

ESTUDIO TEÓRICO COMPARATIVO DE CARACTERÍSTICAS TERMODINÁMICAS DEL DESEMPEÑO DE UN MOTOR DE COMBUSTION OPERANDO CON GASOLINA Y CON GAS NATURAL

Comparative theoretical study of thermodynamics characteristics of performance of a combustion engine operating with gasoline and with natural gas.

RESUMEN

En este artículo se presenta un estudio comparativo de algunas características y parámetros de desempeño de un motor de combustión interna operando con gasolina y con gas natural. Se implementa el software *Stanjan*[®] para la determinación de la composición de productos de combustión y el cálculo de las temperaturas de llama. Para el cálculo de otros parámetros de desempeño, como la presión media efectiva indicada, se lleva a cabo la simulación de un motor, mediante el software *Engine Simulation Program*[®]. Se establece el análisis e interpretación de los resultados y se plantean conclusiones en relación con las ventajas y desventajas de la conversión de un motor de gasolina a gas natural, desde la perspectiva termodinámica.

PALABRAS CLAVES: Combustión, Gasolina, Gas Natural, Motores

ABSTRACT

In this article a comparative study of some performance characteristics and parameters of an internal combustion engine operating with gasoline and with natural gas is presented. The software of calculation of chemical equilibrium Stanjan[®], for the determination of the composition of combustion products and the calculation of the flame temperatures, is implemented. For the calculation of other performance parameters, like the indicated mean effective pressure, the simulation of a motor is carried out by means of software Engine Simulation Program[®]. The analysis and interpretation of the results are established and conclusions in relation to the advantages and disadvantages of the conversion of a gasoline motor to natural gas, are planted from the thermodynamic perspective.

KEYWORDS: Combustion, Engines, Gasoline, Natural Gas.

YAMID ALBERTO CARRANZA SÁNCHEZ

Ingeniero Mecánico
Magíster en Ingeniería Mecánica
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
yamidc@utp.edu.co

CARLOS ALBERTO ROMERO PIEDRAHITA

Ingeniero Mecánico
Magíster en Ingeniería Mecánica
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
cromero@utp.edu.co

1. INTRODUCCION

En el ámbito internacional, el gas natural ha constituido una importante opción como fuente energética y sustituto de combustibles convencionales. En Colombia, a partir de la década de los 90's el gas natural ha venido siendo promovido e implementado masivamente como alternativa energética para equipos de conversión energética y, en relación con los motores de combustión interna para automóviles, el empleo gas natural vehicular ha venido siendo promovido e implementado con mayor fuerza en los últimos años mediante programas institucionales y gubernamentales, con el propósito de diversificar la canasta energética ofrecida al sector transporte.

Es prioridad, en el desempeño de los motores modernos, su calidad ambiental dejando, en un segundo plano, la potencia. Lo anterior de la mano de una política de ahorro y uso racional de la energía, asociada al desarrollo sostenible. Ambientalmente, el sector transporte es un gran contribuyente de gases nocivos, con efectos negativos como:

- La alteración de la atmósfera y las precipitaciones.
- Destrucción de la vegetación.

- Deterioro de los materiales y los suelos.
- Incremento de las enfermedades y la mortalidad de los humanos

El trabajo presentado constituye un estudio recapitulativo acerca de algunas ventajas y desventajas de la implementación del gas natural en motores de gasolina, a través de la consideración de algunos aspectos ambientales y tecnológicos y, mediante la implementación de software especializado en el tema de las reacciones de combustión con disociación de especies y el desempeño termodinámico de los motores de combustión interna alternativos. A partir de criterios termodinámicos se valoran las comparaciones del gas natural como sustituto de la gasolina en motores de combustión interna reciprocantes.

2. EL GAS NATURAL COMO COMBUSTIBLE PARA MOTORES DE COMBUSTION INTERNA [1] [2] [3]

El gas natural es una mezcla de componentes, principalmente de metano (60-98%) y pequeñas cantidades de otros hidrocarburos. El gas natural vehicular es comprimido (GNVC, Gas Natural

Comprimido) y se almacena a presiones de 16 a 25 MPa. El gas natural vehicular, cuyo principal componente es el metano, es bastante nocivo ambientalmente si ocurren fugas, estas se pueden producir en las estaciones de compresión y llenado, por ejemplo. El metano tiene un serio impacto negativo ambiental debido a que es contribuyente del efecto invernadero y, por ende, del calentamiento global. Entre las ventajas del gas natural se pueden mencionar:

- Número de octano alrededor de 120, que lo hace buen combustible para motores de ignición por chispa, sumado a esto una alta velocidad de llama.
- Bajas emisiones. Menos aldehídos que con metanol.
- Es abundante en el mundo.

Como desventajas se pueden mencionar:

- Baja eficiencia volumétrica debido a que es gaseoso.
- Necesidad de grandes tanques de almacenamiento con presurización.
- Las propiedades del combustible son inconsistentes.
- El proceso de llenado es lento.
- Los componentes como pistones y válvulas, deberían estar fabricados en materiales especiales debido al carácter corrosivo de este combustible.
- Lubricantes especiales también deben emplearse como consecuencia de la acidez del combustible.

3. PRODUCTOS DE COMBUSTION GENERADOS CON GASOLINA Y CON GAS NATURAL [4] [5] [6] [7]

La determinación de los productos de la combustión se realiza abordando un procedimiento de cálculo basado en el equilibrio químico, no teniendo en cuenta la cinética química del proceso. Para los propósitos comparativos de este estudio se considera suficiente esta metodología de análisis. El análisis de la compresión es realizado con un proceso de compresión politrópica desde el punto muerto inferior *p_{mi}* hasta el punto muerto superior *p_{ms}* y, para la combustión, se considera un proceso de liberación de calor a volumen constante, tal como se presenta en la figura 1. Las condiciones al inicio de la compresión se consideran: presión $P_1=0,5 \text{ atm}$ y temperatura de $T_1=298 \text{ K}$. La relación de compresión del motor se toma $\varepsilon=8$ y el exponente politrópico para la compresión es $n=1,3$. Por lo tanto, la temperatura y la presión al final de la compresión son calculadas mediante relaciones isoentrópicas [4]:

$$T_2 = T_1 \varepsilon^{(n-1)} \quad P_2 = P_1 \varepsilon^n \quad (1)$$

Las condiciones al final de la compresión calculadas mediante (1) son: $T_2=556 \text{ K}$ y $P_2=7,46 \text{ atm}$. Las condiciones al final del proceso de compresión son tomadas como las condiciones iniciales del proceso de combustión, estado termodinámico 2 de la figura 1.

En el proceso de combustión estequiométrica, los productos de combustión son ideales (CO_2 , H_2O y N_2) suponiendo que el carbono contenido en el combustible se oxida completamente formando dióxido de carbono CO_2 , que el hidrógeno se oxida formando agua H_2O y que el nitrógeno del aire N_2 permanece invariable.

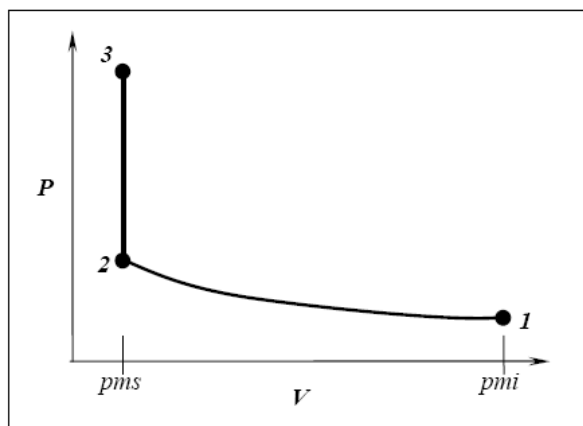
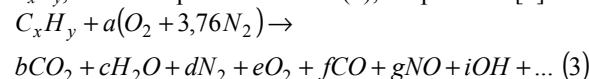


Figura 1. Proceso de compresión politrópica y de combustión isocórica.

En relación con el tipo de hidrocarburo C_xH_y , se analiza la gasolina asumiéndola como isoctano C_8H_{18} y el gas natural vehicular GNV se considera como metano CH_4 , el cual es su principal constituyente. La cantidad de aire que reacciona con el combustible, define si la mezcla es estequiométrica, pobre o rica. Para la combustión estequiométrica, la relación masa de aire a masa de combustible, se calcula mediante [4]:

$$\left[\frac{m_{\text{aire}}}{m_{\text{comb}}} \right]_{\text{est}} = 4,76 \cdot a_{\text{est}} \cdot \frac{PM_{\text{aire}}}{PM_{\text{comb}}} \quad (2)$$

Donde: m_{aire} es la masa de aire, m_{comb} es la masa de combustible, PM_{aire} es el peso molecular del aire ($\sim 29 \text{ kg/kmol}$) y PM_{comb} es el peso molecular del combustible. El término a_{est} está definido como $a_{\text{est}} = x+y/4$, siendo x y y la cantidad de carbonos e hidrógenos del hidrocarburo. Para un proceso de combustión ideal, la relación aire-combustible para el C_8H_{18} es $15 \text{ kg}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{comb}}$ y para el CH_4 es $17 \text{ kg}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{comb}}$. Debido a que el proceso de combustión en un motor se realiza a temperaturas altas, los productos no son la mezcla de productos ideales. Por lo tanto, en este estudio se consideran los efectos de la disociación de especies químicas, de manera que la reacción química de combustión para un hidrocarburo C_xH_y , está dada por la ecuación (3), adaptada de [5]:



En este caso, a representa una cantidad de moles de aire actual que reacciona con el combustible, que puede ser mayor, igual o menor que la cantidad estequiométrica. El coeficiente de exceso de aire α se define [6]:

$$\alpha = \frac{a}{a_{\text{est}}} \quad (4)$$

Si la mezcla es estequiométrica el coeficiente de exceso de aire es $\alpha=1$, si $\alpha<1$ la mezcla se denomina rica (insuficiencia de oxígeno) y, si $\alpha>1$ la mezcla se denomina pobre (exceso de oxígeno). Para la determinación de la composición de equilibrio a partir de la ecuación (3) se ha implementado el programa

computacional STANJAN¹. Se ha cubierto un rango de α apropiado para el desempeño de los motores de automóvil convencionales. Generalmente para marchas normales las relaciones aire-combustible obedecen a mezclas pobres o estequiométricas, mientras que para aceleraciones y el arranque del motor, las mezclas son generalmente ricas, en búsqueda de máxima potencia y calentamiento rápido del sistema de tratamiento de gases, respectivamente. Las comparaciones iniciales se realizan bajo el supuesto que la operación del motor se está llevando a cabo a similares coeficientes de exceso de aire, lo cual no resulta ser estrictamente necesario en la operación de los motores, y es allí donde hay diferencias marcadas dependiendo de las características del combustible y de la tecnología de conversión realizada.

El dióxido de carbono CO₂ es el principal responsable del efecto invernadero e influye en el calentamiento global, mientras el monóxido de carbono CO tiene serias implicaciones en la salud humana, que pueden ir, en función de la concentración y del tiempo de exposición, desde simples dolores de cabeza hasta la muerte. Los resultados de las emisiones de dióxido de carbono y monóxido de carbono, en porcentaje de fracción volumétrica, han sido graficados en la figura 2, como una función del coeficiente de exceso de aire α .

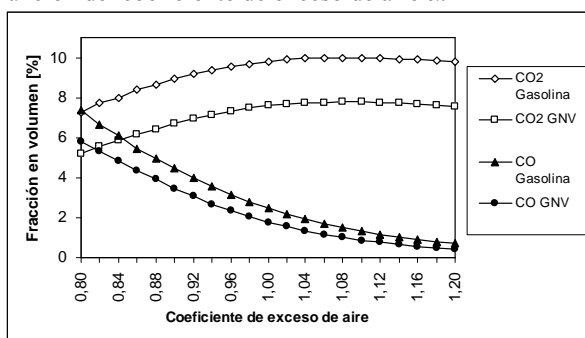


Figura 2. Composición de CO₂ y CO para la operación con gasolina y con gas natural.

En la figura 2 se puede observar que la implementación del gas natural redundará en una reducción de las emisiones de CO₂ y CO para una explotación del motor en similares relaciones de aire combustible, es decir, similares coeficientes de exceso de aire. La reducción de emisiones de CO₂ como consecuencia de la implementación de GNV está entre 27 % (para $\alpha=0,8$) y 22 % (para $\alpha=1,2$). De manera similar, la reducción del CO está en un rango entre 20% (para $\alpha=0,8$) y 38 % (para $\alpha=1,2$).

Otra manera de expresar los niveles de emisión es el Índice de Emisión de la especie i , IE_i . Este índice se define como la masa de contaminante i emitida en relación con la masa de combustible quemada. Para

combustión de un hidrocarburo en aire el índice de emisión [4] está dado por:

$$IE_i = \left(\frac{\chi_i}{\chi_{CO} + \chi_{CO_2}} \right) \cdot \left(\frac{x \cdot PM_i}{PM_{comb}} \right) \left[\frac{kg_i}{kg_{comb}} \right] \quad (5)$$

Donde: χ son las fracciones molares, x es el número de moles de carbón en un mol de combustible C_xH_y , y PM_i es el peso molecular de la especie i que se desea evaluar. La figura 3 presenta los índices de emisión del dióxido de carbono y del monóxido de carbono, para la combustión del motor operando con gasolina y operando con gas natural. Nótese que los índices de emisión son menores para el gas natural GNV para los dos contaminantes.

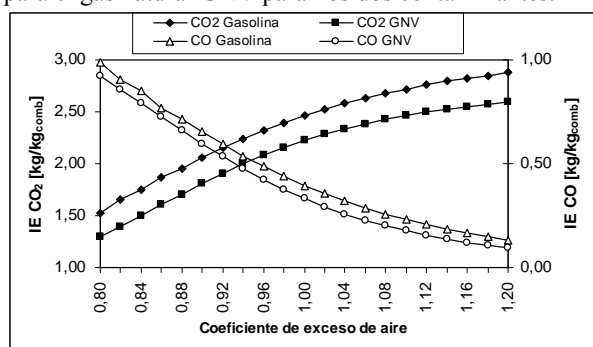


Figura 3. Índice de Emisión para el CO₂ y el CO para la operación con gasolina y GNV.

Obsérvese que los índices de emisión del GNV, a similares coeficientes de exceso de aire, son inferiores que para la gasolina. La reducción de los índices de emisión de CO₂ como consecuencia de la implementación de GNV está entre 15 % (para $\alpha=0,8$) y 10 % (para $\alpha=1,2$). La reducción del CO está en un rango entre 7% (para $\alpha=0,8$) y 31 % (para $\alpha=1,2$).

También pueden expresarse los niveles de emisión mediante la masa de contaminante generada y su relación con la distancia recorrida del vehículo. Considerando una autonomía² de 7 litros por cada 100 kilómetros para un vehículo empleando gasolina, y 8 m³ por cada 100 kilómetros para el mismo vehículo empleando gas natural vehicular, se presenta en la figura 4 la cantidad de CO₂ y CO generada para la operación con los dos combustibles. Vale la pena resaltar que la autonomía del vehículo es influenciada por diversos factores asociados a la operación del vehículo. La reducción de los niveles de emisión de CO₂ en g/km consecuencia de la implementación de GNV está alrededor del 10 % (para $\alpha=0,8$ y $\alpha=1,2$). La reducción de los niveles de emisión de CO en g/km, como consecuencia de la implementación del GNV está en un rango entre 1,2% (para $\alpha=0,8$) y 24 % (para $\alpha=1,2$).

¹ STANJAN Chemical Equilibrium Solver. Stanford University. Versión 3.86.

² La autonomía está relacionada con la cantidad de combustible que consume un vehículo para recorrer una distancia determinada.

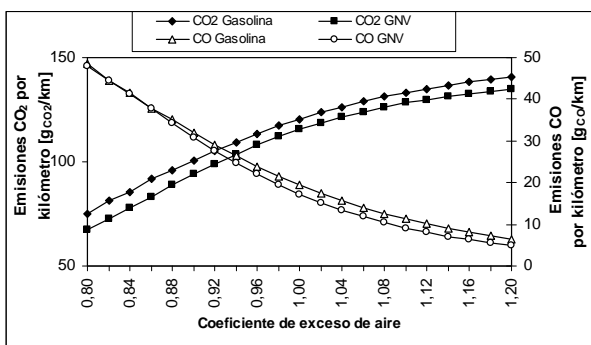


Figura 4. Emisión de CO₂ y CO en gramos por kilómetro para la operación con gasolina y GNV.

Para las autonomías asumidas y a similares coeficientes de exceso de aire, los niveles de emisión en masa de CO y CO₂ son favorables para el GNV, pero se resalta que la autonomía del vehículo es un factor importante que podría eventualmente no ser tan favorable para el gas natural en comparación con la gasolina.

La temperatura adiabática de llama o temperatura máxima que puede ser alcanzada por los productos de combustión es mayor para el motor a gasolina para similares coeficientes de exceso de aire, ver figura 5. La temperatura máxima es un indicador de mayor eficiencia térmica para un motor. Una temperatura de operación menor, puede conllevar a problemas de funcionamiento, fallas y deterioros de las partes para motores convertidos, debido a factores asociados a la menor dilatación térmica de los materiales, por ejemplo.

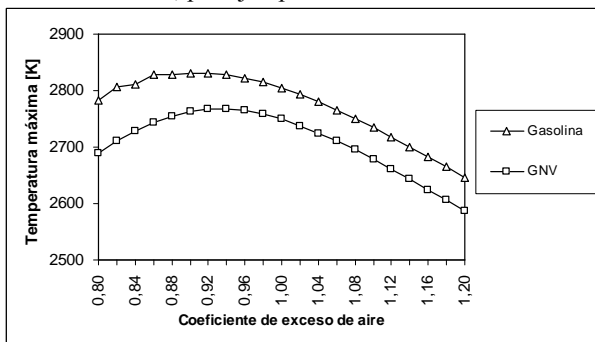


Figura 5. Temperatura máxima para la operación con gasolina y GNV.

El incremento de la variación molar en la combustión (ver figura 6) está asociada al aumento de presión en el cilindro, lo cual redundará en el trabajo generado por el motor y su consecuente potencia generada. Esta variación molar está dada por [6]:

$$VariaciónMolar = \frac{N_{prod}}{N_{react}} \quad (6)$$

Donde N_{prod} es el número de moles en los productos de la combustión y N_{react} es el número de moles en los reactantes. La figura 6 presenta que la variación molar es favorable para el motor de gasolina, y aquí está manifiesta una de las desventajas del gas natural, debido

a que esta es una de las razones por la cual ocurre la disminución de potencia en comparación con la gasolina.

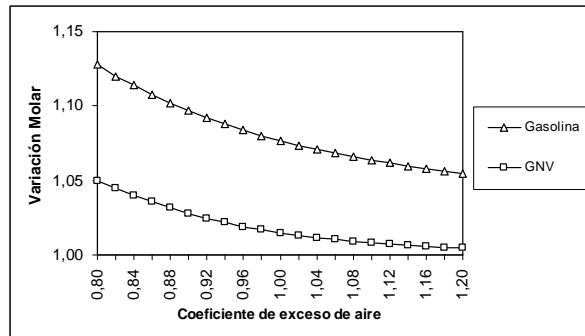


Figura 6. Variación molar para la operación con gasolina y GNV.

El poder calorífico Q_m representa la energía contenida por unidad de masa de un combustible. Para el gas natural (considerado como metano) el poder calorífico³ es 49770 kJ/kg, mientras que para la gasolina (considerada como octano) el poder calorífico es 44300 kJ/kg. Obsérvese que, bajo el concepto de poder calorífico, el gas natural tendría ventajas respecto a la gasolina, por cuanto cada unidad de masa aporta más energía a la combustión. Pero en un motor de combustión interna, una variable más importante a la hora de comparar la energía aportada por el combustible, es el calor de combustión Q_v , entendido como la energía por unidad de volumen de mezcla de combustible vaporizado y aire. El quid de este asunto es que en el interior del cilindro es importante el volumen de mezcla que lo llena y, en este orden de ideas, el gas natural presenta una desventaja respecto a la gasolina, puesto que el hecho de ser gaseoso, hace que desplace aire y, por tanto, baje la potencia. La potencia de un motor es proporcional a la energía del volumen de gases dentro del cilindro. El calor de combustión se determina mediante:

$$Q_v = Q_m \frac{m_{comb}}{V_{mezcla}} \quad (7)$$

Donde m_{comb} es la masa de combustible que ingresa a la reacción de combustión y V_{mezcla} es el volumen de la mezcla de los reactantes. La figura 7 presenta el calor de combustión como una función del coeficiente de exceso de aire. Nótese que el calor de combustión del GNV es menor que el calor de combustión para la gasolina, lo que influye en la energía disponible para la generación de potencia y, por consiguiente en esta última. Así mismo, se grafica la variación de la reducción del calor de combustión cuando se opera con gasolina y luego con gas natural, en función del coeficiente de exceso de aire. Nótese cómo la variación en el calor de combustión, para el rango de coeficientes de exceso de aire establecido, está entre 8% para mezclas pobres y 11% para mezclas ricas.

³ Se considera el poder calorífico inferior.

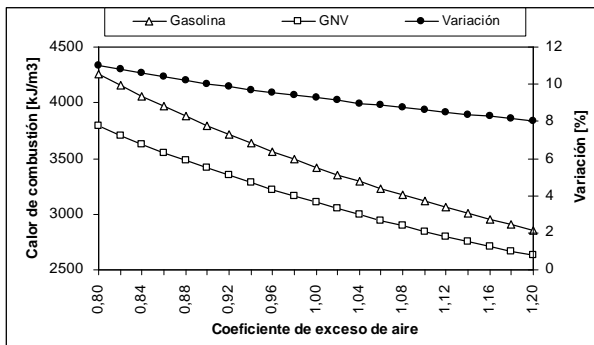


Figura 7. Calor de combustión para la operación con gasolina y GNV.

En una productoria de factores influyentes en la comparación del desempeño en potencia de una conversión a gas natural, se puede establecer que hay factores constituyen una desventaja para el gas natural: la variación molecular y el calor de combustión.

La reducción de la contaminación atmosférica a partir de automóviles es una exigencia mundial. Las exigencias ambientales a los motores de combustión interna son cada vez mayores, hasta el punto que en Europa está proyectándose, para el 2012, niveles tan exigentes como 120 g/km máximo para CO₂. El empleo de combustibles alternos a los convencionales es una posibilidad, pero lo más importante es lograr una combinación con nuevos conceptos de motor, la optimización de sistemas de postratamiento de gases de escape y el mejoramiento de las situaciones de tráfico.

4. DIAGRAMAS INDICADORES DEL MOTOR OPERANDO CON GASOLINA Y CON GAS NATURAL

Se realiza la simulación computacional del desempeño termodinámico de un motor de combustión operando con gasolina (considerada como iso octano C₈H₁₈) y el desempeño del mismo motor operando con gas natural (considerado como CH₄). Esta simulación se lleva a cabo con la herramienta computacional *Engine Simulation Program ESP*⁴. El ESP emplea modelos matemáticos para la combustión, modelos de las propiedades físicas, modelos termodinámicos, modelos para la transferencia de calor y modelos de flujo de fluidos. En la tabla 1 se presentan algunas características constructivas del motor empleado para la simulación.

Relación de compresión	8
Diámetro del cilindro [mm]	83
Carrera del pistón [mm]	106
Cilindrada [cm ³]	645
Avance de chispa [°]	10

⁴ ENGINE SIMULATION PROGRAM, ESP versión V.2.4. Stanford University. Desarrollado por: S.C. Kassinos y W. C. Reynolds. 1999-2000.

Revoluciones por minuto	2400
-------------------------	------

Tabla 1. Características del motor empleado para la simulación en ESP.

Se presentan los resultados de la simulación realizada para el motor operando con coeficientes de exceso de aire correspondientes a la mezcla estequiométrica. La figuras 8 y 9 presentan los diagramas indicadores del motor operando con gasolina y gas natural, respectivamente.

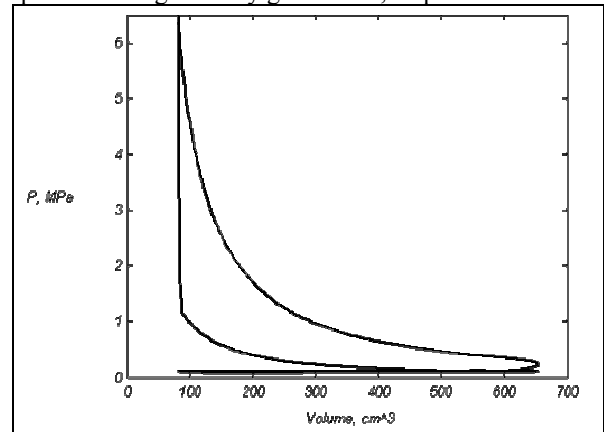


Figura 8. Diagrama indicador resultante de la simulación con gasolina. Coeficiente de exceso de aire α=1.

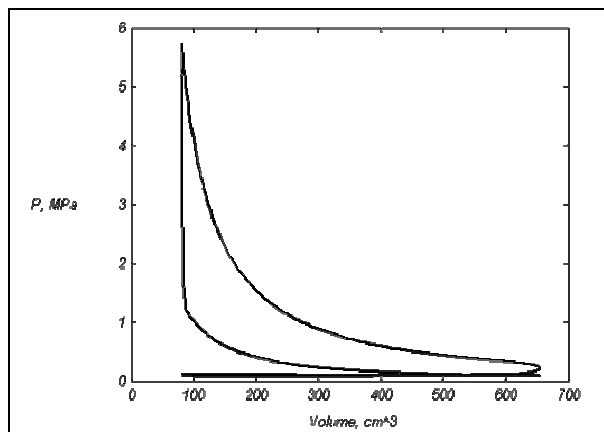


Figura 9. Diagrama indicador resultante de la simulación con gas natural. Coeficiente de exceso de aire α=1.

En el diagrama indicador se representa el proceso de admisión, compresión, combustión, potencia y expulsión de gases. El área notable es el área entre el proceso de potencia y el de compresión. El área entre el proceso de escape de gases y de admisión de la mezcla es despreciable en comparación con el anterior. A esta última área se le denomina pérdidas por bombeo. Aunque no fácilmente perceptible, nótese en los diagramas indicadores una mayor área neta producida por el motor a gasolina en comparación con el área neta del diagrama indicador del motor a gas natural. El área bajo el diagrama P-V indica la cantidad de trabajo generada por el motor de combustión. Por lo tanto, el trabajo generado, para la cilindrada de 645 cm³, es mayor para el motor operando con gasolina y, de manera proporcional

con el número de cilindros del motor. La tabla 2 presenta la comparación de algunos parámetros de desempeño obtenidos con *ESP*.

PARAMETRO	GASOLINA	GNV
Presión media efectiva indicada [atm]	8,74	7,90
Consumo específico indicado de combustible [kg/kJ]: M_{comb}/W_{ind}	$7,953 \times 10^{-5}$	$1,280 \times 10^{-3}$
Presión pico del ciclo [atm]	64,1	57,9

Tabla 2. Relación de parámetros de desempeño a 2400 rpm. Adaptada del *ESP*.

La presión media efectiva indicada pme_i es un buen parámetro de operación para la comparación de motores debido a que este es independiente del tamaño del motor y de la velocidad. Se refiere a la presión constante que, actuando sobre el área del pistón en la carrera, produciría el trabajo observado en el ciclo. En este caso particular de la comparación de un mismo motor operando con dos combustibles, la presión media efectiva indicada permite establecer las ventajas entre estos portadores energéticos en relación con la generación de potencia. La potencia indicada P_i está dada por [9]:

$$P_i = pme_i \cdot V_d \frac{n}{X} \quad (8)$$

Donde V_d es el desplazamiento o cilindrada total del motor, n es la velocidad de rotación del cigüeñal y X es el número de revoluciones por carrera de potencia. Para un motor de cuatro tiempos $X=2$ y para un motor de dos tiempos $X=1$. De la ecuación (8) puede establecerse que a mayor presión media efectiva mayor será la salida de potencia, cuando la cilindrada y las revoluciones del motor son constantes y el número de tiempos para la generación de potencia es similar. De acuerdo con la tabla 2, la presión media efectiva indicada para el motor operando con gasolina es 1,11 veces mayor u 11% mayor que la presión media efectiva indicada para la operación con gas natural.

Otro parámetro de desempeño es el consumo específico indicado de combustible CEC_i el cual es la relación entre el flujo másico de combustible en el motor \dot{m}_{comb} y la potencia indicada P_i . Está definido como [7]:

$$CEC_i = \frac{\dot{m}_{comb}}{P_i} \quad (9)$$

Nótese, a partir de la tabla 2, que para la misma salida de trabajo, el consumo de masa de gasolina es menor que el consumo de masa de gas natural. Se puede establecer que para el mismo trabajo generado, el consumo en masa de gas natural es aproximadamente 16 veces mayor, lo que implica que un motor convertido a gas natural, para que genere el mismo trabajo que entregaba con gasolina, debe emitir alrededor de 16 veces más contaminantes al medio ambiente, en dependencia de la relación también con los índices de emisión. Por lo tanto, desde este punto de vista, no resulta tan sencillo concluir que las emisiones

contaminantes globales a partir del gas natural son notablemente menores que a partir de la gasolina, debido a que la comparación estaría sometida a si el motor generará el mismo trabajo por ciclo o si el trabajo generado es diferente.

5. CONCLUSIONES

- Las emisiones CO_2 y CO generadas (en porcentaje volumétrico) por la operación de un motor con gas natural, son menores que en su operación con gasolina, bajo similares relaciones aire-combustible.
- El índice de emisión de contaminantes por unidad de masa de combustible para el CO_2 y CO , resulta favorable a la utilización de gas natural en comparación con la gasolina.
- Para los valores de autonomías asumidas, los niveles de emisión de CO_2 y CO en gramos por kilómetro son más bajos para el gas natural que para la gasolina, si bien, la fuerte influencia de las autonomías podría, eventualmente, otorgarle beneficios a la gasolina.
- El consumo específico de combustible es menor para la gasolina, por lo tanto, para motores que generen similar trabajo indicado, la generación global de contaminantes sería mayor para el GNV que para la gasolina.
- La presión media efectiva indicada para un motor operando con gas natural es menor que la presión media efectiva indicada del mismo motor operando con gasolina, lo que indica que ocurre una reducción de potencia cuando se emplea gas natural.
- Factores como la relación aire-combustible requerida por el motor para generar similar trabajo indicado con gasolina y con gas, pueden influir notablemente en la asignación de ventajas al GNV o a la gasolina.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] GANESAN V. *Internal Combustion Engines*. Singapore: McGraw-Hill, 2004, pp. 224-226.
- [2] BOSCH. "Automotive Handbook", Robert Bosch GmbH, 4th edition, pp. 501, 1996.
- [3] PULKRABEK, Willard W. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engines*. USA: Pearson Prentice-Hall, 2004. pp. 62-67, 179-180, 444.
- [4] TURNS, Stephen. *An Introduction to Combustion*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1996. pp. 18-19, 45-51, 472-480.
- [5] KUO, Kenneth K. *Principles of Combustion*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1986. pp. 71.
- [6] JÓVAJ., M. S. y MÁSLÓV., G. S. *Motores de Automóvil*. Moscú: Editorial Mir, 1982. pp. 49-50.
- [7] OBERT, Edward. *Motores de Combustión Interna*. México: CECSA, 2000. pp. 385-388. pp. 401-403.
- [8] S. BIRCH. "Technology Development Under Pressure". *Automotive Engineering Internacional*, volume 113, number 6, pp. 24-27, June 2005.
- [9] LUMLEY, John L. *Engines: An Introduction*. USA: Cambridge University Press, 1999. pp. 1-3. 15-19.