

# Determinación de la performance y emisiones en motores de combustión interna al suministrar hidrógeno gaseoso en el proceso de combustión

Nicolás A. Galante<sup>1</sup>, Roberto Franzí<sup>1</sup>, Sergio Macchello<sup>1</sup>, Luis Roche<sup>2</sup>,  
Damián Salinas<sup>1</sup>

*1 Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Buenos Aires, Medrano 951, (C1179AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina*

*2 Universidad Nacional de La Plata y CONICET – Calle 47 y 116, (B1900AJJ), La Plata, Prov. de Buenos Aires, Argentina*

*nicolasgalante@gmail.com*

*Recibido el 27 de julio de 2022, aprobado el 7 de agosto de 2022*

## Resumen

En la actualidad el transporte automotor es el responsable del 10% de las emisiones de gases de efecto invernadero. El hidrógeno es un transportador de energía ideal y una muy buena opción para la descarbonización a gran escala. Puede ser transformado en energía útil de manera eficiente y con impacto en el medioambiente casi nulo, y el subproducto de su utilización es agua y una pequeña cantidad de NO<sub>x</sub>. Puede utilizarse en cualquier aplicación que actualmente funcione con un combustible fósil. Se ha evaluado la utilización de hidrógeno gaseoso en un motor de combustión interna de ciclo Otto instalado en un banco de ensayos. Se obtuvieron mejoras en prestaciones y emisiones. Se exponen y analizan los resultados obtenidos.

**PALABRAS CLAVE:** HIDRÓGENO - MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA - DESCARBONIZACIÓN - EMISIONES

## Abstract

Currently, automotive transport is responsible for 10% of greenhouse gas emissions. Hydrogen is an ideal energy carrier and a very good option for large-scale decarbonization. It can be transformed into useful energy efficiently and with almost zero impact on the environment, and the by-product of its use is water and a small amount of NO<sub>x</sub>. It can be used in any application that currently runs on fossil fuel. The use of gaseous hydrogen in an Otto cycle internal combustion engine installed on a test bench has been evaluated. Improvements in performance and emissions were obtained. The results obtained are exposed and analyzed.

**KEYWORDS:** HYDROGEN - INTERNAL COMBUSTION ENGINE - DECARBONIZATION- EMISSIONS

## Introducción

A lo largo de varias décadas, y con mayor énfasis en los últimos 30 años, la comunidad científica ha dedicado grandes esfuerzos en encontrar un sustituto para los combustibles fósiles. El primer factor desencadenante de esa corriente de investigación fue el agotamiento de dichos combustibles. Si bien la expectativa de la disponibilidad ha ido aumentando con los descubrimientos de nuevos yacimientos, como así también con la modernización de los procesos de extracción y producción, los cuales permiten la utilización de combustibles fósiles no convencionales, dicho agotamiento será alcanzado en algún momento.

Por otro lado, también en las últimas décadas ha aumentado la preocupación por los efectos que ejercen las emisiones de los hidrocarburos en el medioambiente. Ya a principios de la década de 1990, mediante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se advirtió la necesidad del control de las concentraciones de los gases de efecto invernadero en la atmósfera para evitar efectos catastróficos en el clima mundial. A través del Protocolo de Kioto celebrado en 1997, se establecieron obligaciones legales vinculantes para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por los países desarrollados, quienes eran, y siguen siendo en la actualidad, los principales generadores. En 2015 los países miembros de la convención firmaron el Acuerdo de París, en el cual propusieron como objetivo limitar el calentamiento global a menos de 2° C. en el siglo, e intentar que no sea mayor a 1,5 °C. En los años posteriores al Acuerdo de París se ha ido revisando la situación actual con respecto a las metas planteadas oportunamente, y se ha concluido que la situación climática se encuentra en emergencia, siendo el calentamiento global debido a la actividad humana 1,1 °C. mayor al ocurrido a final del siglo XIX, tornándose imperioso reducir las emisiones de dióxido de carbono en un 45% para el año 2030 (con respecto a los valores del año 2010), y cero emisiones netas para el año 2050. De otra manera, el impacto en el clima será catastrófico, pudiendo darse temperaturas extremas, aumento del nivel del mar, y grandes pérdidas de biodiversidad. (IPCC, 2018). Habiendo asumido que con las acciones tomadas hasta el momento no se podrán cumplir las metas establecidas, se han iniciado una serie de medidas con el objeto de intentar lograr los objetivos propuestos oportunamente en el Acuerdo de París. Por lo tanto, uno de los temas más importantes de los tratados en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2021 en el esfuerzo por la descarbonización, fue la sustitución de los combustibles fósiles. Según el Consejo de Transición a Vehículos de Cero Emisiones de las Naciones Unidas, en la actualidad el transporte automotor es el responsable del 10 % de las emisiones de gases de efecto invernadero, es por ello que en la Conferencia los principales fabricantes han establecido como meta la venta de vehículos nuevos que produzcan cero emisiones para el 2040 a nivel mundial, y para el 2035 en los principales mercados, representando un tercio de las emisiones en dichos mercados en la actualidad.

Varios de los principales contribuyentes a las emisiones de efecto invernadero han redoblado sus esfuerzos para el cumplimiento de los mencionados objetivos, y como elemento importante para su concreción, han puesto foco en el hidrógeno. Como ejemplo se puede citar a la Unión Europea, quien ha creado una hoja de ruta estratégica para el hidrógeno, la cual ha establecido metas ambiciosas en cuanto a la investigación, inversión, producción, y utilización de hidrógeno limpio.

En la actualidad se considera al hidrógeno un transportador de energía ideal y una muy buena opción, sino la única hasta el momento, para la descarbonización a gran escala de algunos sectores. Puede ser producido utilizando agua y una fuente de energía de origen diverso, y posteriormente transformado en energía útil de manera eficiente y con impacto en el medioambiente casi nulo, sobre todo si es producido mediante energía solar: en ese caso, ambos tipos de energía son totalmente renovables. El subpro-

ducto de su utilización es agua (o vapor) y una pequeña cantidad de NO<sub>x</sub> si se utiliza aire para alimentar la llama de la combustión. Puede utilizarse en cualquier aplicación que actualmente funcione con un combustible fósil, como ser: motores de combustión interna, motores a reacción; y cualquier tipo de vehículos: automóviles, buses, barcos, trenes, aviones, etc. Gracias a estas características, mediante el hidrógeno es posible pensar en una transición paulatina pero continua hacia la descarbonización del planeta, y así cumplir con las metas de reducción de gases de efecto invernadero.

Considerando el estado actual de la tecnología de producción de hidrógeno, todavía posee un costo de obtención algo elevado, hecho que también impone una limitación en la aplicación masiva del mismo. Ésta y otras cuestiones que se mencionarán más adelante, representan los desafíos económicos, técnicos y políticos, los cuales deberán afrontarse en el corto plazo.

En el presente trabajo se estudió la aplicación del hidrógeno como aditivo en un motor estándar de automóvil de ciclo Otto. Cabe destacar que uno de los objetivos del presente estudio es verificar la factibilidad de una transición tecnológica paulatina, en la dirección a la cual se pretende avanzar para alcanzar las metas de descarbonización impuestas. Es por ello que, en una primera instancia, se analizó la aplicación del hidrógeno en el estado actual de la tecnología del parque automotor existente, es decir, motores que han sido diseñados para funcionar con nafta.

### **Alcance**

Se estudiaron las prestaciones de un motor de ciclo Otto del parque automotor actual, cuando se le suministraron diferentes cantidades de hidrógeno gaseoso como aditivo al combustible convencional y también, cuando fue alimentado con hidrógeno como único combustible. Para ello se efectuaron pruebas para determinar los valores de potencia, consumo, y emisiones contaminantes de un motor convencional de uso automotriz, instalado e instrumentado en banco de ensayos, sin modificaciones en su calibración original. Se simularon diferentes condiciones de marcha mediante las variaciones de carga, posición de acelerador y revoluciones por minuto; y se estudiaron las variaciones de las prestaciones y emisiones al modificar algunos parámetros de motor que implicaron solamente calibración, como ser el avance al encendido y el tiempo de inyección de combustible, pero no modificaciones mayores.

En primer lugar, se repasarán los antecedentes sobre la utilización de hidrógeno como aditivo en motores de combustión interna de ciclo Otto. Posteriormente se describirán brevemente los fundamentos teóricos sobre la utilización del hidrógeno como aditivo. Se establecerá una comparación con trabajos realizados por el mismo grupo de estudios, en los cuales se utilizó como aditivo el gas obtenido mediante un hidrolizador de disponibilidad comercial (generador de Gas de Brown o HHO). A continuación, se analizarán los resultados obtenidos en los ensayos, y por último se presentarán las conclusiones.

### **Antecedentes**

El uso de hidrógeno en motores posee aproximadamente un siglo de historia, con diferentes grados de desarrollo, siempre motivados por situaciones extremas. Durante las décadas de 1920 y 1930, en Alemania se utilizaba en aviación como combustible secundario para los dirigibles. Los primeros prototipos de los motores a reacción construidos en Alemania utilizaban hidrógeno como combustible. En las décadas de 1930 y 1940 tanto en Alemania como en Inglaterra se realizaron pruebas como combustible experimental de automóviles, camiones, locomotoras, embarcaciones, submarinos y torpedos (Rifkin, 2004). Con el nuevo orden mundial económico establecido en la posguerra, la utilización de hidrógeno perdió interés por varias décadas, resurgiendo en la década de 1970 con el comienzo de las crisis petroleras y la incertidumbre sobre

la disponibilidad de hidrocarburos en las décadas venideras. A partir de ese momento, se reanudaron los estudios y trabajos de investigación, los cuales fueron tomando cada vez más preponderancia a medida que la escasez del petróleo se hacía más evidente, y a ello se le fue agregando la problemática ambiental, la cual no ha cesado de generar nuevos desafíos.

Este grupo de investigación posee remarcables antecedentes en la investigación del hidrógeno como combustible o aditivo en motores de combustión interna, y también de varios otros combustibles alternativos. Se realizó un estudio sobre la utilización de combustible híbrido GNC-H<sub>2</sub> en un motor de ciclo Otto, verificando en un banco de ensayos mejoras en prestaciones y emisiones al compararlo con GNC (Trigubó, 2011). Adicionalmente se equipó un automóvil para su funcionamiento con combustible híbrido, el cual fue exhaustivamente testado en una pista de pruebas para evaluar sus características conductivas, condiciones de seguridad, desempeño funcional, y respuesta dinámica; siendo todas ellas satisfactorias (Trigubó, 2016). Posteriormente este grupo de estudios realizó un trabajo que fue el disparador de la presente investigación, en el cual se ensayaron diferentes hidrolizadores comerciales para generar *in situ*, un aditivo a base de hidrógeno para alimentar a un motor convencional de ciclo Otto (Galante, 2021). En aquella oportunidad, apenas se pudieron verificar mejoras al utilizar el aditivo cuando el motor funcionaba en ralentí, probablemente debido a la cantidad insuficiente producida por los dispositivos. Es por ello que para que sea de utilidad para los futuros proyectos de hidrolizadores, o para cualquier otro dispositivo capaz de producir hidrógeno para ser utilizado en motores, se decidió inicialmente realizar pruebas con hidrógeno gaseoso provisto exteriormente como aditivo al combustible principal del motor. Una vez completada dicha comparación, los ensayos prosiguieron hasta llegar a utilizar solamente hidrógeno como combustible, a fin de generar información de base para la buscada transición de combustibles fósiles a combustibles limpios, sin que esto signifique un cambio abrupto de tecnología y puesta en desuso de la misma, lo cual implica un alto costo inicial y una contradicción a la búsqueda de un planeta más limpio, considerando los desperdicios que se generarían.

A nivel internacional, sería imposible mencionar todos los trabajos y publicaciones que existen del tema, pero cabe destacar algunos remarcables que dieron el puntapié inicial a la corriente iniciada en la década de 1970. Kukkonen (1981) realizó un análisis íntegro sobre la utilización del hidrógeno como combustible automotriz alternativo, en el cual todavía se veía como algo lejano su utilización, considerando el estado de la tecnología en ese momento debido a los costos asociados, y a la disponibilidad de otras fuentes de energía. Donnelly (1981) también analizó varios aspectos del uso de hidrógeno como combustible alternativo automotriz, y presentó información colectada en ensayos de motor. Si bien al momento de la publicación manifestaba la dificultad en el uso masivo en el corto y mediano plazo, sostenía la factibilidad basándose en información documentada. Adt *et al.* (1981) presentó información experimental a modo de base de datos para futuros diseños, sobre motores automotrices utilizando hidrógeno como combustible. En la publicación se presentó información de diferentes configuraciones de motores, abarcando las prestaciones, emisiones y cuestiones relativas a la seguridad. D'Andrea *et al.* (2004) estudió el agregado de hidrógeno a un motor de ciclo Otto, obteniendo mejoras en prestaciones y emisiones cuando se utilizaban mezclas pobres. Negurescu *et al.* (2012) realizó diversos ensayos utilizando hidrógeno como único combustible en un motor de ciclo Otto, verificando mejoras en prestaciones y emisiones con respecto al uso con nafta, salvo en los NO<sub>x</sub>, los cuales evidenciaron un leve incremento. Ma *et al.* (2010) investigó las prestaciones de un motor ciclo Otto funcionando en ralentí cuando es alimentado mediante hidrógeno solamente, y son variados el avance al encendido y la riqueza de la mezcla, demostrando la posibilidad de funcionar con mezclas pobres y así obtener mejoras tanto en parámetros energéticos como en los de contaminación.

## Marco Teórico

### Características del hidrógeno como combustible

Al analizar las características termodinámicas del hidrógeno y su aplicación como combustible en motores de combustión interna, se evidencian notorias diferencias respecto a los combustibles convencionales o alternativos similares a estos, las cuales permiten de manera inicial, enumerar sus ventajas y desventajas para este tipo de aplicaciones. Posee un elevado poder calorífico másico; alta velocidad de llama (cinco veces superior a la de la nafta), lo que permite aproximar el proceso de combustión en un motor de ciclo Otto al ciclo teórico (a volumen constante); la energía requerida para la ignición es muy baja, mejorando así la capacidad de arranque en frío; posee un amplio rango de inflamación, lo que permite empobrecer la mezcla y consecuentemente, obtener una disminución del consumo de combustible y de las emisiones contaminantes; y presenta una distancia de apagado pequeña, este último término se refiere a la distancia crítica entre superficies a través de la cual la llama no se puede propagar. Esta última característica hace que la llama pueda viajar más cerca de las paredes del cilindro y penetrar más en los intersticios, logrando de este modo una combustión más completa. Al mismo tiempo, si bien posee un gran poder calorífico másico, no lo es así el volumétrico, el cual es bajo respecto a otros combustibles, ocasionando de esta manera algunas dificultades para su almacenamiento en vehículos de transporte, como ser la necesidad de disponer de un volumen muy grande, o almacenarse a una presión muy elevada o en estado líquido. A su vez, dos factores que podrían presentar una ventaja para la aplicación en vehículos, también ocasionan ciertas desventajas si se las analiza desde el punto de vista de la seguridad, como lo son la baja energía de ignición, la cual podría ocasionar un encendido prematuro de la mezcla y/o contraexplosiones con el solo hecho de ponerse en contacto con gases o puntos calientes; y el amplio rango de inflamación, que presenta serios riesgos durante la manipulación del hidrógeno. Adicionado a éstas, la pequeña distancia de apagado del hidrógeno comparada con la nafta, supone teóricamente que la llama podría atravesar el espacio entre una válvula prácticamente cerrada y el asiento. Estos tres factores contribuyen notoriamente a la aparición de fenómenos como las contraexplosiones en la admisión. A su vez, estas características también pueden generar fenómenos de pre-ignición, con el consecuente aumento abrupto de la presión en el cilindro, lo cual origina un funcionamiento irregular y perjudicial para el motor, con la aparición de vibraciones de baja frecuencia y disminución de la eficiencia y de la potencia entregada.

Es por ello que, una forma de aplicación del hidrógeno en los vehículos automotores que aprovecharía las ventajas antes mencionadas sin ocasionar demasiadas dificultades técnicas, es la utilización del hidrógeno como aditivo en el proceso de combustión de otros combustibles, para obtener una mezcla que combine las características sobresalientes de ambos. El hidrógeno posee buenas propiedades de difusión cuando es mezclado con otros combustibles en variadas proporciones, se combina con la mezcla aire-combustible existente formando una nueva mezcla de gran uniformidad. Cantidades pequeñas de hidrógeno no presentarían inconvenientes a la hora de almacenarlos, tampoco elevaría tanto el costo de la mezcla de combustible, y serían más fáciles los controles y soluciones a los temas de seguridad antes mencionados. A su vez, esto representaría una buena manera de iniciar la transición paulatina de combustibles convencionales al hidrógeno. Por sus propiedades antes mencionadas, el agregado de hidrógeno al combustible produce una disminución en el retardo de la ignición como así también en la duración de la combustión, los cuales presentan los mayores valores cuando se trabaja solamente con nafta en el lado rico o pobre de la mezcla, no ocurriendo esto mismo en valores de mezcla cercanos a la estequiométrica. Es por ello que en estas condiciones de trabajo se encuentran características de combustión deficiente e inestable. Al mejorar y reducir el valor de esos dos parámetros mediante el aporte de hidrógeno como aditivo, es posible trabajar en la zona pobre de la mezcla, generando

así una disminución del consumo de combustible y de las emisiones contaminantes respecto a la condición estequiométrica, debido a la reducción de la temperatura de la combustión de la mezcla y a una combustión más completa.

### Emisiones contaminantes

Los hidrocarburos sin combustionar (HC) y el monóxido de carbono (CO) presentes en el gas de escape del motor están estrechamente relacionados con el factor  $\lambda$  de riqueza de la mezcla. Cuando la mezcla es rica, no existe la cantidad suficiente de oxígeno para reaccionar con todo el carbono, formándose de esta manera dichos productos de combustión en el gas de escape. Los HC en la atmósfera actúan como odorizantes, irritantes y algunos de ellos son cancerígenos. El CO es un producto de combustión no deseado, no sólo por tratarse de un gas venenoso sino también porque indica que la energía química del combustible no fue completamente aprovechada en el motor. Su generación se debe a una combustión incompleta y está directamente ligada a la riqueza de la mezcla, observándose que, en condiciones de mezcla rica, como pueden ser la puesta en marcha o en aceleración bajo carga, aumenta la cantidad del mismo en las emisiones de escape, debido a que la cantidad de oxígeno es insuficiente para la formación de  $\text{CO}_2$ . Además de  $\lambda$ , otros factores que influyen son la geometría de la cámara de combustión y la turbulencia generada, la cual favorece el mezclado del aire con el combustible. Cuando éste es incorrecto, genera una mezcla no uniforme con zonas de alta concentración de combustible, las cuales favorecen la formación de CO. De igual manera, durante la puesta en marcha donde la mezcla es intencionadamente enriquecida, o en condiciones de funcionamiento donde se utiliza mezcla rica como puede ser la aceleración del motor bajo carga, se observa también un incremento del contenido de HC en el gas de escape. Por otro lado, en mezclas extremadamente pobres, casi en el límite con la falla de encendido, se observa también un aumento de los HC debido a la combustión defectuosa. La geometría de la cámara de combustión, los parámetros de funcionamiento del motor, y la composición de combustible también son factores que afectan la cantidad de HC presentes. En cuanto a este último factor, el hidrógeno presenta una ventaja, ya que obviamente es un combustible que no posee carbono.

Incluso cuando la mezcla es estequiométrica se verifica la presencia de HC, dado que la combustión nunca es perfecta y algunas partículas de combustible no reaccionan con oxígeno, terminando en el gas de escape. Existen varias causas que originan este fenómeno, como ser: mezclado incorrecto; apagado de la llama cuando alcanza las paredes del cilindro, lo que deja ciertas partículas de HC sin combustionar; el mismo fenómeno de apagado de llama se verifica en la parte final de la carrera de expansión por la disminución de la presión y temperatura dentro del cilindro; en condiciones de funcionamiento que poseen gran cantidad de gases residuales dentro del cilindro como puede ser baja carga o ralentí, o motores que poseen gran cantidad de recirculación de los gases de escape; el volumen de los intersticios, hacia los cuales es forzada una parte del combustible durante la compresión, el cual fluye nuevamente al cilindro durante la expansión dejando algunas partículas de HC sin combustionar; pérdidas de la válvula de escape durante la compresión; cruce de válvulas, que permite el flujo de mezcla de la válvula de admisión hacia la de escape, sobre todo a baja carga y en ralentí; y los depósitos en la cámara de combustión, los cuales absorben partículas de combustible durante la compresión y luego son desorbidas al disminuir la presión en la carrera de expansión, fenómeno que se observa también con la película de aceite lubricante en las paredes del cilindro. Cuando el desgaste de los componentes es mayor, la película de aceite lubricante se incrementa, lo que ocasiona que durante la compresión parte de ese aceite se escape y, al tratarse de una molécula pesada de hidrocarburos que no posee las mismas características que la nafta para combustionarse, termine en las emisiones de escape como HC. Este último hecho se ha verificado en las pruebas en las que se utilizó solamente hidrógeno como combustible, a pesar de no estar utilizando

un combustible que posea carbono en su composición. Varios de estos fenómenos son significativamente modificados por la presencia del hidrógeno y tenderían a disminuir la cantidad de HC en las emisiones pero por otro lado, es probable que también se encuentre hidrógeno sin combustionar en dichas emisiones.

Los óxidos de nitrógeno (NOx) son compuestos de nitrógeno que pueden existir en diversas formas, principalmente como óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), trióxido de nitrógeno (NO<sub>3</sub>), óxidos nitrosos (N<sub>2</sub>O), etc. Liberados en la atmósfera contribuyen a la formación de ozono y *smog*, y es uno de los causantes del efecto invernadero antropogénico. Los NOx se forman principalmente debido al nitrógeno contenido en el aire. A bajas temperaturas como las que existen en la atmósfera, la molécula biatómica de nitrógeno es estable, pero a temperaturas elevadas como las que se desarrollan en la cámara de combustión, esta molécula se descompone en dos átomos de nitrógeno, que son los que van a reaccionar para formar los NOx. A mayor temperatura de llama, mayor cantidad de nitrógeno biatómico se disociará para formar nitrógeno monoatómico, y esta condición se obtiene cuando se utiliza una mezcla ligeramente pobre respecto a la estequiométrica, en la cual tiene lugar la mayor temperatura y se dispone de un exceso de oxígeno para la formación de NOx. Adicionalmente a la temperatura, la formación de NOx dependerá también de: la presencia de otros gases como oxígeno y vapor de agua, los cuales también son estables a baja temperatura, pero se vuelven reactivos a temperaturas elevadas; de  $\lambda$ ; de la presión; del avance al encendido; y del tiempo que dura la combustión, verificándose que mientras más rápida sea, menor será la formación de NOx debido al menor tiempo de permanencia en la cámara de combustión para que la reacción suceda. Este último hecho podría estar favorecido por la elevada velocidad de llama del hidrógeno.

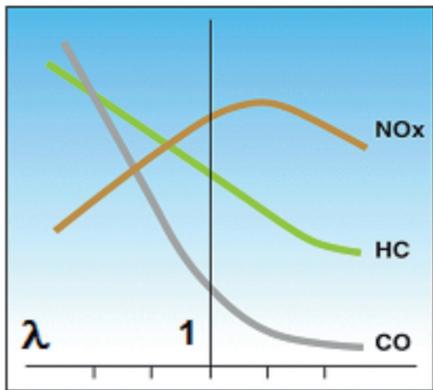


Fig. 1. Emisiones de la combustión en función de la riqueza de mezcla  $\lambda$

Tabla 1. Propiedades del hidrógeno y de la nafta

Propiedades	Unidad	Hidrógeno	Nafta
Densidad (líquido)	kg/dm <sup>3</sup>	0,07	0,73 - 0,74
Densidad (gas 25°C; 1 atm)	kg/ m <sup>3</sup>	0,083	---
Densidad (gas 25°C; 200 bar)	kg/ m <sup>3</sup>	15	---
Aire/Comb. Estequiométrico (vol.)	v/v	2,37	49,2
Aire/Comb. Estequiométrico (masa)	m/m	34,3	14,7
Poder Calórico Inferior	MJ/kg	120	43,5
Límites de inflamabilidad	% vol	4 - 75	1 - 7,6
Energía mínima de encendido	mJ	0,02	0,24
Velocidad de llama laminar (NPT)	cm/seg	170	37 - 43
Número Octano Research	RON	60	97

## Parte Experimental

Para el presente trabajo se utilizaron dos motores de ciclo Otto de diferentes características y aplicaciones. Uno de ellos es un motor estándar naftero de automóvil, el cual fue ensayado en un banco dinamométrico para medir torque, potencia y consumo específico. Estos parámetros observados fueron corregidos teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas, de acuerdo a lo especificado en las normas IRAM-AITA. El otro se trata de un motor naftero de baja cilindrada, el cual no se encuentra instrumentado para registrar los mismos valores antes mencionados, pero de todas maneras por la particularidad de su sistema de dosificación de combustible, es posible evidenciar diferencias de cualidades energéticas entre combustibles con la diferencia de rpm, ya que su funcionamiento es a velocidad constante.

En ambos motores se registraron HC y CO con un analizador de gases, y se registraron NOx en las pruebas en las que se desarrollaron las mayores temperaturas de gas de escape. Todas las mediciones de emisiones contaminantes se realizaron en el escape antes del catalizador.

El instrumental utilizado fue el siguiente:

El hidrógeno gaseoso provino de un cilindro presurizado, el cual disponía de un regulador de presión y un dosificador de caudal con su correspondiente caudalímetro (los valores de caudal mostrados son referenciados en condiciones normales), y fue enviado directamente al múltiple de admisión del motor, como se puede apreciar en la Figura 2. Dado que su manipulación presenta ciertos riesgos, principalmente una contraexplosión que podría alcanzar el cilindro debido a sus propiedades ya mencionadas, se tomaron recaudos especiales para minimizarlos y realizar los ensayos de forma segura. Se utilizó un arrestallama en la línea de abastecimiento del motor, previo a la entrada al múltiple de admisión. Se eliminaron todos los posibles focos de ignición en todo el recinto, y el cilindro de hidrógeno se localizó en el exterior de las instalaciones. A su vez, se realizaron pruebas de estanqueidad y se verificó el estado de todos los elementos involucrados antes de comenzar cada ensayo.

Como se mencionó anteriormente, en primer lugar, se realizaron mediciones en ambos motores a fin de compararlas con las obtenidas en un trabajo de investigación anterior,

**Tabla 2. Motores utilizados en los ensayos**

Datos Generales	MOTOR 1	MOTOR 2
Marca / Modelo	Volkswagen / Audi-Gol	Villa
Tiempos / Cant. cilindros	4 / 4	4 / 1
Cilindrada total (cm <sup>3</sup> )	1600	411
Potencia	97 CV	8 HP
Sistema de combustible	Nafta => Inyección "Marelli"	Nafta => carburador

**Tabla 3. Instrumental utilizado**

Instrumental	Marca
Dinamómetro hidráulico	Clayton
Procesamiento de datos	Dynodin (H.Recio)
Sonda Lambda	Oreste Berta
Motortester	Bosch
Osciloscopio	Bosch FA720
Analizador de gases	RAG
Consumo de combustible	Duran "UNIV 18"



**Fig. 2. Banco de ensayos / Ingreso de hidrógeno en el múltiple de admisión**

en el cual se utilizaron hidrolizadores, los cuales producían un gas compuesto de hidrógeno y oxígeno, que se utilizó como aditivo a la nafta. En el motor de baja cilindrada, las pruebas se efectuaron sin modificar la regulación de la dosificación de combustible, a fin de registrar como variaban las rpm al adicionarse hidrógeno. También se efectuaron pruebas utilizando solamente hidrógeno como único combustible. Los resultados se pueden observar en la Tabla 4 y en la Figura 3. En el motor automotriz, dichos ensayos comparativos con los hidrolizadores se realizaron en ralentí, dado que cuando se habían ensayado los mismos, sólo se habían advertido diferencias de funcionamiento en ese régimen. Los resultados se pueden observar en la Tabla 5 y en la Figura 4.

Posteriormente se continuaron con las pruebas con diferentes cantidades de hidrógeno como aditivo, en las que se simularon las condiciones de funcionamiento del motor de un automóvil en ciudad, de acuerdo a una combinación de rpm y porcentaje de acelerador (porcentaje de apertura de mariposa): ralentí; baja velocidad en ciudad, la cual fue definida como 2.000 rpm y acelerador al 35 %; y velocidad media en ciudad, definida como 3.000 rpm y 45 % de acelerador. En las tres condiciones, una vez definida la cantidad de hidrógeno a adicionar en cada ensayo, se fijó el acelerador en el valor definido previamente, y se ajustó la carga del motor hasta obtener las rpm deseadas. De esta manera, se observó la variación de carga del motor y, por lo tanto, la potencia desarrollada con las diferentes cantidades de hidrógeno aportado.

Las pruebas denominadas “de baja velocidad” se efectuaron en un principio con la calibración original del motor, la cual fue diseñada para el funcionamiento con nafta; de esta manera la computadora de mando de la inyección de combustible fue la encargada de modificar la cantidad de nafta y el avance al encendido. Posteriormente se disminuyó el tiempo de inyección de nafta para reemplazarla por hidrógeno. Los resultados están en la Tabla 6 y en la Figura 5.

Las pruebas de velocidad media se efectuaron manteniendo la calibración original del motor, y en ellas se midieron los NOx. En todos los ensayos en los que el hidrógeno se utilizó como aditivo de la nafta, se calculó qué porcentaje del total de energía que ingresaba al motor mediante combustible (nafta + H<sub>2</sub>), fue aportado por el hidrógeno. Para ello se utilizaron las fórmulas que están a continuación. Los resultados se pueden ver en la Tabla 7 y en la Figura 6.

Energía aportada por la nafta:  $E_{nafta} = PCI_{nafta} \cdot \text{Caudal Másico}_{nafta}$

Energía aportada por el H<sub>2</sub>:  $EH2 = PCI_{H2} \cdot \text{Caudal}_{H2} \cdot \rho_{H2}$

Porcentaje de energía aportada por el H<sub>2</sub>:  $EH2 = \frac{EH2}{E_{nafta} + EH2} \cdot 100$

Finalmente se realizaron pruebas para evaluar la estabilidad del motor cuando es alimentado solamente con hidrógeno, en las cuales se calificó de manera cualitativa el funcionamiento, se verificaron las prestaciones, y emisiones contaminantes. Estas prue-

bas se realizaron con la calibración original del motor, a bajas rpm, y se efectuaron variaciones del avance al encendido para observar las diferencias.

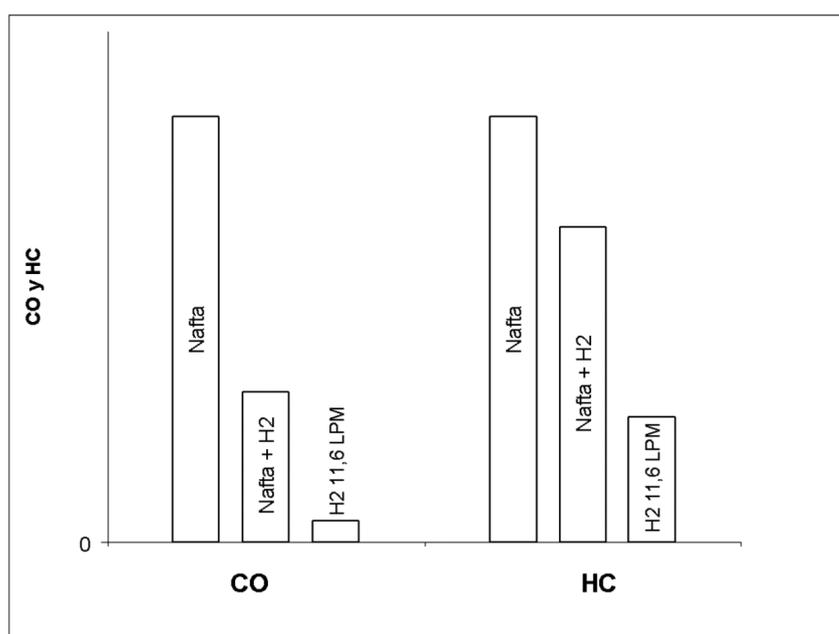
## Resultados

A continuación, se exponen los resultados de las mediciones de prestaciones del motor de baja cilindrada cuando funciona con diferentes porcentajes de hidrógeno como aditivo; desde la alimentación solamente con nafta, para utilizarlo como base comparativa, hasta el funcionamiento sólo con hidrógeno. Esta prueba tuvo el objeto de obtener una primera información sobre la utilización de hidrógeno como único combustible, y verificar el funcionamiento sin que ello implique ningún riesgo para las personas, instalaciones o medio ambiente. A su vez, se utilizó para comparar con los ensayos realizados con hidrolizadores comerciales en trabajos de investigación anteriores.

Del análisis de la Tabla 4 se aprecia una reducción máxima de 95% en las emisiones de CO y 75 % en las de HC al utilizar hidrógeno como combustible único, con respecto al funcionamiento del motor con nafta. También se observan mejoras de 65 % y 25 % de CO y HC respectivamente, cuando el hidrógeno es utilizado como aditivo a la nafta. En el funcionamiento con hidrógeno solamente, estas dos emisiones disminuyen hasta valores ínfimos pero siguen encontrándose en el escape, a pesar de estar utilizando un combustible sin carbono; siendo probablemente el resultado de la combustión del acei-

**Tabla 4. Emisiones en motor de baja cilindrada**

Nafta	H <sub>2</sub> [LPM]	rpm	CO [% vol.]	HC [ppm vol.]
Apertura Total	0	1450	0,277	308
Apertura Parcial	5	1800	0,098	228
Cerrada	5	1050	0,046	114
Cerrada	11,6	1400	0,014	91
Cerrada	18	1450	0,021	120
Cerrada	21,4	1500	0,061	75



**Fig. 3. Emisiones de motor de baja cilindrada**

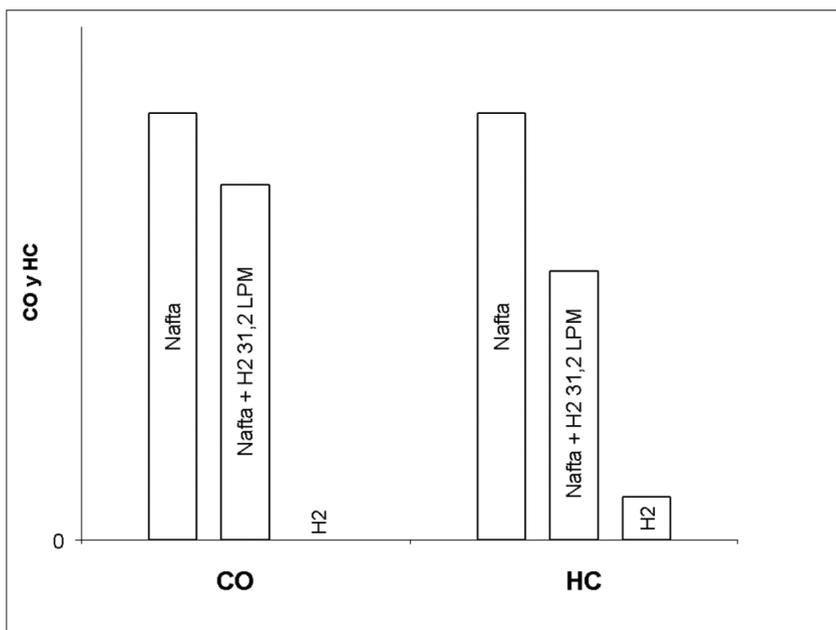
te lubricante y depósitos de carbono presentes en los componentes del motor. Cuando se comparan los valores obtenidos a apertura parcial (hidrógeno como aditivo) con los registrados cuando se utilizó como aditivo el gas producido por los hidrolizadores comerciales (Galante, 2021), se observa una mejora en la emisión de CO, no así siendo tan notoria en los HC, a pesar de adicionar un caudal de gas hasta 10 veces superior. Esto podría deberse a una combustión deficiente, dado que no se realizó ninguna regulación en el motor, a pesar de estar funcionando con diferentes proporciones de componentes de la mezcla de combustibles.

Luego se exponen los resultados de los ensayos realizados en el motor automotriz con diferentes cantidades de hidrógeno, simulando las tres condiciones diferentes de funcionamiento de un automóvil en ciudad antes mencionadas: ralentí, velocidad baja y velocidad media. Para evaluar las diferencias que origina el agregado de hidrógeno como aditivo en la combustión, y también como único combustible, estas pruebas se efectuaron con diversas calibraciones de motor: conservando la calibración original del motor, y actuando sobre el tiempo de inyección de nafta y sobre el avance al encendido total.

En la Tabla 5 se puede apreciar una mejora en las emisiones al utilizar hidrógeno como aditivo. Se muestra también el resultado de alimentación del motor solamente con hidrógeno. Como puede apreciarse, los valores de emisiones son prácticamente nulos en esta condición, pero cabe destacar que se trató de una prueba con un exceso de caudal de alimentación de hidrógeno, no siendo viable en la práctica para esa condición de

**Tabla 5. Emisiones en motor automotriz, funcionamiento en ralentí**

Condición	H <sub>2</sub> [LPM]	H <sub>2</sub> [% de energía combustible]	CO [% vol.]	HC [ppm vol.]
calibración original	0	0	0,675	100
calibración original	18,1	9	0,697	89
calibración original	31,2	16	0,561	63
Sólo hidrógeno 0° Avance APMS	145	100	0,000	10

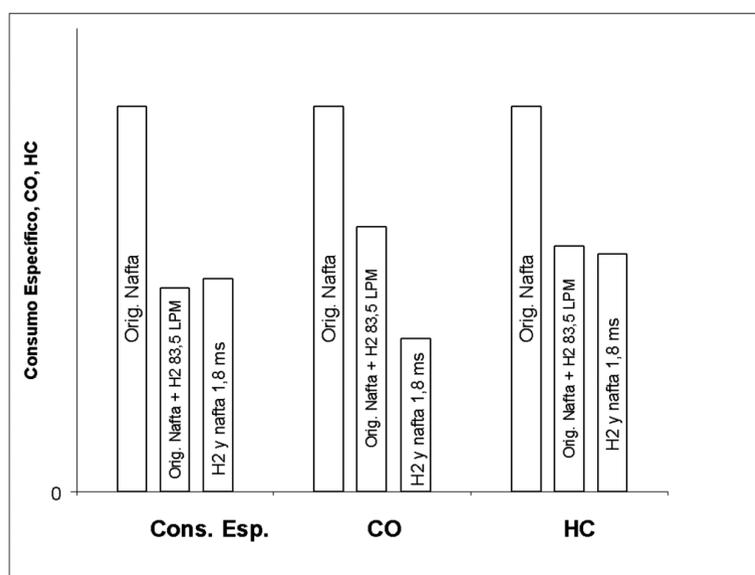


**Fig. 4. Emisiones de motor automotriz en ralentí**

marcha del motor. Se efectuaron varias pruebas con cantidades de hidrógeno menores y con diferentes avances al encendido, encontrando como resultado el funcionamiento inestable del motor, en todos los casos con valores de  $\lambda$  superiores a 1,5. Recién alcanzando caudales superiores a 90 LPM de hidrógeno y de avance al encendido total menor a 13° APMS, se logró empezar a estabilizar el funcionamiento del motor. En todos los casos a igual caudal, se evidenció un funcionamiento más estable a menor avance al encendido, mostrando de esta manera su relación con la mayor velocidad de llama del hidrógeno. Se volverá sobre este tema en la última serie de ensayos (Tabla 8 y Figura 7). En la Tabla 6 se pueden apreciar los resultados de las pruebas simulando una condición de marcha en baja velocidad en ciudad (2.000 rpm y acelerador al 35 %). Las primeras mediciones se efectuaron con el motor en su calibración original, es decir, permitiendo que la computadora de mando de la inyección realice los ajustes necesarios de forma automática, de acuerdo a su programación estándar de fábrica. En las siguientes pruebas, se adicionó hidrógeno sin modificar el tiempo de inyección de

**Tabla 6. Emisiones y prestaciones de motor automotriz a velocidad baja**

Condición	H <sub>2</sub> [LPM]	H <sub>2</sub> [% energ. comb.]	Pot. [kW]	Torque [Nm]	C. E. Nafta [gr/kW h]	CO [% vol.]	HC [ppm vol.]	$\lambda$
calibr. orig.	0	0	4,26	20,02	574,21	0,933	104	0,95
calibr. orig.	11,6	2	4,42	20,54	548,54	1,047	114	0,95
calibr. orig.	37,8	8	4,59	21,05	462,56	0,668	104	0,98
calibr. orig.	50,8	11	4,72	21,56	454,05	0,677	92	0,98
calibr. orig.	63,9	14	4,73	21,56	412,65	0,640	82	0,98
calibr. orig.	83,5	22	4,73	21,56	303,93	0,642	66	0,98
t.i. 2,4 ms.	11,6	2	4,17	19,90	587,56	1,646	95	0,92
t.i. 2,4 ms.	37,8	7	4,44	20,92	552,00	3,794	107	0,84
t.i. 2,4 ms.	50,8	9	4,60	21,43	560,90	4,874	117	0,80
t.i. 2,4 ms.	63,9	10	4,60	21,43	592,77	5,652	128	0,76
t.i. 2,4 ms.	83,5	14	4,83	21,94	546,57	6,835	144	0,72
t.i. 2,3 ms	11,6	2	4,36	20,92	567,50	0,407	58	0,98
t.i. 2,1 ms	37,8	8	4,60	21,43	465,75	0,485	61	0,98
t.i. 2,0 ms	50,8	10	4,78	21,94	460,69	0,562	59	0,98
t.i. 1,8 ms	63,9	17	4,95	22,45	316,94	0,37	64	0,98



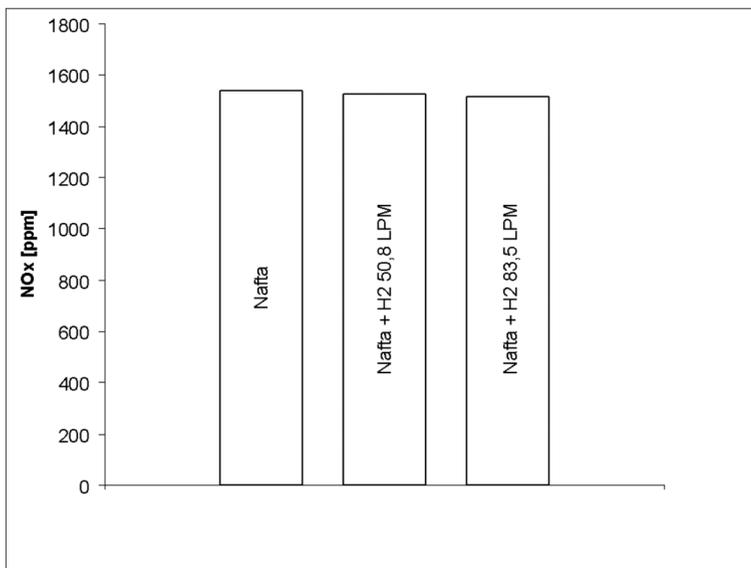
**Fig. 5. Consumo específico y emisiones de motor automotriz a baja velocidad**

nafta, el cual fue de 2,4 ms.; es decir, a una cantidad fija de nafta se le fue incorporando hidrógeno. Por último, se fue disminuyendo el tiempo de inyección de nafta a medida que se agregaba hidrógeno. En este caso se trató de un reemplazo del combustible convencional por hidrógeno.

Como puede apreciarse en la Tabla 6, cuando se utilizó la calibración del motor sin ninguna modificación, se observa que la computadora de mando de la inyección fue ajustando la cantidad de nafta para mantener  $\lambda$  prácticamente constante a medida que se incorporó hidrógeno. Las emisiones tuvieron una mejora máxima cercana al 30 % y 40 % en CO y en HC respectivamente. Lo mismo se observa en el consumo específico de nafta, que refleja una disminución de un 47 %. En la segunda serie de ensayos, al dejar fija la cantidad de nafta inyectada e ir adicionando hidrógeno, se puede observar que la mezcla fue tornándose cada vez más rica, con el consecuente aumento del CO y de los HC. Por último, al disminuir la cantidad de nafta inyectada a medida que se incrementó la cantidad de hidrógeno y manteniendo  $\lambda$  constante, se aprecia que las prestaciones mejoraron, obteniéndose resultados parecidos a los obtenidos con la calibración original, es decir que la computadora de mando de la inyección de nafta, la cual no fue concebida para trabajar con hidrógeno gaseoso como aditivo, gestionó de manera satisfactoria la dosificación de combustible para obtener la mayor eficiencia del motor en la primer serie de ensayos. En cuanto a los valores de las emisiones contaminantes, mejoraron respecto a las dos series de ensayos anteriores.

**Tabla 7. Prestaciones y emisiones de motor automotriz a velocidad media**

H <sub>2</sub> [LPM]	H <sub>2</sub> [% energ. Comb.]	Pot. [kW]	Torque [Nm]	C. E. Nafta [gr/kW h]	CO [% vol.]	HC [ppm vol.]	NOx [ppm vol.]	$\lambda$	Tesc. [°C]
0	0	9,81	31,24	407,58	0,980	131	1538	1	450
50,8	6	10,1 4	30,74	381,71	1,256	115	1527	0,95	498
83,5	11	10,3 2	31,24	341,96	0,898	103	1515	0,97	501



**Fig. 6. NOx de motor automotriz a velocidad media**

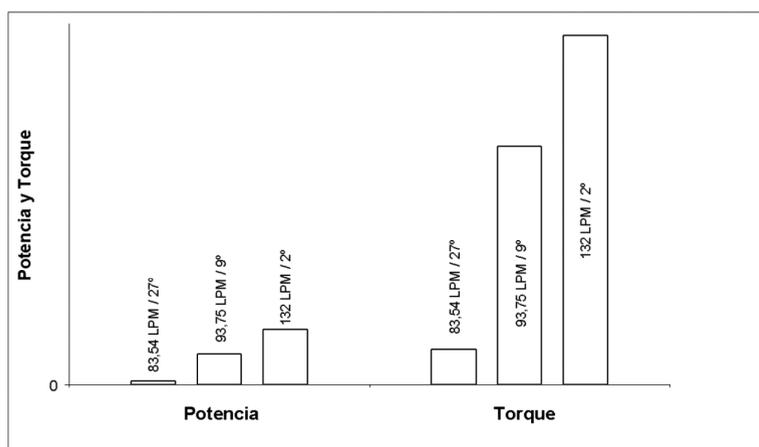
En la siguiente serie de ensayos se verificaron las prestaciones y emisiones del motor simulando una condición de velocidad media en ciudad (3.000 rpm, 45 % de acelerador). En estas pruebas se utilizó la configuración de fábrica del motor, dejando que la computadora de mando gestione la inyección de nafta cuando se adicionó hidrógeno. Se midieron los NOx dado que a temperaturas elevadas como las de estas pruebas, generalmente se obtienen los valores más elevados.

Se observa que la computadora de mando de la inyección fue ajustando la cantidad de nafta para mantener  $\lambda$  prácticamente constante, a medida que se adicionó hidrógeno. Se obtuvo una mejora en el consumo específico de nafta de un 17 %, y pequeñas mejoras en las emisiones contaminantes. A pesar de haber presentado temperaturas de escape más elevadas a medida que se incorporó hidrógeno, la emisión de NOx mostró valores similares entre sí. Ello podría deberse, por un lado, al enriquecimiento de la mezcla observado, como así también por el aumento de la velocidad de combustión, y por ende poco tiempo para la formación de los mismos.

Para evaluar los aspectos relacionados con la estabilidad del motor bajo el funcionamiento con hidrógeno como único combustible, se realizaron una serie de pruebas en las cuales se modificó la cantidad de hidrógeno enviado (para ocasionar variaciones de  $\lambda$ ) y el avance al encendido total. Los resultados pueden observarse en la Tabla 8. La columna Funcionamiento da una idea cualitativa del comportamiento (tendencia a pararse, marcha uniforme, suavidad, etc.) del motor con respecto al funcionamiento bajo esa misma condición utilizando solamente nafta.

**Tabla 8. Funcionamiento con hidrógeno a bajas rpm**

H <sub>2</sub> [LPM]	rpm	Potencia [kW]	Torque [Nm]	$\lambda$	Avance al encendido total [°]	Funcionamiento
83,54	950	0,20	2,04	1,7	27	muy inestable
83,54	1040	0,22	2,06	1,8	20	muy inestable
83,54	960	0,21	2,06	1,6	14	inestable
93,75	1220	1,71	13,39	1,5	17	levemente inestable
93,75	1240	1,80	13,88	1,5	13	levemente inestable
93,75	1240	1,80	13,88	1,5	9	levemente inestable
132	1490	3,02	19,34	1,0	13	normal
132	1505	3,05	19,34	1,0	8	normal
132	1505	3,13	19,83	1,0	4	normal
132	1515	3,23	20,33	1,0	2	normal



**Fig. 7. Torque en alimentación con hidrógeno a baja velocidad**

De la tabla precedente se puede observar que en las mezclas muy pobres el funcionamiento del motor no fue adecuado, presentando inestabilidad, marcha no uniforme, detonación y tendencia a detenerse. Se observó también que la condición mejoró con el enriquecimiento de la mezcla, y a medida que se disminuyó el avance al encendido, se obtuvieron mejores prestaciones y un funcionamiento más uniforme, a iguales caudales de hidrógeno. Hecho que puede relacionarse con la velocidad de llama elevada y el poco retardo de la ignición que posee hidrógeno.

## Conclusiones

De los ensayos realizados en el motor de baja cilindrada, se concluye que la cantidad de hidrógeno a utilizar para obtener beneficios de dicho aditivo con respecto a los hidrolizadores comerciales ensayados oportunamente, está en el orden de 10 con respecto al volumen de gas ( $O_2 + H_2$ ) producido por dichos dispositivos. Ya sea utilizando hidrógeno como aditivo o como único combustible, las emisiones de CO y HC disminuyen, debido al menor contenido de carbono en la mezcla combustible y a probablemente, a las características beneficiosas para una combustión completa y eficiente, como ser: alta velocidad de llama, amplio límite de inflamación, menor distancia de apagado, menor retardo de la ignición. Sin embargo, si el motor no dispone de un sistema que gestione la cantidad de combustible y aditivo, es probable que gran parte de esos beneficios se pierdan debido a una combustión ineficiente, como puede observarse en el motor de baja cilindrada, en el cual las emisiones disminuyeron pero luego volvieron a incrementarse con el incremento de la cantidad de hidrógeno de alimentación. Esto también se puede observar en los ensayos realizados en el motor automotriz, que, a pesar de haber sido concebido para funcionar con nafta, la computadora de mando de la inyección de combustible se ajustó para obtener siempre la mayor eficiencia. Es importante notar también que al motor de baja cilindrada, el cual posee una tecnología muy simple y fue diseñado para trabajar con nafta, fue posible hacerlo funcionar de manera satisfactoria solamente con hidrógeno, sin ninguna complicación o riesgo; lo que supone un impacto positivo si contase de sistemas diseñados específicamente para trabajar con el mismo.

En el motor automotriz también se observó que el caudal provisto por los hidrolizadores se supone pequeño para poder obtener beneficios, cuando es comparado con los caudales utilizados en estos ensayos. Como ya se mencionó, el hidrógeno como aditivo y como combustible único demostró proporcionar ciertas ventajas en cuanto a las emisiones contaminantes y en cuanto al consumo de combustible, siempre que es administrado de manera correcta, es decir, que genera un funcionamiento más eficiente. Ello se puede observar en la Tabla 6, en las que mezclas ricas no ocasionaron ninguna mejora de prestaciones o emisiones. La disminución en las emisiones de CO y HC se suponen igualmente causadas por los factores citados anteriormente para el motor de baja cilindrada. En cuanto a la emisión de NO<sub>x</sub>, es probable que confluyan factores que tienden a decrecerlos y otros a incrementarlos, es por ello que no se observa ninguna diferencia significativa. Al estar ligada su producción con la temperatura y a los picos de presión, se ve afectada una posible disminución gracias a la combustión más rápida.

Para un motor que no fue diseñado para trabajar con hidrógeno, la utilización del mismo como único combustible en mezclas muy pobres demostró un funcionamiento inestable, sin embargo al alcanzar valores de  $\lambda$  iguales o menores a 1,5; el motor demostró un funcionamiento normal y con notorias mejoras en las emisiones, como pudo apreciarse en los ensayos mostrados en la Tabla 8. A su vez, también se corroboró una mejora en el funcionamiento en cuanto estabilidad con la disminución del avance al encendido, probablemente porque dicho parámetro se adecuó a la combustión más rápida del hidrógeno, debido a su mayor velocidad de llama y su menor retardo de ignición. Estos últimos factores deberían estudiarse bajo el uso continuado del motor,

dado que es probable que ocasionen picos de presión en la cámara de combustión.

Al ensayar el motor en una condición simulando una velocidad baja de ciudad, se observaron mejoras en las prestaciones y emisiones cuando se utilizó el hidrógeno como aditivo y cuando fue utilizado como combustible único, incluso se pudieron mejorar las emisiones de CO y HC al intervenir los parámetros de la inyección de nafta cuando se utilizó como aditivo, es por ello a pesar de que la computadora original del motor se desempeñó de manera satisfactoria, se concluye que con un diseño específico para el funcionamiento con hidrógeno, podrían lograrse notorias mejoras.

De las pruebas realizadas simulando velocidades medias en ciudad, también se observaron mejoras en prestaciones y emisiones de CO y HC, no así en la emisión de NOx. La utilización de hidrógeno trae aparejado un aumento de la temperatura en la cámara de combustión, como así también de los picos de presión. Estos dos factores tienden a incrementar la producción de NOx. De todas, no se verificaron incrementos, sino que se mantuvieron prácticamente constantes con respecto al funcionamiento con nafta. La combustión más rápida del hidrógeno supondría una disminución en la generación de NOx, es por ello que es probable que este hecho haya ocasionado una compensación al aumento producido por la mayor temperatura. Es importante continuar las investigaciones de esta emisión con mezclas pobres, las cuales también ocasionarían un menor consumo específico de combustible.

En cuanto a la seguridad del uso del hidrógeno, no ocurrió ningún incidente como contraexplosiones, ni fueron necesarias adoptar medidas extremas para realizar los ensayos, por lo tanto, se puede inferir que es totalmente factible su manipulación si se implementa en vehículos automotores, siempre que se tomen las precauciones básicas. Por lo expuesto anteriormente, se concluye que la aplicación del hidrógeno como aditivo a los combustibles convencionales es posible, y permitiría una transición hacia la utilización del hidrógeno como combustible del futuro en reemplazo de los combustibles fósiles. Esta transición permitiría: por un lado, aprovechar el parque automotor existente, el cual puede ser adaptado fácilmente; y por otro lado, añadir antecedentes que contribuyan al desarrollo de tecnologías futuras, en las cuales el uso de hidrógeno en el transporte automotor sea masivo.

## Agradecimientos

A la memoria de los ingenieros Horacio Trigubó y Nicolás Galante, quienes dieron nacimiento a este grupo de estudios, y dedicaron un enorme esfuerzo para su crecimiento y consolidación a lo largo de cinco décadas, siendo el presente trabajo el último del cual formaron parte. Los autores agradecen al Ing. Horacio Acevedo por su colaboración y aporte de instrumental en el desarrollo de este trabajo, a la empresa Air Liquide por la provisión del hidrógeno gaseoso utilizado en los ensayos, y a los ingenieros Ernst Winklhofer y Guilherme Pinheiro por el aporte de instrumental y equipos de medición.

## Referencias

- ADT, R., (1981). Hydrogen-fueled automotive engine experimental testing to provide an initial design-data base – *Alternate Fuels Sp-480*, p. 163.
- D'ANDREA, T.; HENSHAW, P.F. y TING D.S.-K., (2004). The addition of hydrogen to a gasoline-fuelled SI engine – *International Journal of Hydrogen Energy* 29, 1541 – 1552.
- DONNELLY, J., (1981). Prepared discussion of “Hydrogen as an alternative automotive fuel” – *Alternate Fuels Sp-480*, p. 151
- MA, F.; He, Y.; DENG, J.; JIANG, L.; NAEVE, N.; WANG, M. y CHEN, R., (2011). Idle characteristics of a hydrogen fueled SI engine – *International Journal of Hydrogen Energy* 36, 4454 – 4460.
- GALANTE, N.; MACCHELLO, S.; ROCHE, L. y SALINAS, D., (2021). Determinación de la performance y emisiones en motores de combustión interna al suministrar hidrógeno bajo el modo del gas HHO (de Brown) en el proceso de combustión. En *Revista Proyecciones*, Vol. 19 n° 1, abril 2021, UTN.FRBA. URI <http://hdl.handle.net/20.500.12272/5486>
- IPCC (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- KUKKONEN, C., (1981). Hydrogen as an alternative automotive fuel – *Alternate Fuels Sp-480*, p. 127.
- NEGURESCU, N.; CONSTANTIN PANA, C. y CERNAT, A., (2012). Aspects of Using Hydrogen in SI Engine - *U.P.B. Sci. Bull. Series D*, Vol. 74, Iss. 1.
- PULKRABEK, W., (1997). *Engineering Fundamentals of the internal combustion engine.* Prentice Hall. EE.UU.
- RIFKIN, J., (2004). *La economía del hidrógeno.* Editorial Paidós. Argentina.
- TRIBUBÓ, H.; GALANTE, N.; MACCHELLO, S.; FRANZI, R. y BAGLIONI, C., (2011). Desarrollo del combustible híbrido gaseoso (GNC+H<sub>2</sub>) en motores de transporte público y de carga. Tercer Congreso Iberoamericano de Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía.
- TRIBUBÓ, H.; GALANTE, N.; MACCHELLO, S. y FRANZI, R., (2016). Utilización del combustible híbrido gaseoso (GNC+H<sub>2</sub>) en motores de uso vehicular. *Jornadas Iberoamericanas de Motores Térmicos y Lubricación.*