

## **Factor de equivalencia en la sustitución de gasolina por gas natural comprimido para uso vehicular**

*John R. Agudelo Santamaría\** y *Andrés A. Amell Arrieta\**  
(Recibido el 11 de mayo de 2001)

### **Resumen**

En este artículo se presenta un balance completo de la energía en el vehículo cuando éste funciona en modo bicomcombustible, gasolina-gas natural, para determinar el factor de equivalencia energético entre ambos combustibles ( $\text{m}^3$  GNC/gal de gasolina). En el modelo se han incluido el motor, la transmisión y el efecto de sobrepeso de los cilindros. Los resultados muestran que el gas natural de la Guajira, no obstante ser el más puro de Colombia, tiene una relación 14,5% menos favorable que el gas natural de Cusiana y 5,6% menos favorable que el gas natural de Apiay. Esto deja de manifiesto la necesidad de estudiar la intercambialidad de los diferentes gases naturales colombianos.

----- *Palabras clave:* gas natural vehicular, equivalencia energética y motor de encendido por chispa.

## **Energy equivalence factor in gasoline to compressed vehicle natural gas substitution**

### **Abstract**

In this paper, the authors show a model based in a vehicle energy balance used to obtain the ratio of energy equivalence of natural gas and petrol used as fuels in the vehicle. The model includes the engine, transmission and natural gas cylinders effects. The model has been applied to different colombian natural gases, it shows that Guajira natural gas has 14,5% lower ratio than Cusiana natural gas and 5,6% lower ratio than Apiay natural gas, these results shows a need in the study of colombian natural gases interchangibility.

----- *Key words:* natural gas for vehicles, energy equivalence and spark ignition engine.

---

\* Grupo Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. [radian@udea.edu.co](mailto:radian@udea.edu.co).

## Introducción

En el contexto de la política energética colombiana, la aplicación del gas natural comprimido, GNC, para sustituir gasolina en los grandes centros urbanos, desempeña un rol importante en estos momentos. Ello se traduce en ventajas económicas y ambientales para el país.

Uno de los aspectos determinantes en el momento de realizar estimaciones económicas y financieras para la sustitución de gasolina por gas natural comprimido, GNC, es el volumen de gas necesario para sustituir un galón de gasolina. Si bien ha sido práctica común en nuestro medio asumir un valor indicativo, esta práctica no tiene en cuenta las incertidumbres que generan las variables asociadas a la composición química del gas, al rendimiento de la conversión de combustible del motor y al sobrepeso de los cilindros en la conversión.

En este artículo, bajo algunos supuestos que se exponen, se desarrolla un modelo teórico para estimar con mayor exactitud esa relación y se aplica a tres de los gases naturales distribuidos en Colombia.

## Modelo

### Balance energético

En el sistema motor-vehículo, la conversión de energía que se obtiene a expensas de la energía química almacenada en un combustible líquido o gaseoso se emplea al generar energía mecánica para la tracción. Resulta conveniente, entonces, al momento de realizar el balance de energía, considerar dos subsistemas: el motor y el vehículo propiamente dicho.

### El motor

La energía primaria que entra al motor está definida por la cantidad de combustible consumido y su poder calorífico superior. Sólo una fracción de esa energía se convierte en trabajo útil para la tracción en el eje del motor (véase figura 1), debido a que se presentan las siguientes pérdidas:

- El calor latente de vaporización del agua, ya que al quemarse un hidrocarburo se forma vapor de agua cuya energía no se puede recuperar en el motor.
- El calor sensible de los gases a alta temperatura que salen por el sistema de escape. Es energía que no se puede aprovechar completamente y sale, por el tubo de escape, con el flujo de gases.
- Las pérdidas de energía por combustión incompleta, ya que durante la combustión no se logra quemar completamente el combustible; ello da lugar a la formación de monóxido de carbono, CO, e hidrocarburos sin quemar, HC.
- El calor transferido al agua de refrigeración, ya que es necesario retirar calor del cilindro con el fin de proteger la duración y estabilidad mecánica de los componentes del motor. Este calor podría convertirse en trabajo útil en el eje, pero los materiales no soportarían la fatiga térmica [1].
- Las pérdidas por convección y radiación que ocurren en un sistema térmico que funciona a elevada temperatura, como es el caso del motor.

Teniendo en cuenta las pérdidas de energía antes mencionadas, el rendimiento de conversión de combustible  $\eta_m$  en energía útil de un motor, queda definido por:

$$\eta_m = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{térmica}}} = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{térmica}}} \quad (1)$$

Donde la energía térmica,  $E_t$ , está definida por el producto entre la cantidad de combustible (volumétrico o másico) que consume el motor y su poder calorífico inferior,  $PCI$ , (volumétrico o másico respectivamente):

$$E_{\text{térmica}} = Q_{\text{combustible}} \cdot PCI_{\text{volumétrico}} = m_{\text{combustible}} \cdot PCI_{\text{másico}} \quad (2)$$

Donde  $Q_{combustible}$  es el volumen y  $m$  la masa de combustible consumido, respectivamente, y la potencia térmica sería la  $E_t$  por unidad de tiempo.

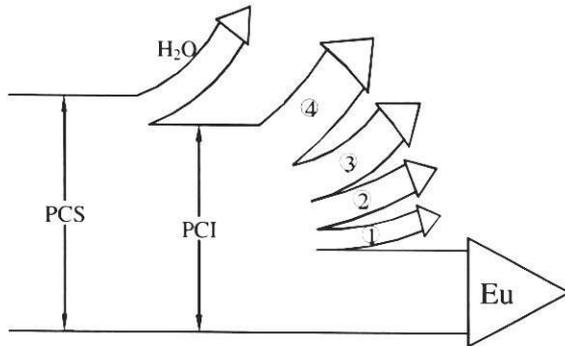


Figura 1 Balance de energía en un motor

### El vehículo

La energía útil, disponible en el eje del motor, se emplea para realizar la tracción del vehículo, lo que implica:

- Arrastrar el peso del vehículo, lo cual es función de la masa del vehículo y de la pendiente de la carretera (véase figura 2).
- Vencer pérdidas por fricción de rodadura entre las llantas y la superficie de la carretera. La fuerza de fricción depende del peso del vehículo y de la inclinación o pendiente de la carretera.
- Pérdidas por resistencia aerodinámica, las cuales son función directa de la velocidad del vehículo, de su área frontal y de la densidad del aire.
- La fuerza de aceleración que aparece, por la segunda ley de Newton, cuando ocurren cambios de velocidad en la dirección del movimiento del vehículo.

En la figura 2  $W$  es el peso del vehículo,  $N$  la normal a la superficie,  $\alpha$  el grado de inclinación de la carretera,  $F_T$  la fuerza de tracción,  $F_R$  la fuerza de fricción por rodadura y  $F_V$  la fuerza que opone el viento o resistencia aerodinámica.

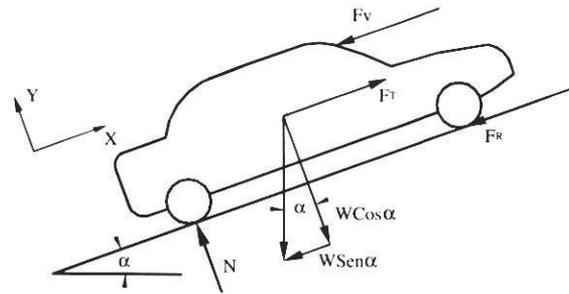


Figura 2 Diagrama de fuerzas en el vehículo

La fuerza de tracción equivale a:

$$F_T = F_V + F_R + W \text{sen} \alpha + ma \quad (3)$$

### Balance global motor-vehículo

En la figura 3 se muestra la secuencia de conversión de energía en el sistema motor-vehículo. Se observa que de la potencia térmica que entra al motor parte se convierte en potencia útil en el eje del motor y parte de ésta, a su vez, se utiliza para vencer las resistencias anteriormente descritas en el vehículo y producir, finalmente, el efecto de tracción.

En resumen, los rendimientos de conversión de energía en el motor, en el vehículo y en el sistema global quedan definidos en la tabla 1.

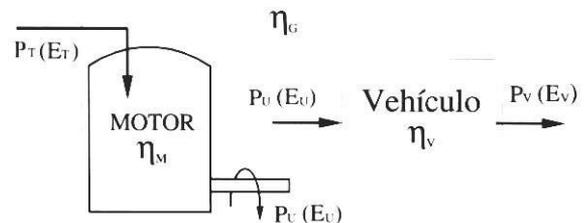


Figura 3 Balance global de energía en el sistema motor-vehículo

**Tabla 1** Rendimientos de conversión de energía en el motor, en el vehículo y en el sistema global

| <i>Rendimiento del motor</i>                          | <i>Rendimiento del vehículo</i>  | <i>Rendimiento global</i>   |
|---|--|---|
| $\eta_m = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{térmica}}}$ | $\eta_{\text{vehículo}} = \frac{E_{\text{vehículo}}}{E_{\text{útil}}}$ | $\eta_{\text{global}} = \frac{E_{\text{vehículo}}}{E_{\text{térmica}}}$ |

Donde  $\eta$  en todos los casos es el rendimiento,  $E$  la energía y  $P$  la potencia.

**Relación entre volúmenes consumidos, para igual energía equivalente, en la conversión gasolina-gas natural comprimido**

Para el desarrollo del modelo se supone:

1. Que el peso del cilindro incrementa la fuerza de tracción en un 8%, aproximadamente y (para vehículos pequeños representa 80 kilos entre los 1.000 kg que puede pesar el vehículo, y para vehículos grandes puede representar unos 400 kg entre los 5.000 kg del vehículo).
2. La distancia recorrida por el vehículo será la misma con ambos combustibles.
3. Se considera velocidad constante (sin aceleración) para efectos de comparación.
4. La resistencia aerodinámica, comparada con las fuerzas de fricción y las fuerzas inerciales se considera despreciable, ya que su mayor efecto se observa a partir de velocidades superiores a los 100 km/h [2], situación poco habitual en nuestras ciudades.

Con los supuestos 1 y 4 se puede deducir que:

$$E_{\text{tracciónGNC}} = 1,08 \cdot E_{\text{tracciónGasolina}} \quad (4)$$

Además, los rendimientos globales con GNC y con gasolina son respectivamente:

$$\eta_{\text{globalGNC}} = \frac{E_{\text{vehículoGNC}}}{E_{\text{térmicaGNC}}} \quad \text{y} \quad \eta_{\text{globalGasolina}} = \frac{E_{\text{vehículoGasolina}}}{E_{\text{térmicaGasolina}}} \quad (5)$$

Si se tienen en cuenta las expresiones (4) y (5) se encuentra que la relación entre el volumen de gas natural ( $V_{GNC}$ ) y el de la gasolina ( $V_{gasolina}$ ) para la misma equivalencia energética sería:

$$\frac{V_{GNC}}{V_{gasolina}} = 1,08 \cdot \frac{\eta_{\text{global gasolina}}}{\eta_{\text{global GNC}}} \cdot \frac{PCI_{gasolina}}{PCI_{GNC}} \quad (6)$$

Como se ha demostrado, el rendimiento global en ambos casos depende del rendimiento de la conversión de combustible en el motor. Según Mitzlaff [3], el motor gana en torno a un 10% de rendimiento cuando opera con GNC. Esto se debe a la homogeneidad en la formación de la mezcla y a la sencillez de la estructura molecular del metano.

Además, si se tiene en cuenta la corrección por el sobrepeso establecida cuando se convierte el vehículo de gasolina a GNC, puede considerarse, con buena aproximación que la eficiencia global es función únicamente de la eficiencia del motor. Se puede definir el factor  $\Omega$  como aquél que considera los efectos antes mencionados, así:

$$\Omega = \text{factor peso cilindros} \times \text{relación eficiencias motor} = 1,08 \times 0,9 = 0,972$$

Al llevar este factor a la ecuación de relación entre volúmenes, resulta:

$$\frac{V_{GNC}}{V_{gasolina}} = \Omega \cdot \frac{PCI_{gasolina}}{PCI_{GNC}} \quad (7)$$

En esta ecuación puede observarse que la relación entre volúmenes depende de:

1. La relación de los rendimientos del motor de gas natural y de gasolina.
2. El sobrepeso que implican los cilindros de gas natural.
3. La relación de poderes caloríficos.

### Ejemplo de aplicación

En la tabla 2 se muestran los factores de equivalencia,  $\Omega$ , que se obtienen con diferentes gases naturales de Colombia.

Los datos que se muestran en la tabla 2 se obtienen al suponer que el PCI de la gasolina permanece invariable y con un valor de 122 MJ/galón.

Dichos resultados revelan que para sustituir 1 galón de gasolina, que tiene un PCI de 122 MJ/galón, se requieren 3,34 m<sup>3</sup><sub>st</sub> de gas de La Guajira, 3,15 m<sup>3</sup><sub>st</sub> de gas de Apiay y 2,86 m<sup>3</sup><sub>st</sub> de gas de Cusiana.

### Conclusiones

1. La determinación de energía equivalente entre GNC y gasolina depende de los siguientes factores:
  - La relación entre poderes caloríficos de esos dos combustibles.
  - La relación entre los rendimientos del motor al operar con uno u otro combustible.
  - El diferencial de peso del vehículo cuando trabaje con uno u otro combustible.
2. La composición química de los gases naturales distribuidos en Colombia es determinante al momento de encontrar el volumen de GNC necesario para sustituir un galón de gasolina.
3. La aplicación del modelo a tres diferentes gases naturales colombianos muestra que se obtendría un rendimiento 14,37% mayor (más kilómetros recorridos con el mismo volumen de combustible) con el gas natural de Cusiana que con el gas natural de La Guajira y un 9,2% más rendimiento que con el gas natural de Apiay; esto explica por qué un gran número de conductores que tienen vehículos convertidos a gas natural en la ciudad de Bogotá, buscan abastecerse preferiblemente en las estaciones del sur, justo porque allí se suministra gas natural del sur del país.
4. Los resultados obtenidos con este modelo muestran la importancia de realizar un estudio más detallado en cuanto a la intercambiabilidad

**Tabla 2** Factores de equivalencia

| <b>Campo</b> | <b>PCI (MJ/m<sup>3</sup><sub>st</sub>) [4]</b> | <b>Relación <math>V_{GNC} / V_{gasolina}</math></b> | <b>Variación (%)</b> |
|--------------|--|---|----------------------|
| Apiay        | 37,63  | 3,15  | 9,20                 |
| Guajira      | 35,43  | 3,34  | 14,37                |
| Cusiana      | 41,42  | 2,86  | 0,00                 |

de los diferentes gases colombianos empleados para automoción. No está clara, aún, la influencia sobre el rendimiento de conversión de combustible y sobre el desempeño mecánico y ambiental del motor cuando se emplea un gas de pozo libre o de pozo asociado. Si bien es cierto que el gas natural de Cusiana tiene mayor poder calorífico por unidad de volumen que los demás gases naturales trabajados en este artículo, debe considerarse también que aquél tiene mayor contenido de inertes, lo cual encarece el proceso de purificación del gas, caso contrario al del gas natural de La Guajira, cuyo contenido de metano oscila entre 97 y 98%, ubicándolo entre los más puros del mundo.

5. La determinación del factor de equivalencia energética cobra más importancia a medida que el consumo de gas natural es mayor. Si se toma, como ejemplo, una gran flota de vehículos operando en modo bicomcombustible, sus proyecciones para la recuperación de la inversión en los sistemas de conversión se pueden alargar más a medida que sea mayor el factor  $\Omega$ .
6. La autonomía del vehículo incrementa en relación directa con la capacidad de almacenar

más energía (implicaría una disminución en el factor de equivalencia energética), por eso se observa una fuerte tendencia hacia el uso del gas natural licuado en lugar del comprimido, con los sobrecostos que conlleva su licuefacción.

7. El modelo puede ampliarse a otros combustibles gaseosos, siempre y cuando se hagan las modificaciones pertinentes sobre: el rendimiento del motor, el peso de los cilindros y el poder calorífico volumétrico inferior. Puede conservarse el rendimiento obtenido para el vehículo.

### Referencias bibliográficas

1. Heywood, John. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Nueva York. McGraw-Hill. 1988. p. 674.
2. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía de España y Universidad Politécnica de Madrid. *La conducción al menor coste*. España. 1998. pp. 24-26.
3. Von Mitzlaff, Klaus. *Engines for Biogas, theory, modifications, economic operation*, GATE, GTZ. Wiesbaden. Germany, 1988. p. 58.
4. "Características del Gas Natural Distribuido en Colombia". En: *ACOGAS*. No. 14. Santafé de Bogotá, 1996.