

---

## **COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS GASEOSOS – CONSIDERACIONES SOBRE RENDIMIENTOS ENERGÉTICOS Y EMISIONES CONTAMINANTES**

---

**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. Ing. Mecánica – Facultad Regional Buenos Aires – Universidad Tecnológica Nacional.  
Av. 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 disminución de la existencia de combustibles fósiles, como así también el incremento permanente de su consumo y la creciente normativa internacional para reducir las emisiones contaminantes, han potenciado la búsqueda de soluciones con combustibles alternativos entre los cuales están el gas natural y el GLP.

Formando parte de esta tendencia y previamente a utilizar mezclas GNC/H<sub>2</sub>, (PAV en ejecución en UTN/FRBA), el Laboratorio de Máquinas Térmicas investigó el funcionamiento de un motor Mercedes Benz OM 352 Diesel transformado en OTTO al funcionar con estos combustibles gaseosos.

Diferentes calibraciones del motor fueron ensayadas para optimizar su funcionamiento, las que incluyeron cambios en la relación de compresión, modelos de bujías, curvas de avance al encendido y las relaciones de riqueza de mezcla.

Así se determinaron las curvas características (potencia, par motor y consumo específico de combustible), como también la medición de emisiones contaminantes.

En este estudio, se han desarrollado:

- Para el GNC, la influencia de la relación de compresión.
- Para el GLP, la influencia de la riqueza de mezcla ( $\lambda$ ).

Para modificar el valor  $\lambda$  y lograr que fuese estable durante el funcionamiento del motor, hubo que adaptar un sistema de control de lazo cerrado que posibilitara y permitiera efectuar los ensayos previstos.

Los resultados positivos obtenidos permiten ser optimistas en cuanto a la disminución del consumo de combustibles y de las emisiones contaminantes, independientemente de la magnitud de la tarea por realizar para lograr un correcto funcionamiento del motor.

### **Palabras Clave:**

combustibles fósiles líquidos, combustibles alternativos gaseosos, relación aire-combustible (valor  $\lambda$ ), emisión de contaminantes, consumo de combustible.

---

<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 cambiando rápidamente, tanto por la disminución de la existencia de petróleo, como por el incremento en su consumo. Partiendo de la premisa de que en un futuro próximo, no se utilizarán combustibles fósiles líquidos —servirán como materia prima para las industrias químicas—, para el accionamiento de los motores de combustión interna ha comenzado la etapa de los combustibles alternativos (Tabla 1).

Tabla 1 - Combustibles alternativos

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

\* Renovables

La utilización de los combustibles gaseosos está en pleno auge por la magnitud de los yacimientos mundiales existentes. Así, debido a su menor costo, el GNC ha tenido una extraordinaria aceptación en nuestro país.

Describiremos a continuación las características fundamentales del GNC y del GLP:

#### 1.1. GAS NATURAL

Sus características principales son [1]:

- Por su baja 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%.
- Dado su elevado número de octano, se puede utilizar en motores Ciclo Otto con relaciones de compresión del orden de 13:1. Considerando la densidad y poder calorífico, resulta que

$$1\text{m}^3 \text{ GN} = 1,2 \text{ lt. Nafta} \quad (\text{ver tabla 2})$$

#### 1.2. GAS LICUADO DE PETRÓLEO

Sus características principales son [1]:

- Su poder calorífico y el índice de octano son ligeramente superiores a los de la nafta, lo que permite utilizar motores con similar relación de compresión y mayor avance al encendido.
- Su rendimiento, considerando la densidad y poder calorífico, es:

$$1 \text{ Kg GLP} = 1,41 \text{ lt. Nafta} \quad (\text{ver tabla 2})$$

Tabla 2 - Propiedades de los combustibles [2]

	GNC	GLP	NAFTA	GASOIL
Peso específico Kg/m <sup>3</sup>	0,83	2,23	750	855
PCI Inferior Mj/Kg	47,7	46	43,5	42,7
Nº Octano	125	100	90/97	----
Nº Cetano	----	----	----	mínimo 50

### 1.3. TRANSFORMACIÓN DEL MOTOR DIESEL EN OTTO

Dado el interés que existía en el mercado de vehículos de transporte de pasajeros y de carga, para utilizar los combustibles GNC y GLP en reemplazo del Gasoil (por la diferencia de precios entre los mismos), se efectuaron estudios de mercado que evidenciaron el potencial de la conversión de motores del ciclo Diesel a Otto. En consecuencia el Grupo de Investigación decidió utilizar un motor Mercedes Benz “352” originalmente Diesel que transformado en ciclo Otto se encontraba en etapa de prototipo (ver tabla 3).

Los trabajos básicos para convertir un motor Diesel en Otto son [3]:

- Reemplazar el conjunto diesel: bomba inyectora, inyectores de combustible y sus cañerías por un sistema de encendido constituido por el distribuidor con su accionamiento mecánico, las bujías de encendido en la tapa de cilindros, la bobina de alta tensión, etc.
- Modificar la relación de compresión, que según las características del combustible a ensayar, requirió la preparación de juntas espaciadoras

Combustible	Gasoil	GNC	GLP
Relación de compresión	17:1	12,5:1 AC	9:1 BC

AC: Alta Compresión  
BC: Baja Compresión

### 1.4. SISTEMA DE CONTROL DE COMBUSTIBLES GNC-GLP POR SONDA LAMBDA ( $\lambda$ )

Para disminuir las emisiones contaminantes y poder cumplir con las normativas internacionales EURO, los motores Ciclo Otto están equipados con:

- Sistemas de inyección de nafta y encendido electrónico con su control ECU.
- Catalizador para el tratamiento de los gases de escape y sonda Lambda

**En nuestro caso, dado que el motor a ensayar debía estar de acuerdo con las características del mercado, no tenía instalados inyectores de gas, catalizador y ECU.**

Únicamente fue equipado con dos sistemas diferentes de reguladores de los combustibles gaseosos GNC y GLP y con dos sistemas de control de caudal de combustible marca Landi Renzo, modelo “Lambda Control System” ( $\lambda=1$ ) y PVR modelo “Sorpasso” ( $\lambda$  variable), comandados por la señal de la sonda Lambda.

Se denomina “lambda” a la proporción entre la cantidad real instantánea de aire-combustible y la cantidad estequiométrica.

<b>Lambda</b>	<b>=1</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&gt; 1</b>
mezcla	estequiométrica	pobre (exceso de aire)	rica (exceso de combustible)

En la práctica los motores Otto por variación de la cantidad de combustible, 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).

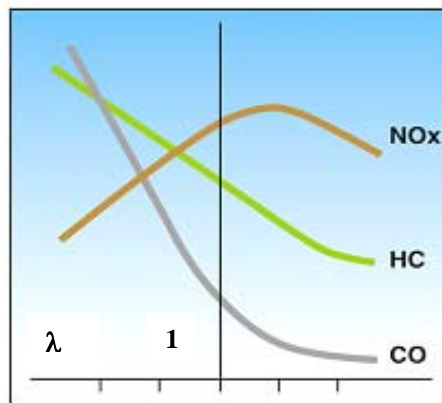


Figura 1 - Emisiones

## 2. ENSAYOS EN DINAMÓMETRO

Se presenta un resumen de los ensayos energéticos y ambientales efectuados al utilizar los combustibles GNC y GLP para las siguientes condiciones de funcionamientos.

$\lambda$	Combustible	Rc
Cte = 1	GNC	9:1    12,5:1
0,85 – 1 – 1,15	GLP	9:1

- La determinación de las curvas características (potencia, par motor y consumo específico) se efectuó según la norma CETIA 3-1 (Comisión Estudios Técnicos Ind. Automotriz Argentina).
- En los estudios efectuados, se agregó como comparación el correspondiente al motor Mercedes Benz original funcionando con Gasoil. (Tabla 3)

### Instrumental utilizado:

- Dinamómetro Hidráulico “CLAYTON” (Origen EE.UU.)
- Medición gravimétrica de consumo de combustible “MORETTI” (Argentina)
- Analizador gases de escape “TRONIC TEST” (Italia)
- Analizador de motor y encendido “MOTORTESTER BOSCH” (Alemania)
- Controlador Lambda Control System “LANDY RENZO” (Italia) ( $\lambda$  Cte = 1)

- Sistema electrónico "PVR" regulador del lambda variable (Argentina) ( $\lambda$  Variable)
- Probador de bujías "DALTON" (Argentina)
- Distribuscopio electrónico "TELME" (Argentina)
- Sistema registrador de datos mediante PC con sensores e interfaces "H.RESCIO" (Argentina)

Tabla 3 - Especificaciones del motor ensayado

Datos Generales	MOTOR OTTO-GAS	MOTOR DIESEL
Marca	Mercedes Benz	Mercedes Benz
Modelo	OM-352G	OM-352
Tiempos	4	4
Cant.de cilindros	6	6
Cilindrada total (cm <sup>3</sup> )	5675	5675
Relación Compresión	9:1 (BC)	17:1
	12,5:1 (AC)	
Sistema de refrigeración	agua	agua
Sistema de admisión	mezclador con aspiración natural	aspiración natural
Sistema de combustible	reductor 3 etapas GNC	bomba inyectora Bosch RS lineal
	reductor 2 etapas GLP	inyectores Bosch
Sistema de encendido	distribuidor Indiel/Bosch	
Bujías	NGK	
Sistema de escape	silenciador original	silenciador original

### 3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

#### 3.1 GAS NATURAL COMPRIMIDO (GNC)

Del estudio de las curvas características efectuadas para el GNC con las relaciones de compresión (AC y BC) y con  $\lambda = 1$ , se comprueba que se obtienen mejores resultados energéticos y menor emisión con el motor funcionando en la mayor relación de compresión. (ver Figuras 2, 3 y Tabla 4).

Tabla 4

GNC	Emisiones en el par motor máximo (1400 RPM)	
	Bc 9:1	Ac 12,5:1
Rc		
Co %vol	0,99	0,66
HC ppm	73	63
T.esc °C	692	643

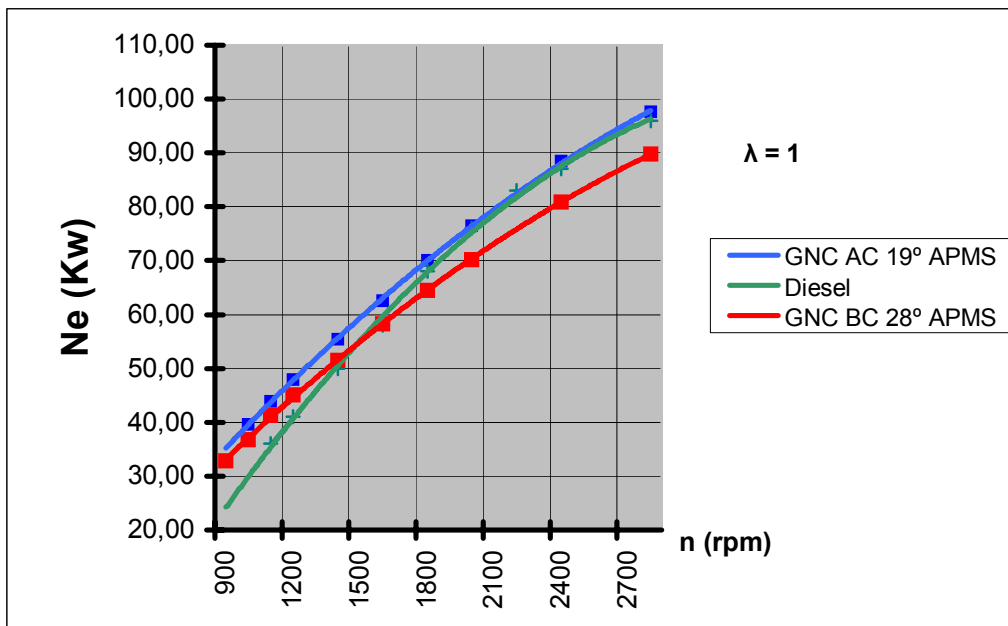


Figura 2 – Comparación Curvas de Potencia

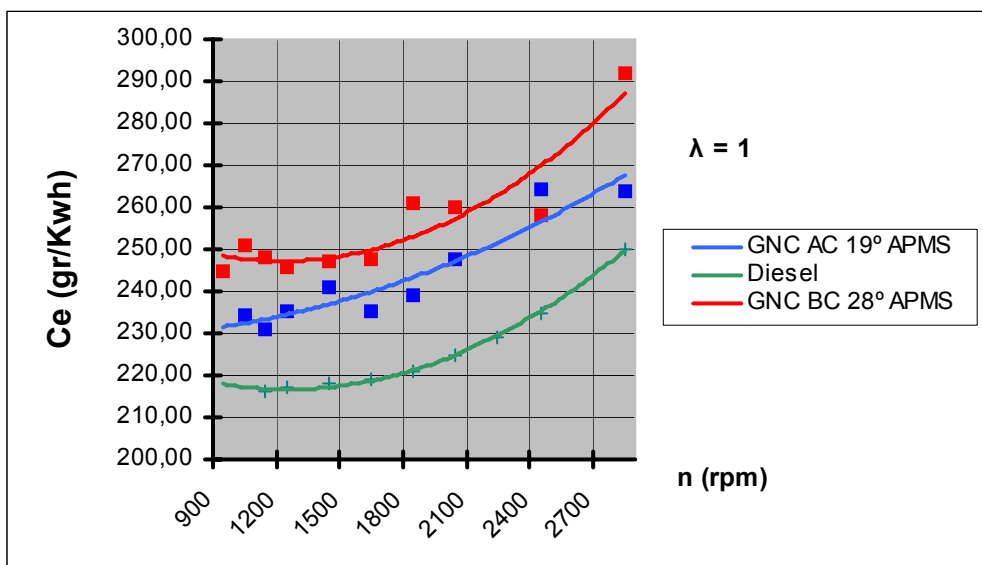


Figura 3 – Comparación Consumo Específico

Aclaración: Las curvas representadas corresponden a las óptimas obtenidas en función del avance al encendido (APMS).

Dado que en la actualidad el GNC se utiliza en motores cuya relación de compresión oscila en alrededor de 9:1, no se aprovechan en su totalidad las bondades de éste combustible. En consecuencia, los motores deben ser diseñados para el uso de GNC (motores dedicados y no convertidos). Para comparar se incluyen las curvas correspondientes al motor Diesel

### 3.2 GAS LICUADO DE PETRÓLEO (GLP)

Las experiencias vinculadas con la utilización del lambda variable se efectuaron con el combustible GLP, por funcionar el motor correctamente para la relación de compresión Rc 9:1, que es el valor standard de los motores actuales en nuestro país. Como referencia se presentan ensayos efectuados con  $\lambda = 1$ .

#### 3.2.1 POTENCIA

En la Figura 4, trabajando con relación  $\lambda = 1$  y baja relación de compresión, se observa la influencia del avance al encendido en la obtención de las curvas de potencia. Se verifica que para 19° APMS, se obtiene el mejor valor.

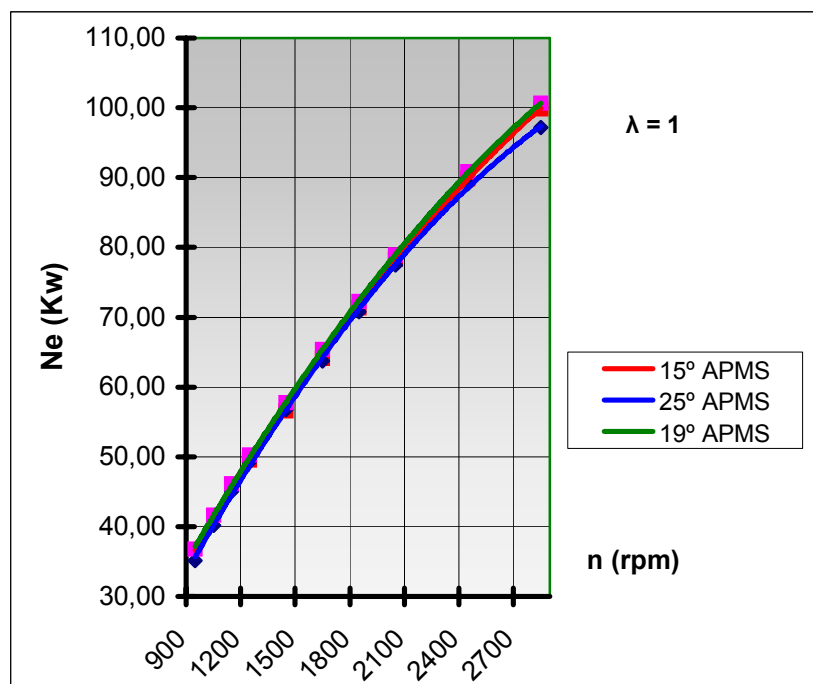


Figura 4 – Potencias por Avance

#### 3.2.2 CONSUMO ESPECÍFICO PARA LA CONDICIÓN DE PAR MÁXIMO CON DIFERENTES AVANCES.

En la Tabla 5, se observa que el mínimo consumo específico se logra para el valor de avance al encendido, con el cual se obtiene la máxima potencia .

Tabla 5 Par máximo (1400 RPM); Rc 9:1;  $\lambda = 1$

Avance	15°	19°	25°
Consumo Especifico Ce (gr/Kw h)	253,51	249,52	253,23

### 3.2.3 COMPARACIÓN CURVAS DE POTENCIA GNC (AC) Y GLP (BC) PARA $\lambda = 1$

En la Figura 5, se muestran las curvas óptimas logradas para cada combustible gaseoso y su comparación con la correspondiente al motor diesel, observándose valores superiores con los combustibles alternativos.

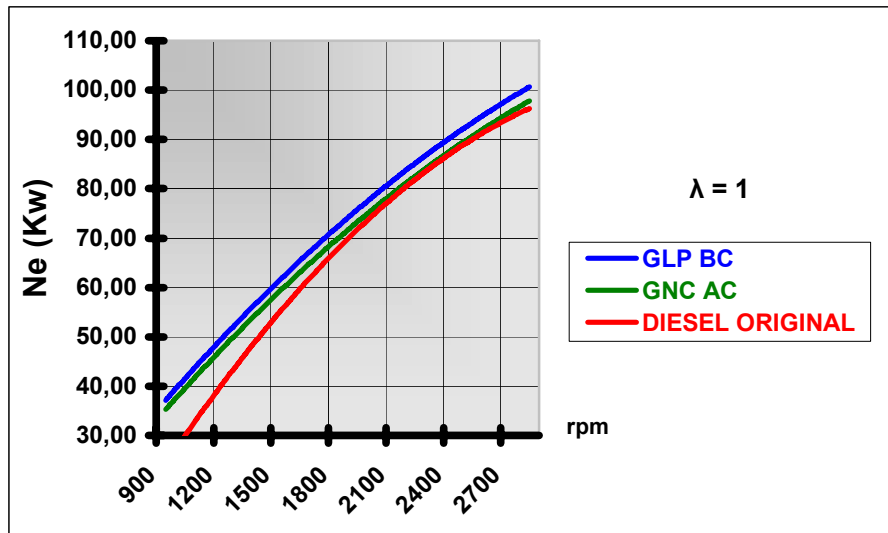


Figura 5 – Comparación Curvas de Potencia

### 3.3 GLP CON LAMBDA VARIABLE

Lambda variable: la utilización de mezclas pobres ( $\lambda > 1$ ) es una de las técnicas en estudio para disminuir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes. La experiencia internacional nos indica que, por las propiedades del GNC y GLP, los mejores resultados se obtienen al aplicar este procedimiento [4], [5]

#### 3.3.1 VARIACIÓN DEL CONSUMO ESPECÍFICO

En la Figura 6, se representa para la condición de par máximo (1.400 RPM) cómo varía el consumo específico en función de  $\lambda$  y del avance al encendido. Se observa que disminuye al empobrecerse la mezcla, coincidiendo el mínimo con el correspondiente al mejor APMS (19°).

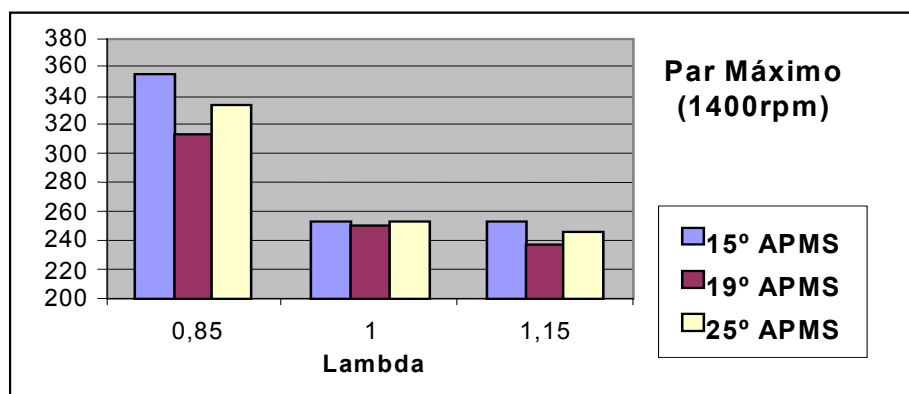


Figura 6 – Consumo Específico  $f(\lambda; APMS)$

### 3.3.2 VARIACIÓN DE POTENCIA, CONSUMO ESPECÍFICO Y EMISIONES EN FUNCIÓN DE $\lambda$ Y DEL AVANCE AL ENCENDIDO PARA LA CONDICIÓN DE PAR MÁXIMO

En la Tabla 6, se verifica que al empobrecer lambda, disminuyen las emisiones; al atrasar el avance aumenta la temperatura de gases de escape; la mayor potencia se logra para 19° APMS y con  $\lambda = 0,85$ ; y el menor consumo se logra con  $\lambda = 1,15$ .

Tabla 6

POTENCIA, CONSUMO ESPECÍFICO, EMISIONES: $f(\lambda, \text{APMS})$																				
GLP Rc 9:1 1400 RPM (Par Motor)																				
Lambda=0,85							Lambda=1			Lambda=1,15										
APMS	Nec	Cec	Te	CO	HC	NOx	APMS	Nec	Cec	Te	CO	HC	NOx	APMS	Nec	Cec	Te	CO	HC	NOx
15	55,05	354,2	648	7,71	160	665	15	57,99	253,5	718	0,46	93	xxx	15	51,7	252,4	678	0,06	52	xxx
19	59,10	312,5	635	5,25	125	598	19	57,6	249,5	660	0,49	110	xxx	19	52,5	236,6	670	0,07	40	xxx
25	55,89	334,3	578	7,33	153	714	25	56,73	253,2	660	0,45	93	xxx	25	51,7	246,6	650	0,05	61	xxx

Los valores de NO<sub>x</sub> no registrados corresponden a los que han excedido el límite superior del analizador de gases.

### 3.3.3 POTENCIA Y CONSUMO ESPECÍFICO EN LA CONDICIÓN DE PAR MÁXIMO (1400 RPM) Y 19° APMS, EN FUNCIÓN DE $\lambda$

Adoptando como base 100 los máximos del consumo específico y potencia para  $\lambda = 0,85$  y 19° APMS registrados en Tabla 6, representamos en la Figura 7 los porcentajes relativos para  $\lambda = 1$  y  $\lambda = 1,15$ . Se verifica que para el  $\lambda$  más pobre, el consumo específico disminuyó un 24% y la potencia el 11%.

En consecuencia, el modo de utilización del motor (mayor potencia o menor consumo), va a determinar el valor de  $\lambda$  a utilizar.

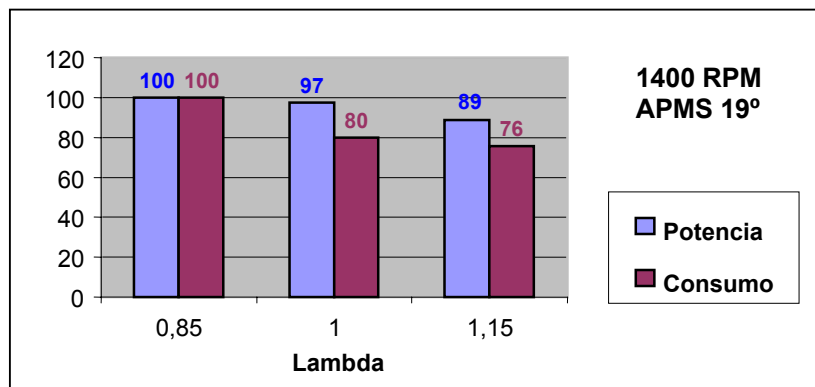


Figura 7 – Potencia y Consumo Específico  $f(\lambda)$

### 3.3.4 EMISIONES EN FUNCIÓN DE $\lambda$ PARA 1.400 RPM Y 19° APMS

En la Tabla 6, se observa que las mayores emisiones se producen para  $\lambda = 0,85$ . En consecuencia, adoptando éstas como base 100, al representar los valores relativos para  $\lambda = 1$  y  $\lambda = 1,15$  se comprueba la notable disminución de las emisiones (para el CO = 99% y para el HC = 68%) (ver figura 8)

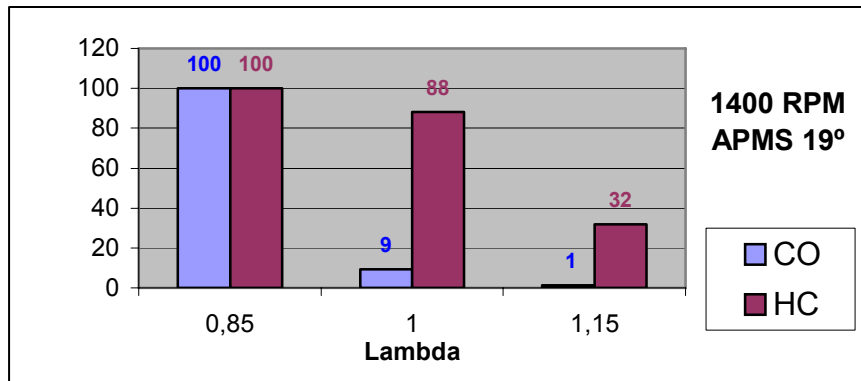


Figura 8 – Consumo Específico  $f: (\lambda)$

## 4. CONCLUSIONES

Los resultados de las investigaciones efectuadas con los combustibles alternativos gaseosos GNC y GLP, indican que se logran disminuir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes al utilizar motores dedicados (GNC en motor con AC), como también con la aplicación de mezclas pobres (GLP para  $\lambda = 1,15$ ). Con lo que se reafirma el objetivo de que para cada combustible se debe optimizar el motor a utilizar.

## 5. REFERENCIAS

- [1] SAE, *Automotive Fuels Handbook*, (1994).
- [2] BOSCH, *Manual de la Técnica del Automóvil*, (2002).
- [3] M.Benz Argentina, *Utilización del GNC como combustible* (1984)
- [4] SAE, *Lean Burn Natural Gas Spark Ignition Engine* (2003).
- [5] SAE, *Opportunities for making LPG a clean and low greenhouse emission fuel* (2005)

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a los docentes del Laboratorio de Máquinas Térmicas y al personal y directivos de los departamentos de Mecánica y de Ciencia y Técnica, que han participado con nosotros en la realización de este trabajo de investigación.