

DISMINUCION DE LA TOXICIDAD DE LOS MOTORES DIESEL MEDIANTE EL EMPLEO DEL GAS LICUADO DE PETROLEO

Guillermo Lira Cacho, Nicolai N. Patrakhaltsev, Jorge Ponce Galiano
Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería

RESUMEN

Se propone un método de suministro de gas licuado de petróleo (GLP) en los motores diesel, con formación interna de la mezcla aire-combustible, para disminuir el humeado y la toxicidad de los gases de escape. Para efectuar la comparación de la toxicidad de diferentes motores se utiliza el criterio de la toxicidad sumatoria convencional de las emisiones totales, la cual toma en cuenta el grado de toxicidad de cada uno de los componentes de los gases de escape. Las pruebas se realizaron tanto en el Instituto de Motores de Combustión Interna de la UNI como en la Universidad de los Pueblos de Moscú y permitieron determinar que la toxicidad sumatoria del motor con el sistema de suministro de GLP propuesto es menor que en el caso de los motores diesel-gas convencionales (con formación externa de la mezcla aire-gas) y que en los motores diesel, en la proporción de 0,75/0,9/1,0, respectivamente.

ABSTRACT

A new method of supplying liquid petroleum gas (LPG) in diesel engines with internal formation of air-fuel mixture to decrease the smoke and toxicity of exhaust gases is proposed. To make the comparison of toxicity in different engines, the conventional sum toxicity of total emissions is used. This last takes into account the degree of toxicity of each component of the exhaust gases. The tests let us determine that the sum toxicity of the diesel engines with the LPG supply system is less than in the cases of conventional diesel-gas engines (with external formation of the air-fuel mixture) and in diesel engines, in the ratio 0,75/0,9/1,0, respectively.

INTRODUCCION

El empleo de combustibles gaseosos en los motores Diesel y, particularmente, el gas licuado de petróleo (GLP), se considera uno de los medios más efectivos para disminuir la toxicidad y el humeado en los gases de escape [1,5,6]. El GLP se puede emplear en los motores Diesel utilizando tanto el método de formación externa como el método de formación interna de la mezcla. En el primer caso, la mezcla gas-aire se realiza en un mezclador fuera del motor (en el múltiple de admisión) y luego esta mezcla es suministrada a los cilindros del motor durante el proceso de admisión. Es decir, en los cilindros del motor se comprime una mezcla aire-gas, luego, al final del proceso de compresión, se inyecta una pequeña cantidad de combustible, llamada piloto, gracias a la cual la mezcla se autoinflama y se produce la combustión de la mezcla aire-gas.

El estudio de este método durante la presente investigación, se realizó en el motor Diesel D-240 (ruso) para tractores[3]. Las pruebas

realizadas en este motor, empleando gas con formación externa de la mezcla, muestran una disminución de 3 a 4 veces el humeado de los gases de escape. Sin embargo, en los regímenes de pequeñas cargas y en vacío, que es cuando en los cilindros hay una mezcla pobre, el encendido de ésta se realiza deficientemente, el motor pierde potencia y estabilidad en el funcionamiento, también las emisiones de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (C_nH_m) aumentan bruscamente. En los regímenes de cargas altas el motor se caracteriza por tener un trabajo bastante rígido, y las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) se incrementan. En estos motores es necesario limitar la relación de compresión para evitar la posibilidad de detonación o golpeteo. Por esta misma razón el empleo de altas relaciones de presión en motores sobrealimentados también se ve limitado. Todo esto disminuye la posibilidad de forzamiento del motor.

Muchas de estas desventajas se pueden superar en los motores diesel-gas con formación interna de la mezcla aire-gas. Este método se utiliza, principalmente, para mejorar los parámetros

ecológicos de motores grandes, por ejemplo, en motores marinos, donde constructivamente es posible organizar la inyección al cilindro, al final del proceso de compresión, tanto gas licuado de petróleo como gas natural. Con este método de formación interna de mezcla se puede alcanzar eficiencias de hasta 55% [1]. La realización de este método de formación de la mezcla en los motores diesel automotrices, debido a las limitaciones de espacio, es difícil, pero es posible inyectar al cilindro una mezcla de petróleo Diesel con gas licuado de petróleo (mezclados previamente en la línea de baja presión del sistema de alimentación) [5,7]. Sin embargo, al suministrar esta mezcla a través de la bomba de inyección es posible que la estabilidad del suministro de combustible se vea perjudicado debido a la formación intensa de vapor en las zonas de depresión o de calentamiento en el ingreso del combustible a la bomba de inyección. Investigaciones realizadas conjuntamente entre la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y la Universidad Rusa de la Amistad de los Pueblos (URAP) han permitido desarrollar un nuevo sistema de suministro diesel-gas con formación interna de la mezcla [5,7] (Fig. 1).

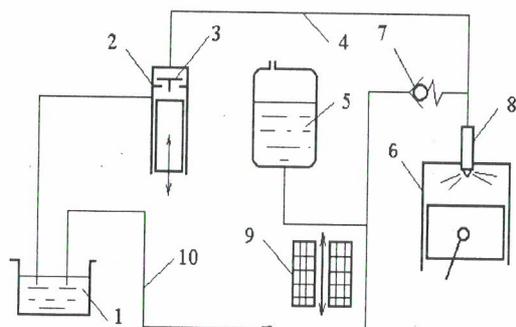


Fig. 1- Esquema del proceso diesel-gas con formación interna de la mezcla.

El sistema propuesto funciona de la siguiente manera: el petróleo Diesel (2- D) del tanque 1 ingresa a la bomba de alta presión 2, la cual posee una válvula impelente con su anillo de descarga respectivo. Cuando se produce el corte del suministro del combustible en la bomba 2, la válvula impelente 3 cae en su asiento, y se forma en la línea de alta presión 4 una onda de depresión, la cual pasa cerca de la válvula especial

(check) 7 abriéndola y permitiendo que el gas del recipiente 5 ingrese a la línea de alta presión 4 cerca del inyector 8 (de tipo cerrado). Gracias a esto, la onda de depresión al pasar por la válvula 7 la abre varias veces durante el período entre inyecciones sucesivas, permitiendo el ingreso del GLP a la línea de alta presión 4 y al inyector; de esta manera, en la siguiente inyección, se inyecta una mezcla de petróleo diesel con gas licuado de petróleo. En el cilindro del motor 6 se produce posteriormente el encendido y la combustión de esta mezcla.

Experimentos realizados en el motor Diesel Ricardo E6[TS del Instituto de Motores de la UNI (monocilíndrico, $D[S]=76[110]$, $n=2.500$ rpm) (figura 2), con adición de 16 a 22% de GLP al petróleo diesel, permitió incrementar la potencia del motor en 10 % (manteniendo el mismo nivel inicial de humeado) o reducir en 1,4 veces el humeado de los gases (manteniendo la potencia del motor constante). Resultados muy parecidos de un proceso diesel-gas se obtuvieron en el motor D-240 (4 cilindros, $D[S]=110[125]$, $n=2.150$ rpm) realizados en la URAP; los experimentos se realizaron tanto en la versión diesel como en la versión diesel-gas (ver figura 3). El análisis de los resultados muestra que la adición del GLP en el petróleo diesel en un cantidad aproximada de 20% (en masa) disminuye el humeado de 1,5 a 2 veces; más significativo aun es la disminución de los óxidos de nitrógeno (NO_x), lo que evidentemente está relacionado con el mejoramiento de la formación de la mezcla, con las bajas concentraciones de oxígeno libre en la cámara de combustión y con la disminución de las temperaturas locales dentro de la cámara. No se observó una variación sustancial de las emisiones de CO y C_nH_m en comparación con el proceso de un motor diesel convencional.

Como se puede observar en las figuras 2 y 3, es bastante difícil obtener conclusiones concluyentes sobre las características ecológicas de los motores diesel-gas y establecer comparaciones sobre los niveles de toxicidad de un motor empleando diversos métodos debido a las diferentes variaciones de las concentraciones de los gases tóxicos en los diferentes regímenes de funcionamiento de estos motores. Para resolver este problema se propone una metodología que permite comparar la toxicidad de las emisiones totales emanadas por un motor durante un tiempo

determinado y tomando en cuenta los diferentes regímenes de funcionamiento del mismo, con respecto a la *toxicidad sumatoria* de otros motores trabajando en los mismos regímenes.

EVALUACION DE LA TOXICIDAD SUMATORIA CONVENCIONAL

Para establecer esta metodología es necesario evaluar la cantidad total de las diferentes sustancias tóxicas emanadas por un motor durante un período determinado, funcionando éste en diferentes regímenes durante este período. Hay que tomar en cuenta que estas sustancias tóxicas poseen diferentes grados de toxicidad o nocividad, por lo que cada una de ellas se establece (norma) una *concentración límite permisible* (CLP) en aire atmosférico. Estos límites se dan tanto para condiciones urbanas, como para ambientes industriales. Por lo tanto, la toxicidad total (T_M) de los gases de escape de un motor durante un período determinado será función de:

$$T_M = f \left[\sum_i^n (G_i; CLP_i) \right] \quad (1)$$

donde: G_i - cantidad total emitida del componente tóxico i (CO , C_nH_m , NO_x , etc.) durante el período; CLP_i es la concentración límite permisible del componente i en el aire.

El parámetro de toxicidad k_i de un determinado componente se puede representar con la relación:

$$k_i = C_i / CLP_i \quad (2)$$

donde: C_i es la concentración del componente i en los gases de escape.

Para todo el conjunto de sustancias tóxicas en los gases de escape, el cual contiene n elementos, el parámetro de *toxicidad global convencional* de los gases de escape se puede representar por

$$k_\Sigma = \sum_{i=1}^n (C_i / CLP_i) \quad (3)$$

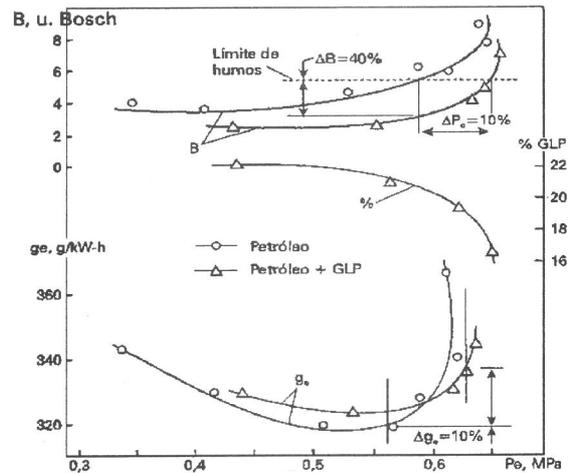


Fig. 2- Características de carga del motor Ricardo E6[TS (n=2500 rpm).

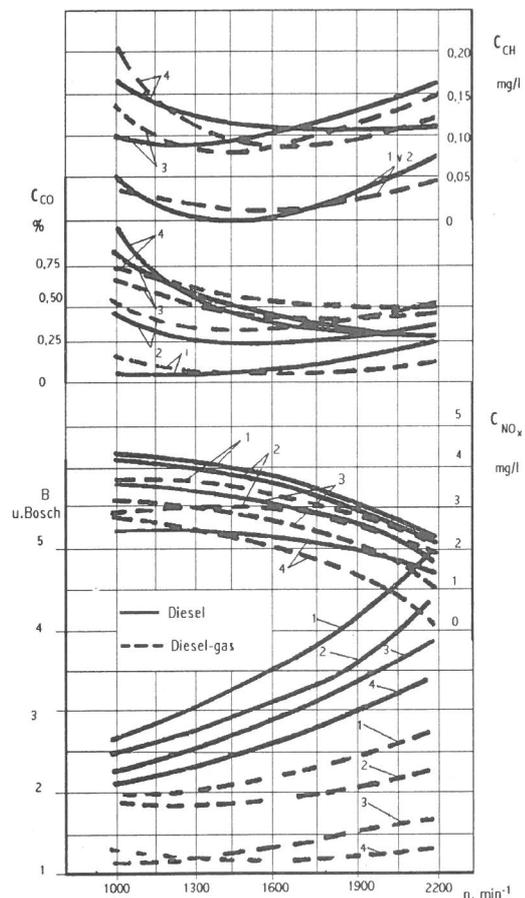


Fig. 3- Características comparativas de velocidad del motor diesel y diesel-gas D-240: 1,2,3,4 - características obtenidas para la posición de la cremallera de la bomba de inyección, correspondiente a $h_p=100\%, 75\%, 50\%, 25\%$, respectivamente; B - humo Bosch.

Físicamente, k_{Σ} representa en cuantas partes de aire (como mínimo) es necesario diluir una parte de gases de escape hasta alcanzar un nivel de toxicidad de no peligrosidad, el cual está determinado por el CLP_i de cada componente [4]. La fórmula (3) se puede transformar en otra más sencilla de utilizar si se considera que la mezcla multicomponente de los gases de escape, por su nivel de toxicidad, sea equivalente a una mezcla de un solo componente x , con concentración C_x , donde este componente x debe cumplir la condición de tener el mismo nivel grado de disolución en el aire que la mezcla multicomponente, es decir, el mismo k_{Σ} , entonces se va a cumplir que:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{CLP_i} = \frac{C_x}{CLP_x} \quad (4)$$

ó

$$C_x = \sum_{i=1}^n \frac{CLP_x}{CLP_i} \cdot C_i \quad (5)$$

donde: CLP_x es la concentración límite permisible de la sustancia x .

Para cálculos prácticos es cómodo asumir, en calidad de equivalente y en forma convencional, que la concentración límite permisible de la sustancia x sea $1 \text{ mg}[m^3]$.

Introduciendo el concepto de *índice de toxicidad*:

$$k'_i = \frac{CLP_x}{CLP_i} = \frac{1}{CLP_i} \quad (6)$$

Entonces, la toxicidad sumatoria convencional de los gases de escape se puede representar por:

$$k_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n k'_i \cdot C_i \quad (7)$$

Para su determinación es necesario conocer las concentraciones límites permisibles de cada componente en diferentes zonas, por ejemplo, en zonas urbanas o en ambientes industriales (ver Tabla 1).

Los gases de escape contienen una cantidad muy grande de hidrocarburos C_nH_m (más de 300), la mayor parte de los cuales no se norman o se limita su concentración máxima en el aire. Para el análisis de la cantidad de C_nH_m en los gases de escape se determina el contenido total o sumatorio de los hidrocarburos con el analizador de gases,

calibrándolo de acuerdo al contenido de hexano, para el cual se establece la concentración límite permisible para un ambiente industrial. Entonces, referencialmente, se puede considerar que

$$\lg(CL P_{C_nH_m}^1) = 0,62 \cdot \lg(CL P_{C_nH_m}^3) - 1,77 \quad (8)$$

Es decir, para el hexano tenemos que la concentración límite permisible en zonas urbanas (promedio diario) es $(CL P_{C_nH_m}^1) = 1,78 \text{ mg}[m^3]$ [2].

Considerando que la mayoría de hidrocarburos C_nH_m son vapores de combustible es necesario relacionar esta concentración límite permisible con el $CL P^1$ de la gasolina ($=1,5$). En este caso el índice de toxicidad de los C_nH_m se puede asumir $k'_{C_nH_m} = 0,67$.

Durante el proceso de escape del motor, los óxidos de nitrógeno NO_x , contenidos en los gases de escape, en su mayoría están constituidos por NO , el cual a medida que se va enfriando en el tubo de escape se va oxidando hasta NO_2 . Luego, ya en la atmósfera, la relación entre el NO_2 y el NO representa cerca de 6 a 18 (crece con la disminución de la temperatura del aire). Por este motivo se acostumbra (convencionalmente) expresar el parámetro de toxicidad de los óxidos de nitrógeno según su equivalente en NO_2 . Considerando que $CL P_{NO_2}^1 = 0,04$, obtenemos que $k'_{NO_x} = 25,0$.

Los aldehídos presentes en los gases de escape de los motores se presentan, principalmente, en forma de formaldehídos H_2CO y acroleína $CH_2=CH-CHO$. El índice de toxicidad de los aldehídos se asume $k'_{CHO} = 83$.

Para la evaluación de la toxicidad de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), generalmente, sólo se toma en cuenta al benzopireno (BP), el cual como se sabe es cancerígeno, por lo que su índice de toxicidad es muy alto $k'_{BP} = 10^6$.

La peligrosidad del hollín (C), el cual está conformado por sustancias sólidas dispersas, radica en su propia toxicidad $(CL P_C^1) = 0,05 \text{ mg}[m^3]$, y también debido a que el hollín es un absorbente activo del benzopireno. El índice de toxicidad del hollín es $k'_C = 20,0$.

Las diversas sustancias tóxicas contenidas en los gases de escape es necesario clasificarlas en aquellas que se controlan tanto directamente como en forma indirecta (es decir, las que se

normalizan y limiten por leyes) y las que no se controlan (ver Tabla 2).

Tabla 1- Concentraciones límites permisibles de los gases de escape.

Gases de escape				Concentraciones en aire (CLP), en mg[m ³]		
Nombre genérico	Fórmula	Sustancia	Fórmula	CLP		
				CLP ¹	CLP ²	CLP ³
Monóxido de carbono	CO	Monóxido de carbono	CO	3,0	5,0	20,0
Oxidos de nitrógeno	NO _x	Bióxido de nitrógeno	NO ₂	0,04	0,085	9,0
		Oxido nítrico	NO	0,06	0,6	30,0
		Tetraóxido de nitrógeno	(NO ₂) ₂	----	-----	1,8
		Oxidos de nitrógeno (en NO ₂)	----	----	----	5,0
Hidrocarburos	C _n H _m	Hexano	C ₆ H ₁₄	----	----	1 800
		Hidrocarburos C ₂ -C ₁₀ (en C)	----	----	----	300,0
		Gasolina (en C)	----	1,5	5,0	----
Hollín	C	Carbón	C	0,05	0,15	3,5
Componentes con plomo	(Pb _x)	Componentes con plomo (en Pb)	----	0,0007	----	0,01
Hidrocarburos policíclicos aromáticos	HAP	Benzopireno (BP)	C ₂₀ H ₁₂	10 ⁻⁶	----	1,5.10 ⁻⁶
Aldehidos	CHO	Formaldehído	H ₂ CO	0,012	0,035	0,5
		Acroleína	CH ₂ =CH-CHO	0,03	0,03	0,7
		Acetaldehído	CH ₃ CHO	0,1	0,1	5,0
Bióxido de azufre	SO ₂	Bióxido de azufre	SO ₂	0,05	0,03	10,0

(1) Promedio diario en zona urbana; (2) Máximo diario en zona urbana; (3) Promedio diario en ambientes industriales.

Tabla 2: Concentración límite permisible en zonas urbanas e índices de toxicidad de sustancias contenidas en los gases de escape.

Sustancia Indice	Emisiones controladas			direct. controladas	Emisiones no controladas		
	CO	NO _x	C _n H _m	C (hollín)	HAP	CHO (aldehidos)	SO ₂
CLP ¹	3,0	0,04	1,5	0,05	10 ⁻⁶	0,012	0,05
k' _i	0,34	25,0	0,67	20	10 ⁶	83	20

Empleando las publicaciones antes mencionadas [3] y los resultados de la investigación realizada se calculó la toxicidad sumatoria convencional (k_Σ) de los gases de

escape del motor D-240, tanto en la versión diesel como cuando se lo adaptó para trabajar en la versión diesel-gas (ver fig. 4), de acuerdo al ciclo estándar de trece escalones.

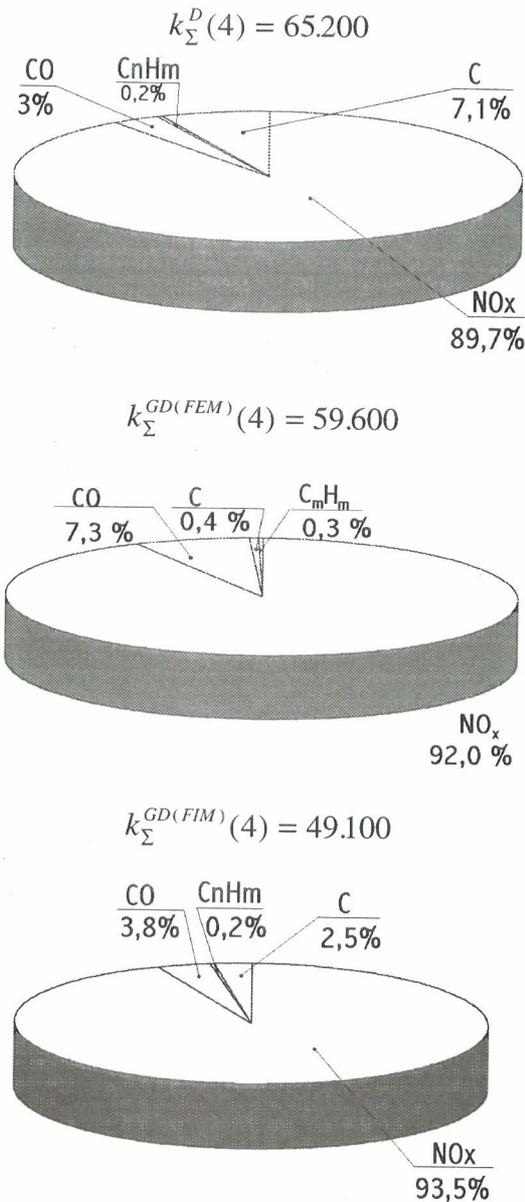


Fig. 4- Toxicidad global convencional de los gases de escape y grado de toxicidad (en porcentaje) de las sustancias tóxicas: D - diesel; GD- diesel-gas ; FEM - formación externa de la mezcla ; FIM- formación interna de la mezcla, considerando cuatro componentes tóxicos en los gases de escape

El análisis de los resultados muestra que (k_{Σ}) de los gases de escape del motor diesel y de los motores diesel-gas con FEM y FIM, se encuentra en la relación 1,0 : 0,9 : 0,75, respectivamente; es decir, el motor diesel-gas con formación interna de la mezcla puede ser 25% menos tóxico que el

motor diesel y 15% menos tóxico con respecto al motor diesel-gas con formación externa de la mezcla.

La metodología propuesta también se puede emplear para efectuar la comparación de la toxicidad de diferentes tipos de motores de combustión interna; en la figura 5, se muestra, comparativamente, la toxicidad sumatoria convencional de un motor diesel y de un motor de gasolina, lo cual permite establecer que la relación del nivel de toxicidad es 1,0 : 1,6 , respectivamente; es decir, se puede establecer que la toxicidad sumatoria convencional de los gases de escape del motor de gasolina supera en 60% la toxicidad de un motor diesel análogo.

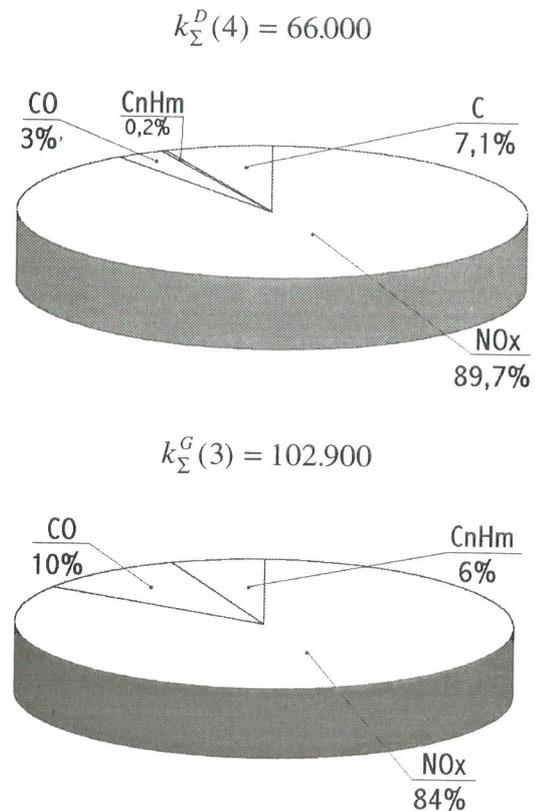


Fig. 5 - Toxicidad global convencional k_{Σ} y grado de toxicidad (de cada componente, en porcentaje) de un motor diesel (D) y de un motor de gasolina (G), considerando cuatro (4) y tres (3) componentes tóxicos en los gases de escape, respectivamente.

También es interesante comparar la toxicidad global convencional de diferentes tipos de motores de combustión interna considerando tanto

los componentes que se controlan o se normalizan así como los no controlados [4]. En estas condiciones la relación de toxicidad comparativa de los gases de escape de los motores diesel y de gasolina, empleando en este último caso gasolinas con plomo y gasolinas sin plomo, es 1,0 : 1,7 : 2,0, respectivamente (ver figura 6):

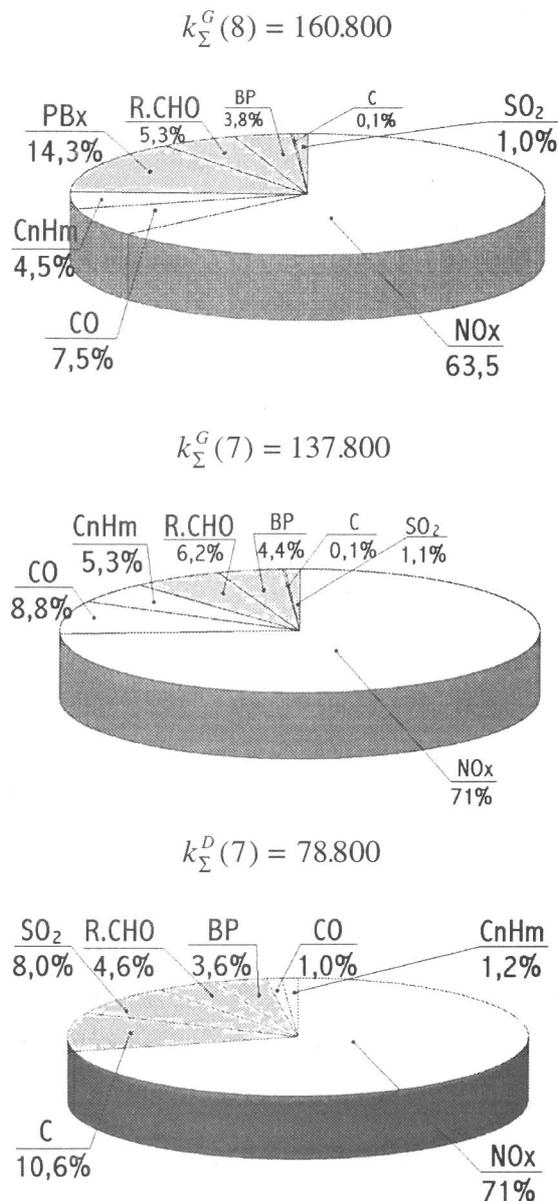


Fig. 6 - Toxicidad global convencional k_{Σ} y grado de toxicidad (de cada componente, en porcentaje) de un motor de gasolina (G) y de un motor diesel (D), considerando (8), (7) y (7) componentes tóxicos en los gases de escape, respectivamente. El área sombreada corresponde a las sustancias no normadas.

CONCLUSIONES

- El empleo del gas licuado de petróleo en calidad de combustible complementario al petróleo diesel 2 mediante el método de formación interna de la mezcla permite reducir de 1,5 a 2 veces el humeado en los gases de escape del motor diesel-gas con respecto a su equivalente diesel.
- La adición de 20% (en masa) de GLP en petróleo diesel permite disminuir la concentración de NO_x en los gases de escape hasta en 20%.
- La efectividad de la disminución del humeado de los motores Diesel de los motores diesel gas con formación interna de la mezcla es menor que en el caso del motor diesel gas con formación externa de la mezcla, pero es mejor en lo referente a las emisiones de CO y C_nH_m, sobre todo en los regímenes de bajas cargas y en vacío. Por eso, para la comparación de las cualidades ecológicas de los motores diesel-gas con diferentes métodos de formación de la mezcla es mejor evaluar la toxicidad sumatoria convencional.
- El método de evaluación de la toxicidad sumatoria convencional de las emisiones tóxicas de un motor se basa en el grado de toxicidad de cada uno de los componentes tóxicos, los cuales dependen de las normas de salubridad en cuanto a las concentraciones límites permisibles de las sustancias tóxicas en zonas urbanas - CLP¹.
- El empleo de la toxicidad sumatoria convencional de los gases de escape de diferentes motores, trabajando según el ciclo estándar de trece escalones, mostró que la toxicidad del motor diesel y del motor de gasolina, empleando gasolinas sin plomo y con plomo, están en la relación comparativa de 1,0 : 1,7 : 2,0, respectivamente; y que el motor diesel y el diesel-gas, con formación externa de la mezcla y con formación interna de la mezcla, están en la relación comparativa de toxicidad 1,0 : 0,9 : 0,75, respectivamente. A medida que las mediciones sean más exactas así como la información y rigurosidad de las normas sobre las concentraciones tolerables de sustancias tóxicas y sus mezclas en el aire, los índices cualitativos de esta metodología de evaluación de la toxicidad sumatoria

convencional es bastante útil para la elección de un método racional de mejoramiento de los índices tóxicos de los motores de combustión interna.

REFERENCIAS

1. Bella, G., Valderrama, A., Defranco, G., Nuevas aplicaciones del gas en los motores de combustión interna, Editorial UNI, Lima, 1996.
2. Bepametnov, G.P., Concentraciones límites permisibles de sustancias químicas en el medio ambiente, "Química", N°4, Moscú, 1985.
3. Dalganov, K.E., Verbovski, V.C, Investigación sobre la economía de combustible y la toxicidad de los gases de escape del motor diesel-gas, Revista "Construcción de Motores", N°8, pp 6-9, Moscú,1991.
4. Ignatovich I.B., Kuteniov, V.F., Generalidades de la teoría de evaluación de la toxicidad del automóvil, "Industria Automovilística", N° 7, pp. C 1-3, Moscú, 1979.
5. Lira Cacho, J.G., Mejoramiento de las cualidades económicas y ecológicas de los motores Diesel automotrices en el Perú mediante la adición de GLP al petróleo diesel, Tesis doctoral, Moscú, 1992.
6. Lira Cacho, J.G., Lastra Espinoza, L.A., El empleo de GLP en los motores diesel, X CONIMERA, memorias, Lima, 1991.
7. Patrakhaltsev, N.N., Equipos para efectuar el proceso gaso-diesel, "Industria Automovilística", N°2, Moscú, 1988.