

Influencia de la adición de gas HHO en un motor convencional de gasolina

ING. CRISTÓBAL COELLO BLANCO

Especialista Ciencia Tecnología y Medio Ambiente
coello@cimab.transnet.cu

ING. ARIEL NAVARRO LUGO

Especialista en Sistemas Auxiliares
ariell.93@nauta.cu

Resumen

El empleo del hidrógeno como combustible alternativo automotor, desde hace varias décadas, es de gran interés para el sector transporte, por constituir, potencialmente, un combustible de mayor eficiencia energética y menor contaminación ambiental.

El objetivo de este trabajo consistió en evaluar la influencia de un electrolizador comercial, modelo DC 2000, productor de gas HHO, en el desempeño energético-ambiental de un auto convencional de gasolina mediante el uso de la mezcla de gasolina y gas HHO. Se partió de la hipótesis de que, debido a las propiedades físico-químicas del hidrógeno contenido en el gas HHO, se podía mejorar la combustión de los vehículos, con la consiguiente reducción del consumo de combustible y de las emisiones de gases contaminantes.

Los resultados obtenidos no se correspondieron con lo argumentado por el fabricante, en lo concerniente a la productividad de la celda y la reducción del consumo de combustible.

Las principales conclusiones se correspondieron con las siguientes:

- ▶ La productividad del electrolizador resultó 20% inferior a la publicada por el fabricante.
- ▶ La eficiencia de la celda fue de 43-47%, siendo la pérdida de energía mayor que la fracción útil de la misma.
- ▶ En las pruebas realizadas no cumplieron con el pronóstico de ahorro de combustible de 30-45% estipulado por el fabricante.
- ▶ Con la combustión de mezcla HHO –gasolina, las emisiones de gases de combustión de CO disminuyeron en 14.7% y las HC en 10.6%.

Abstract

The use of hydrogen as an automotive alternative fuel, since several decades, has a great interest for transport sector, due to that it potentially represents a fuel with more energy efficiency and less environmental pollution.

The objective of this work was to evaluate the influence of a commercial electrolyser, model DC 2000, producer of HHO

gas, in the energy-environmental performance of a conventional gasoline car by using the mixture of gasoline and HHO gas. It was started from the hypothesis that due to the physico-chemical properties of the hydrogen contained in the HHO gas, it could be improved the combustion process, with the resulting decrease of the fuel consumption and emissions of polluting gases.

The results do not correspond with what the manufacturer assured concerning to cell productivity and the reduction of the fuel consumption.

The main conclusions are:

- ▶ *The productivity of the electrolyser was 20% lower than the one published by the manufacturer.*
- ▶ *The cell efficiency was 43-47%; the energy loss was greater than its useful fraction thereof.*
- ▶ *In the tests carried out, they did not meet the forecast of 30-45% in fuel savings stipulated by the manufacturer.*
- ▶ *With the combustion of HHO-gasoline blend the combustion gases emissions of CO decreased by 14.7% and the HC by 10.6%.*

Introducción

La utilización del hidrógeno como vector energético, desde hace algún tiempo, atrae la atención en el sector del transporte, por sus notables propiedades físico-químicas como combustible. Entre los combustibles convencionales posee mayores valores en el poder calórico inferior (120 MJ kg^{-1}), el coeficiente de difusión másica-térmica, el rango de inflamabilidad así como de la temperatura adiabática de la llama y la velocidad de combustión laminar. La combinación de su alta velocidad de la llama y mínima distancia de apagado le confiere una alta tasa de reacción sobre la mezcla en el cilindro, obteniéndose solo agua como producto de la combustión (Verhelst y Wallner, 2009).

El hidrógeno es el gas más ligero, por lo que su alto volumen específico ocasiona una muy baja densidad energética (10 MJ m^{-3}), lo que dificulta su aplicación en el transporte. En tal sentido, las soluciones han estado dirigidas a su licuefacción o compresión a elevadas presiones, lo cual demanda de recipientes con estructuras reforzadas con fibras de vidrio y de carbono sobre acero, sin que se logre alcanzar la densidad de energía que garantizan los combustibles fósiles convencionales.

Una de las soluciones utilizadas para solventar los problemas de transportación y almacenamiento del hidrógeno, es la de su generación a bordo de los propios vehículos automotores, mediante la electrólisis del agua como una mezcla de hidrógeno y oxígeno (sin aislar estos gases en ánodo y cátodo),



Figura 1. Ubicación de la alimentación del HHO.

adicionándolos en la mezcla estequiometría en la admisión del motor (Figura 1).

Aunque de acuerdo con electroquímica clásica se obtiene una mezcla gaseosa de hidrógeno y oxígeno (H_2/O_2), precursores de este método prefieren llamarlo gas HHO o como también se conoce Brown's gas. El argumento base resulta de la hipótesis de formación de moléculas no diatómicas que explican algunas singulares propiedades que exhibe el gas HHO. Ruggero (2006), partiendo de mediciones realizadas, sugiere la existencia de una nueva forma de agua con la estructura $(H \times H) - O$ donde « \times » representa el nuevo enlace magnecular y « $-$ » el enlace molecular convencional. La transición de la especie $H-O-H$ convencional a la nueva especie $(H \times H) - O$ se predice por un cambio de la polarización eléctrica del agua causada por el electrolizador.

El objeto fundamental de este método consiste en el empleo de una celda electrolítica de alta eficiencia que, a partir de las propiedades del hidrógeno presente en el gas oxi-hidrógeno producido (HHO), favorezca la cinética de la combustión y eleve la eficiencia térmica.

Estudios de la aplicación de la electrolisis en motores a gasolina muestran resultados positivos con distintos rangos de ganancia energética. Kassaby, et al. (2015) publican resul-

tados de ahorro de combustible del 20% y disminución de las emisiones, 18% en CO, 14% en HC y 15% en NO_x , mientras que Karagöz, et al. (2015), en ensayos realizados variando el flujo de HHO, solo alcanzan un máximo de ahorro de combustible de 8.6% a bajas revoluciones, reducciones del 13% en las emisiones de HC y del 10 % CO así como incremento entre 3.7%-17% en las de NO_x .

El objetivo en este estudio fue evaluar la influencia de un electrolizador comercial modelo DC 2000, productor de gas HHO, en el desempeño energético-ambiental de un auto Lada VAZ-21074, con motor a gasolina, mediante el uso de la mezcla de gasolina y gas HHO como aditivo. El fabricante recomienda el empleo de una relación de 0.25 l min^{-1} por cada 1000 cm^3 de cilindrada y pronostica un ahorro de combustible de 30-45% para este tipo de motor con alimentación por carburador (Electrolizador DC 2000).

Como resultado de las pruebas de consumo y evaluaciones realizadas en este trabajo, no se alcanzaron los niveles de ahorro estipulados por el fabricante del electrolizador ni por otros investigadores, aunque sí se pudo comprobar la disminución de las emisiones de los gases de combustión.

Materiales y Métodos

Caracterización de la celda electrolítica

Se aplica el método de probeta invertida para la recolección de gases (Molina, 2014), determinándose la media, desviación estándar, coeficiente de variación (COV) e intervalo de confianza según la distribución t de Student.

La celda se alimentó con una fuente regulada a 12 volt (V), ajustándose la concentración del electrolito (80% de pureza de KOH) para obtener 2, 4, 6, 8, 10 y 12 amperes (A), siendo esta última la máxima intensidad de corriente permitida por la celda.

Partiendo del volumen recolectado y el tiempo consumido se calculó la producción de HHO y la eficiencia en función de la intensidad de corriente.

En la Figura 2 se muestra el esquema básico de la instalación empleada.

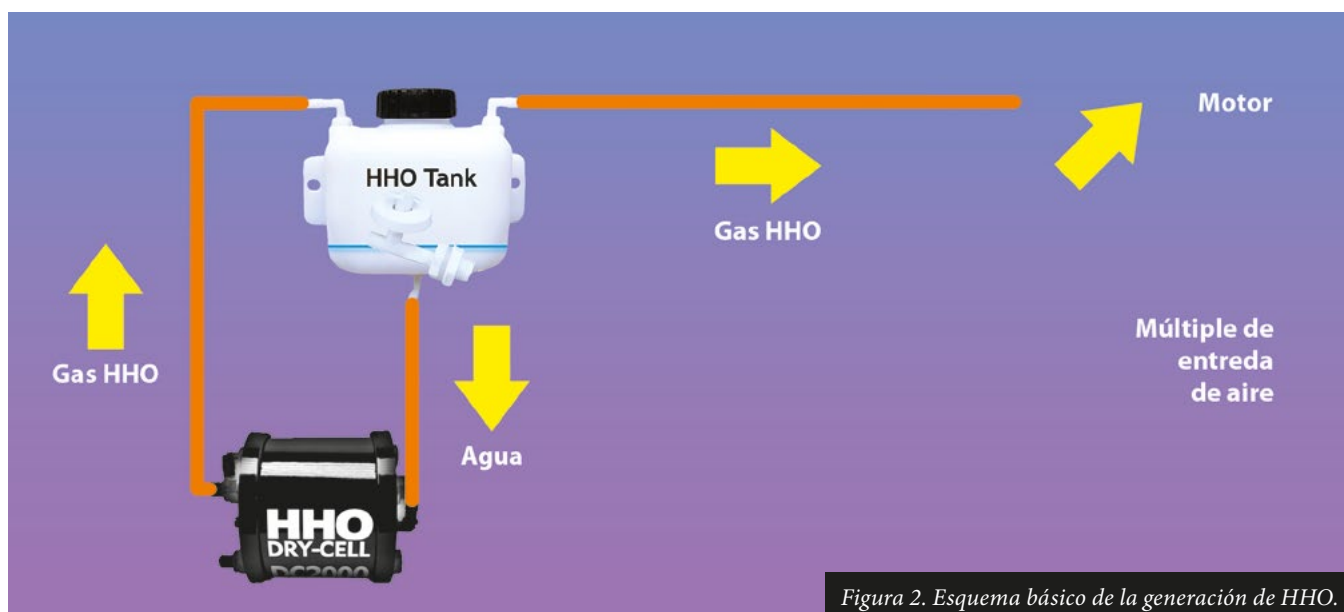


Figura 2. Esquema básico de la generación de HHO.

Pruebas de consumo de combustible

El montaje del generador de HHO y sus accesorios se realizó siguiendo las indicaciones del fabricante. La celda fue montada sobre un soporte en la parte delantera y debajo de la defensa del auto, por constituir un área ventilada, mientras que la alimentación del gas HHO se ubicó en la entrada del carburador como se muestra en la Figura 1.

Para el control del consumo de combustible se empleó el medidor de flujo marca Flowtronic Modelo 206.

La intensidad de corriente y por consiguiente el volumen de gas HHO se controló con un multímetro marca Iunke modelo DJ471101.

Las mediciones de consumo se realizaron con el vehículo con carga y velocidad constante y con el vehículo estacionado sin carga.

Las mediciones con carga y velocidad constante se realizaron en un tramo de un (1) km, certificado por el Centro de Investigación Cid-4 del MINFAR, a velocidades de 40, 60, 80 y 100 km/h para cada valor de flujo de gas HHO establecido. Se efectuaron tres (3) mediciones en ambas direcciones, para compensar las variaciones en la rasante de la vía y de la velocidad del viento.

La carga del vehículo estuvo determinada por el peso del mismo más la del conductor y otros dos pasajeros.

Las mediciones estacionarias sin carga se efectuaron a 950, 1500 y 2000 rpm, para las que se utilizó una batería externa, con el objetivo de cuantificar el efecto energético real

del gas HHO, para excluir el consumo la energía eléctrica en la obtención del mismo.

En ambos casos se realizaron mediciones patrones con la gasolina de diseño del vehículo (sin adición de HHO), con el objetivo de lograr una mayor calidad y precisión en los análisis estadísticos respecto a las mediciones realizadas con las mezclas gasolina- HHO.

Mediciones de los gases de combustión

Las mediciones de los gases de combustión fueron realizadas con el vehículo detenido y el motor sin carga, para velocidades de 950, 1500 y 2000 rpm. Se midió el contenido de monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados, con y sin HHO, utilizándose el analizador de gases CAPELEC tipo CAP3200-OPA. El procedimiento utilizado corresponde al descrito en el propio manual de usuario de dicho dispositivo.

Resultados

Caracterización de la celda electrolítica

El volumen de gas HHO producido por la celda así como el caudal calculado se muestran en la Tabla 1.

Las mediciones de tiempo realizadas se consideran válidas al reflejar valores del coeficiente de variación $<10\%$ para aplicaciones automotor.

En la Figura 3 se muestra el comportamiento de la producción de HHO y masa de H_2 de la celda en función de la intensidad de corriente aplicada.

Tabla 1. Caudal de la celda en función de la intensidad de corriente.

Parámetros	UM	Intensidades de corriente de la celda (A)					
		2	4	6	8	10	12
Tiempo	s	77.92	15.63	10.09	7.74	5.75	5.20
Desv. estándar	-	0.79	0.39	0.42	0.18	0.23	0.23
COV	%	1.01	2.49	4.15	2.31	4.08	4.37
Tiempo inferior	s	77.49	15.41	9.86	7.64	5.62	5.07
Tiempo superior	s	78.36	15.84	10.32	7.84	5.88	5.33
Caudal	L/min	0.023	0.192	0.297	0.387	0.522	0.577

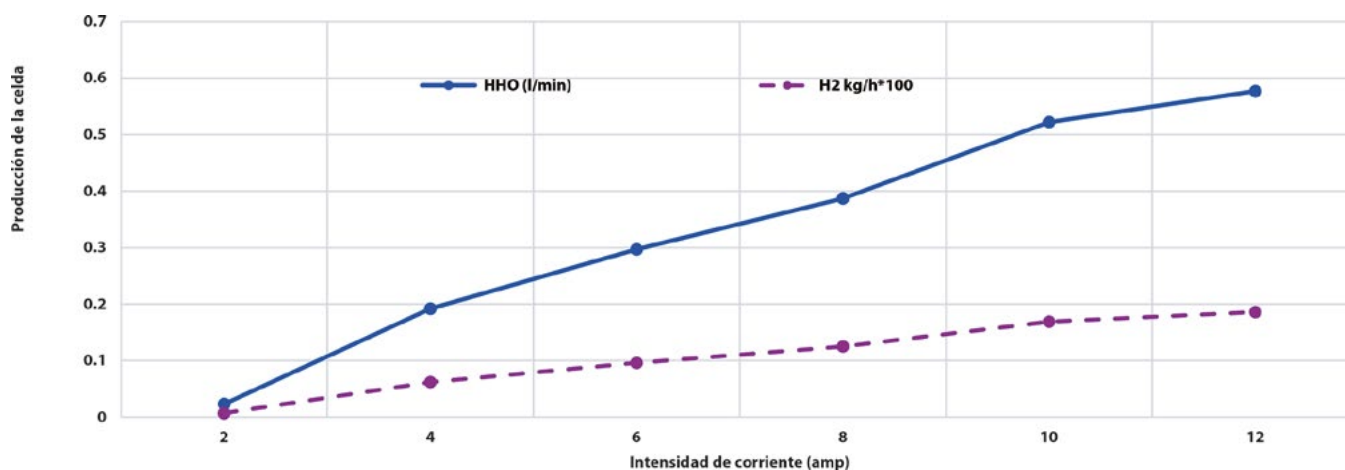


Figura 3. Comportamiento de la producción de HHO y H_2 de la celda.

En la Figura 4 se muestran los valores de eficiencia y de la potencia resultante de la producción de hidrógeno de la celda.

Mediciones de consumo de combustible

Mediciones del vehículo con carga a velocidad constante

En la Figura 5 se muestran, de forma porcentual, los resultados comparativos de estas mediciones.

Mediciones del vehículo estacionado sin carga

Los resultados de las mediciones de consumo de combustible estacionarias se muestran en la Figura 6.

El cálculo la relación entre la energía que aporta el flujo de hidrógeno (120MJ/kg), para cada prueba, con respecto a la gasolina (43.9 MJ/kg) que se ahorra, se muestran en la Tabla 2.

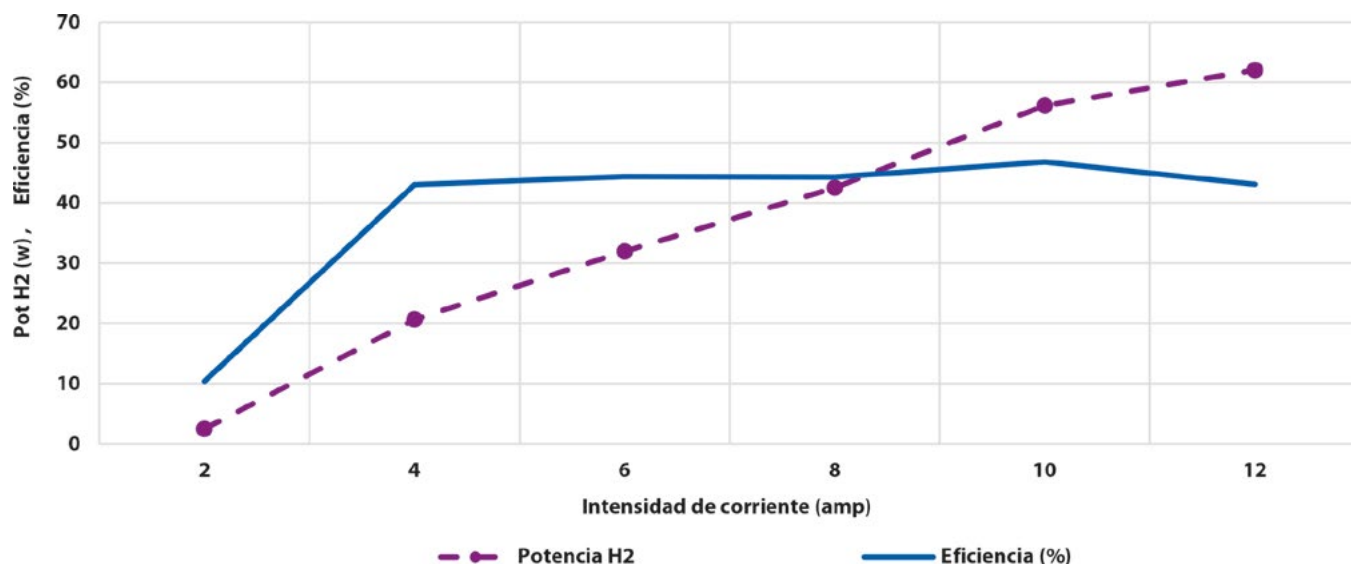


Figura 4. Eficiencia de la celda y potencia resultante de la producción de H₂.

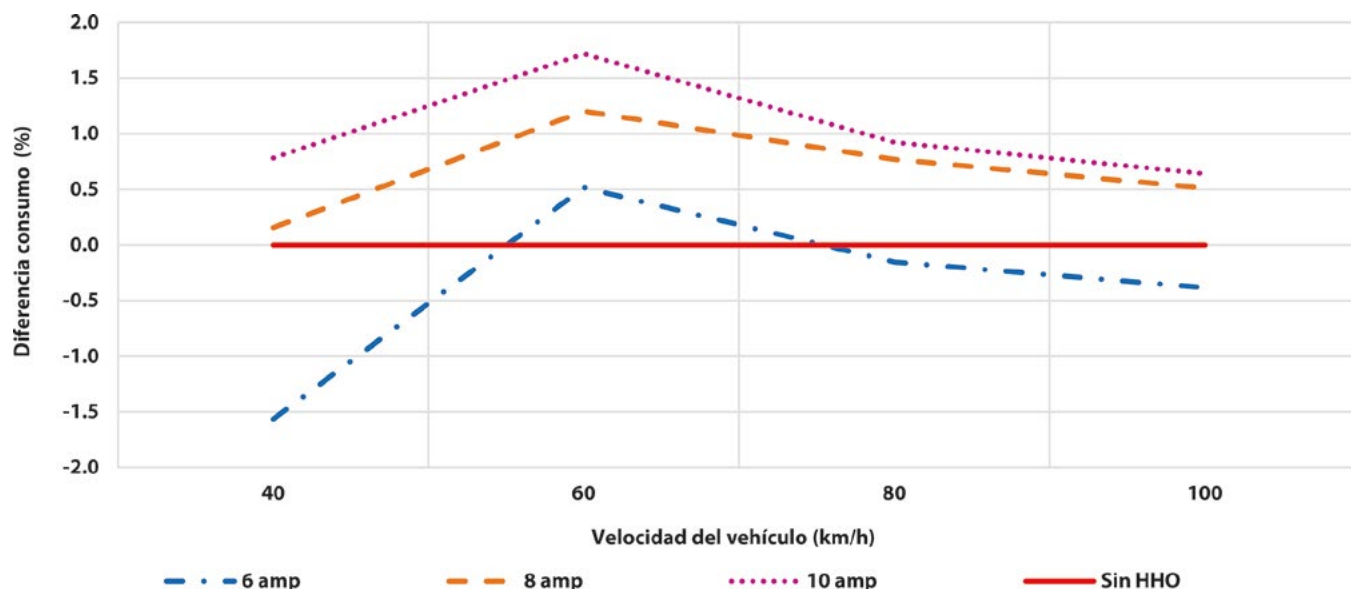


Figura 5. Comparación de consumos de combustible a velocidad constante.

Tabla 2. Fracción en % del hidrógeno en el ahorro de gasolina.

RPM	Ahorro energía H ₂ /gasolina (%)		
	10 A	8 A	6 A
950	9.24	8.64	10.93
1500	7.92	7.78	9.95
2000	4.27	4.09	5.42

Mediciones de los gases de combustión

Las lecturas del contenido de CO y HC en los gases de combustión realizados en el Centro de Revisión Técnica Automotor de la Habana, se muestran en la Tabla 3.

Discusión

Caracterización de la celda electrolítica

En la Tabla 1 y la Figura 3 se observa una función lineal de los productos obtenidos acorde con la primera ley de la elec-

Tabla 3. Mediciones de gases de combustión.

RPM motor	CO (% vol)				HC (ppm)			
	Sin HHO	6 A	8 A	10 A	Sin HHO	6 A	8 A	10 A
950	9.07	7.89	7.86	7.79	757	596	613	576
1500	6.39	5.57	5.56	5.38	371	364	356	362
2000	5.97	5.05	4.98	4.87	264	251	239	241

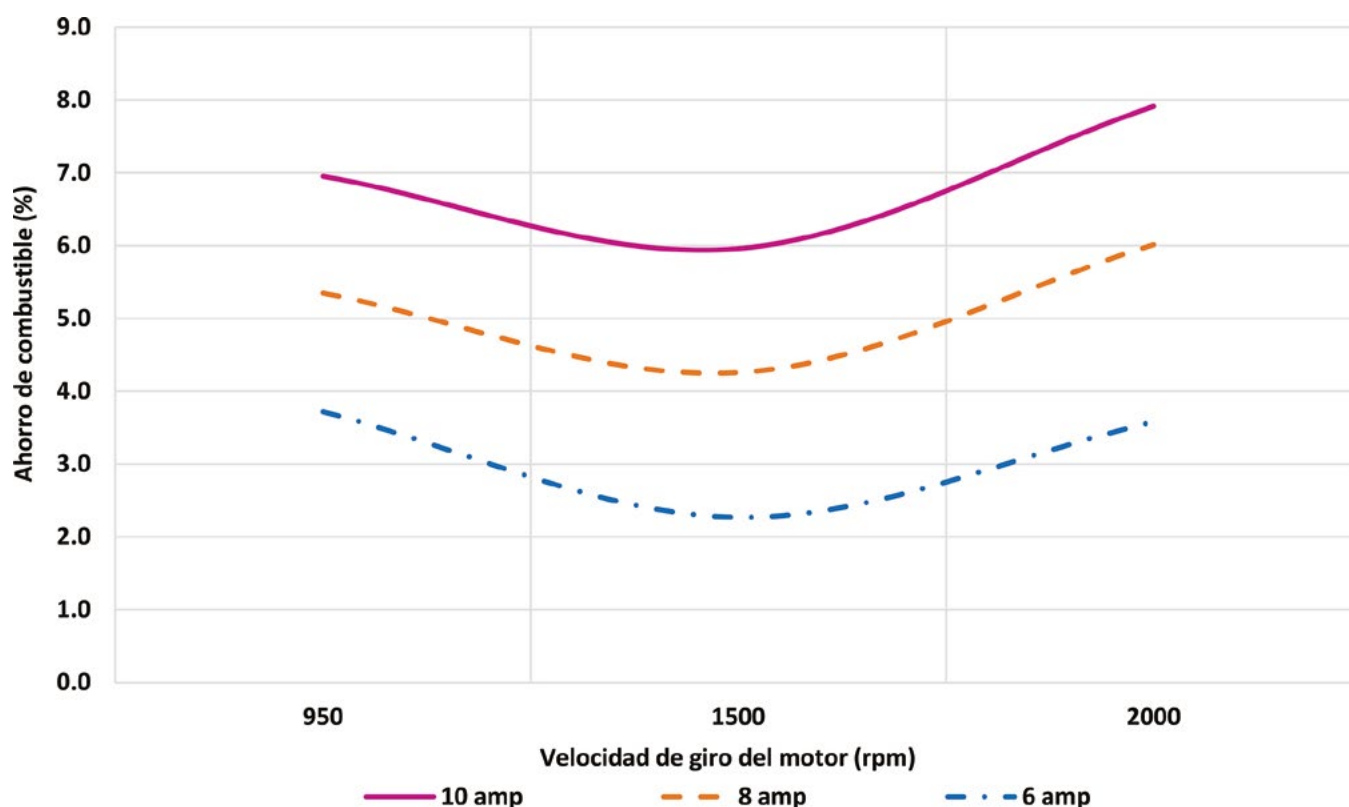


Figura 6. Comportamiento de los consumos sin carga.

trolisis de Faraday para las intensidades entre 4 y 10 A, mientras que los valores extremos (2 y 12 A) se muestran caudales inferiores. La concentración iónica del electrolito es muy baja para 2 A, lo que implica una mala conductividad que obstaculiza el proceso de la electrolisis, aumentando las pérdidas de energía y disminuyendo su eficiencia.

Para doce (12) A, aunque no se produce una significativa pérdida de eficiencia, ocurre una degradación de la disolución que fue observada por un brusco cambio de la coloración y la elevación de la temperatura, lo que explica la disminución del caudal que se logra con esta configuración, por lo que se excluyó la misma del estudio.

Las observaciones anteriores son corroboradas en la curva de eficiencia mostrada en la Figura 4. El valor de solo 10.4 % para 2 A infiere que apenas tiene lugar el proceso de electrolisis. En general, los valores de eficiencia obtenidos resultan inferiores al de las celdas industriales convencionales que oscilan entre 50-70% (Peláez, 2012).

La media de los caudales obtenidos resultan inferiores en 20% a los argumentados por el fabricante, el que, para la cilindrada de 1.6 litros del auto de prueba, recomienda un flujo de HHO de 0.4 l/min, valor que fue obtenido para una inten-

sidad de 8 A. Para ampliar el rango y análisis de las mediciones, en el diseño de las pruebas se incluyó un valor superior (10 A) y otro inferior (6 A).

Mediciones de consumo de combustible

En las mediciones realizadas a velocidad constante, se observa ahorro de combustible cuando la intensidad de corriente en la celda es de 6 amperes (0.3 l/min de HHO), que se corresponde con el menor flujo del gas entre las tres configuraciones de prueba, mientras que para la velocidad de 60 km/h no se logra ahorro en ninguna de las variantes analizadas.

La mejora del consumo, con la adición de HHO, resulta un compromiso entre el aumento de la eficiencia del proceso de combustión, según el volumen de HHO producido, y el costo energético de su obtención. Lo anterior significa que, para el aumento de la energía eléctrica a intensidades de corriente mayores a 6 A, no se obtiene una respuesta proporcional en la eficiencia termodinámica de la combustión.

Las curvas obtenidas tienen un comportamiento común a 60 km/h (mínimo de consumo de combustible), lo que

significa un punto dentro de la región óptima de operación del motor, que minimiza el efecto en las reacciones de combustión por la adición del gas HHO (Karagöz Y et al., 2015).

Resulta evidente que no se lograron los beneficios esperados según lo establecido por fabricante (30-45% de ahorro de combustible) y la literatura técnica especializada, (Karagöz, et al. 2015), (Kassaby, et al. 2015), (Cassidy, 1997) y (Peláez, 2012).

Las mediciones de consumo de combustible con el vehículo detenido y sin carga, sin considerar el gasto energético para la obtención del gas HHO, arrojaron un ahorro de combustible entre 2-8 %, lo que valida el efecto positivo de la presencia de hidrógeno en las reacciones de combustión. Igualmente, se observa que el ahorro logrado es directamente proporcional al volumen de HHO adicionado, lo cual se muestra en la Figura 6.

Este resultado a vehículo detenido sin carga, es contrario al obtenido en las mediciones de consumo con el vehículo cargado, en movimiento y a velocidad constante, donde al aumentar el flujo de HHO, para intensidades de 8 y 10 A, el consumo de combustible es superior al del motor sin adicionar el HHO, estando ello influenciado por la demanda de energía eléctrica para la producción de dicho gas, debido a la baja eficiencia del electrolizador. Por otra parte, el flujo de HHO que penetra a los cilindros es inversamente proporcional a la velocidad de giro del motor, ya que disminuye el tiempo de apertura de las válvulas de admisión.

En resumen se concluye que en las pruebas de consumo sin carga ocurre que a bajas revoluciones, con mezcla enriquecida, prevalece en el ahorro la acción del hidrógeno, a 1500 rpm se observa un mínimo en las curvas por lo que se infiere una zona óptima de operación del motor que minimiza el efecto de la adición del gas, mientras que a 2000 rpm resulta significativa la adición del hidrógeno en la cinética de las reacciones de combustión.

Según se observa en la Tabla 2, la comparación de la fracción que representa el aporte energético del hidrógeno, con respecto al ahorro de gasolina, confirma la función de catalizador del hidrógeno en las reacciones de la combustión, siendo prácticamente despreciable su aporte calórico.

La baja energía de ignición y alto coeficiente de difusión del hidrógeno estimula la creación de centros activos de inflamación que favorecen la fase de combustión difusiva. La alta velocidad y mínima distancia de apagado de la llama del hidrógeno conllevan a una velocidad de reacción nueve veces superior a la gasolina (Verhelst, et al. 2005), lo que permite elevar la velocidad de quemado en la fase principal de la combustión, con incrementos de presión y temperatura que aumentan el trabajo indicado del ciclo y le acercan al modelo teórico que le da origen. También disminuye la fracción del combustible en la fase residual, lo que implica un mayor valor del exponente politrópico en la expansión, que también mejora el trabajo y rendimiento indicado del motor (Jovaj, 1988).

No obstante, el efecto sobre el rendimiento térmico del motor, por la adición de HHO, es limitado por la masa de hidrógeno que no sobrepasa el 0.13% como combustible equivalente.

Mediciones de los gases de combustión

En las mediciones en las pruebas estacionarias, sin carga y con fuente de energía externa, se obtuvo una reducción de

las concentraciones de CO y HC en todos los flujos de HHO, según se observa en la Tabla 3. Como promedio se logra una disminución de 14.7% y 10.6% en los niveles de CO y HC respectivamente, coincidiendo con los resultados publicados por otros investigadores (Karagöz, et al. 2015) y (Kassaby, et al. 2015).

La adición de HHO tiene los mejores efectos en ralentí a 950 rpm, con mezcla enriquecida $\lambda=0.82$ y bajo rendimiento volumétrico, que condicionan un punto de baja eficiencia del motor, que potencia la presencia del HHO en la carga del motor donde se introduce, relativamente, la mayor fracción de dicho gas en los cilindros.

Conclusiones

- ▶ La productividad del electrolizador resultó 20% inferior a la estipulada por el fabricante.
- ▶ La eficiencia de la celda fue de 43-47%, siendo la pérdida de energía mayor que la fracción útil de la misma.
- ▶ En las pruebas realizadas no se cumplieron los pronósticos de ahorro de combustible de 30-45% establecidos por el fabricante.
- ▶ La máxima disminución de consumo de combustible registrada fue de 1.5% a 40 km/h con la mínima demanda de energía de la celda.
- ▶ Con disposiciones de 8 y 10 A el consumo de combustible fue mayor que sin la adición de gas HHO, motivado por la baja eficiencia de la celda.
- ▶ En la pruebas con fuente de energía externa, se obtuvieron ahorros de hasta el 8%, siendo directamente proporcionales al volumen de HHO adicionado.
- ▶ El contenido energético del hidrógeno añadido, menor al 10% del ahorro del combustible, no fue significativo en el aumento de la eficiencia térmica del motor.
- ▶ La adición del hidrógeno elevó el rendimiento indicado del motor al actuar como catalizador de las reacciones químicas de las fases de la combustión, mejorando por extensión el proceso de expansión.
- ▶ Los contenidos de emisiones CO y HC se disminuyeron en 14.7% y 10.6%, respectivamente, con la introducción del HHO en la admisión del motor.

Referencias

- CASSIDY, J. (1997). *Emissions and energy consumption of a piston engine running on a gasoline and a hydrogen-gasoline mixture*.
- Electrolizador DC 2000. Manual de instalación.
- JÓVAJ, M. (1988) *Motores de Automóviles*, Editorial MIR.
- KARAGÖZ, Y. et al. (2015). *Effect of hydrogen addition on exhaust emissions and performance of a spark ignition engine*.
- KASSABY, M. et al. (2015). *Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions*.
- MOLINA, P. (2014). *Prácticas químicas de laboratorio*.
- PELÁEZ, E. (2012). *Técnicas de obtención de hidrógeno*, UH.
- RUGGERO, M. S. (2006). *A new gaseous and combustible form of water*. International Journal of Hydrogen Energy.
- VERHELST, S. et al, (2005). *Laminar and unstable burning velocities of hydrogen-air mixtures at engine-like conditions*.
- VERHELST, S. Y WALLNER T. (2009). *Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines*. ■