



FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECÁNICA  
DE LAS  
INGENIERÍAS

FoDAMI



II CAIM 2010  
Segundo Congreso Argentino  
de Ingeniería Mecánica  
San Juan - Noviembre 2010

## UTILIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE HÍBRIDO GASEOSO (GNC + H<sub>2</sub>) EN MOTORES DE USO VEHICULAR

Ing. Horacio Trigubó<sup>1</sup>, Ing. Nicolás Galante<sup>2</sup>, Ing. Sergio Macchello<sup>3</sup>, Ing. Roberto Franzi<sup>4</sup>

**Depto. Ingeniería Mecánica – Facultad Regional Buenos Aires  
Universidad Tecnológica Nacional**

**Medrano 951, (C1179AAQ) Buenos Aires, Argentina**

[htrigubo@cedi.frba.utn.edu.ar](mailto:htrigubo@cedi.frba.utn.edu.ar), [nicgalante@hotmail.com](mailto:nicgalante@hotmail.com),

[sgmacchello@hotmail.com](mailto:sgmacchello@hotmail.com), [tallerfranzi@hotmail.com](mailto:tallerfranzi@hotmail.com)

### RESUMEN

La creciente motorización global vehicular unida a la disminución mundial de las reservas de petróleo y la imperiosa necesidad de restringir la emisión de gases contaminantes, han impulsado el desarrollo de combustibles alternativos en reemplazo de los tradicionales.

Por lo mencionado, en el Laboratorio de Máquinas Térmicas de la FRBA/UTN y promocionado por CNEA, se está trabajando en el proyecto de utilizar en motores ciclo OTTO un nuevo combustible gaseoso constituido al mezclar GNC por porcentajes variables de H<sub>2</sub>. (5 al 20%)

Los motivos que lo impulsan son:

1- El Gas Natural está incrementando mundialmente su utilización en reemplazo del combustible nafta por su menor precio de venta, como también los motores OTTO pueden funcionar con modificaciones de bajo costo produciendo menor emisión de HC y CO.

Sin embargo, al ser las temperaturas de combustión de las mezclas GNC/Aire más elevadas que la de los combustibles líquidos, origina mayor emisión de óxidos de nitrógeno (NOx).

También, por la menor velocidad de propagación de la llama respecto a la nafta, requiere un mayor avance al encendido disminuyendo la eficiencia térmica del ciclo.

2- El Hidrógeno es considerado como el combustible del futuro, tanto por la posibilidad de obtenerlo a partir de recursos abundantes y renovables, como el agua, como por sus excelentes propiedades:

- alta velocidad de propagación de la llama.
- amplio rango de ignición, lo que favorece el uso de mezclas pobres.
- bajo nivel de emisiones.

En consecuencia, se pueden apreciar los argumentos que impulsan la utilización del nuevo combustible híbrido que resulta de la mezcla del GNC y el H<sub>2</sub>, con la ventaja fundamental de que los motores utilizarían la misma tecnología que para el GNC.

El programa de investigación en el Laboratorio consiste en el ensayo comparativo en dinamómetro de un motor actual normal de producción al funcionar con combustibles líquido y gaseosos (GNC, GLP y GNC+H<sub>2</sub>), verificándose su *performance*, consumo y emisiones contaminantes, con la premisa de que en el motor –y para optimizar los resultados–, se podrán únicamente realizar modificaciones de la calibración original de los sistemas de: encendido, alimentación de combustibles gaseosos y riqueza de mezcla.

Por los resultados positivos a obtener, el proyecto se considera como una transición progresiva hacia el uso masivo del hidrógeno en vehículos de transporte.

**Palabras Claves:** combustibles alternativos gaseosos, combustible híbrido GNC + H<sub>2</sub>, mezcla pobre, emisiones contaminantes, motor original.

<sup>1</sup> Ing. Mecánico – Jefe Laboratorio y Coordinador Grupo Investigación

<sup>2</sup> Ing. Mecánico – JTP

<sup>3</sup> Ing. Mecánico – JTP

<sup>4</sup> Ing. Mecánico – JTP

## 1. INTRODUCCIÓN

### COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

El panorama energético mundial está en permanente cambio por: la disminución de las reservas de yacimientos fósiles; por el incremento de su consumo generado principalmente por una mayor utilización de automóviles; y por la exigente normativa internacional que, para reducir las emisiones contaminantes de los motores de combustión interna (CI), han potenciado la utilización de los denominados “combustibles alternativos”.

Tabla 1 Combustibles alternativos

MOTORES	COMBUSTIBLES		
	TRADICIONALES	ALTERNATIVOS	
	Líquidos	Líquidos	Gaseosos
OTTO	Nafta	Alcohol *	GNC
			GLP
			H <sub>2</sub> *
DIESEL	Gasoil	Biodiesel *	-----

- *Renovables*

Debido a la creciente utilización mundial del combustible **GNC** por su menor precio de venta, y a las posibilidades y ventajas de su mezcla con **H<sub>2</sub>**, describiremos las características fundamentales de ambos:

#### 1.1. Gas Natural

Sus ventajas son:

- menor precio de venta que los combustibles líquidos;
- el bajo costo de la conversión de los motores ciclo Otto para funcionar con GNC;
- la posibilidad de los motores de trabajar con relaciones de compresión del orden 13:1, debido a su elevado número de octano;
- por tener 1C, el CH<sub>4</sub> resulta menos contaminante en CO y HC, que el Isooctano, con 8C.

Sus desventajas son:

- la menor velocidad de propagación de la llama respecto de la nafta, requiere que el encendido de la mezcla se produzca con bastante anticipación del PMS (punto muerto superior).
- al ser la temperatura del proceso de combustión más elevada que al utilizar nafta, se origina mayor emisión de NO<sub>x</sub>;
- por su menor densidad, el gas ocupa más volumen en el cilindro del motor que la nafta, ocasionando por la menor carga de aire una pérdida de potencia de alrededor de un 15%.

## 1.2. Hidrógeno

Es considerado como el combustible más promisorio por:

- su obtención a partir de recursos renovables;
- elevado poder calorífico (120 MJ/kg);
- velocidad de llama cinco veces mayor que la nafta; aproxima al proceso teórico de combustión a Volumen constante mejorando la eficiencia térmica;
- mínimo valor de energía para su ignición;
- amplio rango de inflamación, lo que permite que los motores de CI funcionen con mezclas pobres, disminuyendo el consumo de combustible y las emisiones contaminantes;
- por la composición del H<sub>2</sub>, durante su combustión se genera vapor de agua y NOx.
- por los límites de inflamación (4 al 75%), la carga del motor ciclo Otto puede ser controlada por la cantidad de combustible (funcionando con la mariposa del acelerador totalmente abierta, al igual que el motor Diesel), lo que mejora la eficiencia volumétrica, disminuyendo las pérdidas por bombeo;

Por otro lado, debido al menor poder calorífico inferior volumétrico, genera menor potencia que los combustibles nafta y GNC.

La posibilidad de que el H<sub>2</sub> pueda ser utilizado masivamente en los vehículos dependerá que su fabricación, distribución y almacenaje en el vehículo se pueda efectuar con un costo aceptable y en el que habrá que incluir la ponderación económica de la “**mejora ambiental**”.

Tabla 2 Propiedades de Hidrógeno, Metano y Nafta

Propiedades	Unidad	Hidrógeno	Metano	Nafta
Densidad (líquido)	kg/dm <sup>3</sup>	0,07	0,423	0,73 - 0,74
Densidad (gas 25°C; 1 atm)	kg/ m <sup>3</sup>	0,083	0,651	---
Densidad (gas 25°C; 200 bar)	kg/ m <sup>3</sup>	15	130	---
Aire/Comb. Estequiométrico (vol.)	v/v	2,37	4,75	49,2
Aire/Comb. Estequiométrico (masa)	m/m	34,3	17,4	14,7
Poder Calorífico Inferior	kJ/kg	120.000	50.000	43.500
Límites de inflamabilidad	% vol	4 - 75	5,3 - 15	1 - 7,6
Energía mínima de encendido	mJ	0,02	0,29	0,24
Velocidad de llama laminar (NPT)	cm/seg	170	20	37 - 43
Temperatura adiabática de llama	°K	2318	2190	2470
Número Octano Research	RON	60	120	97

### 1.3. Mezclas Metano + Hidrógeno

El uso de estas mezclas híbridas\* tiene como objetivo aprovechar las ventajas complementarias de ambos combustibles. Éstas son:

- Para obtener buenos resultados en cuanto a emisiones y potencia, se agregan cantidades reducidas de hidrógeno (la experiencia internacional indica del 20 al 30%).
- Como consecuencia, no se incrementa en forma elevada el costo del combustible.
- Se utiliza el mismo equipamiento del GNC instalado en el vehículo.
- se considera como una transición hacia el uso masivo del hidrógeno en vehículos de transporte.
- Al incrementar el H<sub>2</sub>, la velocidad de llama reduce las emisiones de HC, de CO y CO<sub>2</sub>.
- Por el gran rango de inflamabilidad del H<sub>2</sub>, el motor puede funcionar con mezclas pobres, emitiendo menor NO<sub>x</sub> y disminuyendo su *consumo*.
- De la Tabla 2, se observa que por el menor PCI volumétrico del H<sub>2</sub> respecto del Metano, al incrementar el porcentaje de H<sub>2</sub>, se reduce la potencia del motor. Por lo tanto, el contenido de H<sub>2</sub> en la mezcla debe adecuarse al uso del motor.

### 2. EMISIONES CONTAMINANTES

Por ser los motores de CI una de las causas fundamentales de contaminación ambiental (CO, HC, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>), se ha generado una normativa cada vez más restrictiva sobre las emisiones (ej.: Euro 2, 3, 4, 5).

Una variable muy importante para determinar la emisión en los motores Otto es el valor denominado "Lambda", que es la relación entre la cantidad real instantánea de aire-combustible y la cantidad estequiométrica.

Tabla 3 Relación Lambda

Lambda	= 1	< 1	> 1
Mezcla	Estequiométrica	Pobre (exceso de aire)	Rica (exceso de combustible)

En la práctica, por variación de la cantidad de combustible, los motores Otto trabajan entre Lambda 0,9 y 1,10, pudiendo alcanzar otros valores según la exigencia del funcionamiento, lo que produce diversas emisiones contaminantes (HC, CO, NO<sub>x</sub>) (ver figura 1).

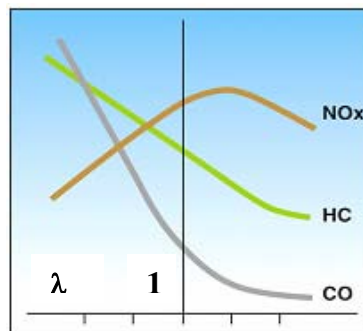


Figura 1 Variación del CO, HC y NO<sub>x</sub> en función de Lambda

\* Las mezclas son denominadas "Hythane" (Hy-drogen; Me-thane)

En la figura 1, se observa la importancia que tiene lograr que el motor trabaje con mezclas pobres para disminuir las emisiones. Sin embargo, al considerar el **Metano**, no es posible efectuarlo por su baja velocidad de propagación. Por ello se aumenta el avance al encendido (APMS) lo que ocasiona, el incremento de la temperatura de la combustión con el consecuente aumento de los NO<sub>x</sub>.

De ahí surge la ventaja fundamental de **agregar H<sub>2</sub>** al Metano, al lograr extender el límite pobre de la combustión y también incrementar la velocidad de llama, lo cual permite al motor funcionar con menor APMS, que implica la emisión de menor cantidad de NO<sub>x</sub>.

### 3. PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN

El Grupo de Investigación de la FRBA planificó el ensayo de un motor en dinámometro con todos los combustibles existentes en nuestro ámbito (nafta,alconafta, GLP, GNC y mezclas GNC-H<sub>2</sub> del 5% al 10%). Las tareas consisten en utilizar un motor normal actual de producción, al que se le efectuarán ensayos comparativos para obtener su potencia, par motor, consumo específico y emisiones contaminantes, con el condicionamiento que al motor sólo se le podrán modificar la calibración original del avance al encendido, la alimentación de los combustibles gaseosos y la riqueza de mezcla.

Para los combustibles gaseosos se utilizarán los sistemas de alimentación de combustible por aspiración e inyección gaseosa.

Los ensayos en dinámometro se efectuarán según la norma CETIA 3-1 (Comisión Estudios Técnicos Industria Automotriz Argentina).

Tabla 4 Especificaciones del motor ensayado

Datos Generales	MOTOR
Marca	Volkswagen
Modelo	Audi-Gol
Tiempos	4
Cantidad de cilindros	4
Cilindrada total (cm <sup>3</sup> )	1600
Relación Compresión	10:01
Sistema de refrigeración	agua
Sistema de admisión	Mezclador con aspiración natural
Sistema de combustible	Líquido => Inyección Bosch
	GNC-GLP => Aspiración
	GNC-GLP => Inyección "PVR"
Sistema de encendido	Bosch
Bujías	Bosch
Sistema de escape	Silenciador y catalizador original
APMS	9°

Instrumental utilizado:

- Dinamómetro Hidráulico "CLAYTON" (Origen EE.UU.)
- Medición gravimétrica de consumo de combustible líquido "ING. DURÁN" (Argentina)
- Medición gravimétrica de consumo de combustible gaseoso "ING. DURÁN" (Argentina)
- Analizador gases de escape "TRONIC TEST" (Italia)
- Analizador de motor y encendido "MOTORTESTER BOSCH" (Alemania)
- Controlador Lambda Control System "PVR" (Argentina) ( $\lambda$  Cte = 1)
- Scanner automotriz "SPC-960" (Argentina)
- Probador de bujías "DALTON" (Argentina)
- Variador de avance al encendido y cantidad de combustible "MOTEK" (Australia)
- Medidor de Lambda "BERTA" (Argentina)
- Sistema registrador de datos mediante PC con sensores e interfaces "H.RESIO" (Argentina)

#### 4. ENSAYOS EN BANCO DE MOTORES

##### 4.1. Consideraciones

- El motor que se está utilizando es nuevo (Volkswagen modelo Audi/Gol), el cual fue armado, instalado en el dinamómetro e instrumentado por los docentes y alumnos becarios del Laboratorio de Máquinas Térmicas.
- La medición de las emisiones contaminantes se efectuó antes del catalizador para tener una lectura real.
- La temperatura de los gases de escape se midió antes del catalizador.
- Al motor se le efectuó un proceso de ablande con cargas variables, durante 50 horas.
- Los ensayos de los combustibles fueron realizados con la calibración de fábrica del motor.
- Hasta el presente, los combustibles ensayados fueron:  
Naftas Súper "YPF" y "Shell"; Alconafta "YPF" al 5% y 10% de alcohol (E5; E10); GLP (Gas Licuado de Petróleo)

##### 4.2. Resultados de los ensayos

###### 4.2.1 Nafta Súper "YPF"

Las curvas de *performance* obtenidas (potencia, par motor, consumo específico de combustible) indican que el motor funciona correctamente y coincidentemente con las curvas características del fabricante.

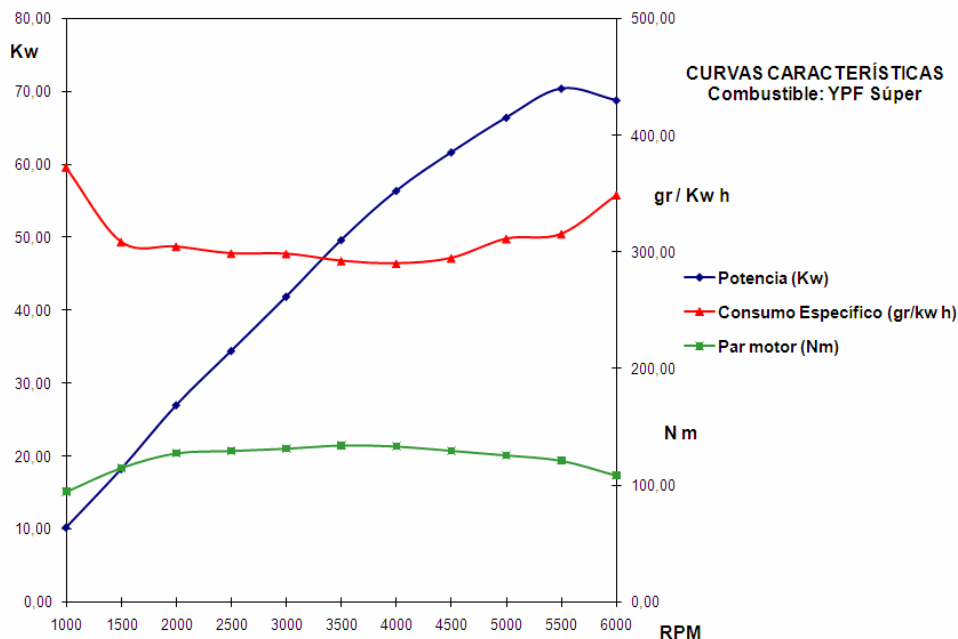


Figura 2 Curvas características Nafta Súper "YPF"

o; Roberto Franzi /  
Utilización del Combustible Híbrido Gaseoso (GNC+H<sub>2</sub>) en Motores de Uso Vehicular

#### 4.2.2 Comparación Curvas Potencia de Naftas Súper "YPF" y "Shell"

Se observa que con ambos combustibles, se obtienen resultados equivalentes.

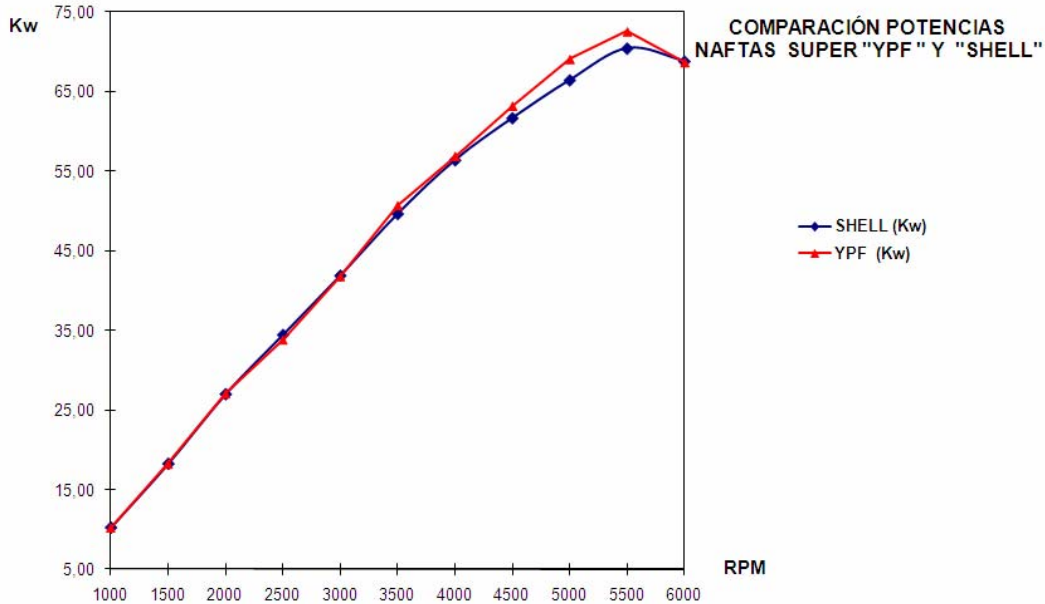


Figura 3 Comparación curvas de potencia Naftas Súper "YPF" y "SHELL"

#### 4.2.3 Comparación Curvas de Potencia de Nafta Súper "YPF" con Alconafta "YPF" E5 y E10

Lasalconaftas utilizadas fueron provistas por el fabricante y son mezclas de naftas Súper con alcohol al 5% y 10%. Se debe mencionar que actualmente la nafta ya contiene un 5% de alcohol y en breve pasará a contener un 7%.

En la comparación de potencias, con el E10 se observa un resultado levemente superior y sin variantes con el E5.

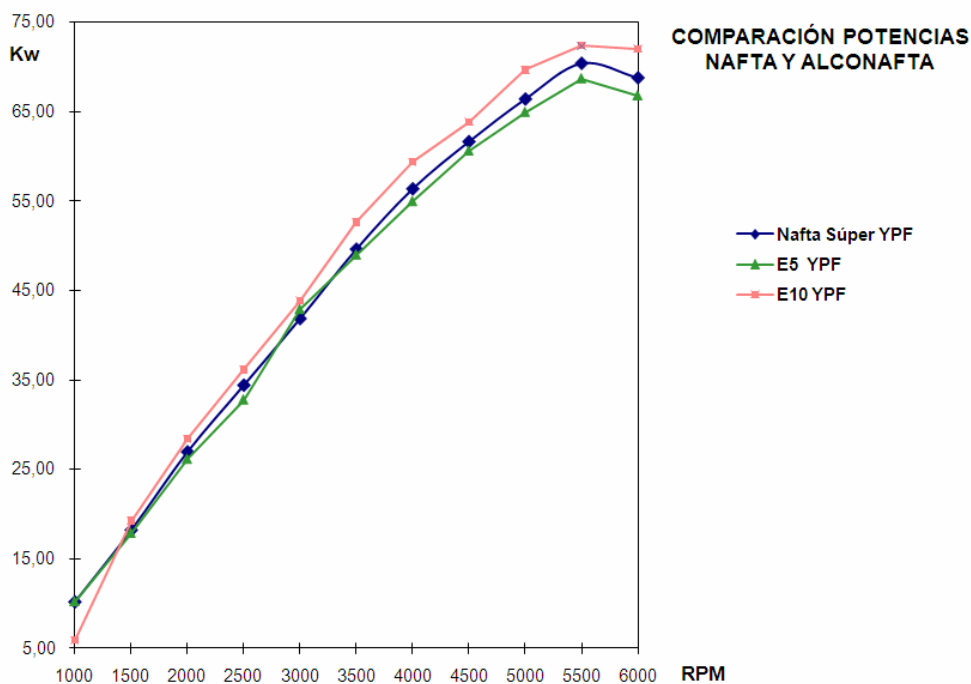


Figura 4 Comparación curvas de potencia nafta Súper y Alconaftas "YPF"

#### 4.2.4 Comparación Curvas de Potencia del GLP con diferentes avances al encendido

Con este combustible, la alimentación al motor se efectuó mediante el sistema de aspiración (depresión), con proceso de regulación de caudal de combustible por lazo cerrado, que mantiene el  $\lambda = 1$ .

Se obtuvieron curvas de potencia para los siguientes avances iniciales del encendido (APMS):

9° APMS Valor original de fábrica

4° APMS Motor atrasado

19° APMS Motor adelantado

Se observa que para el valor original de fábrica (9° APMS), se logra la mejor curva de potencia.

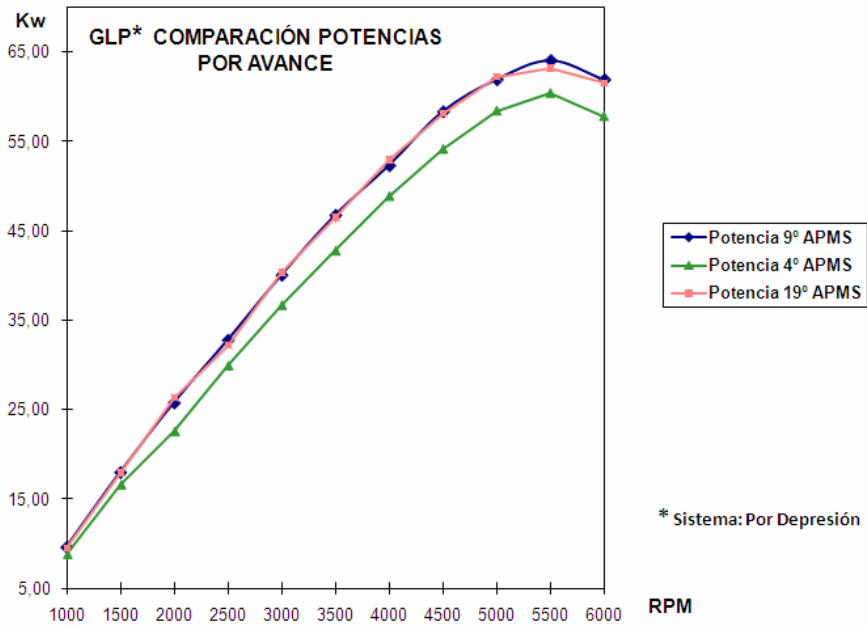


Figura 5 Comparación curvas de potencia GLP para diferentes avances al encendido

#### 4.2.5 GLP (Gas Licuado de Petróleo)

En el siguiente gráfico, se representan las curvas características obtenidas con el motor funcionando en la mejor condición de avance al encendido (9° APMS).

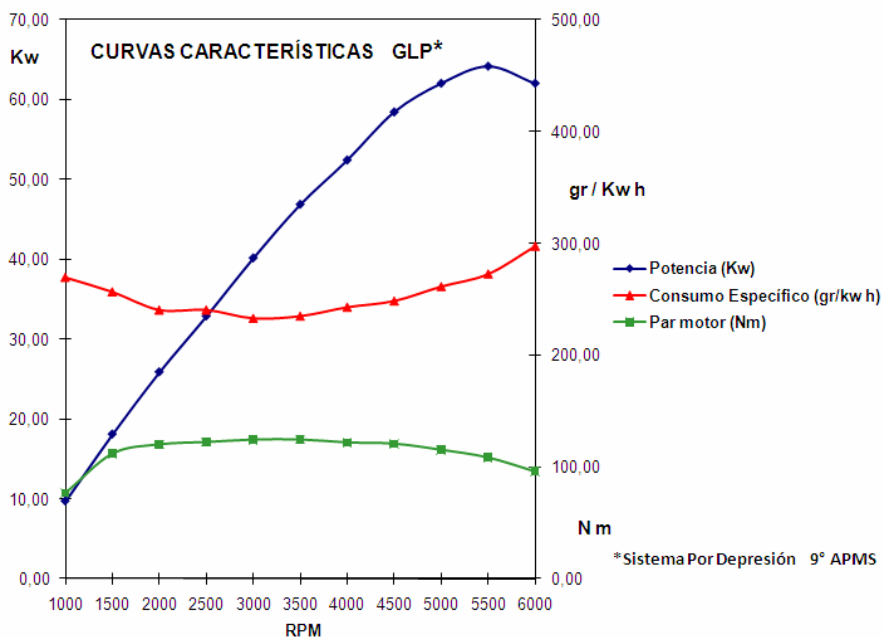


Figura 6 Curvas característica GLP

#### 4.2.6 Comparación Curvas Características entre Nafta Súper “YPF” y GLP

Se observa que para el valor máximo de potencia (5500 RPM), el GLP tiene una potencia menor, de alrededor de un 8%. Respecto del consumo específico en la condición de par máximo (3000 RPM), con el GLP se logra una disminución del orden de un 25%.

**Nota:** Es importante mencionar que el motor en la condición de máxima potencia funciona: con  $\lambda = 0,85$  para el combustible nafta mientras que  $\lambda = 1$  para GLP.

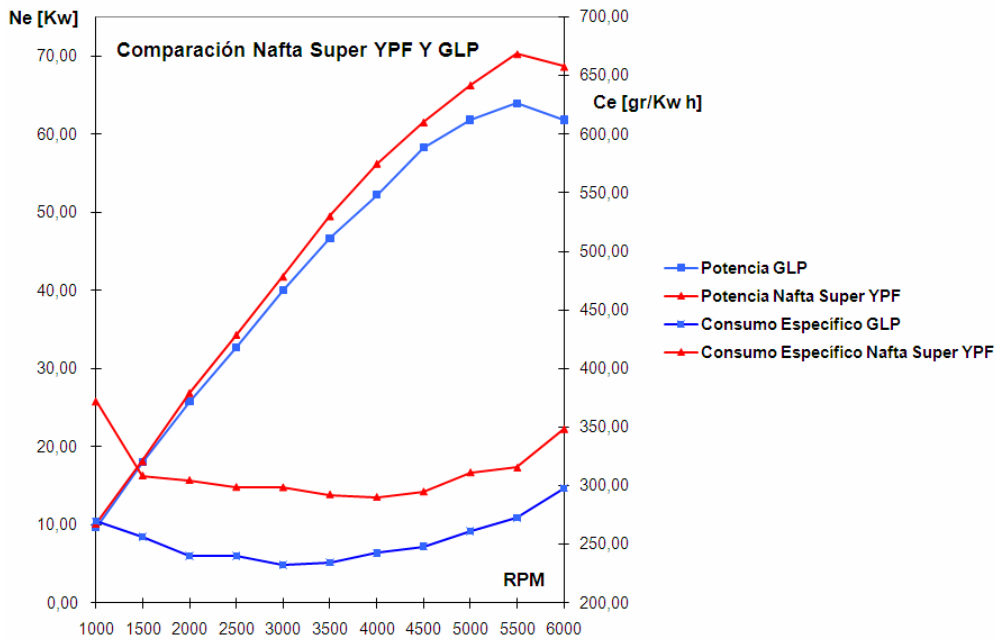


Figura 7 Comparación curvas características nafta Súper “YPF” y GLP

#### 4.2.7 Comparación de temperaturas de gases de escape y emisiones contaminantes a 3000 RPM

Tabla 5 Temperaturas de gases de escape y emisiones contaminantes

Combustible	$\lambda$	Temperatura de gases de escape	CO %	HC (ppm)	NOx (ppm)
Nafta Súper YPF	0,85	754°C	2,84	53	>1000
E 5 YPF	0,85		2,8	54	>1000
E 10 YPF	0,85		2,96	60	>1000
GLP	1	763°C	0,68	37	>1000

Se observa en la variación de las emisiones la influencia del tipo de combustible.

## 5. CONCLUSIONES INICIALES

En el comienzo del trabajo de investigación al observar los ensayos de los combustibles mencionados, se puede apreciar la importancia de ir adecuando las variables “avance al encendido y riqueza de mezcla” con cada uno para así posibilitar la disminución de las emisiones y optimizar su performance.

## 6. TRABAJOS A EFECTUAR

Destacamos que este proyecto es muy completo al abarca todos los combustibles utilizados en el motor OTTO. Esto implica: su obtención, la instalación en el motor de diferentes sistemas de alimentación de combustible con el instrumental correspondiente para luego poder efectuar los ensayos específicos.

Los trabajos en proceso de ejecución son:

Combustible	Trabajos a efectuar en el proyecto actual
<b>GNC</b>	Relevar curvas características con sistema de alimentación por aspiración de motor (coincide con el equipamiento instalado en la gran mayoría de vehículos en nuestro país).
<b>Instalación en el motor del sistema de inyección de combustibles gaseosos con los reguladores de GNC y GLP e instrumental específico</b>	
<b>GLP / GNC</b>	Optimizar curvas características actuando con el avance al encendido.
<b>GNC +H<sub>2</sub> (5%)</b>	Optimizar funcionamiento del motor actuando sobre el avance al encendido y relación $\lambda$ .

Combustible	Trabajos a realizar en el proyecto futuro
<b>GNC + H<sub>2</sub></b> H <sub>2</sub> (10-20%)	Determinar la concentración óptima de hidrógeno para lograr mínimo NOx , máxima potencia y mínimo consumo actuando con $\lambda$ y APMS
	Determinar el límite pobre para un correcto funcionamiento, utilizando diferentes relaciones de mezcla GNC + H <sub>2</sub> .

## 7. REFERENCIAS

- [1] *Lean Burn Natural Gas Spark Ignition Engines*, SAE, EE.UU., 2003.
- [2] Esteban Estévez y Otros, *Effects of hydrogen supplementation in the combustion of natural gas fuelled engines*, Hydrogen Research Institute, Université du Québec, Canadá, 2003.
- [3] Jesús Kindelan, *El hidrógeno, combustible en motores*, Politécnica de Valencia, España, 2009.
- [4] G. Karim, *Hydrogen an additive to methane for spark ignition engine applications*, Pergamon, EE.UU. 1999.
- [5] Roger Sierens, *Hydrogen fuelled internal combustion engines*, Universiteit Gent, Holanda. 2007.

## Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer al Dr. Daniel Pasquevich y a la Dra. Cristina Fernández de Giorgi, de la CNEA, a los docentes del Laboratorio de Máquinas Térmicas, y a los integrantes de los departamentos de Mecánica y de Ciencia y Técnica de la FRBA/UTN, que han participado con nosotros en la realización del trabajo de investigación.