

# Development in Venezuela of energy system based in the hydrogen. Part III: Transport and distribution

**Fausto Posso**

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

## Abstract

The aim of this work is to develop and evaluate a mathematical model for the process of transport and distribution of hydrogen for use as an energetic vector in rural sectors of Venezuela. Pressurized containers of 50 l of geometric volume and 200 bars of pressure transported by truck was the way chosen as the most appropriate means of transport. The non-linear model has been used to calculate the transport and distribution costs, depending on the number of rural homes to be supplied. The results show that economy of scale means the overall cost can be reduced as the number of homes served and/or distance travelled increases. Finally, we see that investment costs are the largest portion of the overall cost, whereas in terms of the operating costs, it is the cost of the lorry that is the main item.

**Key words:** Transport and distribution of hydrogen, model, costs.

# Desarrollo en Venezuela de un sistema energético basado en el hidrógeno. Parte III: Transporte y distribución

## Resumen

El propósito de este trabajo es desarrollar y evaluar un modelo matemático del proceso de transporte y distribución de hidrógeno con vista a su uso como vector energético en sectores rurales de Venezuela. El hidrógeno gaseoso se transporta y distribuye en camiones, confinado en cilindros con un volumen geométrico de 50 l a una presión de 200 bares, medio y modo de transporte seleccionado como el más adecuado para los fines propuestos. El modelo no lineal resultante se utiliza para calcular los costos de transporte y distribución según el número de hogares rurales a satisfacer de energía. Los resultados muestran que la economía de escala permite disminuir los costos totales a medida que aumentan el número de hogares servidos o la distancia recorrida en los ciclos de distribución propuestos. Finalmente, los costos de inversión predominan en los costos totales mientras que los costos del camión prevalecen en los costos operativos. Los costos obtenidos para el transporte y distribución de H<sub>2</sub> resultan competitivos con respecto a la opción de suministro de energía por tendido eléctrico.

**Palabras clave:** Transporte y distribución de hidrógeno, modelo, costos.

## Introducción

Una de las aplicaciones más interesantes del hidrógeno -H<sub>2</sub> en adelante- es su utilización como vector energético en sistemas energéticos

desarrollados con el fin de cubrir las necesidades energéticas en lugares aislados o remotos [1], siendo en las zonas rurales de los países en vías de desarrollo donde estos sistemas se están usando cada vez con mayor frecuencia [2]. La

fuerza primaria comúnmente utilizada es algún tipo de energía alternativa, por lo que tales sistemas de energía tienen características de renovabilidad y amigabilidad ambiental.

En este contexto se ubica una investigación cuyo amplio propósito es estudiar la viabilidad del desarrollo en el sector rural de Venezuela de un sistema energético basado en el  $H_2$ . En este estudio marco, 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 en la forma de calor y electricidad. Una vez estudiadas las dos primeras etapas, Producción y Almacenamiento [3-4], en este trabajo se considera la etapa de Transporte y Distribución.

En líneas generales, la forma de transportar y distribuir el  $H_2$  puede ser como gas comprimido o líquido criogénico, como hidruro metálico o mediante microesferas, nanofibras y nanotubos de carbono [5]. Los medios o tecnologías de transporte comúnmente usados son: camiones, trenes, barcos y sistemas de tuberías o gasoductos [6]. La selección de la forma y medio de transporte para un caso específico depende de: a. La cantidad de  $H_2$  a transportar, b. La distancia a recorrer, c. Las condiciones del almacenamiento, d. Los usos finales y e. Los costos asociados [7]. Al respecto, consideraremos que el  $H_2$ , producido vía electrólisis y almacenado en forma de gas comprimido en el mismo centro de producción, deberá ser transportado y distribuido a poblados rurales de Venezuela para cubrir todas sus necesidades energéticas. Por tanto, nuestro estudio tendrá como objetivos: definir la forma, cantidad y medio de transporte del  $H_2$  para el uso indicado, y estimar los costos asociados, para lo cual se ha desarrollado un modelo matemático, denominado MTDH (Modelo para el Transporte y Distribución de  $H_2$ ), que consta de un modelo de energía y un modelo de costos. Con vista a la aplicación del MTDH se propone un Esquema General de Distribución de  $H_2$  que conlleva varios ciclos de distribución de  $H_2$  según la población rural servida y la distancia recorrida en ellos. Finalmente, se realizan las simulaciones de dichos ciclos, obteniéndose en cada caso los costos de inversión, los costos de operación y mantenimiento y los costos totales de transporte y distribución.

## Núcleos Rurales a Abastecer

La primera etapa del estudio consiste en precisar la región rural venezolana a satisfacer de energía, lo cual haremos con la ayuda de varios indicadores demográficos y socioeconómicos, todos tomados de estudios oficiales [8], y relacionados con: a. El porcentaje de población rural, b. La carencia de servicios de energía; c. El Índice de Desarrollo Humano, IDH [9]; y, d. La Infraestructura vial. El criterio seguido ha sido encontrar una región con una alta proporción de población rural y con valores de los otros indicadores muy por debajo de la media nacional, de manera que la utilización del  $H_2$  como vector energético esté plenamente justificada al contribuir a elevar la calidad de vida y propiciar un desarrollo sustentable en dicha región.

En este sentido, si tomamos en cuenta que en la división político-territorial de Venezuela se establecen 23 estados, 330 municipios y 1680 parroquias [10]; entonces, la selección procede por comparación directa y de manera incluyente; es decir, primero se escoge el estado, luego el municipio y por último la parroquia, resultando seleccionado el estado Portuguesa, ubicado en el centro occidental del país; dentro de éste, el Municipio Guanarito y, finalmente la parroquia Trinidad de la Capilla, que ocupa un área aproximada de 900 km<sup>2</sup>.

## Forma y Medio de Transporte de $H_2$

Luego de una revisión bibliográfica exhaustiva [11-14], con respecto a la forma y medio de transportar el  $H_2$ , hemos seleccionado el  $H_2$  gaseoso comprimido a 200 bares en cilindros de 50 L de volumen geométrico y transportado por carretera en camiones. Las razones para ello han sido:

- El  $H_2$  gaseoso comprimido es la forma usual y más adecuada de transporte para los usos finales propuestos [11, 12].
- El transporte en forma de gas comprimido evita un consumo adicional de energía de compresión.
- El transporte por carretera en camiones es la mejor opción para el transporte de pe-

peñas cantidades de  $H_2$  a cortas distancias [13-14], como es el caso de nuestro estudio.

- d. La infraestructura vial de Venezuela corresponde en un alto porcentaje a autopistas, carreteras y caminos, estos últimos en el sector rural [10]. Por lo tanto, la movilidad de carga y pasajeros se realiza mayoritariamente en vehículos a gasolina o diesel.
- e. La realidad socio-económica del medio rural venezolano, de bajos ingresos y escaso nivel de instrucción [8], impone seleccionar las opciones tecnológicas más simples.

### Modelo de Energía

Tiene como propósito determinar el contenido energético del cilindro de  $H_2$  según su capacidad, y el número de cilindros necesarios para satisfacer el consumo energético mensual de un hogar rural. Los cálculos se hacen con base en el valor calorífico superior del  $H_2$ , HHV.

#### Contenido energético del cilindro

El peso del  $H_2$  contenido en el volumen geométrico de los cilindros, a las condiciones de presión y temperatura de confinamiento (200 bares y  $21^\circ C$  respectivamente), se calcula utilizando la ecuación de estado de Peng-Robinson [15], obteniéndose un peso de  $H_2$ ,  $P_H$ , de 0,7625 kg/cilindro. El contenido energético del cilindro es entonces:

$$C_E = P_H \text{ HHV} = 0,7625 \text{ kg/cilindro} \times 39,7 \text{ kWh/kg} = 30,27 \text{ kWh/cilindro} \quad (1)$$

#### Consumo de cilindros por hogar rural

Conociendo el consumo energético anual por habitante en el medio rural,  $C_{HR}$ , estimado en 191 kWh/hab.año [3], se calcula la cantidad de cilindros por habitante como:

$$N_{CH} = \frac{C_{HR}}{C_E} = \frac{191 \text{ kWh / hab.año}}{30,27 \text{ kWh / cilindro}} = 6,3 \text{ cilindro/hab.año} \quad (2)$$

Considerando que un hogar rural promedio venezolano está integrado por cinco miembros [8], entonces el número de cilindros por hogar es:

$$C_{CH} = N_{CH} \times P_{HH} = 6,3 \text{ cilindros/hab.año} \times 5 \text{ hab/hg/12 mes/año} \approx 3 \text{ cilindros/hg.mes} \quad (3)$$

Lo cual significa que un hogar rural requiere cada diez días, en promedio, un cilindro de  $H_2$  de las características especificadas. Este resultado será de gran utilidad para desarrollar el Esquema General de Distribución de  $H_2$ .

#### Peso del cilindro de hidrógeno

Se obtiene de las especificaciones de diseño del fabricante [16]. El peso del cilindro lleno y la capacidad máxima de carga del camión de transporte determinan el número máximo de cilindros a transportar por viaje.

#### Producción anual de hidrógeno

Es directamente proporcional al consumo anual de energía por habitante rural,  $C_{HE}$ , estimado en  $54,5 \text{ Nm}^3 H_2$  [3], y al número de habitantes,  $N_{HAB}$ , que se consideren, según un factor de producción,  $F_P$ , que pondera las eventuales pérdidas por operación y manejo.

$$P_{HA} = F_P C_{HE} N_{HAB} \quad (4)$$

#### Modelo de Costos

El modelo de costos incluye el costo del capital, representado por la inversión de los camiones y cilindros, y el costo de operación y mantenimiento de ambos.

#### Costos de capital

**Costo de los camiones.** Su inversión depende del costo unitario del camión,  $C_{UC}$ , y del número de camiones,  $N_{CA}$ , necesarios para ejecutar un determinado ciclo de distribución. Con respecto al primero, su valor se obtiene de la oferta comercial en Venezuela según la capacidad máxima de carga del camión. Por su parte, el número de camiones resulta del tiempo total consumido en el ciclo de distribución y de su disponibilidad diaria, tal como lo expresa la ecuación 20, a la que después nos referiremos. Por tanto, la inversión total en camiones,  $C_{ICA}$ , es:

$$C_{ICA} = C_{UC} N_{CA} \quad (5)$$

**Número de cilindros.** Para estimar la inversión de los cilindros, lo primero es conocer el número necesario. Este dependerá de la demanda según los usos finales propuestos. Entonces, cualesquiera sean los dispositivos utilizados para la generación de calor y electricidad a partir de  $H_2$ , y el consumo de cada uno de ellos, los hogares rurales deberán tener una provisión continua de  $H_2$ . Para el cálculo del número de cilindros,  $N_{CI}$ , se establece que cada hogar dispondrá simultáneamente de dos cilindros, uno principal y otro de reserva, el cual se utilizaría inmediatamente al agotarse el  $H_2$  del primero. El segundo cilindro impediría que el usuario se viera afectado por imprevistos cortes en el suministro. En consecuencia, el número mínimo de cilindros a adquirir viene dado por:

$$N_{MIN} = 2 N_H \quad (6)$$

Asumiendo un factor de contingencia del 10%, se tiene:

$$N_{CI} = 1,1 N_{MIN} \quad (7)$$

**Costo de los cilindros.** De la información de fabricantes de recipientes de almacenamiento de  $H_2$  y de la bibliografía consultada, [12-14], hemos estimado un costo unitario del cilindro elegido,  $C_{UCI}$ , e indicado en la Tabla 1. El costo de inversión de los cilindros es:

$$C_{IC} = C_{UCI} V_C N_{CI} \quad (8)$$

De manera que el costo total de inversión es:

$$C_{TI} = C_{ICA} + C_{IC} \quad (9)$$

Con un Factor de Recuperación de Capital, igual a:

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

donde  $d$  es la tasa de descuento, mientras que  $n$  representa el tiempo de vida útil del equipo o maquinaria considerado.

Si asumimos para  $n$  un valor de 5 años para los camiones y de 10 años para los cilindros [12, 13], los respectivos costos de inversión anualizados se calculan como:

$$C_{ICIA} = F_{RCI} C_{IC} \quad (11)$$

$$C_{ICAA} = F_{RCA} C_{ICA} \quad (12)$$

El costo total de la inversión anualizada quedará:

$$C_{TIA} = C_{ICIA} + C_{ICAA} \quad (13)$$

### Costos de O&M

**Costos de operación.** Están representados por el costo del combustible, el costo de la operación del camión y el costo de la mano de obra necesaria, tanto para la carga de los cilindros desde la unidad de almacenamiento al camión, como para la descarga de los cilindros desde el camión hasta los hogares rurales, y viceversa. Para la estimación de estos costos se definen las siguientes variables:

Viajes Anuales:

$$N_{VA} = N_{VC} C_A \quad (14)$$

Distancia Anual Recorrida:

$$D_{AR} = D_{PC} C_A \quad (15)$$

Tiempo Promedio Viaje:

$$T_{PV} = D_{PV}/V_P \quad (16)$$

Tiempo Anual de Operación del Camión:

$$T_{OA} = T_{PV} N_{VA} \quad (17)$$

Tiempo Anual de Carga y Descarga:

$$T_{CD} = T_{CV} N_{VA} \quad (18)$$

Tiempo Anual de Distribución:

$$T_{AD} = T_{OA} + T_{CD} \quad (19)$$

Número de Camiones:

$$N_{CA} = T_{AD}/D_C \quad (20)$$

Consumo Anual de Combustible:

$$C_{CA} = D_{AR}/R \quad (21)$$

Entonces, los costos anuales de operación, discriminados por tipo, se calculan como:

Costo Anual Conductor:

$$C_C = C_{HC} T_{OA} \quad (22)$$

Costo Anual Mano de Obra:

$$C_{MO} = C_{HMO} T_{CD} \quad (23)$$

Costo Anual Combustible:

$$C_{CB} = P_{CB} C_{CA} \quad (24)$$

Y el Costo Anual de Operación:

$$C_{OA} = C_C + C_{MO} + C_{CB} \quad (25)$$

**Costo de mantenimiento.** Las labores de mantenimiento de los cilindros consisten en pruebas hidrostáticas y reposición de válvulas, mientras que para los camiones son las acostumbradas para vehículos a gasolina o diesel. Los costos de mantenimiento de ambas labores suelen estimarse, para casos como el nuestro, en el 5% de la inversión anualizada [6, 12], tal que:

$$C_{MA} = 0,05 C_{TIA} \quad (26)$$

### Ecuación general para el modelo MTDH desarrollado

Los costos totales anuales, por peso de  $H_2$  transportado,  $P_{HA}$ , en el mismo lapso de tiempo son:

$$C_{TA} = (C_{TIA} + C_{OA} + C_{MA})/P_{HA} \quad (27)$$

### Aplicación del Modelo

El modelo desarrollado se aplicará a núcleos rurales ubicados en la parroquia Trinidad de la Capilla, del Municipio Guanarito del estado Portuguesa, con una población de 3.658 habitantes [10]. Geográficamente la parroquia está dividida en sectores, en los cuales se encuentran 45 núcleos rurales, localizados a distancias variables de la capital de parroquia, San José de la Capilla, única población de tipo urbano-rural, y en la cual se ha supuesto que está ubicado el centro de producción y almacenamiento del  $H_2$  electrolítico.

La información sobre el número de hogares sin servicio de energía en cada centro poblado rural de la parroquia, y la distancia de éstos a la capital de la misma, se ha obtenido de estadísticas oficiales [8]. En resumen, hay un total de 539 hogares rurales sin servicios de energía, tanto en núcleos rurales como diseminados, y que representan el 80% del número total de hogares rurales de la parroquia. En la Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros utilizados en el modelo.

Tabla 1  
Valores de los Parámetros del MTDH

Parámetro	Valor
Costo Unitario Camión ( $C_{UC}$ )	35.000 \$
Capacidad Máxima Camión	4.000 kg
Costo Unitario Cilindros ( $C_{UCI}$ )	4,73 \$/L
Volumen Cilindros ( $V_C$ )	50 L
Rendimiento Camión (R)	4 km/L
Velocidad Camión ( $V_p$ )	30 km/h
Tiempo Carga y Descarga ( $T_{CD}$ )	2 h/viaje
Disponibilidad Camión ( $D_C$ )	12 horas/día
Disponibilidad Conductor ( $D_{CON}$ )	8 horas/día
Salario Conductor ( $C_{HC}$ )	10 \$/hr
Salario Mano de Obra ( $C_{HMO}$ )	2 \$/hr
Precio Combustible ( $P_{CB}$ )	0,05 \$/L
Factor de Producción ( $F_p$ )	1,1
Tiempo de vida (n)	Camión: 5 Cilindros: 10
Tasa Anual de descuento (d)	10
Factor de Recuperación Capital (F)	Camión: 0,2638 Cilindros: 0,1628

## Resultados y Discusión

### Esquema general de distribución de $H_2$

La distribución de  $H_2$  a los hogares rurales toma en cuenta la: a. Capacidad máxima de carga del camión; b. Distancia máxima a recorrer; y, c. Disposición geográfica de los sectores y centros poblados. Con respecto al primer punto, la capacidad máxima se indica en la Tabla 1, y corresponde a un camión de un tamaño adecuado para el tipo y condiciones de las vías rurales de la parroquia [8]. Esta capacidad determina el número máximo de cilindros a transportar; y por lo tanto, el número de hogares a abastecer de cilindros por viaje completo. En cuanto a la distancia máxima a recorrer, la misma corresponde al centro poblado más lejano, *El Limoncito IV*, ubicado a 62 km

de la capital de la parroquia. Por último, la disposición geográfica de los sectores, permite agruparlos según su proximidad. Tomando en cuenta todo lo anterior, en la Tabla 2 se presenta el Esquema General de Distribución de  $H_2$ , en el cual al número de hogares atendidos por día, se han añadido ocho hogares, correspondientes al promedio diario de atención de los 53 hogares diseminados.

El Esquema General de Distribución propuesto pretende equilibrar los efectos de las siguientes variables: Número de Hogares Atendidos, Número de Viajes Completos, Distancia Recorrida por Viaje y Carga Total Transportada. Además, constituye la base para generar numerosos ciclos de distribución de los que se han elegido los tres que resultaron más adecuados al caso en estudio.

### Ciclos de distribución de $H_2$

Con el fin de estudiar el efecto en los costos de la distancia recorrida y del número de hogares

atendidos, en la Tabla 3 se presentan tres ciclos posibles de distribución, cada uno con diferente duración, número de viajes y porcentaje de hogares atendidos. Los ciclos obtenidos lo han sido de forma que en todos ellos se abastezca una misma cantidad de hogares rurales por viaje,  $N_{HV}$ , tal como se muestra en la columna 6, lo cual será de utilidad para estudiar el efecto de la variación de la distancia recorrida en el transporte de un mismo peso de  $H_2$ . Además, en el ciclo de mayor duración se atendería al 100% de los hogares rurales considerados en este estudio.

Los tres ciclos propuestos tienen como características:

1. Una relación proporcional directa entre la cantidad de sectores atendidos y la duración del ciclo, y entre el número de hogares atendidos y la distancia promedio recorrida en el ciclo.
2. Una relación proporcional inversa entre la distancia promedio por viaje,  $D_{PV}$ , y el número de viajes del ciclo respectivo,  $N_{VC}$ , co-

Tabla 2  
Esquema General de Distribución de  $H_2$  en la parroquia Trinidad de la Capilla

Día	Sectores Atendidos	Hogares Atendidos	Viajes Completos	Distancia Total (km)	Carga Total (kg)
1	1	50	1	116	3.650
2	1-2	50	1	124	3.650
3	2-3	85	2	120	6.205
4	4	90	2	76	6.570
5	3-5	128	3	122	9.344
6	6-7	91	2	124	6.643
7	7	45	1	64	3.285
Total	7	539	12	746	39.347

Tabla 3  
Ciclos de Distribución de  $H_2$  en la parroquia Trinidad de la Capilla

Ciclo	Total Sectores Atendidos	Duración (Días)	$N_H$	Hogares Atendidos (%)	$N_{HV}$	$D_{PV}$	$N_{VC}$	$D_{PC}$	Carga Transportada (%)
Uno	3	3	185	34	45	108	4	432	85
Dos	5	5	405	75	45	75	9	663	82
Tres	7	7	539	100	45	73	12	857	82

lumnas 7 y 8. De esta manera, en el Ciclo 1, que incluye los sectores más alejados del sitio de producción, se realiza el menor número de viajes, 4, pero con la mayor distancia promedio por viaje; mientras que en el Ciclo 3 se realiza la mayor cantidad de viajes, 12, pero con la menor distancia promedio recorrida.

3. Un porcentaje de carga transportada superior al 80% de la carga máxima, lo cual indica un satisfactorio nivel de utilización de la capacidad de carga del camión.

### Simulación de los ciclos de distribución de H<sub>2</sub>

En el análisis de los resultados de las simulaciones se debe tomar en cuenta las particularidades del caso en estudio, en especial que el usuario final no es único ni está localizado a una distancia fija del sitio de producción y almacenamiento, sino un conjunto de hogares distribuidos en una amplia área de 900 km<sup>2</sup>. Además, en las Figuras 1, 2, 3 y 5, los tres puntos que aparecen en las gráficas corresponden a los tres ciclos estudiados.

En la Figura 1, se aprecia el efecto de la economía de escala sobre los costos totales al incrementarse la producción de H<sub>2</sub> o, lo que es lo mismo, el número de hogares atendidos, que se representa en la Figura 2.

La influencia de la distancia recorrida en los costos totales se manifiesta en dos formas diferentes; la primera considera el efecto de la distancia promedio del ciclo y se muestra en la Figura 3.

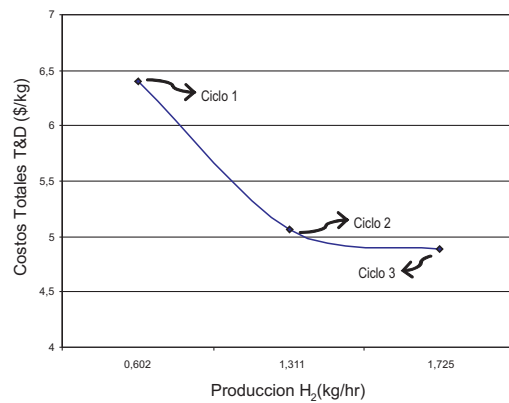


Figura 1 Costos totales de T&D según la producción de H<sub>2</sub>.

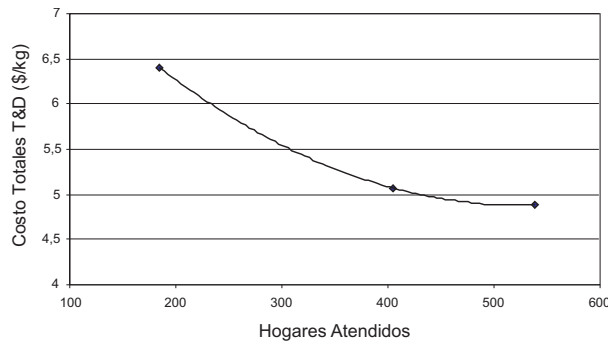


Figura 2. Costos totales de T&D según los Hogares atendidos.

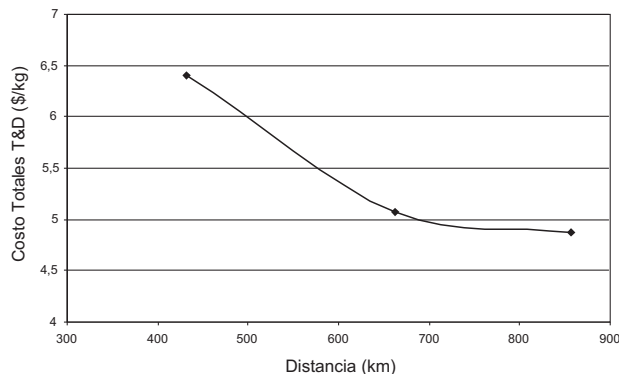


Figura 3. Costos totales de T&D con la distancia recorrida en el ciclo.

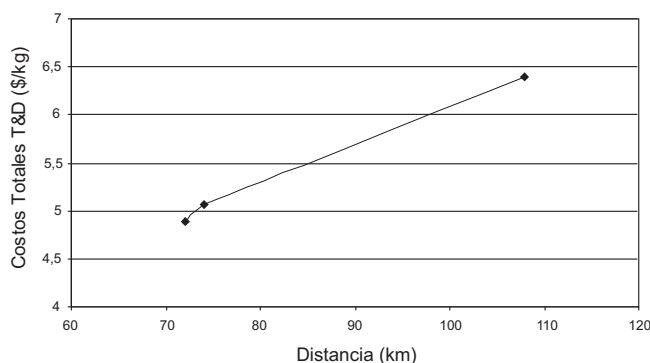


Figura 4. Variación de los costos con la distancia promedio recorrida por viaje.

Se observa una disminución en los costos totales con la distancia. Si tomamos en cuenta la Ec. 27, entonces este comportamiento se explica al predominar el incremento en la producción de  $H_2$  sobre el correspondiente aumento en los costos de inversión y de O&M. Ambos efectos son, a su vez, una consecuencia directa de la ampliación en la cobertura de hogares atendidos.

Una segunda forma de estudiar la influencia de la distancia recorrida en los costos totales, es considerar la distancia promedio recorrida por viaje, para una misma cantidad de  $H_2$  transportado, que se representa en la Figura 4. Como era de esperar, los costos totales aumentan a medida que la distancia recorrida aumenta, debido a un incremento en los costos de operación del camión. La distribución porcentual de los costos totales según el tipo de costos, se muestra en la Figura 5, evidenciándose el predominio de los costos de inversión.

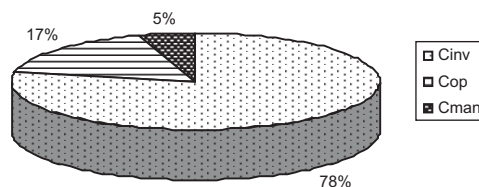


Figura 5. Distribución porcentual de los costos totales según su tipo. Ciclo Tres.

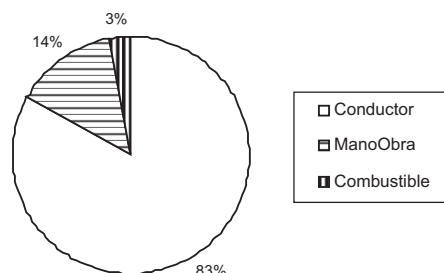


Figura 6. Distribución porcentual de los costos de operación. Ciclo Dos.

En la Figura 6 se muestran los costos de operación, predominando los correspondientes al camión, representados por los costos del conductor, resultado acorde con los obtenidos en estudios similares [7, 17].

Una forma de evaluar los resultados del MTDH es compararlos con la opción tradicional de suministro de energía por tendido eléctrico, para lo cual se debe cuantificar lo que costaría extender la red eléctrica para cubrir todas las poblaciones rurales consideradas en este estudio. La principal dificultad radica en obtener estimados fiables y actuales de los costos de transmisión y distribución de potencia eléctrica en el sector rural de Venezuela. Young y Mill [18] estiman un costo básico de 10.000 \$/km, el cual se utilizará en la comparación; entonces, para llevar la

electricidad al centro poblado más lejano de la capital de la parroquia, *El Limoncito IV*, se debería invertir:

$$C_{IE} = 10.000 \text{ \$/km} \times 62 \text{ km} = 620.000 \text{ \$} \quad (28)$$

Si ahora se considera el costo de la inversión del MTDH para cubrir toda la parroquia (Ec. 9):

$$C_{TI} = C_{ICA} + C_{IC} = 315.442 \text{ \$} \quad (29)$$

Estos resultados indican, en principio, que el costo de transporte y distribución de  $H_2$  en la forma que hemos establecido, serían competitivos con la opción del suministro de energía por tendido eléctrico.



## Conclusiones

Se estudia el transporte y distribución, T&D, de  $H_2$  desde su centro de producción y almacenamiento hasta los usuarios finales ubicados en el sector rural venezolano. El  $H_2$  se transporta en camiones como gas a una presión de 200 bares en cilindros de 50 l de volumen geométrico. Con el fin de estimar los costos de T&D, se desarrolla un modelo matemático no lineal, llamado MTDH, conformado por un modelo de energía que calcula el número de cilindros de  $H_2$  requeridos para abastecer a todos los hogares de la región sujeto de estudio, y un modelo de costos que estima los costos de inversión, de operación y mantenimiento y los costos totales por peso de hidrógeno transportado. El MTDH se aplica en la parroquia rural Trinidad de la Capilla. Se propone un Esquema General de Distribución de  $H_2$ , y derivados de éste, se establecen tres posibles Ciclos de Distribución con un porcentaje creciente de hogares atendidos y distancia recorrida. Los resultados indican que la economía de escala permite reducir los costos totales a medida que aumenta el número de hogares abastecidos o, equivalentemente, la cantidad de  $H_2$  transportado. También, al aumentar la distancia total recorrida, los costos totales disminuyen debido a la economía de escala, mientras que al incrementarse la distancia recorrida por viaje dentro de un ciclo, los costos totales aumentan al aumentar los costos de operación. Los costos de inversión dominan en los costos totales y en los costos de operación prevalecen los correspondientes al camión. Los costos obtenidos para el T&D de  $H_2$  resultan competitivos con la opción de suministro de energía por tendido eléctrico.

## Nomenclatura

$C_P$  : Centros Poblados  
 $C_T$  : Carga Total (kg)  
 $C_E$  : Contenido Energético (kWh/cil)  
 $C_{ICA}$ : Costo Inversión de los camiones (\$)  $C_{TIA}$ : Costo Inversión Anualizado (\$/año)  
 $H_{CP}$ : Hogares por centro poblado =  $N_H/C_P$   
 $N_{CH}$ : Número de cilindros por hogar  
 $D_{CP}$ : Distancia a la capital de la parroquia (km)  
 $N_H$  : Número de Hogares sin servicio de energía

$N_{HT}$  : Total Hogares sin energía por centro poblado  
 $N_{HAB}$ : Número de Habitantes sin servicios de energía  
 $C_{HE}$ : Consumo de  $H_2$  ( $Nm^3H_2/año.hab.$ )  
 $C_A$  : Ciclos Anuales (ciclos/año)  
 $C_{CH}$ : Cilindros por hogar (cil/hg.mes)  
 $C_{TI}$  : Costo Total de la Inversión (\$)  
 $D_{PV}$ : Distancia Promedio por viaje (km)  
 $D_{PC}$ : Distancia Promedio por ciclo (km)  
 $N_{CI}$ : Número total de cilindros  
 $P_H$  : Peso de hidrógeno (kg/cil)  
 $N_{MIN}$ : Número mínimo de cilindros  
 $N_{VA}$ : Número de viajes anuales (viaje/año)  
 $N_{VC}$ : Número de viajes por ciclo (viaje/ciclo)

## Referencias Bibliográficas

1. St-Arnaud, J.M. and T.K. Bosse, Renewable energy systems based on hydrogen for remote applications, *J. of Power Source*, vol 96 (2001), 68-172.
2. Sadpru, K., Strategies for introducing renewable hydrogen for transportation and cooking in developing countries, *Proceedings World Hydrogen Energy Conference*, 2002.
3. Posso, F., Desarrollo en Venezuela de un sistema energético basado en el hidrógeno. I: Producción de hidrógeno electrolítico, *Revista Técnica de Ingeniería*, vol 30, (2007) 201-208.
4. A. Contreras and F. Posso, Modelling and simulation of the storage of hydrogen form hydroelectricity in Venezuela. *Proceedings 2<sup>nd</sup> International Hydrogen Energy Congress & Exhibiton*. Instambul. Turkey, 2007.
5. Sherif S., F. Barbir and T.N. Veziroglu, Towards a hydrogen economy, *The Electricity Journal*, vol 18, 6 (2005), 62-76.
6. Berry, G.D. and J. Smith, Integrated Technical and Economic Assessment of Transport and Storage of Hydrogen, 9404162-6. Lawrence Livermore National Laboratory, 1994.
7. Padro, C. and V. Putsche, Survey of the Economics of Hydrogen Technologies, NREL/TP-570-27079, 1999.

8. Atlas del Desarrollo Humano en Venezuela, INE, Venezuela, 2004.
9. Human Development Report 2006. En <http://hdr.undp.org/hdr2006/>.
10. Nomenclador de Centros Poblados 2001, INE, Venezuela, 2004.
11. NRC. The Hydrogen economy: opportunities, costs, barriers, and R&D needs. National Research Council Board on Energy and Environmental Systems. Washington DC, 2004.
12. Amos, W., Costs of Storing and Transporting Hydrogen, NREL/TP-570-25106 National Renewable Energy Laboratory, 1998.
13. Yang, C. and J. Ogden Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode, Int. J. Hydrogen Energy, Vol 32, 2007, 268-286.
14. Shayegan, S., Analysis of the cost of hydrogen infrastructure for buses in London, Journal of Power Sources, Vol 157, 2006, 862-874.
15. Peng, D. and D. Robinson, D., A new two-constant equation of state for fluids and fluid mixtures, Ind. Eng. Chem. Fundam., 15, 58-64, 1976.
16. Catálogo Europeo de Gases Puros, en [www.es.airliquide.com/gases-puros/H2.pdf](http://www.es.airliquide.com/gases-puros/H2.pdf)
17. Simbeck, D. and E. Chang, Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways. Scoping Analysis, NREL/SR-540-32525, 2002.
18. Young, D. and G. Mill, Feasibility of renewable energy storage using hydrogen in remote communities in Bhutan, Int. J. of Hydrogen Energy, Vol.32, 2007, 997-1009.

Recibido el 23 de Octubre de 2007

En forma revisada el 02 de Febrero de 2008