

# PRODUCCION DE HIDROGENO ELECTROLITICO EN VENEZUELA

F. Posso

Departamento de Ciencias. Universidad de Los Andes-Táchira  
Universidad de Los Andes-Táchira. Sede Paramillo. San Cristóbal, 5001. Estado Táchira, Venezuela  
Tel. 00-58-276-3421520 – Fax 00-58-276-3562609 e-mail: fausto@ula.ve

**RESUMEN:** Se estudia la viabilidad de la producción de H<sub>2</sub> en Venezuela mediante la construcción y manipulación de un modelo matemático de los costos de producción. El H<sub>2</sub> se produce por electrólisis del agua, con la hidroelectricidad como fuente primaria y se destinaría a satisfacer las necesidades energéticas en el sector rural, como posible uso final. Los resultados de la aplicación del modelo a tres casos de estudio muestran que al aumentar la producción de H<sub>2</sub>, los costos totales de producción disminuyen, mientras que el aporte porcentual de los costos de potencia eléctrica a los costos totales aumenta, ambos comportamientos por efecto de la economía de escala.

**Palabras clave:** modelo matemático, electrólisis, Venezuela

## INTRODUCCION

Se pretende determinar la viabilidad de la producción de H<sub>2</sub> por electrólisis en Venezuela a partir de hidroelectricidad mediante la formulación de un modelo matemático conformado por un modelo de energía y un modelo de costos, el cual se aplica para diferentes condiciones de operación y un horizonte temporal de 20 años.

## MODELO DE ENERGÍA

### *Producción Anual de Hidrógeno*

La producción anual de H<sub>2</sub> se considera proporcional al consumo de energía residencial por habitante rural, estimado en 55 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/hab.año, y al número de habitantes a servir de energía, según un factor de manejo, (Ec. 1).

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

### *Energía Eléctrica necesaria para la Producción y Compresión del H<sub>2</sub>*

El consumo de energía del electrolizador se considera la variable más importante del proceso de electrólisis. La información para construir una estructura matemática que represente su comportamiento actual y futuro, Ec. 2, proviene de referencias de la literatura e información de fabricantes, (Ivy, 2004; Cloumann et. al, 1996)

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

El consumo de energía eléctrica de los equipos auxiliares y para el tratamiento y compresión de los gases representa, en promedio, el 24 % del consumo del electrolizador, (Cloumann, et. al., 1996).

$$E_A + E_C = 0.24 E_E \quad (3)$$

Y el consumo total de energía eléctrica es:

$$C_T = E_E + E_A + E_C = 1.24 E_E \quad (4)$$

## MODELO DE COSTOS

### *Costos de Insumos*

Los insumos corresponden a la energía eléctrica y al agua. En cuanto al primero, la estructura matemática que estima su costo incluye: a. El consumo total de energía eléctrica, (Ec. 4), b. La producción de H<sub>2</sub>, (Ec. 1), y c. La tarifa eléctrica industrial en Venezuela, cuya variación se representa satisfactoriamente mediante la expresión lineal:

$$T_{EI} = 1,2535 t - 0,4985 \quad R^2 = 0,9761 \quad (5)$$

Tal que el costo de la energía eléctrica es:

$$C_{EE} = P_H C_T T_{EI} \quad (6)$$

En cuanto al segundo insumo, las bajas tarifas del mismo en Venezuela, alrededor de 10<sup>-4</sup> \$/l, y los volúmenes estimados de H<sub>2</sub> a producir permiten asumir que el efecto de este costo en los costos totales sea despreciable, tal que:

$$C_I = C_{EE} \quad (7)$$

### *Costo de la Inversión*

Está representado por el costo del electrolizador, el modelo matemático de esta variación se ha elaborado a partir de los resultados de (Da Silva, 2005; Oulette, 1995; Padró, 1999). Siendo la ecuación que la representa:

$$C_{EL} = 1499,74 P^{-0,2167} \quad R^2 = 0,987 \quad (8)$$

Donde la potencia de la planta se obtiene de:

$$P = P_H C_T / DI \quad (9)$$

El costo de instalación del electrolizador:

$$C_{IE} = C_{EL} P \quad (10)$$

Y el costo de la inversión anualizada:

$$C_{INV} = F C_{IE} \quad (11)$$

*Costo de Operación y Mantenimiento*

Simplemente se asume como un porcentaje de  $C_{IE}$ , (Padró, 1999; Ivy, 2004; Da Silva, 2005)

$$C_{OM} = OM C_{IE} \quad (12)$$

El costo total de producción vendrá entonces dado por:

$$C_{TP} = \frac{C_{EE} + C_{INV} + C_{OM}}{P_H} \quad (13)$$

### RESULTADOS Y SU ANALISIS

Se presentan tres casos de estudio, (Tabla 1). Se obtiene que el  $C_{TP}$  disminuye a medida que aumenta la producción de  $H_2$ , manifestándose la economía de escala.

	$P_H$	$C_{EE}$	$C_{INV}$	$C_{OM}$	$C_{TP}$
CASO 1	13.849	1.114	3.986	1.784	0,5193
CASO 2	177.632	14.278	30.940	13.166	0,3287
CASO 3	725.995	58.353	93.206	39.662	0,2634

Tabla 1. Costos de Producción de  $H_2$  ( $\$/Nm^3 H_2$ ) Año 2005

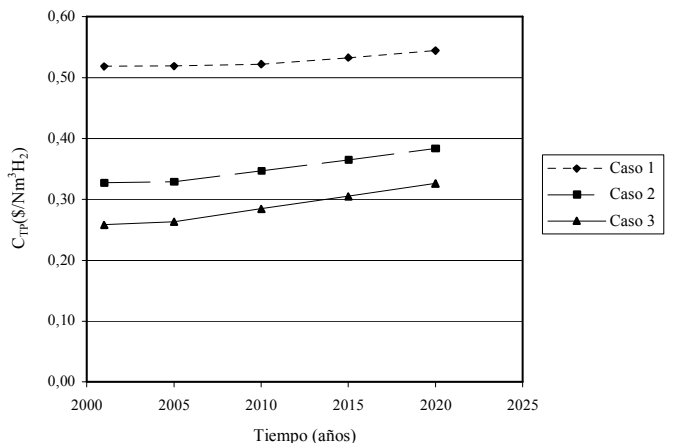


Fig. 1 Evolución de los Costos de Producción

La evolución del  $C_{TP}$  en el período estudiado, Fig. 1, muestra un aumento sostenido para todos los casos. Con respecto a la potencia eléctrica, su aporte porcentual a los costos totales crece de un caso a otro para un año específico, principalmente a expensas de los costos de inversión, Fig. 2. También en la evolución temporal se presenta tal crecimiento, Fig. 3, llegando incluso a predominar en los costos a medida que  $N_H$  aumenta.

### CONCLUSIONES

Se ha estudiado la viabilidad de la producción de  $H_2$  electrolítico en Venezuela mediante la construcción y manipulación de un modelo matemático. El modelo está conformado por modelo de energía y un modelo de costos, obtenidos a partir de estadísticas oficiales del sector rural, información de fabricantes y resultados de la bibliografía. Para todos los casos analizados, el costo total de producción de  $H_2$  disminuye a medida que aumenta la producción de  $H_2$ , por efectos de la economía de escala. El efecto de costos de la potencia eléctrica en los costos totales varía entre el 13 % y el 51 % propiciando la disminución de éstos. Finalmente, puede concluirse que producción de hidrógeno electrolítico en Venezuela resulta, en principio, viable y atractiva de desarrollar.

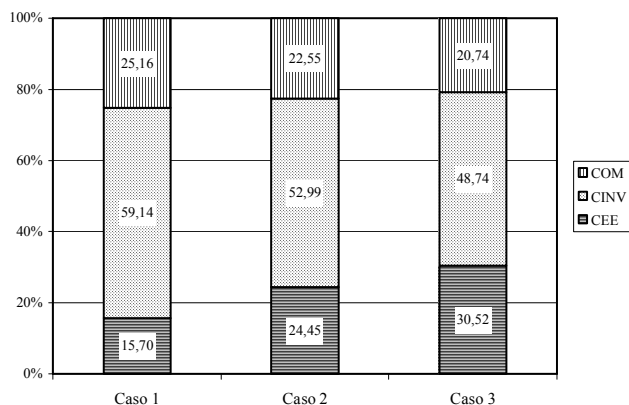


Fig. 2 Componentes de los Costos

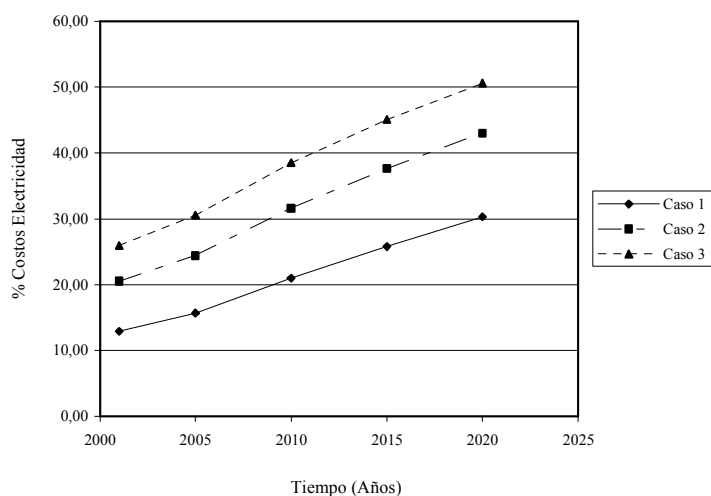


Fig. 3 Contribución Porcentual de los Costos de Energía Eléctrica

### NOMENCLATURA Y VALORES DE LOS PARAMETROS DEL MODELO

$N_H$ : Número de habitantes (hab.)	OM: Tasa para O&M (%) = 5
$T_{EI}$ : Tarifa eléctrica industrial (\$ kWh <sup>-1</sup> )	t: tiempo (años)
$C_i$ : Costo de insumos (\$ año <sup>-1</sup> )	$C_{INV}$ : Costo Anual de Inversión (\$ año <sup>-1</sup> )
$C_{EE}$ : Costo Anual de electricidad (\$ año <sup>-1</sup> )	$E_A$ : Consumo eléctrico equipos auxiliares
$C_{HE}$ : Consumo Anual de Hidrógeno por habitante (Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> año <sup>-1</sup> hab. <sup>-1</sup> )	$C_T$ : Consumo Total de electricidad ((kWh Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> <sup>-1</sup> )
$E_C$ : Consumo eléctrico compresión (kWh Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> <sup>-1</sup> )	$C_{EL}$ : Costo unitario de la planta de electrólisis (\$ kW <sup>-1</sup> )
P: Potencia eléctrica de la planta de electrólisis (MW)	$C_{OM}$ : Costo Anual de Operación y Mantenimiento (\$ año <sup>-1</sup> )
$P_H$ : Producción Anual de Hidrógeno (Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> año <sup>-1</sup> )	F: Factor de Recuperación de Capital
$C_{TP}$ : Costo Total anual de producción de hidrógeno (\$ año <sup>-1</sup> )	

### BIBLIOGRAFIA

- Cloumann, A., d'Erasmus, P., Nielsen, M., Halvorsen, B., (1998). Analysis and optimization of equipment cost to minimize operation and investment for a 300 MW electrolysis plant, *Proceedings 12<sup>TH</sup> World Hydrogen Energy Conference*, Da Silva, E., Marin, A., Ferreira, P., Camargo, J., Apolinario, F., Pinto, C., (2005). Analysis of Hydrogen, Production from combined photovoltaics, wind energy and secondary hydroelectricity supply in Brazil, *Solar Energy*, 78,5, 670-677
- Ivy, J., (2004). Summary of Electrolytic Hydrogen Production, NREL/MP-560-36734
- Oulette, N. Rogner, H. and D.S. Scott, (1995) Hydrogen from remote excess hydroelectricity Part I: Production plant capacity and production cost, *International Journal of Hydrogen Energy*, 20, 865-871
- Padró, C.E.G. and V. Putshe, (1999) Survey of the Economics of Hydrogen Technologies, NREL/TP-570-27079

### ABSTRACT

We study the viability of the production of hydrogen in Venezuela by means of the construction and manipulation of a mathematical model of the production cost. The H<sub>2</sub> 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 utilized to calculate the production cost for three case studies. The results show that when the increases the H<sub>2</sub> production, the production costs diminished, whereas the contribution of the porcentual costs of the electrical power to the total costs increases, both behaviors by effect of the scale economy.

**Keywords:** mathematical model, electrolysis, Venezuela