Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Sistema de Información Científica

I. A. Vértiz-Maldonado, C. A. González-Rodríguez, A. Miranda-Cid
Celda de combustible: análisis teórico del rendimiento eléctrico de hidrógeno almacenado en fase sólida
Científica, vol. 15, núm. 4, octubre-diciembre, 2011, pp. 189-195,
Instituto Politécnico Nacional
México

Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61422759004

Científica,
ISSN (Versión impresa): 1665-0654
revista@maya.esimez.ipn.mx
Instituto Politécnico Nacional
México

¿Cómo citar? | Fascículo completo | Más información del artículo | Página de la revista

www.redalyc.org
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Científica, Vol.15 Núm. 4, pp. 189-195,octubre-diciembre 2011.
ISSN 1665-0654, ESIME Instituto Politécnico Nacional México.

Celda de combustible: análisis teórico del rendimiento eléctrico de hidrógeno almacenado en fase sólida

I. A. **Vértiz-Maldonado**[1]
C. A. **González-Rodríguez**[2]
A. **Miranda-Cid**[2]

[1] Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco,
Instituto Politécnico Nacional.
Edificio 5, 2º piso, Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos',
Col. Lindavista, CP 07738, México, DF.
MÉXICO.
[2] Universidad Politécnica del Valle de México.
Av. Mexiquense s/n, esquina Av. Universidad Politécnica,
Col. Villa Esmeralda, CP 54910, Tultitlán, Edo de México.
MÉXICO.

Tel. (+52) 55 2145 2161, (+52) 55 5062 6460

correo electrónico (email): ia_vertizm@yahoo.com.mx

Recibido el 18 de octubre de 2010; aceptado el 16 de junio de 2011.

1. Resumen

En este trabajo se presenta una metodología para determinar el efecto del almacenamiento de hidrógeno en una estructura de fase sólida formada por hidruro de magnesio (acumulación de hidrógeno). Se realiza un análisis comparativo del porcentaje teórico que es capaz de almacenar en peso este hidruro que es del 7.59%, mientras que el obtenido en un experimento de hidruración es de 5.955% en peso. Lo anterior se llevó acabo con el fin de determinar el rendimiento de energía acumulada en 1000 g de MgH_2, para así, al determinar el volumen de hidrógeno almacenado y que esté en condición de establecer el tiempo de funcionamiento de diversos motores operando a distintos voltajes, así como, efectos de trabajo, tales como: tiempo de funcionamiento y energía consumida.

Palabras clave: hidruro, fase sólida, rendimiento, absorción.

2. Abstract (Fuel Cell: Theoretical Efficiency Electrical Analysis of Stored Hydrogen in Solid Phase)

In this paper it is proposed a methodology to determine the Hydrogen storage effect as part of a solid phase structure made from Magnesium Hydride. It is developed a comparative analysis between the theoretical storage percentage results against experimental data. The main target of this work is to determine the energy accumulated in 1000 g of MgH_2, as well as the electric current intensity and to obtain the service time that diverse motors could provide. Additionally, some working effects, are analyzed such as; work time and energy consumption.

Key words: hydride, solid phase, performance, adsorption.

3. Introducción

El hidrógeno es un elemento químico que, en condiciones normales de presión y temperatura, es un gas diatómico (H_2), incoloro, inodoro, insípido, no metálico y altamente flamable [1]. El gran inconveniente del hidrógeno al ser aplicado como fuente de energía es que no es una fuente primaria, lo que significa que debe de ser altamente procesado para poder ser utilizado. Sin embargo, una gran cualidad que presenta el hidrógeno es que puede ser comprimido y almacenado por largos periodos en recipientes a presión [2].

Actualmente, el hidrógeno tiene una gran aplicación en la generación de energía eléctrica. En particular en la alimentación de celdas de combustible para la generación de electricidad. Una de las características más ventajosas del hidrógeno es que este elemento químico es el más abundante en el universo y puede ser encontrado en la superficie terrestre con gran facilidad. El hidrógeno tiene una densidad de 0.8376 kg m^3, por lo que su almacenamiento como gas no requiere de volúmenes muy grandes [3].

Este elemento químico contiene mayor energía por unidad de masa, que algunos otros. Sin embargo, menor energía por unidad de volumen [4]. Razón por la cual, uno de los retos a vencer en la aplicación y utilización del hidrógeno

como combustible, es su almacenamiento, para lo cual es necesario definir la cantidad de energía que es posible obtener por unidad de volumen almacenado [5].

Estos conceptos, así como el ajuste a punto de las pilas de combustible, constituyen los vínculos tecnológicos que concretan el establecimiento en la economía de la utilización del hidrógeno [6].

En este trabajo se presenta el desarrollo de una metodología muy simple para determinar el valor de la carga producida por el hidrógeno y el tiempo de desempeño energético que puede proporcionar un motor accionado por este medio, se plantea así mismo, realizar una comparación con valores obtenidos de manera analítica contra los encontrados en forma experimental.

El objetivo básico del trabajo de investigación que aquí se presenta, es introducir al lector de una manera muy simple a las posibles aplicaciones de celdas de combustible de hidrógeno.

4. Generalidades teóricas

La celda de combustible de Hidrógeno, es un dispositivo electroquímico de conversión de energía, que permite el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos. Es decir, produce electricidad a partir de una fuente externa, como son el Hidrógeno y el Oxígeno. Se caracteriza por que los electrodos son catalíticos y relativamente estables [7]. Esta característica permite contar con una mejor eficiencia de las celdas de combustible, debido a las baterías electroquímicas, donde el almacenamiento de energía se encuentra limitado debido al consumo de electrodos, los que reaccionan con el electrolito, originando cambios en su estado energético, además de que se consumen reactivos sólidos que, al agotarse se eliminan o bien podrían recargarse mediante el suministro de una corriente eléctrica [8].

En este sentido, las celdas de combustible ofrecen una respuesta factible mediante sistemas de energía miniaturizados y portátiles. Aun cuando estas celdas presentan eficiencias que fluctúan entre el 35% y el 76%, son superiores potencialmente en eficiencia a cualquier otro sistema [9-10]. Cabe señalar que estos equipos ya se empiezan a utilizar en aplicaciones de baja o alta energía [10-11].

Las celdas de combustible alimentadas por hidrógeno son silenciosas, además de producir electricidad y calor, como residuo generan solo vapor de agua [12-13]. En la figura 1 se muestra el diagrama de una celda de combustible alimentada por hidrógeno, asimismo se representa la reacción química característica que se lleva a cabo en este dispositivo.

Actualmente, el mayor problema que se presenta en las celdas de combustible de hidrógeno, radica en el tiempo de duración de la celda, así como en el costo excesivo implícito en su desarrollo y manufactura, por lo que es extremadamente importante reducir los costos de producción y asegurar periodos prolongados de servicio. En este sentido, la aplicación del hidrógeno como fuente energética, ofrece una respuesta satisfactoria a los diversos requerimientos energéticos para los distintos sistemas industriales y actualmente son la mayor y mejor esperanza real para el cambio paulatino de vehículos de combustión interna a vehículos con motor eléctrico a los que se les suministra potencia por medio del hidrógeno.

Asimismo, se puede afirmar que el desempeño de la celda de combustible de hidrógeno depende directamente de la capacidad que se tenga para almacenar el hidrógeno en un sistema portátil. Lo cual se puede llevar a cabo mediante la formación de un hidruro metálico [14], que se obtiene a partir de la reacción con un metal de transición, como se muestra en la ecuación 1:

$$M + \frac{x}{2} H_2 M \leftrightarrow MH_x \qquad (1)$$

Dónde:

M	metal (magnesio)
x	moles
H_2	hidrógeno diatómico
H_x	relación atómica del hidrógeno

A partir de esta ecuación se propone llevar a cabo experimentación con la finalidad de definir diversos parámetros relativos a los volúmenes de hidrógeno que se pueden manejar u obtener para su aplicación a celdas de combustible de Hidrógeno.

5. Desarrollo experimental

En esta sección se presenta una metodología que permite determinar el porcentaje en peso de hidrógeno, que es posible obtener mediante la formación de un hidruro metálico, esto debe basarse en materiales nanoporosos, debido a que la capacidad de adsorción de un metal está íntimamente ligada al tamaño de la partícula y a la superficie expuesta de esta partícula que es sobre la que se deposita el hidruro, es posible demostrar que, a menor tamaño de partícula, el área disponible para la adsorción en una misma masa de material es mayor

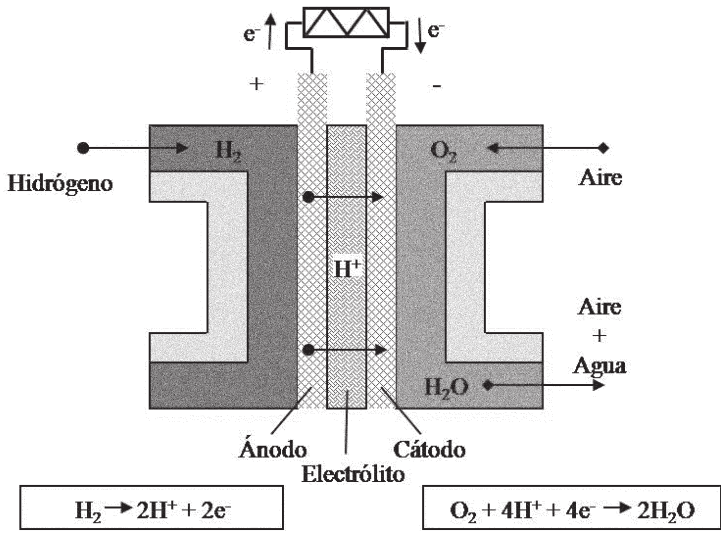


Fig. 1. Diagrama general de una celda de combustible alimentada por hidrógeno.

(véase figura 2), esto se explica mediante el siguiente análisis. En esta figura se observa que el área de las caras del cubo mayor se encuentra determinada por:

Área = (6) (S) superficie expuesta del cubo y

$$S = (l)\ (l) = l^2$$

donde

S área de una cara del cubo, siendo que el área total del cubo es $A_c = 6S = 6l^2$.

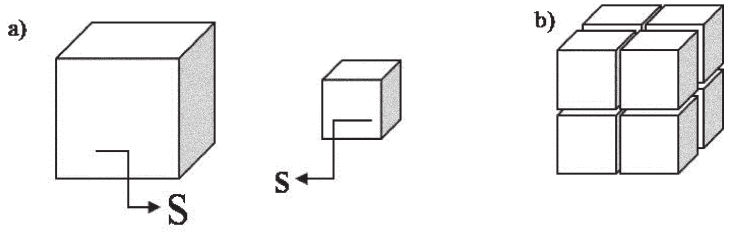


Fig. 2. Fragmentación para el hidruro: a) bloque original, b) fragmentación en 8 partes.

Al fragmentar este cubo en ocho partes (figura 2b) se tiene que para cada cubo menor su área está determinada por

$$S_{cm} = (l/2)\ (l/2) = l^4/S$$

y el área total de cada cubo menor es igual

$$A_{cm} = 6S_{cm} = 6/4l^2$$

y dado que son ocho cubos menores, el área total expuesta de estas partículas cúbicas, para el mismo volumen es del doble

$$A_{cm} = 6/4l^2\ 8 = 12\ l^2$$

Para llevar a cabo el almacenamiento de hidrógeno a partir del hidruro de magnesio, inicialmente se lleva a cabo la molienda del material que pasa por un primer proceso de molienda en el cual, en cinco horas, se obtiene lo que se puede denominar caracterización T5 (para tiempo igual a cinco horas) con lo cual se define de hecho un tamaño de partícula del material (figura 3). Al prolongar el tiempo de molienda se lleva al material a una caracterización final para un proceso de molienda de 12 horas esta caracterización es denominada T12 (figura 4) y a continuación se procede a utilizar este Hidruro para captar el hidrógeno y de ahí proceder a determinar la cantidad de hidrógeno que queda contenida en una muestra de MgH_2, la que es obtenida mediante el proceso de hidruración en que se llevó a cabo la reacción.

Un análisis termogravimétrico de la muestra de MgH_2, mostró una cantidad de 5.995 % de H_2 en peso desprendido, esto se utilizó para calcular la eficiencia de acumulación de hidrógeno. El porcentaje teórico de hidrógeno fue obtenido por la reacción:

$$Mg + 2H^+ \leftrightarrow MgH_2 \qquad (2)$$

La capacidad de almacenamiento del metal viene determinada por sus curvas características PCT (presión, concentración y temperatura). En condiciones catalíticas apropiadas y mediante un aumento de la temperatura (del orden de los 80-300 °C) es posible inducir un fenómeno de desorción que libera el hidrógeno, haciendo posible su utilización como fuente de energía [1].

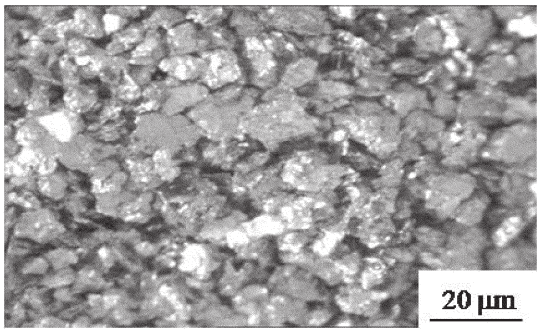


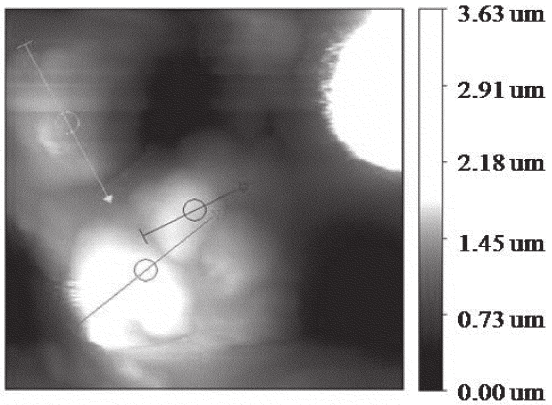
Fig. 3. Caracterización de polvo con cinco horas de molienda.

La cinética de reacción que detalla las propiedades termodinámicas del experimento entre los compuestos metal-hidrógeno de una fase, se fundamenta en la construcción de isotermas presión-concentración, conocidas como curvas PCT. Las cuales se basan en el cambio de presión del gas a temperatura constante, este proceso tiene tres etapas características que se especifican en la figura 5 y se mencionan a continuación:

Etapa 1. Región A-B; baja concentración de hidrógeno, formando solución sólida de H_2 en el metal y se define como Fase α. Punto B; saturación de la Fase α y comienzo de la nucleación (Fase β) formando un hidruro estequiométrico.

Etapa 2. Región B-C; transformación de Fase α a Fase β a presión constante, conocida como presión de equilibrio (Peq). Punto C; formación total del hidruro.

Etapa 3. Región C-D; disolución del hidrógeno en la Fase β.



Información de la imagen

Ra = 0.482 um	Rq = 0.634 um
Rzjis = 3.60 um	Rzjis = 3.62 um
S = 134.1 um²	Sratio = 1.33

	1	2	3
Ra (um)	0.208	0.102	0.221
Rzjis (um)	0.000	0.000	0.000
Rq (um)	0.256	0.125	0.252
Rz (um)	1.080	0.596	0.766
Longth (um)	4.870	4.700	2.940

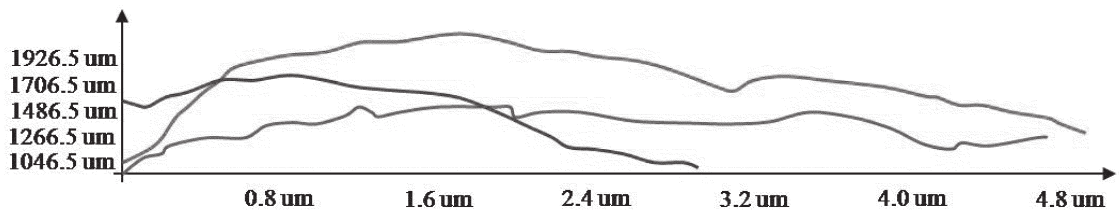


Fig. 4. Caracterización de molienda Mg 12 horas de molienda de alta energía.

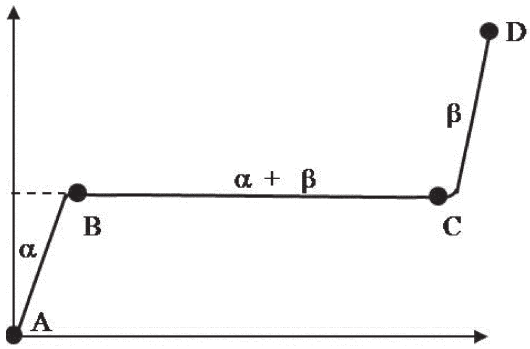


Fig. 5. Representación de H_2 contenido en el metal (Curva PTC).

En la tabla 1 [15] se muestra el porcentaje en peso de hidrógeno que es posible obtener a partir de distintos hidruros, así como la temperatura necesaria para que lleve a cabo la reacción.

6. Desarrollo analítico

Para determinar la capacidad de almacenamiento de hidrógeno en el hidruro de Magnesio (MgH_2). Es muy importante, en primera instancia determinar la cantidad de hidrógeno que puede contener una muestra de MgH_2 obtenida mediante un hidrurador. Lo cual es posible realizar a partir de la reacción química ya mencionada.

Para el desarrollo del análisis de la muestra se utilizó un equipo analizador termogravimétrico. Con el que se puede determinar la cantidad de H_2 desprendida de la muestra de MgH_2. Lo cual se utiliza para calcular la eficiencia de acumulación de Hidrógeno. El porcentaje teórico de hidrógeno obtenido por la reacción se expresa por medio de la ecuación 3:

Tabla 1. Relación de hidruros, y temperatura para que se lleve a cabo la reacción [15].

Hidruro metálico	Porcentaje en peso H_2	ΔH (KJ/mol-H_2)	T (°C)
PdH	0.60	−33.5	25
VH_2	3.80	−17.3	35
AlH_3	10.00	−46.0	150
KH	2.50	−57.7	415
NaH	4.20	−56.5	425
MgH_2	7.59	−75.3	300
CaH_2	4.80	−181.5	600
LiH	12.60	−116.3	720

$$MgH_2 \leftrightarrow Mg + 2H^+ \qquad (3)$$

Si se considera una muestra base de 1000 g de MgH_2 se tiene que:

$$1000\ g\ MgH_2 \left| \frac{1\ mol\ MgH_2}{27.321 g\ MgH_2} \right| \frac{2\ mol\ H}{1 mol\ MgH_2} \left| \frac{1.008\ g}{1 mol\ H} \right| = 76.59 g\ H$$

A partir de esto, la cantidad de hidrógeno que se puede obtener es de 76.59 gramos. Lo que representa el 7.59% mencionado en la tabla 1. Mientras que el porcentaje real obtenido de manera experimental es del 5.995%. Por lo que es posible fijar una eficiencia de la reacción del 77.76%. Con base en el resultado experimental del hidrógeno captado, se puede determinar el tiempo que podría funcionar un motor, considérese el caso por ejemplo de un motor de 800 watts. Aplicándose el siguiente procedimiento:

6.1. Carga producida por el hidrógeno

En esta sección se presenta el desarrollo analítico para determinar la carga eléctrica que se puede producir con el volumen captado de hidrógeno.

$$76.59\ g\ H \left| \frac{1\ mol\ MgH_2}{1.08\ g\ H} \right| \frac{2\ eq}{1 mol\ H} \left| \frac{96500\ C}{1\ eq} \right| = 11\ 402\ 387\ C$$

$PM_H = 1.00796 g\ H$

Se tiene definido que:

1 equivalente químico = 96 500 Coulombs

Para el cálculo de la corriente eléctrica se considera que la potencia es el consumo de energía por unidad de tiempo y se expresa de la siguiente manera:

$$P = E/t \qquad (4)$$

Donde: P es la potencia en watts (W), E es la energía en joules (J) y t es el tiempo en segundos (s). Asimismo, la potencia se puede expresar en función del voltaje y la intensidad de corriente como:

$$P = V I \qquad (5)$$

Donde la I representa a la intensidad de corriente en Amperes (A), V es el voltaje en volts (V). De la ecuación 5 se despeja

la intensidad de corriente y se presenta de la siguiente manera:

$$I = P / V \quad (6)$$

Por lo que el flujo de electrones por unidad de tiempo se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$I = W / V \quad (7)$$

Siendo W, watts, para el motor propuesto se tendría:

$$I = \frac{W}{V} = \frac{800\ \text{W}}{110\ \text{V}} = 7.27\ \text{A}$$

La corriente o intensidad eléctrica es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorren los electrones al moverse libremente en un material conductor.

6.2. Desempeño energético del motor

Utilizando la ley de Coulomb para determinar la corriente eléctrica, la cual establece la relación que existe entre energía por unidad de tiempo y se expresa en Coulombs por segundo [17]:

$$I = C / t \quad (8)$$

Donde, despejando C de la expresión anterior se obtiene que:

$$C = I\,t \quad (9)$$

Si se considera que un equivalente químico corresponde a 96 500 coulombs, es posible determinar el tiempo operativo del motor de 800 watts de potencia. Al considerar la capacidad de hidrógeno contenido en el recipiente de diseño así como la eficiencia de la reacción, se tiene que a partir de 59.55 g de H_2, es posible establecer que el tiempo de operación del motor de 800 watts es:

$$t = \frac{11402387\ \text{A/s}}{7.2727\ \text{A}} \left| \frac{1\ \text{hora}}{3600\ \text{s}} \right| \left| \frac{1\ \text{día}}{24\ \text{horas}} \right| = 18.146\ \text{días}$$

El tiempo que podrían operar distintos motores a diferentes voltajes, utilizando la celda de combustible antes mencionada se muestra en la tabla 2.

7. Conclusiones

En el análisis que se plantea en este artículo, se determina en términos ideales, la cantidad de energía eléctrica que se puede generar con el hidrógeno en fase sólida contenido en una muestra de 1000 g de hidruro de hagnesio (MgH_2), con base en el porcentaje en peso almacenado de hidrógeno utilizando como metal anfitrión al magnesio, se puede definir el porcentaje teórico a partir de los datos de la tabla , que es de 7.59% y comparar esto con el valor obtenido mediante el método termogravimétrico que es de 5.995% en peso. Este porcentaje representa una eficiencia de almacenaje del método utilizado que es de 77.76% respecto al teórico ideal de 7.59% obtenido de la tabla 1. Lo cual permite establecer un parámetro de referencia real para proponer la descripción del análisis cuantitativo y así estimar la cantidad de energía acumulada de hidrógeno en la fase solida (MgH_2). Esta cantidad energética se pondera con base en la cantidad de energía eléctrica extraída del hidrógeno almacenado en el hidruro.

Tabla 2. Tiempo de operación de diferentes motores alimentados por el volumen de Hidrógeno de la celda de combustible a partir de 1000 g de MgH_2.

Motor HP	Potencia watts	Corriente amper/s	Voltaje volts	Tiempo días
1	745.7	7.272	110	18.140
5	3728.5	33.890	110	3.893
10	7426.9	67.790	110	1.946
1	3728.4	16.940	220	7.790
20	44741.9	108.600	440	1.210
30	223709.0	508.430	440	0.778

Para establecer la intensidad de corriente que se puede obtener a partir de un análisis atómico de hidrógeno. Se utiliza como equivalente químico el número de Faraday que es 96 500 Coulombs. Lo cual permite la obtención de la intensidad de corriente en amperes por segundo y así la estimación del rendimiento de la energía en diversos motores.

Como parte de la memoria de cálculo se incluyen los análisis teóricos de elementos que forman parte del efecto final de conversión a energía eléctrica.

También es importante mencionar, que se estima que el recipiente que se necesita para almacenar el hidrógeno, tendría dimensiones aproximadas de 10 cm de diámetro por una longitud de 40 cm. Lo cual se podría considerar aceptable para ser instalado en vehículos automotores.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo otorgado por el gobierno mexicano por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y el Instituto Politécnico Nacional para el desarrollo de este trabajo.

8. Referencias

[1] D. L. Trimm, y Z. I. Onsan, "Onboard fuel converssion for Hydrogen fuel cell driven vehicles", *Catalysis Reviews-Science and Engineering*, vol. 43, núm. 1-2, pp. 31-84, 2001.

[2] L. Schlapbach, y A. Züttel, "Hydrogen-storage materials for mobile applications", *Nature*, vol. 414, pp. 353-358, 2001.

[3] A. Lanz, J. Heffel, y C. Messer, *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies*, Ed. College of the Desert, Energy Technology Training Center, pp. 130, 2001.

[4] R. Ramachandran, y R. K. Menon, "An overview of industrial uses of Hydrogen", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 23, núm. 7, pp. 593-598, 1998.

[5] G. Luna-Sandoval, G. Urriolagoitia-Calderón, L. H. Hernández-Gómez, G. Urriolagoitia-Sosa, y E. Jiménez, "Hydrogen fuel cell design and manufacture process use for public transportation in Mexico City", *World Congress on Engineering* 2011, London, UK, pp. 2009-2014, 2011.

[6] L. Gutiérrez-Jodra, El hidrógeno, combustible del futuro, *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, V Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica, vol. 99, núm. 1, pp. 49-67, 2005.

[7] G. Luna-Sandoval, G. Urriolagoitia-Sosa, G. Urriolagoitia-Calderón, L. H. Hernández-Gómez, y J. P. Campos-López, "Fuel cells using urine as a natural electrolyte; Clean energy alternative´s new way for Hydrogen fuel", *International Material Research Congress* IMRC XX, pp. 101, 2011.

[8] G. Luna-Sandoval, L. H. Hernández-Gómez, G. Urriolagoitia-Calderón, y G. Urriolagoitia-Sosa, "Metodología de la ingeniería inversa para la construcción de una celda de combustible de Hidrógeno", VI *Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas*, pp. 1-6, 2011.

[9] D. Torres-Franco, G. Urriolagoitia-Calderón, y G. Urriolagoitia-Sosa, "Desarrollo de un proyecto para poner en circulación taxis híbridos en la ciudad de México", MT 9; *Innovación y Tecnología Industrial*, SINNCO 2010, pp. 1-23, 2010.

[10] D. Torres-Franco, G. Urriolagoitia-Sosa, L. H. Hernández-Gómez, B. Romero-Ángeles, E. R. Ruíz-Muñoz, y E. Ávalos-Villarreal, "Diseño de un montaje experimental para determinar la rentabilidad técnica de un proyecto vehículo híbrido eléctrico", *Científica*, vol. 14, núm. 1, pp. 9-15, 2010.

[11] D. Torres-Franco, G. Urriolagoitia-Sosa, G. Urriolagoitia-Sosa, L. H. Hernández-Gómez, y M. B. Parra-Castillo, "Implementación de celdas solares a un vehículo híbrido eléctrico", VIII *Simposio Internacional de la ESIQIE*, pp. 2-3, 2010.

[12] J. M. Ogden, M. M. Steinbugler, y T. G. Kreutz, "A comparison of Hydrogen, methanol and gasoline as fuel for cell vehicles; Implications for vehicles design and infrastructure development", *Journal of Power Sources*, vol. 79, núm. 2, pp. 143-168, 1999.

[13] G. Luna-Sandoval, G. Urriolagoitia-Calderón, L. H. Hernández-Gómez, E. Jiménez-López, y G. Urriolagoitia-Sosa, "Celdas de combustible de Hidrógeno; Energía limpia para el uso en el transporte público de México", 9th *Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, Medellín, Colombia, pp. 1-6, 2011.

[14] M. Melnichuk, G. Andreasen, y H. A. Peretti, *Caracterización de un prototipo de almacenador de Hidrógeno de pequeñas escala basado en hidruro metálico*, CANAMET/SAM 2006, pp. 1-6, 2010.

[15] W. Grochala, y P. P. Edwards, "Thermal decomposition of the non-interstitial hydrides for the storage and production of Hydrogen", *Chemical Reviews*, vol. 104, núm. 3, pp. 1283-1315, 2004

DOAJ

Directory of Open Access Journals

20% of peer-reviewed articles are now freely available

http://www.doaj.org