

# DISEÑO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN MIXTO GASOLINA/GAS NATURAL PARA MOTORES AUTOMOCIÓN CICLO OTTO

Maicol Mareno<sup>1</sup>, Paul Barrios<sup>2</sup>,  
Wilfrido Maldonado<sup>3</sup>, Lesme Corredor<sup>4</sup>

1-Ingeniería Mecánica, Barranquilla, Colombia.  
maicolm@uninorte.edu.co

2-Ingeniería Mecánica, Barranquilla, Colombia.  
paulb@uninorte.edu.co

3-Ingeniería Mecánica, Barranquilla, Colombia.  
mwilfrido@uninorte.edu.co

4-Ingeniería Mecánica, Barranquilla, Colombia.  
lcorredo@uninorte.edu.co

**Palabras clave:** motor automoción Otto, inyección mixta, desempeño carga parcial, dosificación combustible, curvas de quemado, lazo de control inyección

## Resumen

Actualmente no hay tecnología disponible para usar dos combustibles simultáneamente en un motor de encendido por chispa. Este concepto sólo se ha aplicado en motores diésel usando gas natural vehicular por medio de un inyector dual que dosifica ambos combustibles. En el presente se desarrolló el diseño conceptual de un sistema de alimentación mixto entre gasolina y GNV para motores de automoción ciclo Otto comerciales. Se evaluó el comportamiento de las curvas de quemado con las ecuaciones de Wiebe. Se obtuvo la variación de la relación de aire combustible teniendo en cuenta el lazo de control del sistema de inyección indirecta, sin alterar la relación de compresión. Estas modificaciones se realizan para lograr un desempeño parecido a carga parcial en comparación con el convencional motor a gasolina reduciendo sustancialmente las emisiones de gases de efecto invernadero.

## 1. Introducción

Con la volatilidad económica del petróleo y sus derivados en nuestros días, siendo un recurso limitado dependiente de su disponibilidad y estabilidad, se ha abierto una ventana de la oportunidad para otros combustibles, entre los cuales, cabe resaltar una alternativa mucho más barata, el gas natural vehicular (GNV), a menudo denominado también como gas natural comprimido (GNC). Se trata de un combustible fósil conformado por diversas especies de gases y sus propiedades se asemejan al metano, que es su principal constituyente. Existen extensas reservas de éste comparadas con el crudo y se descubren nuevos yacimientos constantemente. Como se espera que los motores de combustión interna continúen en servicio durante la presente época, la demanda de vehículos más eficientes, con mayores presiones medias efectivas, mayor confiabilidad y menores tasas de contaminantes continuará su tendencia de incrementar, entonces, se hace evidente la necesidad de usar fuentes de energía más seguras y sostenibles que contribuyan a la

solución de la problemática ambiental, la cual toma cada vez mayor relevancia a nivel mundial.

Es un combustible no contiene azufre ni requiere de aditivos tóxicos empleados para mejorar su octanaje, es seguro, más liviano que el aire y se dispersa fácilmente en la atmósfera, no forma una mezcla suficientemente rica para llevar a cabo la combustión, así como posee mayor número de octano que mejora la eficiencia térmica y permite utilizar de forma más eficiente convertidores catalíticos [1]. La combustión del GNV produce menos emisiones debido a la menor cantidad de impurezas disueltas en el combustible, lo que se traduce como menor cantidad de hidrocarburos aromáticos policíclicos, formaldehídos y material particulado [2]; en cifras, monóxido de carbono (CO) en un 70-90%, óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) 75-95% y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en 20 a 30% [3]. El gas natural posee un poder calorífico másico mayor que la gasolina convencional, sin embargo, para un motor con aspiración natural, la eficiencia volumétrica para un combustible gaseoso es más reducida que con uno líquido, ya que el gas ocupa un mayor volumen por unidad de energía que el combustible líquido, la temperatura de la mezcla de gasolina es menor debido al calor latente de vaporización y la baja velocidad de llama del gas natural, que requiere una sincronización de chispa más avanzada para conseguir una combustión completa dentro de la porción correcta del ciclo del motor [4]. Cualquier vehículo se puede adaptar para consumo de gas natural, aunque algunas marcas optan por comercializar vehículos diseñados para GNV, tal como Landireno. Según [5], comparado con la gasolina presenta un valor para  $LHV_f$  2.2% menor y una relación  $(A/F)_{st}$  17.2% mayor, lo cual trae consigo una reducción de potencia entre el 10% y 15%. Su principal ventaja es el ahorro en economía de combustible y mantenimiento, sumado al menor ruido por explosiones menos intensas, pudiendo operar a mayores relaciones de compresión pasando de 8:1 hasta 14:1, donde valores mayores a esos pueden causar knocking, y evita a su vez el problema de la auto detonación gracias a su mayor octanaje. No obstante, su almacenamiento puede ser un problema. El gas natural requiere nuevos tipos de tanques de almacenamiento modificados y sistema de suministros debido a su baja densidad (típicamente almacenado a 20 MPa). Esto hace que carguen menor energía másica o volumétrica de combustible que la gasolina, lo cual hace que posean un rango limitado de operación, a largas distancias requieren mayor re abastecimiento de combustible.

## 2. Modificaciones

El paso del carburador al inyector vino acompañado de la implementación de un sistema electrónico que garantiza mayor potencia entregada, menor consumo específico de combustible debido a su mejor dosificación, arranque más rápido y menores emisiones de contaminantes. Con todo lo anterior, una vez entendido el lazo de control del motor, es posible plantear un sistema de alimentación mixto que emplee como combustible principal GNV y para compensar las pérdidas en potencia y torque, inyectar gasolina en las cantidades correctas. Se han llevado a cabo numerosas investigaciones para motores en funcionamiento dual utilizando diésel y gas natural, con respecto al comportamiento del motor con miras a desarrollar tecnologías comerciales que puedan utilizar dos fuentes de combustible sin castigar las prestaciones mecánicas y cumplir con las rigurosas normas ambientales. Bosch propone el uso de inyección directa en motores de gasolina para modos específicos de relación aire combustible, modo estratificado, mezcla homogénea pobre y pobre, pero es más común encontrar sistemas de inyección indirecta, por lo que el análisis

aquí presentado se centra en la adaptación de inyectores comerciales, como los provistos por Tomasetto Achille, que dosifiquen GNV en el múltiple de admisión; diseñados para gas natural licuado (GLP) o CNG con inyección secuencial, tienen un tamaño de boquilla sugerido entre 1.25 hasta 3mm para una potencia específica desde 12 hasta 48 kW/cilindro y trabajan entre 0.5 y 2.5 bar con una presión máxima de 7 bar [6]

Según [7] para pasar del funcionamiento de un motor de gasolina a gas natural es necesario, realizar los siguientes cambios para el correcto funcionamiento del motor.

1. Un dispositivo de mezclado aire-Gas que provea una mezcla homogénea entre estos dos normalmente se hace uso de un tubo de Venturi que funciona con la diferencia de velocidades a ambos lados y así provee la cantidad correcta de combustible, el cual reemplazara al carburador.
2. Una relación de compresión correcta para llevar a cabo el proceso de combustión, ya que para el caso de la gasolina normalmente llega hasta 9 o 10 y para el uso de gas natural se requiere una relación de compresión de 10 hasta 12. Esto se logra con el mecanizado de la culata
3. Almacenamiento del combustible se realiza en un nuevo cilindro apto para contener el gas o puede ser almacenado en forma líquida y luego ser llevado a un evaporador para luego pasar al tubo Venturi y así llegar a la cámara de combustión.

Westport realiza la puesta en escena de la inyección mixta a través de inyectores diésel-GNV evidenciados en sus patentes más recientes US2016/0108874 A1, WO 2014/186893 A1 y WO 2014/186892. Estos inyectores pueden ser instalados en los orificios de la culata sin realizar modificaciones al motor, cuentan con un par de válvulas de aguja para la dosificación de cada combustible y poseen con un acumulador volumétrico, con el cual no se necesita un riel común exterior. Aquí, se utiliza cerca del 5% de gasóleo utilizado normalmente para propagar la llama durante la combustión y están en capacidad de brindar cerca de 24 bares de presión media efectiva a eficiencias similares de diésel [8]. Dicho concepto es el que se pretende extrapolar en esta investigación estableciendo la geometría y los parámetros fundamentales que caracterizan el funcionamiento de un dispositivo de esta índole.

Este inyector es el proporcionado por Westport. Se decide el cambio de presión del inyector al igual de que el cambio de presión de la línea de gas natural. Esto se debe a que en un motor diésel la presión de la cámara de combustión es muchas veces mayor a la presión alcanzada en el motor ciclo Otto. Por otra parte la inyección se realiza de forma indirecta y no directa como en el motor diésel. El siguiente esquema muestra como puede ser la inyección en la válvula de mariposa.

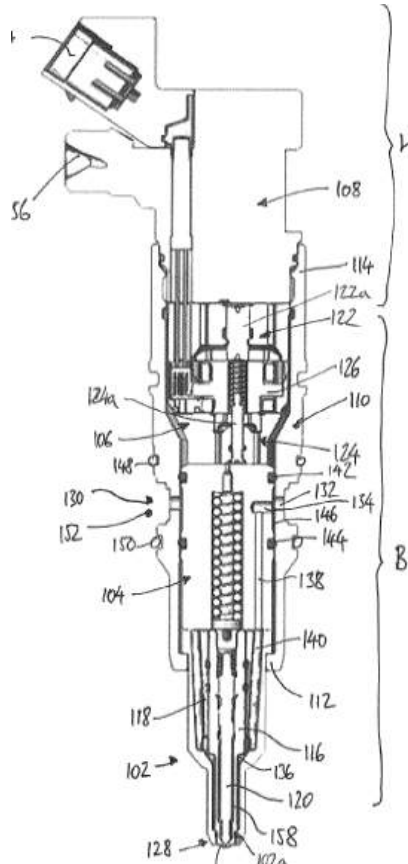


Figura 1. Inyector mixto Westport, tomado de patente US2016/0108874 A1.

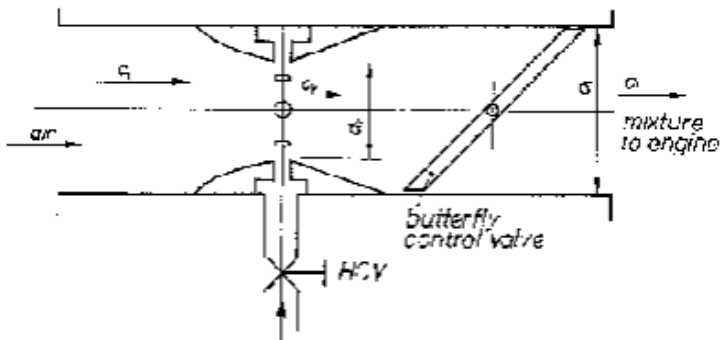


Figura 2. Posición de inyector en válvula mariposa, tomado de Engines for Biogas [7].

### 3. Propuesta de diseño conceptual

Para el diseño conceptual del sistema de inyección mixto, se utiliza el modelo de un motor de encendido por chispa que funcione con gas natural y con gasolina. El motor fue probado usando únicamente gas natural o gasolina con el fin de obtener el rango de potencia en donde la mezcla gasolina/ gas natural podría moverse. El estudio fue realizado por Omid Samimi Abianeh y Mojtaba Mirsalim [4]. Las curvas obtenidas fueron potencia, consumo específico, eficiencia volumétrica y Par en condiciones ISO. A continuación se muestra las especificaciones del motor utilizado y las gráficas de los datos obtenidos.

Tabla 1. Especificaciones del motor.

Numero de cilindros	4
Bore X stroke (mm)	78 X 72
Displacement (cm <sup>3</sup> )	1376
Relación de compresión	10.8
IVO/IVC 1mlift	7°ATDC/197°ATDC intake
Cámara de combustión	pent roof

Los datos obtenidos utilizando como combustible gasolina y gas natural son los siguientes:

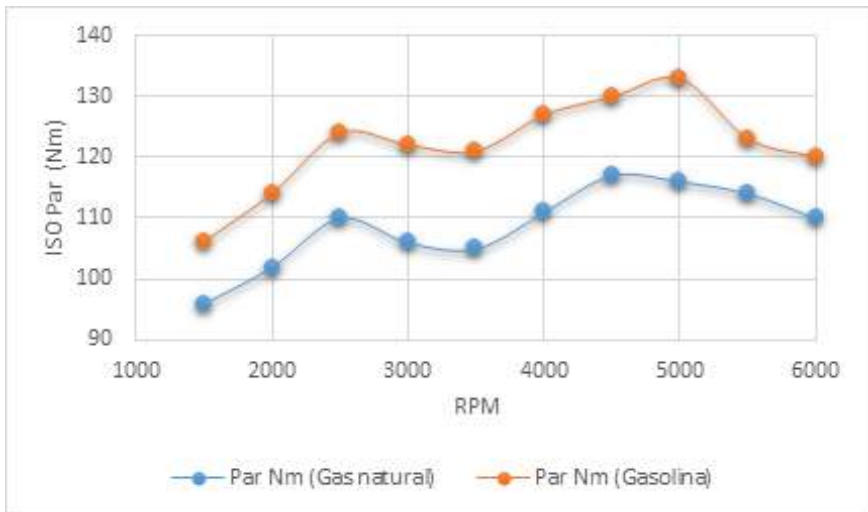


Figura 3. Curva de par (N.m) vs Velocidad del motor (rpm) [4]

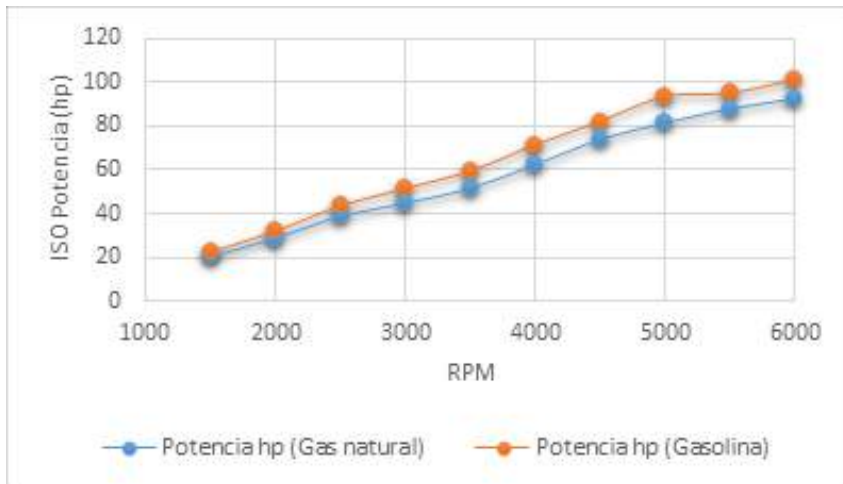


Figura 4. Curva de Potencia (Hp) vs Velocidad del motor [4].

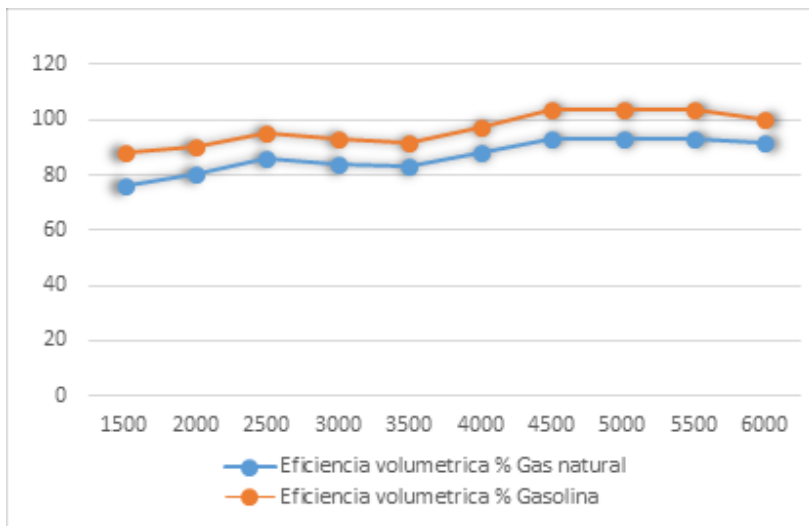


Figura 5. Consumo específico de combustible [4].

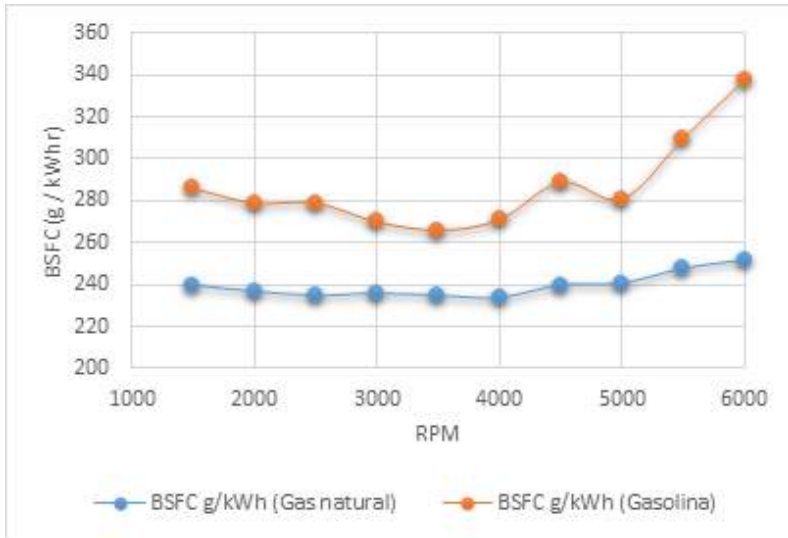


Figura 6. Eficiencia volumétrica del motor a diferentes regimenes de giro (rpm) [4].

Tabla 2. Propiedades de combustible utilizado.

Propiedades	Gas natural	Gasolina
Poder calorifico inferior ( MJ/kg)	51.25	45.55
Densidad ( kg/m3)	0.739	749.1
Eficiencia volumétrica	0.92	1
Octanaje	110	94.7

Teniendo en cuenta estos datos obtenidos, podemos diseñar la estrategia de control para un motor que a diferentes requerimientos utilice gas natural, gasolina o una mezcla de los dos.

La ventaja del uso del gas natural es la menor contaminación, y aumento de la eficiencia del motor a bajo régimen de carga. Incluso a altas revoluciones la eficiencia del motor utilizando gas natural es mayor aunque la eficiencia volumétrica sea menor. A continuación se muestra la variación de la eficiencia del motor según el régimen de giro y el combustible utilizado.

Tabla 3. Cambio de eficiencia motor según régimen y combustible utilizado.

Velocidad del motor RPM	Eficiencia motor usando gas natural	Eficiencia motor usando gasolina
1500	29%	28%
2000	30%	28%
2500	30%	28%
3000	30%	29%
3500	30%	30%
4000	30%	29%
4500	29%	27%
5000	29%	28%
5500	28%	25%
6000	28%	23%

### 5. Estrategia de control

Para determinar el momento donde se debe comenzar a inyectar gasolina se necesita medir una serie de variables. Actualmente los motores de combustión interna utilizan el siguiente esquema de control:

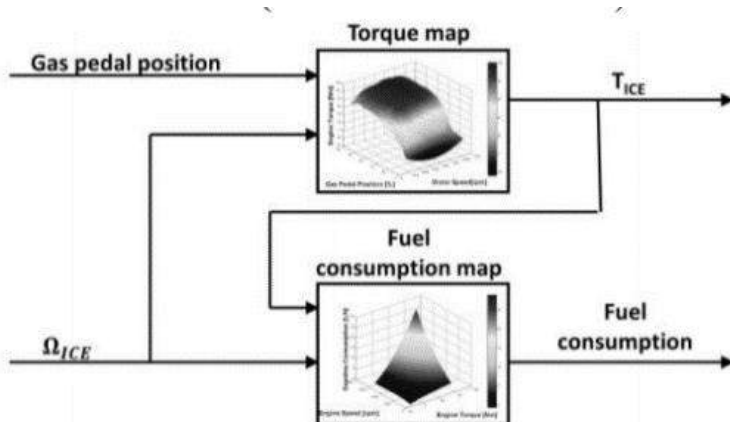


Figura 7. Esquema de control de un motor de combustión interna Fuente especificada no válida.

El mapa de par motor tiene como entrada el sensor de posición de la mariposa o la posición del acelerador y la velocidad del motor. Dado el sistema de control mostrado en la figura 7 se propone que el motor cuando pierda par inyecte gasolina hasta suplir la demanda de par requerido. El detalle de esta estrategia de control está fuera del alcance de este artículo.



## 6. Análisis tasa de quemado

Dado que ahora tendremos un combustible diferente (mezcla de gasolina y gas natural) esto hará que el ángulo de máxima presión cambie así como el tiempo de combustión. En los estudios realizados sobre este motor, el ángulo de máxima presión en el gas natural es casi constante en todas las revoluciones permaneciendo alrededor de los  $15^\circ$  después del punto muerto superior. En la gasolina el ángulo varía desde  $30^\circ$  a  $20^\circ$  después del punto muerto superior. Este ángulo es medido en el cigüeñal.

La tasa de quemado cambia en función de las eficiencias, los porcentajes de cada compuesto y la velocidad de giro. La cantidad de gasolina hace menos estable este ángulo a diferente régimen. Como ejemplo se muestra las curvas de tasa de quemado del motor usando gas natural, gasolina y una mezcla 50-50 en masa a 4500 rpm y a WOT. Se usó las ecuaciones de la ley de Wiebe.

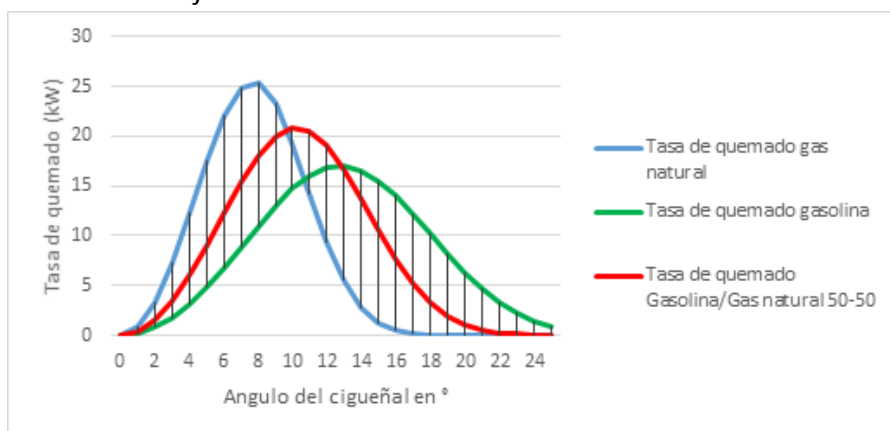


Figura 8. Tasa de quemado gas natural, gasolina y mezcla de gas natural-gasolina 50-50 a WOT a 4500 rpm.

La velocidad del inicio de la combustión está asociado con la concentración de metano y etano, donde los límites de temperatura de autoencendido de la mezcla crecen, ya que los enlaces primarios H-C tienen energías mayores, de entre 3 y 4 kcal/mol, que los enlaces presentes en los hidrocarburos alifáticos más grandes [9]. En consecuencia, la abstracción del hidrógeno desde el gas se vuelve más difícil elevando la temperatura dentro de la cámara de combustión, situación que alude al mayor desgaste de los componentes aledaños al recinto.

## 7. Mapa de par y consumo de combustible para el gas natural

De lo anterior y los datos tomados del motor se puede inferir el mapa de par y el consumo de combustible para el gas natural con base en el mapa que tiene el fabricante en gasolina. En promedio el par generado por el mismo motor a la misma condiciones pero usando gas natural es un 11% menor que al usar gasolina, mientras que para el consumo se registra una disminución de poco más de 16% en promedio.

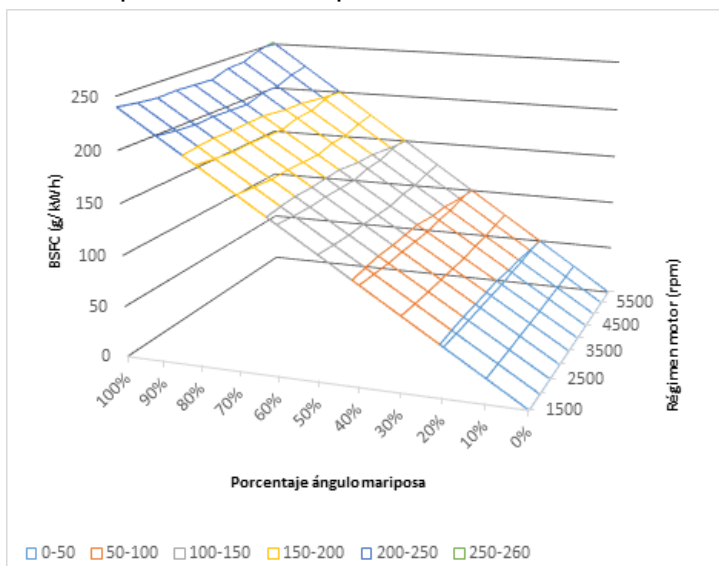


Figura 9. Mapa de consumo específico gas natural.

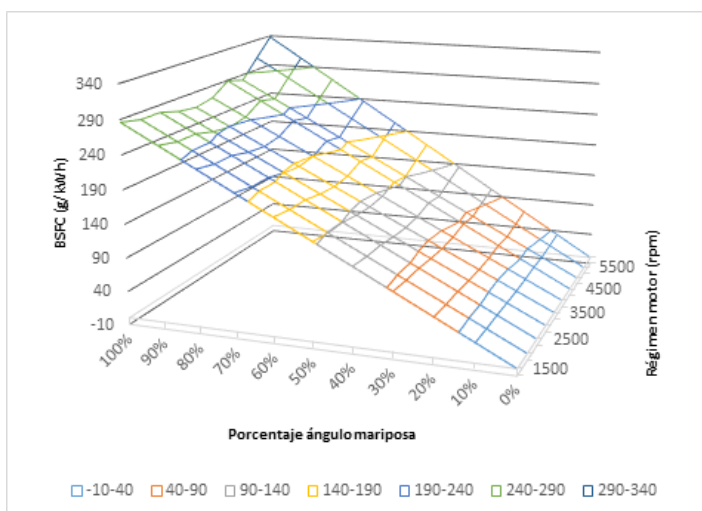


Figura 10. Mapa consumo específico gasolina.

En la figura 9 y 10 podemos observar el consumo específico del motor estudiado, para un motor en general teniendo el mapa de par y consumo de combustible se puede obtener usando estos simples porcentajes. Aunque este enfoque es muy arbitrario es una mejor aproximación en caso de no poder caracterizar el motor. Para puntos intermedios entre el mapa de par y consumo de gas natural y gasolina se utiliza regresiones lineales o interpolaciones. Esto es aplicable en caso de una mezcla de combustible.

## 8. Conclusiones

El uso de un combustible diferente a la gasolina sin hacer una conversión completa al motor trae retos. Una sugerencia es mejorar la dureza de las válvulas para soportar el desgaste que se obtiene al usar un combustible gaseoso en vez de uno líquido. Esto se debe a la película que los combustibles líquidos crean y contribuye a la lubricación. Podemos observar que típicamente la potencia obtenida con el gas natural es menor que la obtenida con gasolina. Esto es resultado de la caída en poder calorífico y eficiencia volumétrica. Otro punto importante es la liberación de calor, el gas natural libera mucho calor en un corto espacio de tiempo comparado con la gasolina que lo hace de manera más controlada. Un segundo efecto en esto es tener una presión media efectiva más elevada y una menor temperatura en la cámara de combustión usando gasolina. Observando la curva de Wiebe mostrada se espera que en los momentos de exigencia de alto par se disminuya la temperatura y aumente la lubricación disminuyendo el desgaste. Como contraste, cuando el motor esté a baja carga será más eficiente que un motor de gasolina contribuyendo al medio ambiente dado que las temperaturas de escapes son menores y el aprovechamiento del calor aumenta. Se sabe que el flujo de contaminante es menor por tener menos carbono en su molécula en el caso del gas natural. Cambios constructivos son necesarios por efectos en la temperatura de las paredes. Mejoras a los pistones, cabeza de cilindro, válvulas y los asientos de las válvulas, son necesarias. Además, se debe añadir un pasaje de lubricación en el asiento de la válvula o cambiando el material del asiento. La combustión con gas natural es más prolongada que con gasolina pero la liberación del calor dura menos tiempo que con la gasolina.

El uso de inyectores de tipo dual es más preciso que el uso de tubos venturi utilizados en los sistemas no electrónicos y de conversión completa. Manteniendo la misma relación de compresión la potencia alcanzada por el gas natural siempre es menor, esto es ideal cuando los autos están en ruta plana o están en la ciudad donde los regímenes son bajos y se tienen tiempos muy largos detenidos en el tráfico. Esta propuesta se presenta como una alternativa más como un híbrido de combustibles alcanzando una optimización de los recursos.

## 9. Referencias

- [1] gasolineraslagaviota, [En línea]. Available: <http://www.gasolineraslagaviota.com/wp-content/uploads/2012/11/Vehicular.pdf>.
- [2] R. PAPAGIANNAKIS, «Theoretical study of the effects of pilot fuel quantity and its injection timing on the performance and emissions of a dual diesel engine,» Energy Conversion and Management, vol. 48, n° 11, pp. 2651-2961, 2007.

- [3] A. Paykani, «Research and development of natural- gas fueled engines in Iran,» *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 26, pp. 805- 821, 2013.
- [4] O. Samimi y M. Mirsalim, «Combustion development of a Bifuel engine,» *International journal of automotive technology* , vol. 10, n° 1, pp. 17-25, 2009.
- [5] T.korakianitis, A. Namasivayam y J. C. R, «Natural gas fueled spark ignition (SI) and compression- ignition (CI) engine performance and emissions,» *Progress in energy and combustion science* , vol. 37, pp. 89- 112, 2011.
- [6] Tomasetto Achille, «Injector rail for LPG and CNG sequential systems, model IT01 Plus standard,» Tomasetto Achille, Vicenza, 2013.
- [7] K. Von Mitzlaff, *Engines for biogas*, Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit , 1988.
- [8] Westport, «Westport,» [En línea]. Available: <http://www.westport.com/is/core-technologies/fuel-injector>.
- [9] C. LAW, *Combustion Physics*, Cambridge University Press, 2010.