

Development in Venezuela of energy system based in the hydrogen. Part IV: End Uses

Fausto Posso¹, Alfonso Contreras²

¹Dpto. de Ciencias, Universidad de Los Andes-Táchira.
San Cristóbal 5001, Venezuela. fausto@ula.ve

¹Dpto. de Química Aplicada a la Ingeniería. Universidad Nacional de Educación a Distancia
UNED-Madrid, 28040. acontreras@ind.uned.es

Abstract

The stage of Final Uses of a renewable energy system is studied with the H₂ like energy vector, by means of the formulation of a model mathematical representative semi empiric of the main technical and economic aspects involved in the operation of the cells of combustible PEM, transformation technology selected to provide from energy to rural towns of Venezuela located in the parish Trinidad of the Chapel of the Portuguese state. The simulation embraces a 20 year-old horizon, considering the increment in the energy demand and the decrease in the unitary costs of the cells of fuel. The results show that the main operation variables: current density, efficiency and voltage present the typical behavior of this type of cells, while from the economic point of view, the cost of the produced electricity diminishes continually for effects of the scale economy. The use of the cells PEM to provide from energy to population's rural Venezuelan sectors is viable in principle when contributing to the improvement of the quality of life and sustainable development of these isolated and depressed regions, those which, for its distance of the development of these isolated and depressed regions, those which, for its distance of the electric net and surface that embrace, they have not been covered by the electric net.

Key words: End uses of hydrogen, fuel cell, mathematical model.

Desarrollo en Venezuela de un sistema energético basado en el hidrógeno. Parte IV: Usos finales

Resumen

Se estudia la etapa de Usos Finales de un sistema energético renovable con el H₂ como vector energético, mediante la formulación de un modelo matemático semiempírico representativo de los principales aspectos técnicos y económicos involucrados en la operación de las celdas de combustible PEM, tecnología de transformación seleccionada para proveer de energía a poblados rurales de Venezuela ubicados en la parroquia Trinidad de la Capilla del estado Portuguesa. La simulación abarca un horizonte de 20 años, considerando el incremento en la demanda de energía y la disminución en los costos unitarios de las celdas de combustible. Los resultados muestran que las principales variables de operación: densidad de corriente, eficiencia y voltaje presentan el comportamiento típico de este tipo de celdas, mientras que desde el punto de vista económico, el costo de la electricidad producida disminuye continuamente por efectos de la economía de escala. La utilización de las celdas PEM para proveer de energía a sectores de población rural venezolana resulta viable en principio al contribuir a la mejora de la calidad de vida y desarrollo sustentable de estas regiones aisladas y deprimidas, las cuales, por la superficie que abarcan y su lejanía de la red eléctrica, no han sido cubiertas por la misma.

Palabras clave: Usos finales del hidrógeno, celdas de combustible, modelo matemático.

Introducción

Uno de las aplicaciones con mayor impacto social de un sistema energético con las energías renovables como fuente primaria y al hidrógeno como vector, tiene que ver con la satisfacción de las necesidades energéticas de poblaciones rurales de los países en desarrollo, ya que contribuyen a elevar significativamente su calidad de vida [1]. En este contexto se está llevando a cabo una investigación marco cuyo principal objetivo es estudiar la viabilidad del desarrollo en el sector rural de Venezuela de un sistema energético basado en el H_2 . En este sistema, el H_2 se produce por electrólisis a partir de hidroelectricidad, se almacena y transporta en forma de gas comprimido, para finalmente convertirlo en energía útil para su aprovechamiento en los hogares rurales. Una vez estudiadas las tres primeras etapas: Producción, Almacenamiento, Transporte y Distribución [2-4], en este artículo se considera la etapa de Usos Finales, la cual en líneas generales tiene como propósito poner a disposición de los diferentes sectores de la sociedad, la energía requerida para cubrir sus necesidades de diversa índole. Por tanto, el desarrollo pleno de esta etapa es crucial ya que determinará en gran medida la penetración exitosa y la utilización masiva del H_2 como vector energético en el corto y mediano plazo [5].

Dentro de las tecnologías de Uso Final que se encuentran actualmente en pleno desarrollo, las celdas de combustible (CC), podrían aprovechar ciertos nichos del mercado energético con perspectivas claras de éxito: la generación distribuida de electricidad en lugares remotos o aislados [6], tal como son las regiones rurales; y las aplicaciones móviles para vehículos eléctricos e híbridos [7].

Por todo esto, el propósito de este artículo es desarrollar un modelo matemático de la operación de las CC de intercambio protónico (PEM), con el fin de estimar los costos de su utilización en sectores rurales de Venezuela para la satisfacción de las necesidades energéticas de sus habitantes mediante la generación de calor y electricidad. La simulación se hace para un horizonte de 20 años a partir del año 2001, considerando la incidencia en los costos de las mejoras tecnológicas esperadas en las CC y del crecimiento estima-

do tanto en el consumo de energía como de la población rural misma sujeto de la aplicación.

Los usos energéticos del hidrógeno

Una de las maneras de clasificar los variados usos energéticos del H_2 , es considerar las rutas seguidas en su conversión, transformación y aprovechamiento energético, tal como se muestra en la Figura 1. La energía útil obtenida de los procesos de conversión y transformación se aprovecha en dispositivos estacionarios, móviles y portátiles, utilizando diferentes tecnologías de servicios ubicadas en los diferentes sectores de la sociedad.

Selección de la tecnología de transformación

Tomando en cuenta que el H_2 se utilizará en los hogares rurales en la generación de calor para la cocción de alimentos y de electricidad para iluminación y operación de artefactos eléctricos domésticos básicos, una selección preliminar de las tecnologías de transformación más adecuadas para tales usos, da como resultado: a. Una combinación de quemadores alimentados directamente con H_2 para el cocimiento de alimentos, con las CC para la generación de electricidad; y b. La utilización exclusiva de las CC para alimentar a cocinas eléctricas y demás artefactos eléctricos. Para la selección final, tomando en cuenta, por una parte, la eficiencia promedio de las CC, su aplicabilidad, sus costos, la complejidad tecnológica y facilidad de acceso a ellas [8]; y por la otra, el nivel cultural y las condiciones socioeconómicas de la población rural venezolana [9], se ha optado por la utilización exclusiva de las CC como tecnología de transformación.

Selección del tipo de celda de combustible

La forma más común de clasificar las CC es según el tipo de electrolito utilizado; de esta manera, se distinguen las celdas: alcalinas, poliméricas o PEM, de ácido fosfórico, de carbonato fundido y de óxidos sólidos. La selección de un tipo de celda para una aplicación específica dependerá de las condiciones de operación, de la naturaleza de la

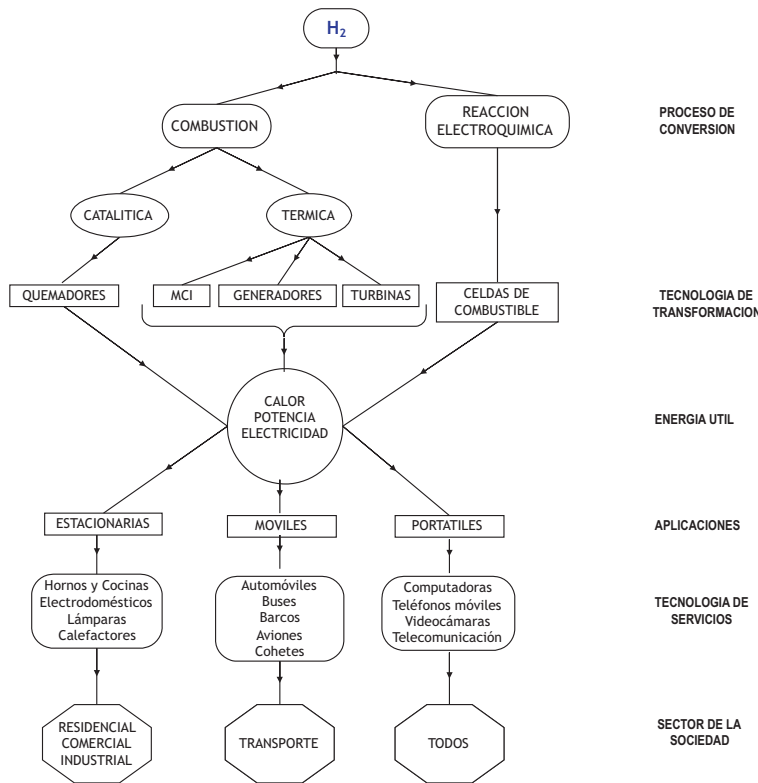


Figura 1. Usos energéticos del H₂.

aplicación y de la potencia de salida requerida [10]. En este estudio se selecciona la celda PEM, con base en las siguientes consideraciones:

1. Es la más adecuada para la generación de potencia estacionaria distribuida de pequeña escala y se ajusta eficientemente a operaciones de carga variable, como es el caso de aplicaciones residenciales [8].
2. Opera a altas densidades de corriente y bajas temperaturas, lo cual le permite un rápido arranque y salida de operación con un menor desgaste térmico de sus componentes, resultando en una mayor durabilidad [10].
3. Posee una construcción compacta, bajo peso y volumen comparadas con los otros tipos de CC, por lo cual el ensamblado y manipulación es menos complejo [10].

Modelo matemático del uso final del H₂

Conceptualmente, el modelo matemático a desarrollar es de tipo semiempírico, ya que a las correlaciones empíricas obtenidas para unas

condiciones específicas de operación, se incorpora un cierto conocimiento fenomenológico [11]. Así, el modelo se construye a partir de resultados previos de la literatura sobre el tema, proyecciones de la demanda energética en el sector rural venezolano e información de fabricantes de CC PEM. Estructuralmente, el modelo matemático está compuesto por un submodelo de energía y un submodelo de costos.

Submodelo de energía

Tiene como propósito calcular el número de celdas del arreglo, la eficiencia de la conversión energética y el consumo de H₂. Todo ello a partir de la relación densidad de corriente/voltaje y para una cierta potencia de salida determinada por la demanda.

Ecuación de polarización

Constituye el indicador más importante del funcionamiento de una CC al determinar el voltaje generado en ella para una cierta densidad de corriente y unas ciertas condiciones de operación. Los modelos matemáticos propuestos para

explicar y predecir esta relación deben considerar las irreversibilidades –de activación, óhmica y de concentración– que suceden en la operación de toda CC y que ocasionan que el potencial real obtenible en ella sea menor que el potencial ideal. Con tal fin, en ellos se utilizan expresiones matemáticas de tipo lineal, exponencial y logarítmico [12-14], según el grado de detalle utilizado para explicar tales irreversibilidades, aumentando en consecuencia la complejidad del modelo. En este estudio se utilizará la aproximación lineal [13], la cual además de su sencillez, tiene un desempeño satisfactorio en el rango práctico de operación de la CC, correspondiente a una variación del voltaje entre 0,5-0,8 V, su expresión es:

$$V = V_0 - k D_C \quad (1)$$

donde V_0 corresponde al voltaje en circuito abierto, mientras que k representa la proporción de cambio entre el voltaje y la densidad de corriente y sus valores se han calculado a partir de los valores experimentales de [13] para una celda PEM con una potencia de salida de 1 kW, del mismo orden a considerar en este trabajo.

Número de celdas

Puesto que el voltaje y corriente obtenidos en una sola CC son pequeños para su aprovechamiento directo, éstas se agrupan en arreglos de tamaño variable hasta alcanzar la potencia de salida deseada. El número de celdas del arreglo se obtiene de la relación entre la potencia teórica y la potencia real [15] según:

$$N_P = \frac{P_{SA}}{D_C V_C A_C} \quad (2)$$

Eficiencia de la celda PEM

La eficiencia de la conversión energética en las CC constituye un aspecto importante de su desempeño y con grandes repercusiones económicas [13]. Para cálculos de diseño y de costos, se utiliza, por lo general, la Eficiencia del Voltaje, que relaciona el voltaje actual o de operación con el voltaje teórico con un valor de 1,48 v, y que corresponde a la máxima energía –eléctrica y térmica– obtenible de la reacción electroquímica [13, 16]. Por tanto:

$$\eta = \frac{V_C}{1,482 V} = 0,675 V_C \quad (3)$$

Consumo de H_2

Su valor se obtiene de la relación entre la energía eléctrica anual producida por la CC y su eficiencia, tal que:

$$C_{H_2} = \frac{E_{EA}}{\eta HHVF_u} \quad (4)$$

donde F_u da cuenta del grado de conversión del H_2 en la reacción electroquímica, mientras que la E_{EA} es directamente proporcional al consumo energético promedio anual de un hogar rural venezolano típico, y su valor fue calculado en [2], tal que:

$$E_{EA} = F_C C_{EH} \quad (5)$$

Conversión y adecuación de la señal de salida

Para su uso doméstico, la potencia de tipo continuo generada en la CC debe convertirse a su forma alterna equivalente, y el potencial debe ajustarse a un valor de salida de 110 V, voltaje utilizado por la mayoría de aparatos eléctricos domésticos. Ambos requerimientos se satisfacen con un convertidor/adecuador de señal, con una representación matemática de tipo lineal [17]:

$$P_{SA} = F_{CA} P_{SC} \quad (6)$$

En resumen, el submodelo de energía está compuesto por las ecuaciones (1) a la (6).

Submodelo de costos

La variable comúnmente usada para evaluar el desempeño económico de las CC es el costo de la generación de electricidad, calculado utilizando el método de las anualidades [18]. Al respecto, el submodelo calcula el costo total anual como la relación entre la suma de los costos de inversión y los costos operacionales del arreglo de celdas y la energía eléctrica producida por dicho arreglo. En este punto es importante resaltar que siendo el principal propósito de este estudio estimar el costo de la etapa de Usos Finales y su aporte a los costos totales de todo el sistema energético, no se considera el efecto del costo del

H₂ requerido para el funcionamiento de la CC, ya que el corresponde más a la etapa de producción del H₂ y cuyo modelado se realizó en [2]. Una vez completado el estudio de todas las etapas del sistema energético, en un trabajo posterior se integrarán los resultados obtenidos en cada una de ella para concluir sobre la viabilidad del sistema energético integral.

Costos de inversión

Con el fin de evaluar la incidencia en los costos de inversión del punto de operación de la CC, es conveniente dividirlos en costos fijos y costos variables, según su dependencia con el tamaño del arreglo. Los primeros, costos del equipamiento, son los que no cambian con el número de celdas y corresponden a los costos de los dispositivos de admisión y salida de reactivos y productos, de medición y control, además de los costos del ensamblado y de la instalación del sistema [19]. Los segundos, costos de las celdas de combustible, C_{CC}, varían con su cantidad según un valor unitario, de acuerdo a:

$$C_{CC} = C_{UC} N_C \quad (7)$$

Además, en los costos de inversión se debe incluir el costo del convertidor/adecuador de señal, el cual depende de la potencia de salida [20], mediante:

$$C_{CV} = C_{UCV} P_{SA} \quad (8)$$

Por lo tanto, la expresión para los costos de inversión es:

$$C_{INV} = C_{EG} + C_{CC} + C_{CV} \quad (9)$$

Para calcular el costo de inversión anual se utiliza un factor de recuperación de capital [18]:

$$F = \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1} \quad (10)$$

Con un tiempo de vida de los equipos de 20 años y de las celdas de cinco años [18]. Por tanto:

$$C_{EQA} = F_{EG} C_{EG} \quad (11)$$

$$C_{CA} = F_C C_{CC} \quad (12)$$

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

$$C_{CVA} = F_{EG} C_{CV} \quad (13)$$

Y la expresión para la inversión anual es:

$$C_{IA} = C_{EQA} + C_{CA} + C_{CVA} \quad (14)$$

Costos de O&M

Se han tomado iguales al 2,5 % del C_{IA}, valor reportado en la bibliografía para casos similares al estudiado [20]. Con respecto al costo de las cocinas eléctricas, por su bajo costo y rápido desgaste, se consideran como parte de los costos anuales de O&M. Por tanto:

$$C_{OMA} = 0,025C_{IA} + C_{CE} \quad (15)$$

Ecuación general del Modelo de Uso Final

El Modelo de Uso Final se sintetiza en la siguiente ecuación que calcula el costo de la electricidad producida con respecto a la energía eléctrica generada por el arreglo.

$$C_E = \frac{C_{IA} + C_{OMA}}{E_{EA}} \quad (16)$$

Aplicación del Modelo de Uso Final en Venezuela

El Modelo de Uso Final se utilizará para calcular los costos de la generación de electricidad en una región rural de Venezuela. La misma corresponde a la parroquia Trinidad de la Capilla del Municipio Guanarito del estado Portuguesa, en el centro occidente del país y cuya selección ha sido suficientemente explicada y justificada en [2, 3]. La simulación tiene un horizonte temporal de 20 años y procede con base en las siguientes premisas: a. Se escoge como año de inicio del estudio –año base– el 2001, para hacerlo coincidir con el año de realización del último censo de población y vivienda en Venezuela. De ésta manera, el estudio parte de estadísticas reales y actualizadas, que indican que esta parroquia tiene un porcentaje de población rural del 72%, del cual el 80% –equivalente a 539 hogares–, no tiene un su-

ministro permanente y seguro de energía [21]; b. El valor para el año base de los costos de equipamiento y de los costos unitarios de la celda se asumen igual a \$1000/arreglo y \$100/celda, respectivamente [22]; c. Los costos de equipamiento deberán aumentar año a año al requerirse mayor potencia para satisfacer el incremento esperado en el consumo anual de energía en cada hogar del sector rural. Este aumento en los costos se asume igual al 2% anual, del mismo orden al estimado para el consumo de energía [23]; d. Con respecto al costo unitario de las celdas, se espera disminuya en el tiempo debido a las mejoras tecnológicas y producción masiva de las mismas. Ya que las estimaciones de esta disminución son variables, para la simulación se ha construido una representación matemática a partir de valores reportados en la bibliografía [10, 21, 24]:

$$C_{UC} = C_{UC0} b^{\tau(t-t_0)} \quad (18)$$

donde C_{UC0} corresponde al costo para el año inicio del estudio, t_0 , o año base.

En la Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros necesarios para la aplicación del modelo.

Resultados y discusión

En primer lugar se presentan y analizan los resultados del submodelo de energía. En la Figura 2, se presenta la variación del tamaño del número de celdas, N_C , del arreglo con la densidad de corriente, D_C . Se observa que para un año fijo, el N_C disminuye continuamente. Dicha disminución es más acentuada para valores menores de la D_C . Este comportamiento se repite para todo el lapso estudiado, notándose que a medida que transcurre el tiempo, la cantidad de celdas aumenta al requerirse de arreglos de mayor tamaño para satisfacer el incremento anual de la potencia como consecuencia del incremento en el consumo de energía en los hogares rurales.

Con respecto a la eficiencia de la CC, en la Figura 3 se observa que el arreglo de celdas pierde eficiencia a medida que aumenta la D_C ya que disminuye el potencial generado en la celda.

En cuanto al consumo de H_2 , éste aumenta dentro de un mismo año al aumentar la D_C y de

Tabla 1
Valores de los parámetros del modelo de Uso Final

Parámetro	Valor
Factor de recuperación de capital, FRC	$F_{EQ} = 0,0944$ $F_C = 0,2439$
Valor calorífico superior del H_2 , HHV	$3,54 \text{ Nm}^3/\text{kWh}$
Factor de conversión continua/alterna, F_{CA}	0,98
Costo de la cocina eléctrica, C_{CE}	50 \$/cocina
Factor de Consumo, F_C	1,1
Factor de utilización del H_2 , F_U	0,8
Área de la celda, A_C	100 cm^2
Parámetro Ecuación 18, C_{UC0}	\$ 100
Parámetro Ecuación 18, τ	$0,1 \text{ años}^{-1}$
Voltaje ideal, V_0	$0,8951 \text{ v}$
Pendiente, k	$-0,5122$ $\text{v}/(\text{A}/\text{cm}^2)$

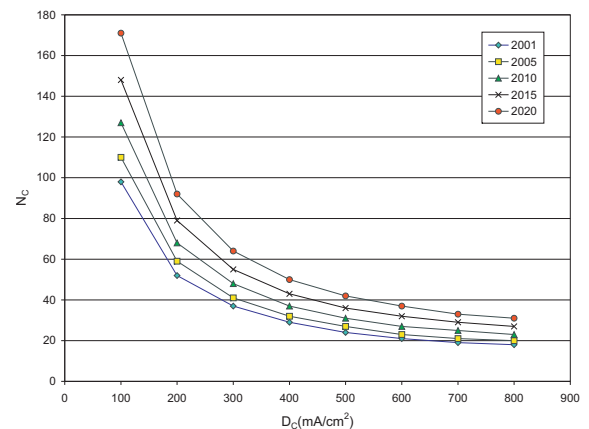


Figura 2. Variación del número de celdas con la D_C .

un año a otro para un valor fijo de D_C , debido al incremento en la potencia de salida, ambos comportamientos se muestran en la Figura 4.

Si se analizan ahora los resultados del modelo de costos, Figura 5. Se obtiene que el costo de la electricidad disminuye con la D_C para un mismo año y como consecuencia de la disminución en el número de pilas; además, para un valor

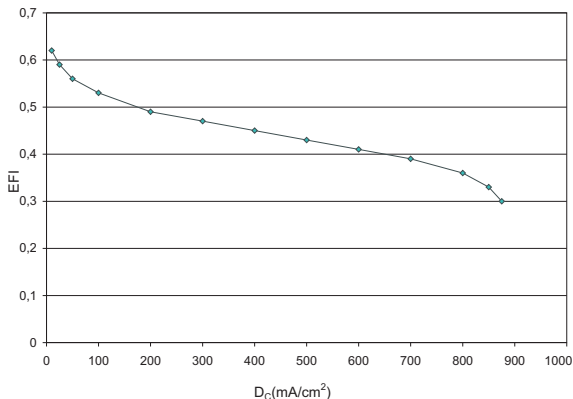


Figura 3. Eficiencia de la celda vs D_C .

fijo de la D_C , el menor costo de la electricidad se obtiene para el año 2020, como consecuencia de la economía de escala.

Los valores del costo de la electricidad podrían considerarse altos al compararse con los obtenidos en otros estudios sobre provisión de energía para viviendas aisladas [25, 26]. Sin embargo en situaciones como la estudiada, es decir, el suministro de energía a regiones rurales con muy baja calidad de vida, el procedimiento clásico de evaluar la viabilidad de una propuesta energética basada exclusivamente en cuantificar y comparar en términos monetarios los costos y beneficios de la misma no es la más adecuada, ya que en este caso existen beneficios intangibles, y por tanto difíciles de cuantificar y más aún de expresar en términos monetarios. En efecto, cómo cuantificar monetariamente la mejora en las condiciones ambientales, en la calidad de vida y en el arraigo social de estas poblaciones. Como incluir en una fórmula de costos el bienestar de una familia rural al disponer de iluminación y de calor para cocinar sus alimentos. Por tanto, los resultados deben verse en una forma más amplia y tomando en cuenta el propósito del estudio.

Una posible alternativa a la propuesta en este trabajo consistiría en extender la red eléctrica hasta cubrir totalmente todos los poblados rurales de la parroquia. En este caso se debe considerar tanto los costos como el impacto ambiental. En el primer caso, ante la dificultad de obtener valores fiables del costo de transmisión y distribución en Venezuela, se utiliza el valor de 10.000 \$/km [1, 27], al cual debe añadirse los costos del mantenimiento de todo el sistema.

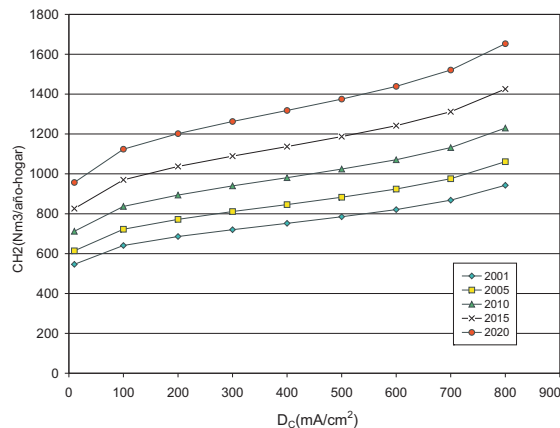


Figura 4. Variación del consumo de H₂ con la D_C .

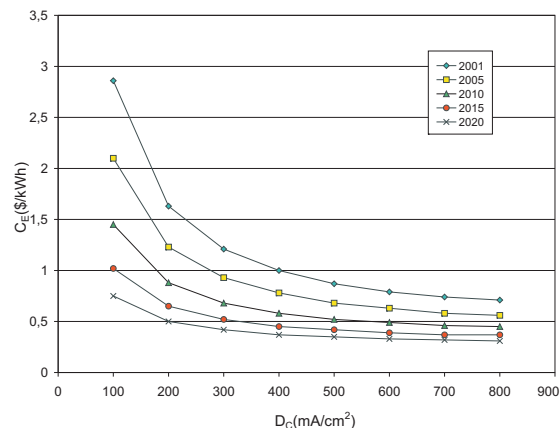


Figura 5. Variación del costo de la electricidad producida con la D_C .

Además hay que tomar en cuenta el impacto ambiental ocasionado por las líneas de transmisión y demás dispositivos de distribución al tener que cubrir un área de 800 km². Los costos derivados de este impacto, es decir las externalidades, de poder ser cuantificados también deberían sumarse a los costos totales, de manera que esta opción tiene ciertos escollos que no han hecho posible su realización y nada indica que en el mediano plazo lo sea.

Conclusiones

Se ha estudiado la última etapa del desarrollo en Venezuela de un sistema energético renovable con el hidrógeno como vector energético, mediante la formulación y manipulación de un modelo matemático. El modelo de Uso Final re-

sultante se utiliza para calcular los costos de utilizar las CC en centros poblados rurales para satisfacer sus necesidades energéticas. La simulación se realiza utilizando la herramienta computacional Excel y considerando un incremento en los costos de equipamiento debido a un incremento esperado en la demanda de energía y una disminución en los costos unitarios de las CC debido a mejoras tecnológicas y producción masiva de las mismas. Los resultados muestran que el costo de la electricidad producida por el arreglo de las CC disminuye por efecto de la economía de escala. Los efectos favorables, tangibles e intangibles, de la utilización de las celdas de combustible y que pueden resumirse en una mejora importante en la calidad de vida de las poblaciones rurales de Venezuela harían viable, en principio, la utilización de las celdas PEM como tecnologías de uso final para proveer de energía al sector rural de Venezuela.

Nomenclatura

C_{CC}	: Costos de las celdas de combustible, \$
C_{CA}	: Costo de las celdas anualizado, \$/año
C_{CV}	: Costo convertidor, \$
C_{CVA}	: Costo convertidor anualizado, \$/año
C_E	: Costo de la electricidad, \$/kW
C_{EH}	: Consumo de energía anual por hogar, kWh/año
C_{EQA}	: Costo de equipamiento anualizado, \$/año
C_{H_2}	: Consumo anual de H_2 , $Nm^3H_2/año$
C_{IA}	: Costo de inversión anualizado, \$/año
C_{EQ}	: Costos de equipamiento, \$/arreglo
C_{INV}	: Costos de inversión, \$
C_{UC}	: Costo unitario de la celda, \$/celda
C_{UC0}	: Costo base unitario de la celda, \$
C_{UCV}	: Costo unitario convertidor, \$/kW
D_C	: Densidad de corriente, mA/cm^2
E_{EA}	: Energía eléctrica anual, kWh/año
N_C	: Número de celdas
η	: Eficiencia de la celda, adim
P_{SA}	: Potencia de salida alterna, kW
P_{SC}	: Potencia de salida continua, kW
V_C	: Voltaje de la pila, V

Referencias bibliográficas

1. Bauen A., Hart A. y Chase A.: "Fuel cells for distributed generation in developing countries-an analysis", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 28, N° 7 (2003) 695-701.
2. Posso F.: "Desarrollo en Venezuela de un sistema energético basado en el hidrógeno. I: Producción de hidrógeno electrolítico". *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia* Vol. 30, N° 1(2007) 201-208.
3. Posso F., Contreras A.: "The use of hydrogen in the rural sector in Venezuela: Technical and financial study of the storage phase". *Renew. Energy* Vol. 34, N° 5 (2009) 1234-1240.
4. Posso F.: "Desarrollo en Venezuela de un sistema energético basado en el hidrógeno. Parte III: Transporte y Distribución". *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia*. Vol. 31, N° 2 (2008) 115-124.
5. Solomon B., Banerjee A.: "A global survey of hydrogen energy research, development and policy", *Energy Policy*, Vol. 34, N° 7 (2006) 781-792.
6. Agbossou K., Chahine R., Hamelin J., Laurencelle F., Anouar A., St-Arnaud J. y Bose T.: "Renewable energy systems based on hydrogen for remote applications", *J. Power Sources*, Vol. 96, N° 1 (2001) 168-172.
7. Varigonda S., Kamath M.: "Control of stationary and transportation fuel cell systems: Progress and opportunities", *Comp. and Chemical Eng.* Vol. 30, N° 10 (2006) 1735-1748.
8. Sames M., Boersma, R.: "Small-scale fuel cell for residential applications" *J. Power Sources*, Vol. 86, N° 1, (2000) 98-110.
9. Sames M., Boersma, R.: "Atlas del Desarrollo Humano en Venezuela", Instituto Nacional de Estadística, República Bolivariana de Venezuela, Caracas, 2004.
10. We J.: "Applications of proton exchange membrane fuel cells systems", *Renew. Sust. Energy Reviews*, Vol. 11, N° 10 (2007) 1720-1738.
11. Sousa R., González E.: "Mathematical Model of polymer electrolyte fuel cells" *J. Power Sources*, Vol. 147, N° 1 (2005) 32-45.

12. Costamagna P., Supramaniam S.: "Quantum jumps in the PEMFC science and technology from the 1960s to the year 2000: Part II. Engineering, technology development and application aspects" *Journal Power Sources*, Vol. 102, Nos. 1-2 (2001) 253-269.
13. Barbir F., Gómez T.: "Efficiency and economics of proton exchange membrane (PEM) fuel cells", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 22, Nos. 10-11 (1997) 1027-1037.
14. Mann R., Hooper H. y Peppley B.: "Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell", *J. Power Sources*, Vol 86, No. 1 (2000) 173-180.
15. Kazim, A.: "Economical and environmental assessments of proton exchange membrane fuel cells in public buildings", *Energy Conv. and Management*, Vol. 42, N° 6 (2001) 763-772.
16. Sherif S., Barbir F. y Veziroglu T. "Wind energy and the hydrogen economy –review of the technology", *Solar Energy*, Vol 78, N° 5, (2005) 647-660.
17. Suazi T., Kawakamin A., Hamada Y. y Azegami Y.: "Development of a 1 kW polymer electrolyte power source", *J. Power Source*, Vol. 92, N° 1 (2001) 131-138.
18. Frangopoulos C., Nakos L.: "Development of a model for thermo-economic design and operation optimization of a PEM fuel cell system", *Energy*, Vol. 31, N° 10-11 (2006) 1501-1519.
19. Khan M., Iqbal M.: "Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland", *Renewable Energy*, Vol. 30, N° 6 (2005) 835-854.
20. Zoulias E. "Techno-economic analysis of the integration of hydrogen energy technologies in renewable energy stand-alone power systems", *Renew. Energy*, Vol. 32, N° 4(2007) 680-696.
21. Zoulias E. "Nomenclador de Centros Poblados y de Comunidades Indígenas 2001", Instituto Nacional de Estadística. República Bolivariana de Venezuela, Caracas, 2004.
22. Kazim A. "A novel approach on the determination of the minimal operating efficiency of a PEM fuel cell" *Renewable Energy*, Vol. 26, N° 3 (2002) 479-488.
23. Kazim A. "PODE 2005, Petróleo y otros datos estadísticos". Cuadragésima Octava Edición. Ministerio del Poder Popular para la Energía y Petróleo de Venezuela, Caracas, 2008.
24. Smith R., Weeda M., de Groot, A. "Hydrogen infrastructure development in The Netherlands. *Int. Journal Hydrogen Energy*", Vol. 32, N° 10 (2007) 1387-1395.
25. Santarelli M, Cali M, "Design and analysis of stand-alone hydrogen energy systems with different renewable sources", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 29, N° 15 (2004) 1571-86.
26. Santarelli, M., Pellegrino D., "Mathematical optimization of a RES-H₂ plant using a black box algorithm", *Renewable Energy*, Vol. 30, N° 4 (2005) 493-510.
27. Isherwood W. Smith J., Aceves S., Berry G., Johnson R. y Seifert R.: "Remote power systems with advanced storage technologies for Alaskan villages", *Energy*, Vol. 25, N° 10 (2000) 1005-1020.

Recibido el 16 de Noviembre de 2009

En forma revisada el 4 de Octubre de 2010