínima de  $H_2$  puede ser acumulada en tales condiciones? ¿A qué volumen de hidrógeno en condiciones normales correspondería?

**Resolución.** Considerando que el  $H_2$  se comporta como un gas ideal tenemos

$$m_B = M \frac{P_{max} V_B}{RT_{max}} \quad (9)$$

donde  $m_B$  es la masa de gas acumulada en un botellón y  $M$  la masa molar del hidrógeno.

De esta forma, la masa de hidrógeno que puede ser acumulada en  $n$  recipientes es:

$$m = M \frac{P_{max} V_B}{RT_{max}} n = 318 \text{ kg} \quad (10)$$

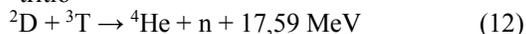
En condiciones normales el volumen que ocuparía esa masa de  $H_2$  es

$$V_0 = n V_B \frac{P_{max}}{P_0} \frac{T_0}{T_{max}} = 3604 \text{ Nm}^3 \quad (11)$$

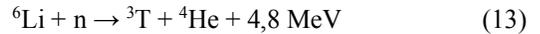
### Problema 4. La producción de hidrógeno electrolítico y la energía de fusión nuclear.

Se espera que hacia 2040 la energía de fusión nuclear ya forme parte de la red de consumo. En octubre de 2007 se puso oficialmente en marcha el proyecto ITER [8] (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) que pretende demostrar la posibilidad de producir comercialmente ese tipo de energía. Prevé la utilización de un TOKAMAK que debe generar 500 MW y, posiblemente, entrar en funcionamiento hacia 2019.

Actualmente la reacción de síntesis termonuclear con mayores perspectivas de realización comercial es la de deuterio – tritio



Esta será precisamente la utilizada por el ITER. El tritio  ${}^3\text{T}$  se obtiene mediante la reacción



la cual puede ser utilizada también para generar energía en forma de calor.

Los neutrones  $n$  son los que escapan del plasma confinado por el campo magnético del TOKAMAK y bombardean un manto de litio que rodea al reactor.

Al parecer, el método de mayores perspectivas para la obtención del deuterio es el de destilación criogénica del hidrógeno ( $H_2$  y  $D_2$ ) altamente puro [19]. Una técnica para producirlo es la electrólisis del agua. La destilación se logra a costa de que la temperatura de ebullición del  $D_2$  es  $23,7 \text{ K}$  y la del  $H_2$  es  $20,4 \text{ K}$  en condiciones normales [20]. Entre las ventajas del método se encuentra la de aportar un residuo de  $H_2$  extraordinariamente puro, útil para ser empleado en pilas de combustible.

La relación entre la temática de la energía de fusión y la producción de hidrógeno electrolítico con energía eólica puede ser analizada a través del planteamiento y la resolución del siguiente problema:

Estimar la potencia eléctrica necesaria para obtener mediante electrólisis de una disolución de KOH en agua, el hidrógeno del que se destilaría el deuterio que demanda una central de fusión nuclear de 1000 MW. ¿Podría ser producido el  $H_2$  necesario con generadores eólicos? Considera los datos siguientes:

- En el agua natural los átomos de deuterio constituyen aproximadamente el 0,015% del total.
- Un flujo de  $1 \text{ Nm}^3/\text{h}$  de  $H_2$  se obtiene con unos 6 kW de potencia eléctrica cuando se realiza la electrólisis de una disolución de KOH en agua al 35%.
- Para producir 1000 MW de energía de fusión durante un año se estima que son necesarios 250 kg de combustible (deuterio y tritio) [21].

**Resolución.** La resolución del problema puede ser dividida en las etapas siguientes:

- a) Estimar el consumo anual de  $H_2O$  necesario para destilar el deuterio consumido por un reactor de fusión de 1000 MW durante un año.
- b) Hallar la producción anual de hidrógeno electrolítico, necesaria para la destilación criogénica del deuterio que consumirá el reactor de fusión.
- c) Estimar la potencia de consumo de la electrolisis y cuántos generadores eólicos permitirían producirla.

La reacción de síntesis nuclear deuterio – tritio (12) indica que pertenecen al deuterio  $2/5$  de la masa total  $m$  del combustible utilizado para generar determinada energía. Es decir se debe producir  $m_D = 2/5 m$  de deuterio.

La masa molar de los átomos de deuterio es  $M_D = 2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$ . El número de moles de átomos de ese elemento necesarios para producir energía 1000 MW durante un año es

$$N_D = \frac{m_D}{M_D} = \frac{2}{5} \frac{m}{M_D} \quad (14)$$

donde  $m = 250 \text{ kg}$ .

Sea  $x = 1,5 \cdot 10^{-4}$  la proporción de átomos de deuterio en el total de átomos de  $H_2O$ . Es decir, por cada mol de

átomos en el agua hay  $x$  de deuterio. La cantidad de moléculas de agua que contienen  $N_D$  moles de deuterio es

$$N_{H_2O} = \frac{1}{3} \frac{N_D}{x} = \frac{2}{15} \frac{m}{xM_D} \quad (15)$$

donde el factor  $1/3$  considera que cada mol de  $H_2O$  tiene 3 moles de átomos.

De este modo, la masa de agua que se debe someter a la electrólisis es

$$m_{H_2O} = N_{H_2O} M_{H_2O} = \frac{2}{15} \frac{m}{x} \frac{M_{H_2O}}{M_D} \quad (16)$$

donde  $M_{H_2O}$  es la masa molar del agua.

Haciendo los cálculos pertinentes resulta que para producir mediante fusión nuclear energía eléctrica a 1000 MW de potencia, es necesario hacer la electrólisis de  $N_{H_2O} = 1,11 \cdot 10^8$  mol o  $m_{H_2O} = 2,0 \cdot 10^6$  kg de agua. Es decir utilizar anualmente  $2,0 \cdot 10^3$  m<sup>3</sup> de esa sustancia en estado líquido.

b) La descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno mediante la electrólisis de una disolución de KOH en agua responde a la fórmula (5). Es decir, por cada mol de  $H_2O$  se obtiene uno de  $H_2$ . De este modo, se generarán  $N_{H_2O}$  moles de hidrógeno para producir el deuterio necesario. La masa correspondiente a esa cantidad de sustancia es:

$$m_{H_2} = N_{H_2O} M_{H_2} = 2,22 \cdot 10^5 \text{ kg} \quad (17)$$

El volumen que en condiciones normales ocupa la cantidad de  $H_2$  calculada es:

$$V_{H_2} = N_{H_2O} \frac{RT_0}{P_0} \quad (18)$$

Por lo tanto, el flujo medio horario con que se debe generar el hidrógeno es:

$$\Phi_{H_2} = \frac{V_{H_2}}{8760h} = \frac{N_{H_2O}}{8760h} \frac{RT_0}{P_0} = 288 \text{ Nm}^3/h \quad (19)$$

c) Considerando que la potencia media de consumo por cada unidad del flujo (Nm<sup>3</sup>/h) de hidrógeno generado es 6 kW, resulta que la electrólisis de toda la masa estimada de agua demandará la potencia media  $P_E = 6 \cdot 288 \text{ kW} = 1,73$  MW.

Actualmente es habitual utilizar generadores eólicos con una potencia nominal de 1 MW. En virtud de la variabilidad de la velocidad del viento es razonable estimar un 70–80 % de aprovechamiento de dicha potencia. De este modo, tres de esos generadores eólicos serán suficientes para realizar la electrólisis del agua que proporcione el deuterio consumido por un TOKOMAK que produce electricidad a 1000 MW. Se han puesto en marcha aerogeneradores con estatores superconductores de 10 MW de potencia nominal [22, 23]. Uno solo bastaría

para garantizar el funcionamiento de tres centrales de fusión como la considerada.

#### IV. CONCLUSIONES

La temática de la economía del hidrógeno permite actualizar la enseñanza universitaria de la Física durante la formación de especialistas en esa ciencia fundamental y en otros campos, como los de la Química e Ingeniería. Ello supone plantear nuevos objetivos y contenido a los cursos universitarios. En el proceso de enseñanza-aprendizaje es necesario considerar, en primer lugar, el contexto social y el estado de la tecnología que demandan la utilización de un combustible inorgánico como el hidrógeno. En segundo lugar, es preciso examinar los fundamentos científicos de la producción, almacenamiento y aprovechamiento del hidrógeno como combustible. Todo ello está ineludiblemente asociado al planteamiento y la resolución de problemas.

Nuestro trabajo es sólo un esbozo de la inclusión de una nueva temática en los cursos universitarios de Física. Por eso hemos considerado solamente algunos aspectos directamente relacionados con la asignatura. Un análisis más amplio y profundo podría tratar exclusivamente un problema docente multidisciplinar que preste atención, por ejemplo, a cuestiones de optimización de procesos mediante técnicas de inteligencia artificial o a la descripción pormenorizada de una práctica de laboratorio [24].

El desarrollo intensivo en el campo de las energías renovables demanda modificar sistemáticamente los materiales docentes utilizados para tratar la temática en los cursos universitarios. Por ello, y atendiendo a la urgencia de avanzar hacia la creación tecnologías comerciales, es imprescindible incorporar a la práctica docente, de forma inmediata, los resultados de mayores perspectivas obtenidos por la investigación e innovación.

Nota: Este documento de trabajo es una contribución a la Década de la Educación por un futuro sostenible (2005-2014) instituida por Naciones Unidas para hacer frente a la actual situación de emergencia planetaria (<http://www.oei.es/decada>).

#### REFERENCIAS

- [1] Solomon, S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt, K.B., Tignor M., H.L. Miller H. L., IPCC, *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (2007).
- [2] Parry M. L., Canziani O. F., Palutikof J. P., Vander Linden P. J., Hanson C. E., IPCC, *Summary for Policymakers, In: Climate Change 2007: Impacts,*

*Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 7-22, (2007).

[3] Midilli, M. Ay, I. Dincer, M. A. Rosen, *On hydrogen and hydrogen energy strategies I: current status and needs. Renewable and Sustainable Energy Reviews* **9**, p.p. 255–271, (2005).

[4] Midilli, M. Ay, I. Dincer, M. A. Rosen, *On hydrogen and hydrogen energy strategies II: future projections affecting global stability and unrest. Renewable and Sustainable Energy Reviews* **9**, pp. 273–287 (2005).

[5] Nejat Veziroglu T., *Quarter Century of hydrogen movement 1974–2000*, International Journal of Hydrogen Energy **25**, pp. 1143-1150, (2000).

[6] Meade A., *50 years of fusion research. Nuclear Fusion* **50**, (2010).

[7] Goodman G. E., *The 18 Year Alternative: A Business Proposal to Develop Commercial Fusion Energy by 2021—The Fusion Power Corporation. Journal of Fusion Energy* **21**, 2002, <http://www.iter.org/>.

[8] Saxe M. A., Folkesson, P. Alvfors. *A follow-up and conclusive report on the attitude towards hydrogen fuel cell buses in the CUTE project—From passengers in Stockholm to bus operators in Europe*, International Journal of Hydrogen Energy **32**, pp. 4295–4305, (2007).

[9] Kaia, T., *et al.*, *A demonstration project of the hydrogen station located on Yakushima Island—Operation and analysis of the station*, International Journal of Hydrogen Energy **32**, p.p. 3519–3525, (2007).

[10] *El primer avión propulsado con hidrógeno logra volar 20 minutos*, El País, (2008).

[11] *Despega el primer avión propulsado por pilas de hidrógeno y oxígeno*, Europa Press, (2009).

[12] Drolet B., *et al.*, *The euro–quebec hydro-hydrogen pilot project [EQHHPP]: Demonstration phase*, Int. J. Hydrogen Energy **21**, pp. 305, 3, 16, (1996).

[13] Mitsugi C., Harumi A., Fukuda Kenzo, *We-net: japanese hydrogen program*, Int. J. Hydrogen Energy **23**, pp. 159-165, (1998).

[14] Tsuneo Hijikata. *Research and development of international clean energy network using hydrogen energy (WE-NET)*, International Journal of Hydrogen Energy **27**, pp. 115–129, (2002).

[15] Bouziane Mahmah et al., *MedHySol: Future federator project of massive production of solar hydrogen*, Int. J. Hydrogen Energy **34**, pp. 4922–4933 (2009).

[16] *Estado de la Tecnología del Hidrógeno y Pilas de Combustible en España, 2007*, Plataforma Tecnológica Española del Hidrógeno y las Pilas de Combustible, Grupo de Análisis de Capacidades, Asociación Española del Hidrógeno, (2008).

[17] Rodríguez L. R., et al., *Proyecto LIFE Hydrosolar'21. Desarrollo de minicentrales de frío solar y de hidrógeno con fuentes eólica y fotovoltaica. Energías renovables, retos y futuro: Refrigeración e hidrógeno solar*, Universidad de Burgos, pp. 103-112, (2008).

[18] Manganaro J. L., *Fusion Power—A Chemical Engineering View of the Integrated Enterprise*, *Journal of Fusion Energy* **22**, (2003).

[19] Physical constants of inorganic compounds, In CRC Handbook of Chemistry and Physics, 91<sup>st</sup> Edition, (2011), <http://www.iter.org/sci/fusionfuels>.

[20] Abrahamsen B., N. Mijatovic N., Seiler E., Zirngibl T., Træholt C., *et al.*, *Superconducting wind turbine generators. Supercond, Sci. Technol.* **23** (2010), <http://www.amsc.com/windtec>

[21] Rodríguez L. R., R. Valdés, Tricio V., Lucio J. H., *De una planta eólica de hidrógeno al laboratorio de alumnos*, VI Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria, La Habana, (2011).