



**ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DEL DESARROLLO EN VENEZUELA DE UN SISTEMA
ENERGETICO BASADO EN EL HIDRÓGENO**

F. Posso¹, A. Contreras²

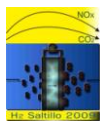
¹ ULA-Táchira. Depto. de Ciencias. Sede Paramillo Av. La ULA. San Cristóbal, C.P. 5001

² Depto. Química Aplicada a la Ingeniería, ETSII-UNED, Madrid 28040.

¹Tel (058)276-3421520, Fax (276)3405043, fausto@ula.ve

RESUMEN

Se estudia la viabilidad del desarrollo en Venezuela del Sistema Energético Hidroelectricidad/Hidrógeno, SEHH, con vista a su aplicación en sectores rurales del país que no disponen de servicios permanentes y seguros de energía. El estudio se realiza mediante la elaboración y posterior simulación de un modelo matemático para cada uno de los componentes del sistema energético: transformación, almacenamiento, transporte y distribución, y usos finales. Estructuralmente, los modelos están conformados por un submodelo de energía y un submodelo de costos. El modelo del SEHH en su conjunto se obtiene de la interconexión de los modelos de los componentes. La simulación se hace para las condiciones de operación y valores de los parámetros más favorables para los fines propuestos, utilizando el mismo horizonte temporal para todos los casos. Los resultados indican que la producción anual de H₂ debe aumentar para satisfacer las crecientes necesidades de energía de la población rural considerada. También que los costos totales anuales del SEHH disminuyen en el lapso de estudio, debido principalmente a la disminución de los costos del componente Usos Finales, que marcan el comportamiento de los costos totales. La comparación de los resultados obtenidos con los resultados de la bibliografía pone de manifiesto el interés del sistema propuesto, por resultar económica y medioambientalmente idóneo para la zona seleccionada, debido fundamentalmente a la disponibilidad de energía hidroeléctrica barata en el país. Se demuestra la viabilidad actual del desarrollo del SEHH al compararlo con la opción de suministro de energía eléctrica a los centros poblados rurales por la vía tradicional de tendido eléctrico



1.- Introducción

El propósito de este trabajo es estudiar la viabilidad, técnica y económica, del desarrollo en Venezuela de un sistema energético renovable, el Sistema Energético Hidroelectricidad/Hidrógeno, SEHH, con el fin de cubrir las necesidades de energía en hogares rurales del país. El estudio se realiza mediante el modelado matemático y posterior simulación del sistema energético considerado.

2.- La estructura del SEHH y de su modelo

La estructura del SEHH incluye los componentes de: Transformación, Almacenamiento, Transporte y Distribución, y Usos Finales. La estructura del modelo tiene dos partes: una, relacionada con el modelo de cada uno de los componentes del SEHH, el *modelo de los componentes*; y la otra, asociada con el modelo del SEHH visto como un todo, llamado el *modelo global*

3. - El Modelo de los Componentes

Está formado por dos submodelos: a. el submodelo de energía, cuyo propósito es establecer las estructuras matemáticas de los diferentes fenómenos físicos que suceden en los componentes; y b. el submodelo de costos, que estima los costos de la inversión, de los insumos, de la operación y mantenimiento, y los costos totales

3.1. - Modelo del componente Transformación

De las diferentes maneras de producir al vector H_2 a partir de energías renovables, se selecciona la electrólisis a partir de la hidroelectricidad, tomando en cuenta el gran potencial hidráulico de Venezuela¹.

3.1.1.- Submodelo de energía

Producción de H_2 : depende directamente del consumo anual de energía en el sector rural venezolano, según:

$$P_H = F_C C_{HE} N_H \quad (1)$$

Donde C_{HE} equivale al consumo de energía rural *per cápita* igual a $54,5 \text{ Nm}^3 H_2$ ¹ para el año 2001, mientras N_H es igual al número de habitantes a servir de energía es N_H .

Consumo de electricidad: Requerida para: a. La electrólisis, b. La compresión y tratamiento posterior del H_2 y, c. La operación de los equipos auxiliares. Con base en la información de fabricantes y de la bibliografía^{2,3}, se construye una expresión matemática del comportamiento actual y futuro del consumo de energía, E_E :

$$E_E = k_0 e^{-t/T} + k_1 \quad (2)$$

El consumo eléctrico del tratamiento y compresión de los gases y de los equipos auxiliares representa cada uno el 12 % de E_E ⁴. Por tanto, el consumo total de electricidad en la producción de H_2 es:

$$C_T = 1.24 E_E \quad (3)$$

3.1.2.- Submodelo de Costos

Costo de los insumos: comprende el costo de la energía eléctrica y del agua. El primero se calcula de:

$$C_{EE} = P_H C_T T_{EI} \quad (4)$$

El consumo de agua en la producción de H_2 promedia $1 \text{ l/Nm}^3 H_2^3$. Las bajas tarifas del agua en Venezuela, $10^{-4} \$/l$, y los volúmenes estimados de H_2 a producir permiten despreciar el efecto de este costo, tal que:

$$C_{INP} = C_{EE} \quad (5)$$

Costo de la inversión: corresponde al costo del electrolizador y su expresión matemática⁵ es de la forma:

$$C_{EL} = 1499.74 P_o^{-0.2167} \quad (6)$$

Donde la potencia de la planta se obtiene de:

$$P_o = P_H C_T / DI \quad (7)$$

Para el cálculo anualizado se define el Factor de Recuperación de Capital como:

$$F = \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1} \quad (9)$$

Por tanto el costo de la inversión anualizada es:

$$C_{IP} = F C_{EL} \quad (10)$$

Costo de la O&M: se asume como un porcentaje de C_{IP} ⁵. Por tanto, el costo total anual de producción es:

$$C_{TP} = 1.05 C_{IP} + C_{INP} \quad (11)$$

3.2.- Modelo del componente Almacenamiento

El H_2 se almacena en recipientes a presión. En este caso, el sistema de almacenamiento está formado por la Unidad de Compresión, UC, y la Unidad de Almacenamiento, UA, propiamente dicha.

3.2.1.- Submodelo de energía

Energía del compresor: depende de la densidad de almacenamiento deseada según:

$$E_C = 0.323 P^{0.4016} \quad (12)$$

Tamaño del compresor: depende de la cantidad de H_2 a comprimir -la cual se corresponde con la producción horaria del sistema electrolítico- y de la energía requerida por el trabajo de compresión, Ec. 12:

$$T_C = P_{HH} E_C \quad (13)$$

Potencia total requerida: si la potencia consumida en el enfriamiento del H_2 es igual al 10 % de E_C ⁶, entonces:

$$P_T = 1.1 T_C \quad (14)$$

Capacidad de la UA: depende del peso de H_2 a almacenar, el cual se obtiene de:

$$P_{HA} = P_{HH} T_A \quad (15)$$

Además, en el cálculo de la capacidad de la UA se incluye un Factor de Sobrediseño, F_{SD} . Entonces:

$$C_A = F_{SD} P_{HA} \quad (16)$$

Relación entre la presión y el volumen de la UA: representada por la ecuación de estado de Peng-Robinson⁷:

$$P = \frac{RT}{V_A - b} - \frac{a\alpha}{V_A^2 + 2bV_A - b^2} \quad (17)$$

3.2.2.- Submodelo de costos

Costo de los insumos: corresponde al costo de la potencia eléctrica según, :

$$C_{INA} = C_P = P_T T_{EI} H_{OP}/\eta_{ELEC} \quad (18)$$

Costo de la Inversión: para la UC, dependen de su tamaño y de la presión de almacenamiento. Para estimar su efecto, se utilizan los factores de escala propuestos por Amos⁸

$$F_{P1} = (P/P_B)^{0.18} \quad F_T = (T_C/T_B)^{0.8} \quad (19)$$

Por tanto, los costos de inversión de la UC son:

$$C_{IC} = C_{UCB} F_{P1} T_B F_T \quad (20)$$

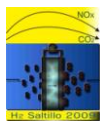
En el caso de la UA, estos costos dependen de su tamaño según un costo unitario, C_{UA} . El efecto de P el tamaño se ha establecido en la Ec. 17, mientras que C_{UA} debe aumentar con P . De la información de la bibliografía^{4,6} se obtiene la siguiente expresión:

$$C_{UA} = 0.8815 e^{0.0084P} \quad (20)$$

También en este caso se incluyen dos factores, F_{P2} y F_V ¹¹, que representan el ajuste en P y V_A :

$$F_{P2} = (P/P_B)^{0.44} \quad F_V = (V_A/V_B)^{0.75} \quad (21)$$

Los costos de inversión de la UA serán por tanto:



$$C_{IUA} = C_{UA} F_{P2} V_B F_V \quad (22)$$

Y los costos totales de inversión:

$$C_{TI} = C_{IC} + C_{IUA} \quad (23)$$

Con un costo anual de la inversión de:

$$C_{IA} = F C_{TI} \quad (24)$$

Costos de O&M: se toman como un porcentaje de los costos de inversión de cada unidad⁵, tal que:

$$C_{OC} = 0.15 F C_{IC} \quad C_{OA} = 0.02 F C_{IA} \quad (25)$$

Y el costo anual de la O&M es:

$$C_{OMA} = C_{OC} + C_{OA} \quad (26)$$

El costo total anual del almacenamiento es:

$$C_{TA} = C_{IA} + C_{OMA} + C_{INA} \quad (27)$$

3.3.- Modelo del componente T&D

El H₂ se lleva hasta los hogares rurales en forma comprimida a 200 bares de presión en bombonas de 50 l de volumen geométrico y transportado por carretera en camiones.

3.1. Modelo de energía

Contenido energético de la bombona: depende del peso de H₂ contenido en ella, descrito por la Ecuación 17:

$$P_{HB} = 0.7625 \text{ kg/bombona} \quad (28)$$

Por tanto, el contenido energético de la bombona es igual a:

$$C_E = P_{HB} \times HHV = 30.27 \text{ kWh/bombona} \quad (29)$$

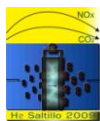
Cantidad de bombonas: el consumo de bombonas por cada habitante rural es:

$$N_{BHAB} = \frac{C_{HE}}{C_E} = 6,3 \text{ bombonas/hab.año} \quad (30)$$

Ya que un hogar rural promedio venezolano está integrado por cinco miembros¹:

$$N_{BH} = 31.5 \text{ bombonas/hg.año} \quad (31)$$

3.3.2. - Submodelo de costos



Costo de la inversión: corresponde a los camiones y a las bombonas. El primero, según su costo unitario y de la cantidad necesaria de ellos para realizar un determinado ciclo de distribución, según:

$$C_{ICA} = C_{UCA} N_{CA} \quad (32)$$

Cada hogar rural dispondrá simultáneamente de dos bombonas. Por tanto, el número de bombonas a adquirir, considerando además un factor de contingencia del 10 %, es:

$$N_B = 2,2 N_{HOG} \quad (33)$$

Entonces, el costo de inversión de las bombonas para un costo unitario C_{UB} , es:

$$C_{IB} = C_{UB} V_{BO} N_B \quad (34)$$

De manera que el costo de inversión del T&D es:

$$C_{TIT} = C_{IC} + C_{IB} \quad (35)$$

Para un tiempo de vida de 5 años para los camiones y de 10 años para las bombonas⁹, se tiene:

$$C_{ICAA} = F_{RC} C_{ICA} \quad (36)$$

$$C_{IBA} = F_{RB} C_{IB} \quad (37)$$

El costo de la inversión anualizada quedará:

$$C_{IT} = C_{ICAA} + C_{IBA} \quad (38)$$

Costos anuales de operación: corresponden al combustible, a la operación del camión y a la mano de obra. Para estimarlos se definen las siguientes variables:

Costo Anual Combustible: $C_{CB} = P_{CB} C_{AC} \quad (39)$

Costo Conductor: $C_C = C_{HC} T_{OA} \quad (40)$

Costo Mano de Obra: $C_{MO} = C_{HMO} T_{CD} \quad (41)$

Y el Costo Anual de Operación del T&D es:

$$C_{OAT} = C_C + C_{MO} + C_{CB} \quad (42)$$

Costos anuales de mantenimiento: pueden estimarse como el 5 % de la inversión anualizada⁹, tal que:

$$C_{MA} = 0,05 C_{IT} \quad (43)$$

Los costos totales anuales de T&D son:

$$C_{TT} = C_{IT} + C_{OA} + C_{MA} \quad (44)$$

3.4.- Modelo del componente Usos Finales

El H_2 se utilizará en los hogares rurales para la generación de calor y de electricidad, considerando las diferentes las tecnologías aplicables en este caso¹², las condiciones de operación, el nivel cultural y las condiciones socioeconómicas de la población rural venezolana¹⁰, se ha optado por la utilización exclusiva de las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico, PEM, para ambos usos.

3.4.1 Submodelo de energía

Ecuación de polarización: para representarla se utiliza la representación de Santarelli¹¹:

$$V_c = E - (D_c + i_n)r - A \ln\left(\frac{D_c + i_n}{i_o}\right) + B \ln\left(1 - \frac{D_c + i_n}{i_l}\right) \quad (45)$$

Número de celdas: se obtiene de la siguiente relación¹⁶, con un área del electrodo, A_c , igual a 100 cm^2 .

$$N_p = \frac{P_{SA}}{D_c V_c A_c} \quad (46)$$

Eficiencia de la celda: para cuantificarla se utiliza la llamada Eficiencia del Voltaje¹² igual a:

$$EFI = \frac{V_c}{1,482 \text{ V}} = 0,675 V_c \quad (47)$$

Consumo de H_2 : su valor se obtiene de la relación:

$$C_{HR} = \frac{E_{EA}}{EFI_X H H V_X F_u} \quad (48)$$

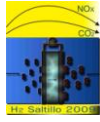
Donde E_{EA} es directamente proporcional al consumo energético anual de un habitante rural, tal que:

$$E_{EA} = F_P C_{HE} \quad (49)$$

Conversión y adecuación de la señal de salida: representado por:

$$P_{SA} = F_{CA} P_{SC} \quad (50)$$

3.4.2.- Submodelo de Costos



Costos de inversión: se dividen en costos fijos y costos variables⁵. Los primeros o costos del equipamiento, no cambian con N_C . Los segundos, o costos de las celdas, C_C , si varían con la cantidad de ellas según:

$$C_C = C_{CU} N_C \quad (51)$$

Además, se debe incluir el costo del convertidor y adecuador de señal, representado por:

$$C_{CV} = C_{UCV} P_{SA} \quad (52)$$

La expresión para los costos de inversión es:

$$C_{ICE} = C_{EQ} + C_C + C_{CV} \quad (53)$$

En el cálculo anualizado se utiliza un tiempo de vida de 20 años para los equipos y de 5 años para la celda⁵:

$$C_{EQA} = F_{EQ} C_{EQ} \quad C_{CA} = F_C C_C \quad (54)$$

Para el convertidor/adecuador se considera un tiempo de vida similar al del equipamiento, tal que:

$$C_{CVA} = F_{EQ} C_{CV} \quad (55)$$

Y la expresión para la inversión anual es:

$$C_{IU} = C_{EQA} + C_{CA} + C_{CVA} \quad (56)$$

Costos de O&M: se han considerado iguales al 2,5 %⁵ de C_{IU} incluyendo además las cocinas eléctricas.

$$C_{OMU} = 0,025 C_{IA} + C_{CE} \quad (57)$$

En resumen, el costo de la electricidad producida en el conjunto de celdas es:

$$C_{TU} = C_{IU} + C_{OMU} \quad (58)$$

4.- El modelo global del SEHH

El modelo global del SEHH se construye mediante la interconexión de los modelos de sus componentes y la integración de los resultados de la simulación de todos ellos.

4.1.- Submodelo de energía

Cantidad total de H_2 a producir: se obtiene de la potencia eléctrica producida, tomando en cuenta las diversas eficiencias y las pérdidas por operación, manejo y transporte del H_2 en todo el SEHH.

$$H_{AR} = \left(\frac{C_{H_2}}{EF_{IxFu}} \right) \left(\frac{1}{\eta_{ELEC}} \right) \left(\frac{E_E}{HHV_{xFc}} \right) \quad (59)$$

4.2. Submodelo de costos

Los costos totales anuales del SEHH se calculan como:

$$C_{TS} = \frac{C_{TP} + C_{TA} + C_{IT} + C_{TU}}{H_{AR}} \quad (61)$$

Similarmente, los costos anuales de inversión, de insumos y de O&M del SEHH son, respectivamente:

$$C_{IS} = \frac{C_{IP} + C_{IA} + C_{IT} + C_{IU}}{H_{AR}} \quad C_{INS} = \frac{C_{INP} + C_{INA} + C_{INT} + C_{INU}}{H_{AR}} \quad C_{OMS} = \frac{C_{OMP} + C_{OMA} + C_{OMT} + C_{OMU}}{H_{AR}} \quad (70)$$

4.3. Pautas para la simulación del modelo global

1. Los poblados rurales a servir de energía están ubicados en una parroquia rural en el centro occidente del país. Inicialmente la cantidad total de hogares es de 539¹⁰, estimándose un crecimiento anual de la población y del consumo energético de los hogares del 2 %²⁰.
2. La presión de almacenamiento es de 200 bares, valor más usado técnica y comercialmente
3. Para el Transporte y Distribución se considera la atención del 100 % de los hogares rurales indicados.
5. La celda PEM opera A a 500 mA/cm², 0,64 V y una eficiencia del 43 %. Se contemplan dos escenarios de disminución de los costos unitarios de las celdas PEM, C_{UA}, Optimista y Conservador.
6. El horizonte temporal para la simulación es de 20 años. Los valores de todos los parámetros de los modelos se pueden obtener de [13].

4.-Resultados

La variación de C_{TS} se presenta en la Figura 1, observándose, para ambos escenarios, una disminución en todo el período de la simulación, siendo más severa en el segundo de ellos, que estima un decremento más pronunciado de los costos unitarios de la celda.

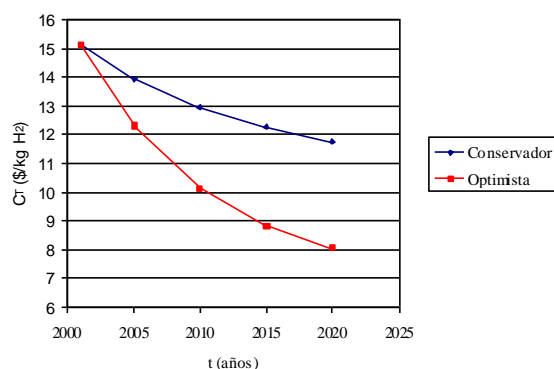


Figura 1. Evolución de los costos totales del SEHH

El aporte porcentual de los costos de cada componente al C_{TS} se muestra en la Figura 2. Se observa que la contribución del componente Usos Finales predomina, aunque su aporte disminuye a lo largo del lapso. Por el contrario, la contribución del componente Producción aumenta continuamente.

La variación de los costos de cada componente, según su tipo, se muestra en la Figura 3, evidenciándose la disminución de los costos de Inversión y de O&M. Los primeros debido a la disminución en los costos del electrolizador y de las celdas de combustible; y los segundos, por ser simplemente un porcentaje de los costos de inversión de cada componente. Por otra parte, los costos de los insumos -potencia eléctrica- aumentan durante todo el lapso, al requerirse una mayor cantidad de H_2 . Al balancear ambos comportamientos, prevalece la disminución de los dos primeros tipos de costos, en especial los costos de inversión.

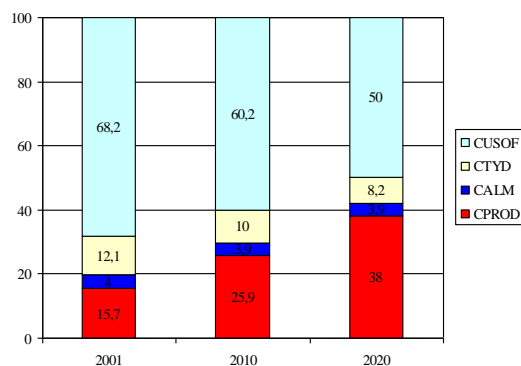


Figura 2. Contribución porcentual de los costos de los componentes a los costos totales. Escenario optimista

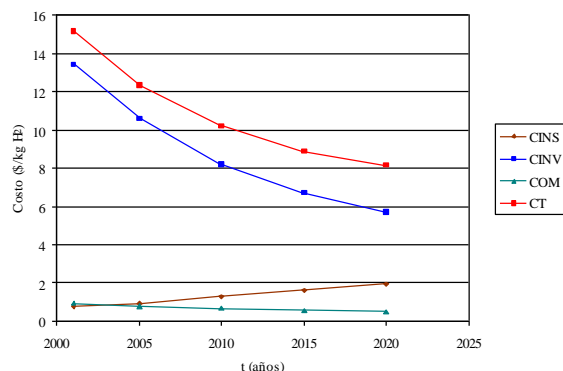


Figura 3. Variación temporal de los costos según su tipo

Finalmente, la comparación de los resultados de este estudio con los obtenidos en otro con un propósito muy similar²⁴ se muestran la Tabla 1. Los mismos son claramente favorables para el caso de Venezuela.

Tabla 1. Comparación de los resultados de nuestro modelo con los de [14]

	Fuente Primaria	Producción de H ₂ (kg/año)	Costos Totales (\$/kg)
Modelo (2005)	Hidroelectricidad	51.402	13, 9 (Esc. I)
[14]	Solar	1.663	322
[14]	Eólica/Hidro	1.663	109,1
[14]	Eólica	1.663	179,1

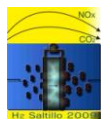
7.- Conclusiones

Se ha determinado la viabilidad actual y futura del desarrollo en Venezuela del SEHH, mediante el modelado y simulación de todos sus componentes y del sistema global. El modelo resultante se emplea para estimar los costos de la utilización del SEHH en la parroquia rural Trinidad de la Capilla, ubicada en el centro occidente del país, con el fin de cubrir las necesidades energéticas de sus hogares. Para las condiciones de operación y escenarios considerados, los resultados indican que los costos totales del SEHH disminuyen en todo el lapso de la simulación, en gran parte debido a la disminución de los costos del componente Usos Finales que marcan el comportamiento de aquellos. Los costos de la implantación del SEHH son claramente favorables

Referencias

¹ A. Contreras, F. Posso and T. Veziroglu, *Int. J. Hydrogen Energy*, 32 (2007) 1219

² P. Kruger, *Int. J. Hydrogen Energy*, 25 (2000) 1023

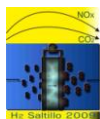


IX Congreso Internacional de la SMH, Saltillo 2009

- ³ J. Ivy, *Summary of Electrolytic Hydrogen Production*, NREL/MP-560-36734, National Renewable Energy Laboratory USA (2004)
- ⁴ J. Vidueria, A. Contreras and T. Veziroglu, *Int. J. Hydrogen Energy*, 28 (2003) 927
- ⁵ E. Da Silva, A. Marin and P. Ferreira, *Solar Energy* 78 (2005) 670
- ⁶ D. Simbeck and E. Chaing *Hydrogen supply: cost estimate for hydrogen pathways-Scoping Analysis*, NREL/SR-540-32525, National Renewable Energy Laboratory USA (2002)
- ⁷ D. Peng and D. Robinson *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 15 (1976) 58
- ⁸ W. Amos *Costs of Storing and Transporting Hydrogen*, NREL/TP-570-25106, National Renewable Energy Laboratory USA (1998)
- ⁹ Fuel Cell Handbook (Seventh Edition) DOE-USA (2004)
- ¹⁰ *Atlas del Desarrollo Humano en Venezuela*, Instituto Nacional de Estadística de Venezuela, (2004)
- ¹¹ M. Santarelli and D. Pellegrino, *Renewable Energy* 20 (2005) 493
- ¹² A. Kazim *Energy Conversion Management* 42 (2001) 763
- ¹³ F. Posso *Modelado y Simulación del desarrollo en Venezuela del sistema energético Hidroelectricidad/Hidrógeno*. Tesis Doctoral ETSII-UNED, España (2008)
- ¹⁴ D. Young, G. Mill and R. Wall R. *Int. J. Hydrogen Energy*, 32 (2007) 997

Nomenclatura

C_A :	Capacidad de la UA, kg	C_{AC} :	Consumo anual de combustible, l/año
C_C :	Costos de las celdas, \$	C_{CA} :	Costo de las celdas anualizado, \$/año
C_{CE} :	Costo de la cocina eléctrica, \$	C_{CU} :	Costos unitarios de la celda, \$/kW
C_{CV} :	Costo convertidor, \$	C_{CVA} :	Costo convertidor anualizado, \$/año
C_E :	Contenido energético bombona, kWh/bom	C_{EE} :	Costo electricidad Producción, \$/Kwh
C_{EH} :	Consumo de energía anual por hogar, kWh/año	C_{EL} :	Costo electrolizador, \$
C_{EQ} :	Costos de equipamiento, \$	C_{EQA} :	Costo de equipamiento anual, \$/año
C_{HC} :	Costo por hora del conductor, \$/hr	C_{IUA} :	Costo de inversión de la UA, \$
C_{IA} :	Costo inversión anual del Almacenamiento, \$/año	C_{IB} :	Costo inversión de las bombonas, \$
C_{IBA} :	Costo inversión bombonas, \$/año		
C_{IC} :	Costo de inversión de la UC, \$	C_{ICA} :	Costo inversión de los camiones, \$
C_{ICAA} :	Costo anual inversión de los camiones, \$/año	C_{IE} :	Costo instalación electrolizador, \$/kW
C_{INA} :	Costo insumos anual del Almacenamiento, \$/año	C_{INP} :	Costo insumos de la Producción, \$/año
C_{INT} :	Costo insumos anual del Transporte, \$/año	C_{INS} :	Costo insumos total del SEHH, \$/kg
C_{INU} :	Costo insumos de los Usos Finales, \$/año	C_{INV} :	Costos de inversión de las celdas, \$
C_{IP} :	Costo inversión de la Producción, \$/año	C_{IT} :	Costo inversión anual Transporte \$/año
C_{IS} :	Costo inversión total del SEHH, \$/kg	C_{IU} :	Costo inversión Usos Finales, \$/año
C_{MA} :	Costo de mantenimiento anual, \$/año	C_{OA} :	Costo anual operación de la UA, \$/año
C_{OC} :	Costo anual de operación de la UC, \$/año	C_{OMA} :	Costo O&M anual Almcto. , \$/año
C_{OMT} :	Costo O&M anual del Transporte, \$/año	C_{OMP} :	Costo O&M anual Producción, \$/año
C_{OMU} :	Costo O&M anual de los Usos Finales, \$/año	C_{OMS} :	Costo O&M total del SEHH, \$/ kg
C_P :	Costo anual de la potencia eléctrica, \$/año	C_{TS} :	Costo total del SEHH, \$/kg
C_T :	Consumo total de electricidad, kWh/ Nm ³ H ₂	C_{TA} :	Costo total anual del Almcto, \$/año
C_{TI} :	Costo de inversión del Almacenamiento, \$	C_{TIT} :	Costo total inversión del Transporte, \$
C_{TP} :	Costo total anual de la Producción, \$/año	C_{TT} :	Costo total anual del Transporte, \$/año
C_{TU} :	Costo total anual de los Usos Finales, \$/año	C_{UA} :	Costos unitarios de la UA, \$/l
C_{UC} :	Costos unitarios del compresor, \$/kW	C_{UCA} :	Costos unitarios de los camiones, \$
C_{UCV} :	Costo unitario convertidor, \$/kW	D_C :	Densidad de corriente, mA/cm ²
E_E :	Eficiencia energética, kWh/Nm ³ H ₂	E_{EA} :	Energía eléctrica producida, kWh/año



IX Congreso Internacional de la SMH, Saltillo 2009

E_C :	Energía consumida por el compresor, kWh/kg	EFI :	Eficiencia de la celda
H_{AR} :	Producción anual real de H_2 , kg/año	F :	Factor de recuperación de capital
F_{P1} :	Factor de escala de la presión en la UC	F_{P2} :	Factor de escala de la presión en la UA
F_T :	Factor de escala del tamaño del compresor	F_V :	Factor de escala del volumen de la UA
F_C :	Factor de capacidad en la Producción	F_U :	Factor de utilización H_2 Usos Finales
N_B :	Número de bombonas	N_{BH} :	Número bombonas hogar, bom/hg.año
N_C :	Número de celdas	N_{CA} :	Número de camiones
N_{HOG} :	Hogares sin servicio de energía	P :	Presión final de almacenamiento, bar
P_B :	Presión base en Almacenamiento, bar	P_{CB} :	Precio del combustible, \$/l
P_H :	Producción anual de H_2 , Nm^3H_2 /año	P_{HA} :	Peso de H_2 almacenado, kg
P_{HB} :	Peso de H_2 en la bombona, kg/bom	P_{HH} :	Producción horaria de H_2 , kg H_2 /hr
P_o :	Potencia requerida en Producción, MW		