

# Development in Venezuela of energy system based in the hydrogen. I: Production of electrolytic hydrogen

**Fausto Posso**

*Departamento de Ciencias, Universidad de Los Andes. San Cristóbal 5001, Venezuela.  
fausto@ula.ve*

## Abstract

We study the viability of the first stage of the development of the Energetic System Solar-Hydrogen in Venezuela, by means of the construction and manipulation of a mathematical model of the production cost of  $H_2$ . The  $H_2$  is produced by electrolysis of water, with the hydroelectricity as the primary source, and will be destined to satisfy the energy needs of the rural sector inhabitants. The model is applied for three case studies. The results show that the production cost increases in the lapse of the simulation, whereas when it increases the  $H_2$  production in the same year, the production costs and the electrolyser cost diminished, both behaviors by effect of the scale economy. One concludes that the development of first stage energetic system proposed is viable and advantageous.

**Key words:** Energy system, mathematical model, hydrogen, electrolysis.

# Desarrollo en Venezuela de un sistema energético basado en el hidrógeno. I: Producción de hidrógeno electrolítico

## Resumen

Se estudia la viabilidad de la primera etapa del desarrollo del Sistema Energético Solar-Hidrógeno en Venezuela, mediante la construcción y manipulación de un modelo matemático del costo de producción de  $H_2$ . El  $H_2$  se produce por electrólisis del agua con la hidroelectricidad como fuente primaria y se destinará a satisfacer de energía a núcleos de población rural. El modelo se aplica a tres casos de estudio. Los resultados muestran que el costo total de producción crece continuamente en el lapso de la simulación, mientras que al aumentar la producción de  $H_2$  en un mismo año, disminuye el costo total y el costo de inversión del electrolizador, ambos comportamientos por efecto de la economía de escala. Al comparar los resultados obtenidos con los reportados en la bibliografía para el mismo método de obtención del  $H_2$  y para valores similares de producción, se evidencia las ventajas de la producción de  $H_2$  electrolítico en Venezuela. Se concluye que el desarrollo de la primera etapa del sistema energético propuesto es viable y competitivo.

**Palabras clave:** Sistema energético, modelo matemático, hidrógeno, electrólisis.

## I. Introducción

En su versión más general, por un sistema energético se entiende una estructura relacionada con la explotación, transformación y utiliza-

ción de la energía por los diferentes sectores de la sociedad (Figura 1).

En los dos últimos siglos, el sistema energético basado en fuentes fósiles (carbón, petróleo, gas natural) se ha usado intensivamente, sopor-

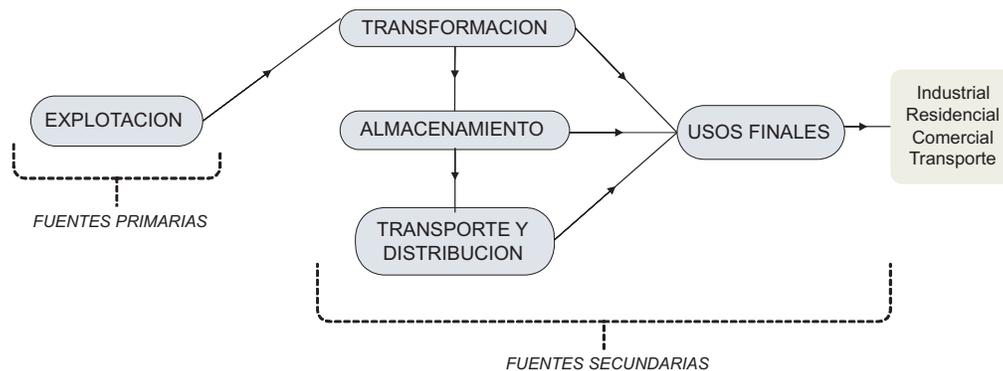


Figura 1. Estructura básica de un sistema energético.

tando el desarrollo y proporcionando confort a la sociedad. Sin embargo, cada vez son más patentes sus debilidades y efectos negativos: agotabilidad en el mediano plazo, contaminación ambiental en todos los ámbitos, y perturbaciones económicas y geopolíticas derivadas de la desigual distribución geográfica de tales fuentes [1]. Por todo esto, se reconoce la necesidad de desarrollar sistemas energéticos alternos basados en fuentes primarias que sean renovables o inagotables, amigables ambientalmente y geográficamente mejor distribuidas. De los múltiples opciones que puedan concebirse, el Sistema Energético Solar-Hidrógeno, SESH2, cumple ampliamente con estas condiciones y despierta como el sistema energético que probablemente motorizará el desarrollo humano en este siglo [2]. En el SESH2, las fuentes primarias son las energías alternativas en sus diferentes formas y las fuentes secundarias o vectores energéticos son el  $H_2$  y la electricidad, aprovechando su gran complementaridad.

Son numerosos los estudios sobre la viabilidad de la implantación del SESH2 en países y regiones [3-7]. En América Latina, Brasil y Argentina son líderes en I&D sobre la producción de  $H_2$  energético a partir de energías alternativas [8-9], proponiendo como su principal aplicación, la provisión de energía a vastos sectores rurales aislados de la red energética, el  $H_2$  podría usarse para la cocción de alimentos mediante su combustión directa en cocinas y hornos adaptados con este propósito y en celdas de combustible para la generación de electricidad para iluminación y otros usos domésticos.

En cuanto a Venezuela, aproximadamente el 30% de su población rural no dispone de servi-

cios energéticos permanentes [10], siendo difícil, costosa y por lo tanto improbable, su satisfacción por el sistema energético tradicional. En este contexto, resulta atractivo estudiar la viabilidad del desarrollo del SESH2 en Venezuela para los usos indicados. Por lo tanto, este artículo tiene como objetivo estudiar la etapa de Transformación del SESH2, consistente en la producción de  $H_2$  electrolítico a partir de hidroelectricidad, mediante la construcción y manipulación de un modelo matemático que determine los costos de producción de  $H_2$ , actuales y futuros, en función del crecimiento demográfico y demanda esperada de energía en los núcleos rurales seleccionados para la aplicación del modelo. La simulación se realiza para diferentes condiciones de operación y horizonte temporal.

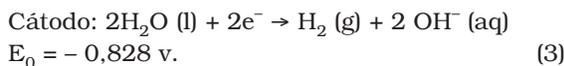
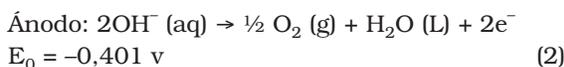
## II. Producción de $H_2$ por Electrólisis

De los diferentes métodos de producción de  $H_2$  a partir de energías alternativas se ha seleccionado a la electrólisis, con la hidroelectricidad como fuente primaria. Básicamente, la electrólisis es un proceso electroquímico que consiste en la ruptura de la molécula de agua en sus componentes mediante la aplicación de una corriente eléctrica continua. La ecuación química general que gobierna esta ruptura molecular es:



Físicamente la electrólisis tiene lugar en una celda electrolítica, que en su versión más sencilla está compuesta por dos electrodos en los cuales ocurren las reacciones de oxidación

(ánodo) y reducción (cátodo), y por un electrolito conductor que los separa. En una escala industrial, la electrólisis ocurre en los electrolizadores, equipos conformados por el arreglo en serie o en paralelo de una cantidad variable de celdas electrolíticas según los requerimientos de producción de  $H_2$ . Los electrolizadores más usados para la producción de  $H_2$  son los Alcalinos y de Intercambio Protónico, diferenciándose en el tipo de electrolito. En los primeros, el electrolito es una solución acuosa de KOH, con las siguientes las reacciones de óxido/reducción:



Para que estas reacciones ocurran, el voltaje mínimo, o potencial ideal de equilibrio, a aplicarse a la celda electrolítica es de 1,229 v, valor obtenido a partir de consideraciones termodinámicas relacionadas con el cambio en la Energía Libre de Gibbs de la reacción global. Sin embargo, el voltaje real de operación es más alto que el potencial ideal y su relación determina la eficiencia del proceso, usualmente superior al 60% [11].

### III. Modelo de Costos de Producción de $H_2$ Electrolítico

El modelo de costos a desarrollar es de tipo semiempírico y matemáticamente representado por un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales, derivadas a partir de: a. Resultados previos de la bibliografía; b. Información de fabricantes de sistemas electrolíticos y; c. Estadísticas oficiales sobre la evolución del consumo y de los costos de la energía en el sector residencial venezolano. Estructuralmente, el modelo está compuesto de dos partes, en la primera se establecen las expresiones matemáticas de la producción de  $H_2$  y del consumo eléctrico del proceso de electrólisis, incluida la compresión y purificación del  $H_2$ . En la segunda parte, se desarrolla el modelo de costos propiamente dicho. Para todos los cálculos se toma como base de referencia energética, el valor calorífico superior del  $H_2$ , HHV

#### III.1. Producción de hidrógeno

En atención a los usos finales propuestos para el  $H_2$ , se establece que la cantidad de  $H_2$  a producir dependerá directamente de las necesidades de energía de los núcleos rurales donde se aplicará el modelo de costos, según la expresión:

$$P_H = F_M C_{HE} N_H, \quad (4)$$

donde la variable  $C_{HE}$  corresponde al consumo de un habitante rural y su valor anual promedio –expresado en la forma de  $H_2$  equivalente– se ha estimado en 54,5  $\text{Nm}^3\text{H}_2/\text{hab.año}$ , valor obtenido del comportamiento histórico del consumo energético en el sector residencial venezolano [10, 12]. Por otra parte, el número de habitantes a servir de energía,  $N_H$ , dependerá del núcleo de población rural considerado, mientras que el factor  $F_M$  toma en cuenta la capacidad de utilización del electrolizador y las eventuales pérdidas por operación y manejo.

#### III.2. Consumo de energía eléctrica

Comprende la energía eléctrica requerida por: a. La electrólisis, b. La compresión y tratamiento posterior del  $H_2$  y; c. La operación de los equipos auxiliares: acondicionadores de potencia, controladores, separadores, entre otros. De todos estos, el consumo de energía eléctrica del electrolizador es el más importante y en cierta medida determina a los otros dos. El valor teórico ideal es de 3,55  $\text{kWh}/\text{Nm}^3 \text{H}_2$  [2], sin embargo, en los procesos reales este consumo es superior por las irreversibilidades de la conversión energética y las resistencias en el electrolito. En los últimos años, los esfuerzos en I&D han permitido disminuir este consumo, logrando mejoras operativas y de diseño, y la tendencia es a seguir disminuyendo [4]. Con base en la información de fabricantes y de trabajos previos de la bibliografía [13-15], se construye una expresión matemática, Ec. 5, que estima el comportamiento actual y futuro de este consumo. Esta expresión exponencial da cuenta de la variación temporal observada del consumo de energía del electrolizador y su probable evolución como consecuencia de las mejoras tecnológicas. Físicamente,  $k_1$  representa el valor ideal del consumo en el electrolizador, lo que matemáticamente corresponde a una asínto-

ta horizontal o valor final de  $C_{EE}$ . El parámetro  $T$  es, en términos dinámicos, la constante de tiempo del sistema electrolítico mientras que  $k_0$  representa el factor de amplificación del término temporal de (5). Tal como se observa en la Figura 2, el ajuste es bastante satisfactorio.

$$C_{EE} = k_0 e^{-t/T} + k_1 \tag{5}$$

En cuanto al consumo eléctrico para la compresión del  $H_2$  y para la operación de los equipos auxiliares, representan, a lo sumo, el 24% del consumo del electrolizador [16] Por lo tanto, el consumo total de energía eléctrica es:

$$C_{TE} = 1,24 C_{EE} \tag{6}$$

### III.3. Costos de producción

Están divididos en costos de los insumos, costos de inversión y costos de operación y mantenimiento. Con el fin de obtener los costos totales anuales por unidad de  $H_2$  producida se utiliza el método del ciclo de vida.

#### Costos de los insumos

Los insumos corresponden a la energía eléctrica y al agua. Con respecto a la primera, la ecuación que estima su costo incluye: a. La producción de  $H_2$ , Ec. 2; b. El consumo total de energía eléctrica, Ec. 6; c. La tarifa eléctrica industrial, cuya evolución en Venezuela (Figura 3), puede modelarse satisfactoriamente por la siguiente expresión lineal

$$T_{EI} = 1,2535 t - 0,4985; R^2 = 0,9761. \tag{7}$$

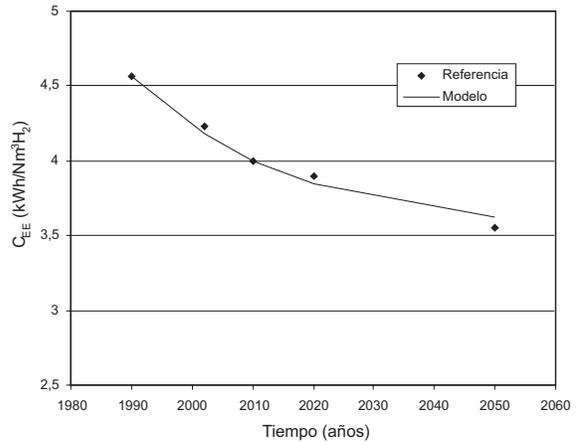


Figura 2. Evolución estimada del consumo de energía eléctrica del electrolizador.

Y la expresión no lineal que representa el costo de la energía eléctrica es:

$$C_{OE} = P_H C_{TE} T_{EI} \tag{8}$$

Con respecto al segundo insumo, se conoce que el consumo de agua en la producción de  $H_2$ , incluido enfriamiento, promedia 1 L/Nm<sup>3</sup>H<sub>2</sub> [13]. Las bajas tarifas de este insumo en Venezuela, alrededor de  $10^{-4}$  \$/L, y los volúmenes estimados de  $H_2$  a producir permiten asumir que el efecto de este costo sea despreciable, tal que:

$$C_{INS} = C_{OE} \tag{9}$$

#### Costo de la inversión

Esta constituida principalmente por la inversión en el electrolizador, fuertemente dependiente de su tamaño y en relación inversa, debido a la economía de escala. Los resultados previos

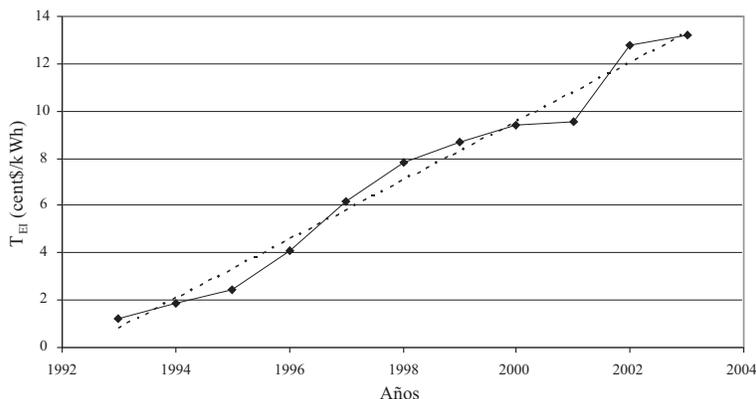


Figura 3. Tarifa eléctrica industrial en Venezuela.

[8, 17-18], sirven de base para obtener su representación matemática:

$$C_{EL} = 1450 P^{-0.2167}. \quad (10)$$

Con la potencia de la planta:

$$P = P_H C_T / DI \eta_{EL}. \quad (11)$$

Y el costo de instalación:

$$C_{IE} = C_{EL} P. \quad (12)$$

Con el factor de recuperación de capital:

$$F = \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1}. \quad (13)$$

Y el costo de la inversión anualizado:

$$C_{INV} = F C_{IE}. \quad (14)$$

#### Costo de operación y mantenimiento

Simplemente se asume como un porcentaje de los costos de instalación del electrolizador, también en este caso se toma el promedio de los valores utilizados en la bibliografía consultada [8, 19]:

$$C_{OM} = OM C_{IE}. \quad (15)$$

### III.4 Costo total de producción

El costo total anual de producción de  $H_2$  vendrá entonces dado por:

$$C_{TP} = \frac{C_{INS} + C_{INV} + C_{OM}}{P_H}. \quad (16)$$

## IV. Aplicación del Modelo

El modelo de costos desarrollado se aplicará en tres núcleos de población con diferentes porcentajes de población rural y de provisión de

energía (Tabla 1), y ubicados en el Municipio Guanarito del estado Portuguesa, en el centro occidental del país. El desarrollo del SESH2 permitiría la autonomía energética de estas zonas aisladas y deprimidas, mejorando su calidad de vida, estimulando la economía local al ser intensivas en empleo, preservando la cultura propia y el desarrollo sustentable.

La simulación se realiza para un horizonte temporal de 20 años y para un crecimiento anual del consumo de energía por habitante y de la población de 0,5% y de 2,4%, respectivamente [10].

## V. Resultados y su Análisis

El costo total de producción (Figura 4), muestra un crecimiento sostenido en todo el lapso de estudio y para todos los casos considerados. Este comportamiento se explica por el predominio del incremento del costo de los insumos sobre la disminución del costo de la inversión. Esta tendencia es más marcada a partir del año 2010, tal como lo indica el cambio en la pendiente de las gráficas del costo total.

Al considerar la contribución de los componentes del costo total de producción para un año específico (Figura 5), se observa el crecimiento sostenido del costo de los insumos, es decir de la electricidad, a expensas de los otros componentes.

El efecto de la economía de escala sobre el costo total y sobre el costo de inversión del electrolizador, se aprecia en las Figuras 6 y 7, respectivamente.

Al comparar los valores del costo total de producción con los reportados en la bibliografía consultada, para el mismo método de producción de  $H_2$  y para valores de  $P_H$  similares, se evidencia la ventaja de la producción de  $H_2$  en Venezuela (Tabla 2). Incluso para casos con valores de  $P_H$

Tabla 1  
Núcleos de Población Rural seleccionados para la aplicación del modelo

Caso	Núcleo de población	Población rural (%)	Población rural sin energía (%)	Habitantes sin energía
1	Chiripa Mamonal	100	100	225
2	Parroquia Trinidad de la Capilla	76	80	2.695
3	Municipio Guanarito	41	60	11.014

Fuente: INE [10].

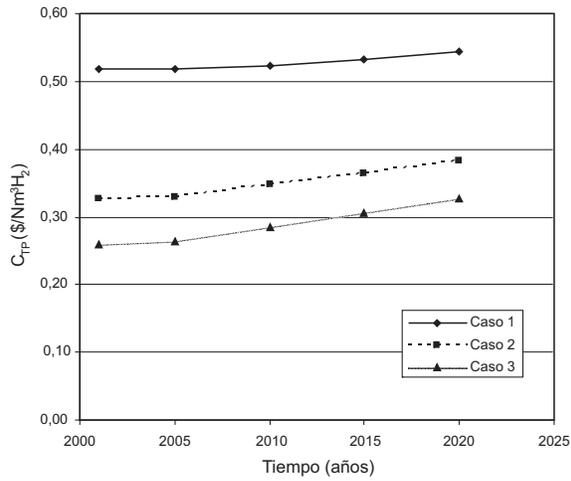


Figura 4. Evolución de los costos de producción de H<sub>2</sub>.

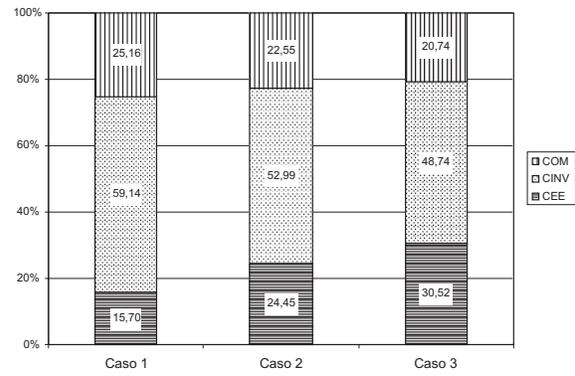


Figura 5. Distribución del costo total de producción. Año 2005.

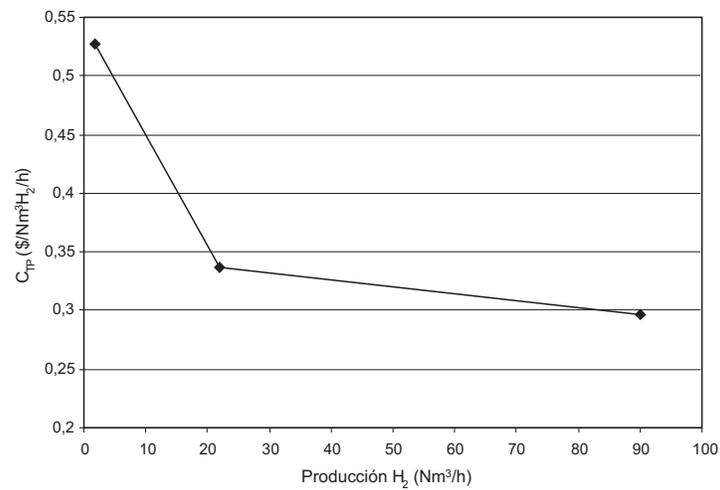


Figura 6. Variación de los costos totales con la producción de H<sub>2</sub>.

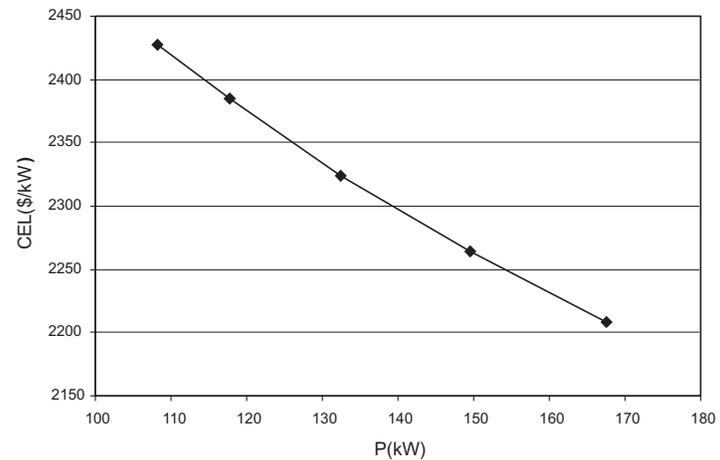


Figura 7. Variación de los costos de inversión con el tamaño del electrolizador.

Tabla 2  
Comparación de los resultados del modelo con resultados de la bibliografía

	$P_H$	$C_{TP}$
Modelo (Caso 1, 2001)	12.716	0,5185
[13]	11.580	0,6385
Modelo (Caso 3, 2005)	748.128	0,2634
[19]	34.000.000	0,3674
[8]	59.000.000	0,9200

mucho mayores, y por lo tanto con mayor efecto de la economía de escala, los costos de producción obtenidos por el modelo para Venezuela son bastante favorables,

Estos resultados están fuertemente influenciados por los bajos precios de la electricidad, como consecuencia de la política estatal venezolana de subsidios al precio de la energía. La sinceración de éste permitiría a su vez un análisis más realista de la factibilidad del desarrollo en Venezuela de la energía del  $H_2$ .

## VI. Conclusiones

Se ha estudiado la viabilidad de la primera etapa del desarrollo del Sistema Energético Solar-Hidrógeno en Venezuela, mediante la construcción y manipulación de un modelo matemático no lineal que estima los costos de la producción de  $H_2$  por electrólisis del agua, con la hidroelectricidad como fuente primaria. El modelo resultante se aplicó en tres núcleos de población rural venezolana seleccionados tomando en cuenta el porcentaje de población rural y su servicio de energía. En la evolución temporal y para todos los casos analizados, el costo total de producción de  $H_2$  aumenta producto del aumento en los insumos. Mientras que para un año específico el costo total y la inversión del electrolizador disminuyen con los niveles de producción, por efectos de la economía de escala. Al comparar los resultados obtenidos para Venezuela con los reportados en la bibliografía consultada para niveles de producción similares e incluso para otros con

efectos de economía de escala más acentuados, se obtiene un resultado sumamente favorable, en gran parte debido a los bajos precios de la energía en Venezuela como consecuencia de la política de subsidios del estado. Se concluye que, en principio, el desarrollo de la primera etapa del SESH2 en Venezuela es viable y competitivo. Sin embargo, se deben estudiar las siguientes etapas del sistema energético propuesto para establecer resultados más firmes sobre la posible implantación del SESH2 en Venezuela.

## Nomenclatura y Valores de los Parámetros del Modelo

- $C_{EE}$  : Consumo de electricidad del electrolizador (kW)
- $C_{EL}$  : Costo unitario de la planta de electrólisis ( $\$/kW^{-1}$ )
- $C_{HE}$  : Consumo anual de hidrógeno por habitante ( $Nm^3H_2 \text{ año}^{-1} \text{ hab.}^{-1}$ )
- $C_{INS}$  : Costo de insumos ( $\$/\text{año}^{-1}$ )
- $C_{INV}$  : Costo anual de inversión ( $\$/\text{año}^{-1}$ )
- $C_{OE}$  : Costo anual de electricidad ( $\$/\text{año}^{-1}$ )
- $C_{OM}$  : Costo anual de operación y mantenimiento ( $\$/\text{año}^{-1}$ )
- $C_{TE}$  : Consumo total de electricidad ( $(kWh Nm^3H_2^{-1})$ )
- $C_{TP}$  : Costo total anual de producción de hidrógeno ( $\$/\text{año}^{-1}$ )
- $d$  : Tasa anual de descuento (%) = 10
- $DI$  : Disponibilidad anual ( $h.\text{año}^{-1}$ ) = 8.328
- $F$  : Factor de recuperación de capital
- $F_M$  : Factor de operación y manejo = 1,1
- $HHV$  : Valor calorífico superior del  $H_2$  ( $MJ/Nm^3$ ) = 12,8
- $k_0$  : Constante Ec. 1 ( $kWh Nm^3H_2^{-1}$ ) =  $9,0160 \times 10^{32}$
- $k_1$  : Constante Ec. 1 ( $kWh Nm^3H_2^{-1}$ ) = 3,5100
- $n$  : Tiempo de vida (años) = 20
- $OM$  : Tasa para O&M (%) = 5
- $P$  : Potencia eléctrica de la planta de electrólisis (MW)
- $P_H$  : Producción anual de hidrógeno ( $Nm^3H_2 \text{ año}^{-1}$ )
- $t$  : Tiempo (años)

$N_H$  : Número de habitantes (hab.)  
 $T$  : Constante Ec. 1 (año<sup>-1</sup>) = 26,2417  
 $T_{EI}$  : Tarifa eléctrica industrial (\$ kWh<sup>-1</sup>)

### Referencias Bibliográficas

1. Hoffman P.: "Tomorrow's Energy", The MIT Press, Cambridge MA, 2001.
2. Dunn J.: "Hydrogen futures: toward a sustainable energy system". *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 27 (2002) 235-264.
3. Momirlan M. and Vizeroglu T.: "Current status of hydrogen energy". *Renewable and Sustainable Reviews*, Vol. 6 (2002) 141-179.
4. Solomon B. and Banerjee A.: "A global survey of hydrogen energy research, development and policy". *Energy Policy*, Vol. 34 (2006) 781-792.
5. Ilyas S., Engin I. and Abdallah M.: "Hydrogen Energy Program: a long term environmental and socio-economic impact for Pakistan". *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 34 (2006) 543-555.
6. Lattin W. and Utgikar V.: "Transition to hydrogen economy in the United States: A 2006 status report". *Int. J. of Hydrogen Energy*, (2007) in press.
7. Murria M., Lugo E. and Pimenta R.: "Toward a hydrogen economy in Portugal", *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 34 (2006) 830-837.
8. Da Silva E., Marin A., Ferreira P., Camargo J., Apolinario F and Pinto C.: "Analysis of Hydrogen, Production from combined photovoltaics, wind energy and secondary hydroelectricity supply in Brazil". *Solar Energy*, Vol. 78 (2005) 670-677.
9. Marschoff C.: "Transition from non-renewable to renewable sources: fuel cells in Antarctica as an economically attractive niche". *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 23 (1998) 303-306.
10. "Nomenclador de Centros Poblados e Indígenas", Instituto Nacional de Estadística, INE Caracas, 2004.
11. Kreuter W. and Hofmann H.: "Electrolysis: The important energy transformer in a world of sustainable energy". *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 23 (1998) 661-666.
12. "PODE: Petróleo y otros datos estadísticos". Ministerio de Energía y Minas, MEM Caracas, 2002.
13. Ivy J.: "Summary of Electrolytic Hydrogen Production", National Renewable Energy Laboratory, NREL/MP-560-36734 (2004).
14. Kruger P.: "Electric power required in the world by 2050 with hydrogen fuel production". *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 30 (2005) 1515-1522.
15. Cloumann A., d'Erasmus P., Nielsen M. and Halvorsen B.: "Analysis and optimization of equipment cost to minimize operation and investment for a 300 MW electrolysis plant". *Proceedings 12TH World Hydrogen Energy Conference Paris*, 1998 112-1123.
16. Vidueria J., Contreras A. and Veziroglu T.: "PV autonomous installation to produce hydrogen via electrolysis, and its use in FC buses". *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 28 (2003), 927-939.
17. Thomas C. and Kuhn I.: "Electrolytic Hydrogen Production Infrastructure Options Evaluation", National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-463-7903 (2005).
18. Oulette N., Rogner H. and D.: "Hydrogen from remote excess hydroelectricity. Part I: Production plant capacity and production cost". *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 20 (2005) 865-871.
19. Padró C. and Putshe V.: "Survey of the Economics of Hydrogen Technologies", National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-570-27079 (1999).

Recibido el 23 de Enero de 2007

En forma revisada el 17 de Septiembre de 2007