



MOTORES DE TRACTORES Y AUTOMÓVILES TRACTOR AND AUTOMOBILE ENGINES



<http://opn.to/a/VIt15>

ORIGINAL ARTICLE | ARTÍCULO ORIGINAL

Diesel engine emissions off road. Case Volkswagen ADG 1.9 L SDI

*Emisiones de los motores diésel fuera de carretera.
Caso Volkswagen ADG 1.9 L SDI*

MSc. José Ramón Soca-Cabrera*

Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

ABSTRACT. Exhaust gas emissions tests of internal combustion engines and the permissible limit values for each component are standardized. This work shows the results of the tests carried out on the Volkswagen 1.9 SDI engine in the Armfield CM12 stationary test bench and the Launch X-431 pro scanner performed in the diesel engine laboratory of the Department of Agricultural Mechanical Engineering (DIMA) of Chapingo Autonomous University (UACH). The methodology of SAE J1995 and ISO 8178 Standards were used to obtain the values of HC, NO_x, CO, CO₂ and O₂. In addition, the variation of lambda λ index was obtained. The characteristics of each component were constructed based on the load (power) and the lambda index. The concentrations were 30.25 g kW⁻¹h⁻¹ for HC + NO_x and 0.47 g kW⁻¹h⁻¹ for CO which is below the established limits.

Keywords: engine tests, exhaust emissions.

RESUMEN. Las pruebas de emisiones de gases de escape de los motores de combustión interna se encuentran estandarizadas, así como los valores límites permisibles para cada componente. En el presente trabajo se muestran los resultados de las pruebas realizadas al motor Volkswagen 1.9 SDI en el banco de pruebas estacionario Armfield CM12 y el escáner Launch X-431 pro realizadas en el laboratorio de motores diésel del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola (DIMA) de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Se utilizó la metodología de las Normas SAE J1995 e ISO 8178 para obtener los valores de los componentes del escape. Se construyeron las características de cada componente en función de la carga (potencia) y del índice lambda. Las concentraciones de HC + NO_x fueron de 30.25 g kW⁻¹h⁻¹ y del CO de 0.47 g kW⁻¹h⁻¹ está por debajo de los límites establecidos.

Palabras clave: pruebas de motores, emisiones de escape.

INTRODUCTION

The unstoppable increase in the number of diesel engines in operation in the world contributes to the increasing deterioration of atmospheric air quality, to the point that the control of pollutant gases emissions they generate is a primary factor in the development of new designs.

Diesel engine exhaust gases consist of 99% of carbon dioxide (CO₂), water vapor (H₂O) and free nitrogen (N₂),

INTRODUCCIÓN

El imparable aumento de la cantidad de motores diésel en funcionamiento en el mundo contribuye al creciente deterioro de la calidad del aire atmosférico, hasta el punto en que el control de las emisiones de gases contaminantes que ellos generan es un factor primordial en el desarrollo de los nuevos diseños.

Los gases de escape del motor diésel están constituidos en un 99% por dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O) y nitrógeno

*Author for correspondence: José Ramón Soca-Cabrera, e-mail: jsoca@yahoo.com

Received: 28/11/2019.

Approved: 13/03/2020.

and a remaining 1% of solid and gaseous by-products that are harmful to the atmospheric air and living beings. They are grouped into compounds regulated by government regulations and unregulated compounds. Among the regulated compounds are solid carbon particles (soot) that are referred to as particulate material (PM) or diesel particulate material (DPM), carbon monoxide (CO) nitrogen oxides (NO_x), and unburned, or partially burned, hydrocarbons, which are expressed as total hydrocarbons (THC) or total hydrocarbons other than methane (NMHC). Unregulated compounds comprise polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), the soluble organic fraction (SOF) consisting of hydrocarbons adsorbed on the particulate material, aldehydes derived from fuel hydrocarbons, sulfur dioxide (SO₂) that is formed with sulfur from fuel and lubrication oil that burns during combustion, nitrous oxide (N₂O), and different metal oxides formed from the additives incorporated to the lubrication oil (González *et al.*, 2015; Mantilla *et al.*, 2015; Suarez *et al.*, 2015; Lodice *et al.*, 2016; Puente & Remache, 2017; Tipanluisa *et al.*, 2017; Hernández *et al.*, 2018; Pérez, 2018).

Currently, different methods are used to optimize the engine process in terms of polluting emissions, specific fuel consumption and combustion noise. Table 1 shows these methods (Bosch, 2014).

New fuel injection systems with electronic control have been introduced, such as injector unit systems (UIS), the pump unit system (UPS) and the common rail system with the aim of increasing the pressure and precision of fuel injection. The turbocharger of variable geometry (TGV) and the supercharger are fundamentally used for air supercharging in order to increase the density and, therefore, the amount of air entering the engine cylinders. Other post-treatment systems for exhaust gases are being introduced in order to reduce pollutant gases: oxidation catalysts for diesel engines (DOC), particulate filter (DPF), low NO_x catalysts (LNC), traps NO_x (LNT), selective reducing catalysts (SCR) and ammonia slip catalyst (ASC), among others (Bosch, 2014).

METHODS

The tests to obtain the engine parameters were carried out in the Diesel engine laboratory of the Department of Agricultural Mechanical Engineering, belonging to Chapingo Autonomous University. The test conditions were: atmospheric temperature of 297.15 K (24 °C), altitude of 2 250 m with atmospheric pressure of 78 kPa and relative humidity of 38%, obtained from Chapingo Meteorological Observatory (CEPRAE Universidad Autónoma Chapingo, 2019).

To perform the measurements of the parameters that allow the construction of the characteristic motor curves, the following equipment and instruments were used (Soca *et al.*, 2019):

- Volkswagen ADG SDI 1.9 L engine.
- Armfield diesel CM12 engine test bench.

libre (N₂), y por un 1% restante de subproductos sólidos y gaseosos que son nocivos para el aire atmosférico y los seres vivos, y que se agrupan en compuestos regulados por normativas gubernamentales y compuestos no regulados. Entre los compuestos regulados se encuentran las partículas sólidas de carbono (hollín) que son referidas como material particulado (PM) o material particulado diésel (DPM), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), y los hidrocarburos no quemados, o parcialmente quemados, los cuales se expresan como hidrocarburos totales (THC) o hidrocarburos totales distintos del metano (NMHC). Los compuestos no regulados comprenden los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH), la fracción orgánica soluble (SOF) constituida por hidrocarburos adsorbidos en el material particulado, los aldehídos derivados de los hidrocarburos del combustible, el dióxido de azufre (SO₂) que se forma con el azufre del combustible y del aceite de lubricación que se quema durante la combustión, el óxido nitroso (N₂O), y diferentes óxidos metálicos formados a partir de los aditivos añadidos al aceite de lubricación (González *et al.*, 2015; Mantilla *et al.*, 2015; Suarez *et al.*, 2015; Lodice *et al.*, 2016; Puente y Remache, 2017; Tipanluisa *et al.*, 2017; Hernández *et al.*, 2018; Pérez, 2018).

En la actualidad se utilizan diferentes métodos para optimizar el proceso de los motores en cuanto a las emisiones contaminantes, del consumo específico de combustible y del ruido de la combustión. En la Tabla 1 se observan estos métodos (Bosch, 2014).

Nuevos sistemas de inyección de combustible con control electrónico se han introducido, como es el caso de los sistemas de unidad inyectora (UIS), el sistema unidad bomba (UPS) y el sistema de rail común (common rail) con el objetivo de aumentar la presión y precisión de la inyección del combustible; para la sobrealimentación de aire se utilizan fundamentalmente el turbocompresor de geometría variable (TGV) y el supercargador con la finalidad de incrementar la densidad y por ende, cantidad de aire que ingresa a los cilindros del motor. Otros sistemas de post tratamiento de los gases de escape se están introduciendo con el fin de disminuir los gases contaminantes: Catalizadores de oxidación para motores diésel (DOC), Filtro de partículas (DPF), Catalizadores para bajas emisiones de NO_x (LNC), Trampas de NO_x (LNT), Catalizadores reductores selectivos (SCR), catalizador para el deslizamiento del amoníaco (ASC, Ammonia Slip Catalyst), entre otros (Bosch, 2014). El objetivo del trabajo consistió en realizar las pruebas al motor Volkswagen 1.9 SDI para la construcción de las características de cada componente en función de la carga (potencia) y del índice lambda.

MÉTODOS

Las pruebas para obtener los parámetros del motor se realizaron en el laboratorio de motores Diésel del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo. Las condiciones de la prueba fueron: temperatura atmosférica de 297.15 K (24 °C), altitud de 2 250 m.s.n.m. con presión atmosférica de 78 kPa y humedad relativa del 38 %, obtenidas del Observatorio Meteorológico de Chapingo (CEPRAE Universidad Autónoma Chapingo, 2019).

Para realizar las mediciones de los parámetros que permiten construir las curvas características del motor se utilizaron los siguientes equipos e instrumentos (Soca *et al.*, 2019):

- Motor Volkswagen ADG SDI 1.9 L.

- Launch X-431 pro scanner.
- Computer with program to operate the test bench.
- Banco de pruebas Armfield diésel engine CM12.
- Escáner Launch X-431 pro.
- Computadora con programa para operar el banco de pruebas.

TABLE 1. Actions to optimize combustion in diesel engines
TABLA 1. Acciones para optimizar la combustión en los motores diésel

Actions	NO _x	HC/CO	Soot	Noice	
Advance to injection,	+	-	-	+	-
Exhaust gas recirculation, EGR	+	-	-	+	-
EGR cooling	+	-	+	0	+
Overfeeding	-	+	+	0	+
Supercharger cooler	+	-	+	0	+
Pilot injection	0	+	-	+	0
Post injection added	+	0	+	0	-
Injection pressure increase	0	+	+	0	+
Lower compression ratio, Rc	+	-	+	-	0

Symbols: +: reduction; -: increase; 0: no changes.

During the engine tests, the SAE J1995 standard was used, which establishes the methodology to obtain the engine parameters, when the air filter, the fan, the cooling system, the alternator and the exhaust pipe are disconnected, among others. To obtain the values of the exhaust emissions with the Launch X-431 pro scanner, the ISO 8178 standard was used. The stationary test referred in the Tier directives is the one designated as C1 in the standards ISO 8178-4:07: (2007) for off-road and industrial vehicles. Eight points are taken into account (see Table 2), each of which is defined by an engine speed and a certain load condition, together with a weighting factor to calculate the average value of escape gas emissions. The engine runs at each point for at least 10 minutes and the emissions are determined over 3 minutes, but only those obtained in the last minute are counted.

To transform the values of the exhaust components obtained in the Launch X-431 pro equipment, expressed in parts per million (ppm) and percent (%) to $g\ kW^{-1}h^{-1}$ for analysis and comparison with the limit values established in the Tier and Stage legislation, the following methodology was used considering diesel fuel without sulfur (≤ 10 ppm of S) with a density of $\rho_c = 830$ kg at $15^\circ C$ (Heseding & Daskalopoulos, 2006; Asociación Alemana de Fabricantes de Maquinaria (VDMA), 2011).

Durante las pruebas del motor se utilizó la norma SAE J1995 que establece la metodología para obtener los parámetros del motor, cuando se desconectan el filtro de aire, el ventilador, el sistema de enfriamiento, el alternador y el tubo de escape, entre otros. Para obtener los valores de las emisiones de escape con el escáner Launch X-431 pro se utilizó la norma ISO 8178. El ensayo estacionario que se contempla en las directivas Tier es el que se designa como C1 en las normas ISO 8178-4:07: (2007) y para los vehículos fuera de carretera y de uso industrial; se tienen en cuenta ocho puntos (Tabla 2) que se definen cada uno de ellos por un régimen de giro del motor y una determinada condición de carga, junto con un factor de ponderación para calcular el valor promedio de las emisiones de los gases de escape. El motor funciona en cada punto durante 10 min como mínimo y a lo largo de 3 min se determinan las emisiones, pero solo se contabilizan las obtenidas en el último minuto.

Para transformar los valores de los componentes de escape obtenidos en el equipo Launch X-431 pro, expresados en partes por millón (ppm) y porcentaje (%) a $g\ kW^{-1}h^{-1}$ para su análisis y comparación con los valores límites establecidos en las legislaciones Tier y Stage se utiliza la siguiente metodología considerando que el combustible diésel sin azufre (10 ppm de S) con una densidad de $\rho_c = 830$ kg m^{-3} a $15^\circ C$ (Heseding y Daskalopoulos, 2006; Asociación Alemana de Fabricantes de Maquinaria (VDMA), 2011):

TABLE 2. Conditions of test mode C1 for off-road engines
TABLA 2. Condiciones del modo de ensayo C1 para motores de uso fuera de carretera

Test points x	Rotation speed ¹ (min ⁻¹)	Motor load ² (%)	Weighting factor Wx
1	Nominal	100	0.15
2	Nominal	75	0.15
3	Nominal	50	0.15
4	Nominal	10	0.10
5	Intermediate	100	0.10
6	Intermediate	75	0.10
7	Intermediate	50	0.10
8	Slow motion	0	0.15

¹ Nominal speed is that of the nominal motor power. Intermediate regime is the one that corresponds to the maximum torque of the engine if it is between 60% and 75% of the nominal. If the maximum torque is reached below 60% of the nominal regime, the intermediate regime corresponds to this percentage; and if it reaches above 75% of the nominal, the intermediate regime is the one corresponding to this percentage.

² Refers to the torque expressed as a percentage of the maximum torque corresponding to each speed.

¹ Régimen nominal es el de la potencia nominal del motor. Régimen intermedio es el que corresponde al par máximo del motor siempre que esté comprendido entre el 60% y el 75% del nominal. Si el par máximo se alcanza por debajo de 60% del régimen nominal o por encima del 75 %, el régimen intermedio es el que corresponde a este porcentaje.

² Se refiere al par motor expresado como porcentaje del par máximo correspondiente a cada régimen de giro.

The following equations are used to convert these units (Heseding & Daskalopoulos, 2006; Asociación Alemana de Fabricantes de Maquinaria (VDMA), 2011):

$$EP_i = EV_{i,d} \cdot \left(\frac{M_i}{M_{Exh,d}} \cdot \frac{m_{Exh,d}}{N_e} \right) = EV_{i,w} \cdot \left(\frac{M_i}{M_{Exh,w}} \cdot \frac{m_{Exh,w}}{N_e} \right), \quad (1)$$

Where:

EP_i - mass of the contaminant i, corresponding to the output power N_e , ($g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$).

$EV_{i,d}$ - value of exhaust emission on dry base of component i, volume (ppm).

$EV_{i,w}$ - value of exhaust emission on wet base of component i, volume (ppm).

M_i - molecular mass of component i, ($g \cdot mol^{-1}$).

$M_{Exh,d}$ - molecular mass of dry base exhaust gases, ($g \cdot mol^{-1}$).

$M_{Exh,w}$ - molecular mass of the wet base exhaust gases, ($g \cdot mol^{-1}$).

$m_{Exh,d}$ - dry mass exhaust flow ($kg \cdot h^{-1}$).

$m_{Exh,w}$ - wet mass exhaust flow, ($kg \cdot h^{-1}$).

N_e - output power (effective) of the motor corresponding to the measuring point, (kW).

g_e - specific fuel consumption corresponding to the measurement point, ($g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$).

The general conversion of the concentration of exhaust gases (ppm or%) to specific consumption ($g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$) for heavy vehicles is expressed as follows (Heseding & Daskalopoulos, 2006; Asociación Alemana de Fabricantes de Maquinaria (VDMA), 2011):

$$CO(g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}) = 3.591 \cdot 10^{-3} \cdot CO(ppm); \quad (2)$$

$$NO_x(g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}) = 6.636 \cdot 10^{-3} \cdot NO_x(ppm); \quad (3)$$

$$HC(g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}) = 2.002 \cdot 10^{-3} \cdot HC(ppm); \quad (4)$$

$$CO_2(g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}) = 63.470 \cdot 10^{-3} \cdot CO_2(vol \%); \quad (5)$$

The EPA and EURO international standards for vehicle emissions for light and passenger vehicles are generally reported in $g \cdot km^{-1}$. The following empirical equations are used for conversion (VDMA, 2011).

$$CO(g \cdot km^{-1}) = 9.66 \cdot 10^{-3} \cdot CO(ppm); \quad (6)$$

$$NO_x(g \cdot km^{-1}) = 28.56 \cdot 10^{-3} \cdot NO_x(ppm); \quad (7)$$

$$HC(g \cdot km^{-1}) = 5.71 \cdot 10^{-3} \cdot HC(ppm); \quad (8)$$

$$CO_2(g \cdot km^{-1}) = 166.3 \cdot CO_2(vol \%); \quad (9)$$

The average values obtained in $g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$ or $g \cdot km^{-1}$ for each exhaust component i analyzed at the x points of the cycle test corresponding to mode C1 (with j = 8 total points) in Table 2, with their corresponding weighted W_x values for each point, are calculated using the following equation.

$$E_i = \frac{\sum_{x=1}^j EP_{xi} \cdot W_x}{j} \quad (10)$$

Para convertir estas unidades se utilizan las ecuaciones siguientes (Heseding y Daskalopoulos, 2006; Asociación Alemana de Fabricantes de Maquinaria (VDMA), 2011):

donde:

EP_i - masa del contaminante i, correspondiente a la potencia de salida N_e , ($g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$).

$EV_{i,d}$ - valor de emisión de escape en base seca del componente i, volumen (ppm).

$EV_{i,w}$ - valor de emisión de escape en base húmeda del componente i, volumen (ppm).

M_i - masa molecular del componente i, ($g \cdot mol^{-1}$).

$M_{Exh,d}$ - masa molecular de los gases de escape en base seca, ($g \cdot mol^{-1}$).

$M_{Exh,w}$ - masa molecular de los gases de escape en base húmeda, ($g \cdot mol^{-1}$).

$m_{Exh,d}$ - flujo másico de escape en base seca, ($kg \cdot h^{-1}$).

$m_{Exh,w}$ - flujo másico de escape en base húmeda, ($kg \cdot h^{-1}$).

N_e - potencia de salida (efectiva) del motor correspondiente al punto de medición, (kW).

g_e - consumo específico de combustible correspondiente al punto de medición, ($g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$).

La conversión general de la concentración de gases de escape (ppm o %) al consumo específico ($g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$) para vehículos pesados se expresa de la siguiente manera (Heseding y Daskalopoulos, 2006; Asociación Alemana de Fabricantes de Maquinaria (VDMA), 2011):

$$CO(g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}) = 3.591 \cdot 10^{-3} \cdot CO(ppm); \quad (2)$$

$$NO_x(g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}) = 6.636 \cdot 10^{-3} \cdot NO_x(ppm); \quad (3)$$

$$HC(g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}) = 2.002 \cdot 10^{-3} \cdot HC(ppm); \quad (4)$$

$$CO_2(g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}) = 63.470 \cdot 10^{-3} \cdot CO_2(vol \%); \quad (5)$$

Las normas internacionales EPA y EURO de emisiones vehiculares para vehículos livianos y de pasajeros generalmente se informan en ($g \cdot km^{-1}$). Para conversión se utilizan las siguientes ecuaciones empíricas (Heseding y Daskalopoulos, 2006; Asociación Alemana de Fabricantes de Maquinaria (VDMA), 2011).

$$CO(g \cdot km^{-1}) = 9.66 \cdot 10^{-3} \cdot CO(ppm); \quad (6)$$

$$NO_x(g \cdot km^{-1}) = 28.56 \cdot 10^{-3} \cdot NO_x(ppm); \quad (7)$$

$$HC(g \cdot km^{-1}) = 5.71 \cdot 10^{-3} \cdot HC(ppm); \quad (8)$$

$$CO_2(g \cdot km^{-1}) = 166.3 \cdot CO_2(vol \%); \quad (9)$$

Los valores promedios obtenidos en ($g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$) o ($g \cdot km^{-1}$) para cada componente de escape i analizado en los x puntos del ciclo de prueba correspondiente al modo C1 (con j=8 puntos totales) de la Tabla 2, con sus correspondientes valores ponderados W_x para cada punto, se calculan utilizando la ecuación siguiente.

$$E_i = \frac{\sum_{x=1}^j EP_{xi} \cdot W_x}{j} \quad (10)$$

RESULTS AND DISCUSSION

The variation of NO_x nitrogen oxides as a function of the charge in the regulator zone is shown in Figure 1. It is observed that NO_x concentrations are higher for lower speed regimes. This is due to the fact that in that area of work of the engine, the lower the turning speed, the better the combustion process. It is also observed that the higher the load for the same speed regime, the greater the concentration of NO_x due to a greater amount of fuel injected.

The variation of oxygen concentration O₂ as a function of the load for different engine rotation regimes is represented in Figure 2. It is observed that the higher the concentration of oxygen increases at a higher speed, while when the load increases the same speed regime, the concentration of this component decreases. The above is related to the air / fuel ratio, that is, the lambda λ index for each work regime.

The variation of the HC hydrocarbon content of the exhaust gases as a function of the power for different constant engine speeds in the regulation zone is shown in Figure 3. It is observed that for the same speed regime, as the power, the concentration of HC decreases and that for the same load (fuel supply) as the speed increases, the concentration of HC also increases. The above has as main factor the quality of the combustion process: as the speed increases, the duration of combustion (in each cycle) increases, because the phase of rapid combustion increases or at a constant volume. Also, at a lower load less fuel injected and lower HC content in the exhaust gases.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La variación de los óxidos de nitrógeno NO_x en función de la carga en la zona del regulador se muestran en la figura 1. Se observa que las concentraciones de NO_x son mayores para regímenes de velocidad menores. Lo anterior se debe a que en esa zona de trabajo del motor, mientras menor sea la velocidad de giro, mejor será el proceso de la combustión. También se observa que a mayor carga para el mismo régimen de velocidad mayor será la concentración de NO_x producto de una mayor cantidad de combustible inyectado.

La variación de la concentración de oxígeno O₂ en función de la carga para diferentes regímenes de giro del motor se representa en la figura 2. Se observa que a mayor velocidad para una misma carga crece la concentración de oxígeno, mientras que cuando aumenta la carga para un mismo régimen de velocidad decrece la concentración de este componente. Lo anterior está relacionado con la relación aire/combustible, o sea, la índice lambda para cada régimen de trabajo.

La variación del contenido de hidrocarburos HC de los gases de escape en función de la potencia para diferentes velocidades constantes del motor en la zona de regulación se exponen en la figura 3. Se observa que, para un mismo régimen de velocidad, a medida que aumenta la potencia disminuye la concentración de HC y que para una misma carga (suministro de combustible) a medida que aumenta la velocidad, aumenta también la concentración de HC. Lo anterior tiene como factor principal la calidad del proceso de combustión: a medida que aumenta la velocidad la duración de la combustión (en cada ciclo) aumenta, porque aumenta la fase de la combustión rápida o a volumen constante. También, a menor carga menor cantidad de combustible inyectado y menor contenido de HC en los gases de escape.

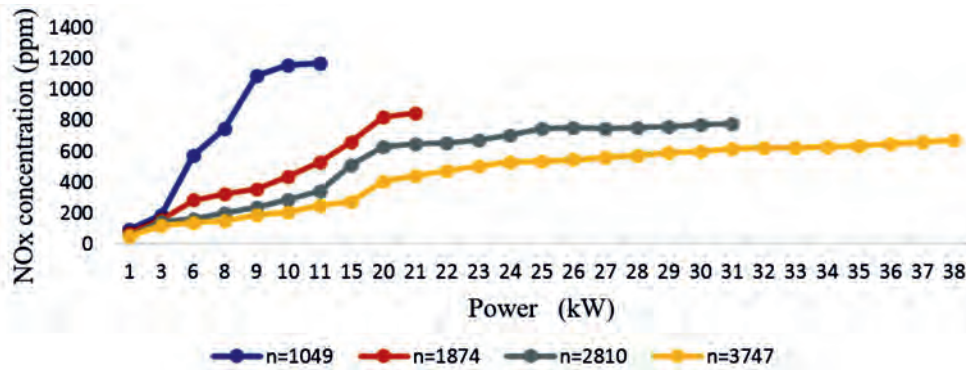


FIGURE 1. Variation of NO_x content in the exhaust as a function of the load for different speed regimes (100, 75, 50 and 25%).
 FIGURA 1. Variación del contenido NO_x en el escape en función de la carga para diferentes regímenes de velocidad (100, 75, 50 y 25%).

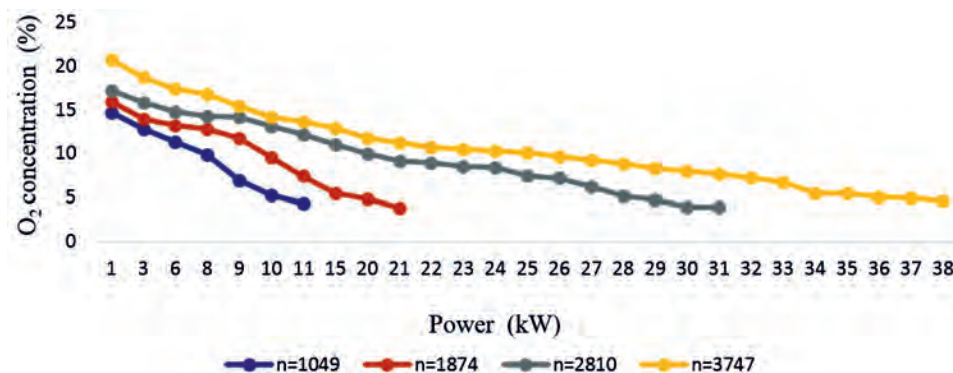


FIGURE 2. Variation of O₂ content in the exhaust as a function of the load for different speed regimes (100, 75, 50 and 25%).
 FIGURA 2. Variación del contenido O₂ en el escape en función de la carga para diferentes regímenes de velocidad (100, 75, 50 y 25%).

The variation of CO₂ hydrocarbon content of the exhaust gases as a function of the power for different constant engine speeds in the regulation zone is shown in Figure 4. It is observed that at a lower speed regime for the same load, the concentration carbon dioxide increases; while for the same speed regime, the CO₂ concentration increases with increasing load.

La variación del contenido de hidrocarburos CO₂ de los gases de escape en función de la potencia para diferentes velocidades constantes del motor en la zona de regulación se exponen en la Figura 4. Se observa que a menor régimen de velocidad para una misma carga, la concentración de dióxido de carbono aumenta; mientras que para un mismo régimen de velocidad, la concentración de CO₂ crece con el aumento de la carga.

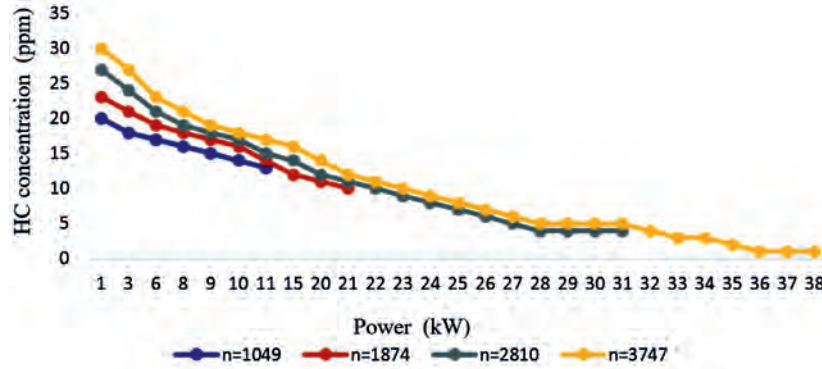


FIGURE 3. Variation of HC content in the exhaust as a function of the load for different speed regimes (100, 75, 50 and 25%).
 FIGURA 3. Variación del contenido HC en el escape en función de la carga para diferentes regímenes de velocidad (100, 75, 50 y 25%).

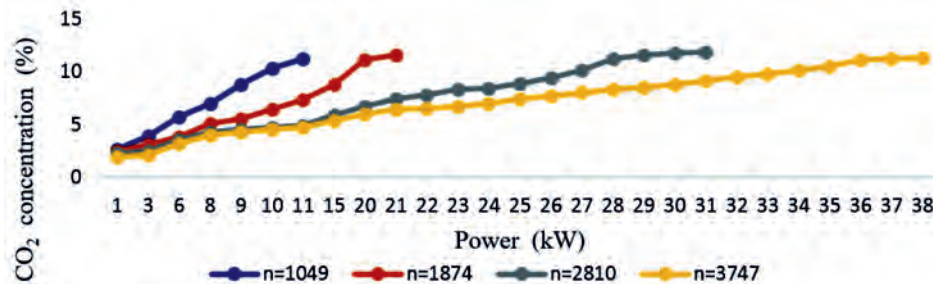


FIGURE 4. Variation of CO₂ content in the exhaust as a function of the load for different speed regimes (100, 75, 50 and 25%).
 FIGURA 4. Variación del contenido CO₂ en el escape en función de la carga para diferentes regímenes de velocidad (100, 75, 50 y 25%).

The concentrations of the exhaust gases analyzed as a function of the lambda λ index for two constant loads (100 and 75%) are shown in Figures 5 and 6. In these graphs, at constant loads, the concentrations of CO₂, O₂, HC and NO_x vary depending on the lambda index and the corresponding rotation speeds. From λ≈2 to 5.8, the motor operates in the regulation zone (Figure 5).

Las concentraciones de los gases de escape analizados en función del índice lambda para dos cargas constantes (100 y 75%) se representan en las Figuras 5 y 6. En estos gráficos a cargas constantes, varían las concentraciones de CO₂, O₂, HC y NO_x en función del índice lambda y las velocidades de rotación correspondiente. Desde hasta 5.8 de la figura 5 el motor opera en la zona de regulación.

It is observed that the poorest mixtures (highest lambda value) are obtained at the maximum speed and the least poor in the area near the maximum torque. The NO_x and CO₂ contents decrease while the mixtures are poorer, while those of O₂ and HC increase.

Se observa que las mezclas más pobres (lambda de mayor valor) se obtienen a la velocidad máxima y la menos pobre en la zona cercana al máximo torque. Los contenidos de NO_x y CO₂ disminuyen mientras las mezclas son más pobres, mientras los de O₂ y HC se incrementan.

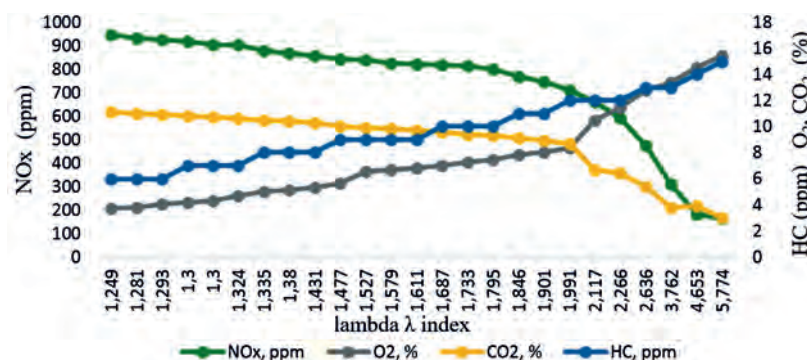


FIGURE 5. Variation of the O₂, CO₂, HC and NO_x contents in the exhaust as a function of the lambda index or air coefficient λ for 100% load.
 FIGURA 5. Variación del contenido O₂, CO₂, HC y NO_x en el escape en función del índice lambda o coeficiente de aire para el 100% de carga.

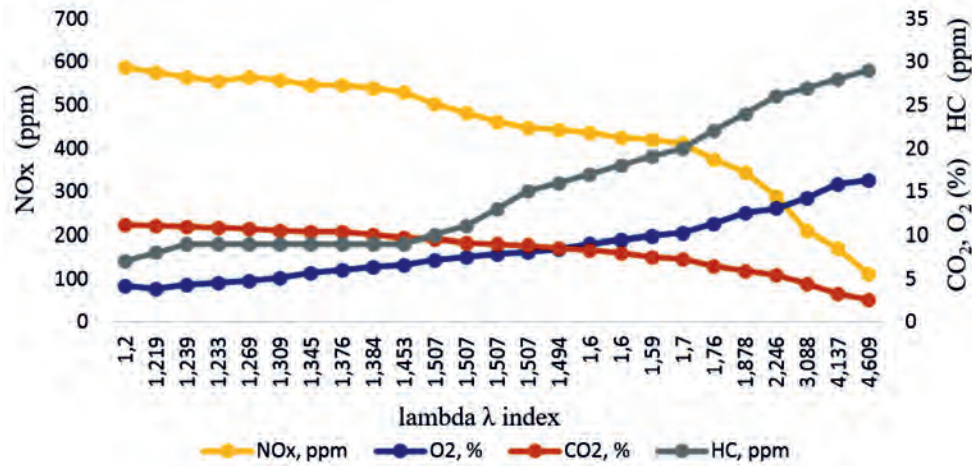


FIGURE 6. Variation of the O₂, CO₂, HC and NO_x contents in the exhaust as a function of the lambda index or air coefficient λ for 75% load.
 FIGURA 6. Variación del contenido O₂, CO₂, HC y NO_x en el escape en función del índice lambda o coeficiente de aire para el 75% de carga.

Equations (2-5) are used to determine the value of each exhaust gas component defined by ISO 8178-4:07: (2007). Table 3 shows the average values obtained for each component in the regimes (points) established by mode C1. The weighted average value was determined by substituting the corresponding values from the table, applying equation (10).

Para determinar el valor de cada componente de gases de escape que define la norma ISO 8178-4:07: (2007), se utilizan las ecuaciones (2-5). En la Tabla 3 aparecen los valores promedios obtenidos para cada componente en los regímenes (puntos) que establece el modo C1. El valor del promedio ponderado se determinó sustituyendo los valores correspondientes de la tabla, aplicando la ecuación (10).

TABLE 3. Values for the test and calculation of the concentration of exhaust components according to ISO 8178-4:07: (2007)
 TABLA 3. Valores para la prueba y el cálculo de la concentración de componentes de escape según ISO 8178-4:07: (2007)

Parameter	Measuring points								Average
C1 mode	1	2	3	4	5	6	7	8	-
Speed	Nominal			Maximum torque				R ¹	-
Torque (%)	100	75	50	10	100	75	50	10	-
Torque (Nm)	98	74	49	9.8	108	81	54	7	-
Weighing	0.15			0.10				0.15	-
CO ₂ (%)	11.1	8.5	6.2	3.5	11.6	7.8	4.9	0	7.475
O ₂ (%)	4.6	8.31	11.7	15	3.75	9.48	13.5	20.7	10.97
NO _x (ppm)	720	593	405	120	848	662	348	0	455.5
HC (ppm)	1	6	11	24	10	12	16	20	11.9

R¹ - slow motion. R¹ - movimiento lento.

Substituting for their corresponding values from Table 3 in the equations:

$$NO_x = 6.636 \cdot 10^{-3} \cdot NO_x = 6.636 \cdot 10^{-3} \cdot 455.5 = 30.23 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$HC = 2.002 \cdot 10^{-3} \cdot HC = 2.002 \cdot 10^{-3} \cdot 11.9 = 0.024 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$CO_2 = 63.470 \cdot 10^{-3} \cdot CO_2 = 63.470 \cdot 10^{-3} \cdot 7.475 = 0.474 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$CO = 3.591 \cdot 10^{-3} \cdot CO = CO = 3.591 \cdot 10^{-3} \cdot 131 = 0.47 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$$

When comparing these values obtained for this engine, under the test conditions, with the limit values established in the Stage standards it is concluded that the concentrations of HC + NO_x limits of 4.7 gkW⁻¹ h⁻¹, are much lower than 30.25 gkW⁻¹ h⁻¹ obtained. The CO₂ component is not regulated, although it is known to be an important GHG. The CO content = 0.47 gkW⁻¹ h⁻¹ is below the limit, characteristic for diesel engines that work with poor mixtures.

Sustituyendo por sus valores correspondientes de la Tabla 3 en las ecuaciones se obtienen:

$$NO_x = 6.636 \cdot 10^{-3} \cdot NO_x = 6.636 \cdot 10^{-3} \cdot 455.5 = 30.23 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$HC = 2.002 \cdot 10^{-3} \cdot HC = 2.002 \cdot 10^{-3} \cdot 11.9 = 0.024 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$CO_2 = 63.470 \cdot 10^{-3} \cdot CO_2 = 63.470 \cdot 10^{-3} \cdot 7.475 = 0.474 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$CO = 3.591 \cdot 10^{-3} \cdot CO = CO = 3.591 \cdot 10^{-3} \cdot 131 = 0.47 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$$

Al comparar estos valores obtenidos para este motor, en las condiciones de prueba, con los valores límites establecidos en las normas Stage se concluye que las concentraciones de HC + NO_x límites de 4.7 gkW⁻¹ h⁻¹, son muy inferiores a las 30.25 gkW⁻¹ h⁻¹ obtenidos. El componente CO₂ no está reglamentado, aunque se conoce que es un GEI importante. El contenido de CO = 0.47 gkW⁻¹ h⁻¹ está por debajo del límite, característico para los motores diésel que trabajan con mezclas pobres.

CONCLUSIONS

- The following statements for the exhaust gases of a diesel engine are generalized from the analysis of the results obtained:
- The NO_x concentrations increase with the decrease in the speed of rotation of the engines because the conditions for a better-quality combustion improve. The NO_x concentration increases with increasing engine load, keeping the engine speed constant, due to the greater amount of fuel injected.
- The oxygen concentration O₂ increases when the engine speed is increased while keeping the load constant because the combustion quality worsens. The O₂ concentration decreases when the load grows for the same engine speed because the mixture formed is less poor (the lambda λ index decreases).
- The concentration of HC decreases when the load increases keeping the speed regime constant, because the mixture will be less poor, the combustion speed increases and its quality. The concentration of HC hydrocarbons increases as the engine speed increases while maintaining the constant load, because the duration of combustion increases (in each cycle), because the phase of rapid or constant volume combustion increases and the combustion quality.
- The CO₂ concentration increases when the engine speed for the same load decreases, because the combustion process is shorter, and its quality improves. The concentration of CO₂ increases when the load grows for the same speed regime, because more fuel is injected, the mixture is less poor, and the fuel is better burned.
- In the working area of the engine as the torque increases, the concentrations of NO_x and CO₂ decrease, due to better combustion because the volumetric efficiency is increased. The opposite occurs in the regulation zone with the increase in the speed of rotation. The opposite happens with O₂ and HC.
- The values obtained from exhaust gas emissions do not meet the established limits of the current Stage, Tier, EPA or Euro standards, because the engine gas treatment system installed in the test bench does not meet current requirements.

REFERENCES

- ASOCIACIÓN ALEMANA DE FABRICANTES DE MAQUINARIA (VDMA): *Exhaust emission legislation Diesel and gas engines*, Inst. Asociación Alemana de Fabricantes de Maquinaria (VDMA), Frankfurt am Main, Germany, 2011.
- BOSCH: *Diesel Engine Management. Systems and Components*, Duale Hochschule Baden-Württemberg Friedrichshafen, Ed. Springer, K. Rief ed., Germany, 2014, ISBN: 978-3-658-03980-6.
- CEPRAE UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO: *Centro de Percepción Remota & Análisis Espacial, CEPRAE Universidad Autónoma Chapingo Km 38.5, [en línea]*, Inst. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Chapingo CP 56230 Edo. México, 2019, *Disponible en: ldiakited@taurus.chapingo.mx*.
- GONZÁLEZ, M.J.M.; ALVARADO, D.A. I; URUEÑA, C.H.G.: "Multivariate analysis of performance and emissions for internal combustion engines running with gasoline-ethanol blends", *Ingeniería Energética*, 36(3): 232-242, 2015, ISSN: 1815-5901.
- HERNÁNDEZ, A.H.D.; MATEO, A.D.; JIMÉNEZ, C.G.; MANTILLA, J.M.: "Comparación de las emisiones en motores que utilizan combustible e0 y e10 en régimen transitorio", *Ingeniería Energética*, 39(1): 3-12, 2018, ISSN: 1815-5901.
- HESEDING, M.; DASKALOPOULOS, P.: "Exhaust emission legislation-diesel-and gas engines", *VDMA, Frankfurt am Main*, 2006.

CONCLUSIONES

- Del análisis de los resultados obtenidos se generaliza las siguientes afirmaciones para los gases de escape de un motor diésel:
- Las concentraciones de NO_x aumentan con la disminución de la velocidad de giro de los motores debido a que mejoran las condiciones para una combustión de mejor calidad. La concentración de NO_x aumentan con el incremento de la carga del motor, manteniendo constante la velocidad de giro del motor, debido a la mayor cantidad de combustible inyectado.
- La concentración de oxígeno O₂ aumenta cuando se eleva el régimen de velocidad del motor manteniendo constante la carga debido a que empeora la calidad de la combustión. La concentración de O₂ disminuye cuando crece la carga para un mismo régimen de velocidad del motor debido a que la mezcla que se forma es menos pobre (el índice lambda disminuye).
- La concentración de HC disminuye cuando aumenta la carga manteniendo constante el régimen de velocidad, debido a que la mezcla será menos pobre, la velocidad de la combustión aumenta y también la calidad de esta. La concentración de hidrocarburos HC aumenta a medida que crece la velocidad de giro del motor manteniendo la carga constante, debido a que aumenta la duración de la combustión (en cada ciclo), porque aumenta la fase de la combustión rápida o a volumen constante y disminuye la calidad de la combustión.
- La concentración de CO₂ aumenta cuando disminuye el régimen de velocidad del motor para una misma carga, debido a que el proceso de combustión es más corto y mejora su calidad. La concentración de dióxido de carbono CO₂ aumenta cuando crece la carga para un mismo régimen de velocidad, debido a que se inyecta más combustible, la mezcla es menos pobre y se quema mejor el combustible.
- En la zona de trabajo del motor a medida que aumenta el torque, disminuye y la concentración de NO_x y CO₂ aumentan, producto de una mejor combustión porque se incrementa el rendimiento volumétrico. Lo contrario ocurre en la zona de regulación con el incremento de la velocidad de giro. Inversamente ocurre con el O₂ y los HC.
- Los valores obtenidos de emisiones de gases de escape no cumplen con los límites establecidos de las normas Stage, Tier, EPA o Euro vigentes, debido a que el sistema de tratamiento de gases del motor instalado en el banco de pruebas no cumple las exigencias actuales.

ISO 8178-4:07: *Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement. Part 4 – Steady – state test cycles for different engines applications*, Vig de 2007.

LODICE, P.; SENATORE, A.; LANGELLA, G.; AMORESANO, A.: “Effect of ethanol–gasoline blends on CO and HC emissions in last generation SI engines within the cold-start transient: An experimental investigation”, *Applied energy*, 179: 182-190, 2016, ISSN: 0306-2619.

MANTILLA, G.J.M.; GARZÓN, R.J.; GALEANO, U.C.H.: “Desempeño y emisiones de un motor de combustión interna con combustible dual Diesel-Gas natural”, *Ingeniería Energética*, 36(1): 27-37, 2015, ISSN: 1815-5901.

PÉREZ, D.D.G.: “Estudio de emisiones contaminantes utilizando combustibles locales”, *INNOVA Research Journal*.,: 23-34, 2018, ISSN: 2477-9024.

PUENTE, E.; REMACHE, A.: “Análisis de las curvas características y la opacidad de un motor JO5ETC16173 con la implementación de un turbocargador”, *INNOVA Research Journal*, 2(10.1): 97-108, 2017, ISSN: 2477-9024.

SOCA, C.J.R.; CHAVARRÍA, I.S.; MARTÍNEZ, R.M.: “Curvas características de velocidad y carga del motor Volkswagen 1.9 SDi”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28(2): 88-100, 2019, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.

SUAREZ, B.R.; ZARDINI, A.; KEUKEN, H.; ASTORGA, C.: “Impact of ethanol containing gasoline blends on emissions from a flex-fuel vehicle tested over the Worldwide Harmonized Light duty Test Cycle (WLTC)”, *Fuel*, 143: 173-182, 2015, ISSN: 0016-2361.

TIPANLUISA, L.E.; REMACHE, A.P.; AYABACA, C.R.; REINA, S.W.: “Emisiones Contaminantes de un Motor de Gasolina Funcionando a dos Cotas con Combustibles de dos Calidades”, *Información tecnológica*, 28(1): 03-12, 2017, ISSN: 0718-0764.

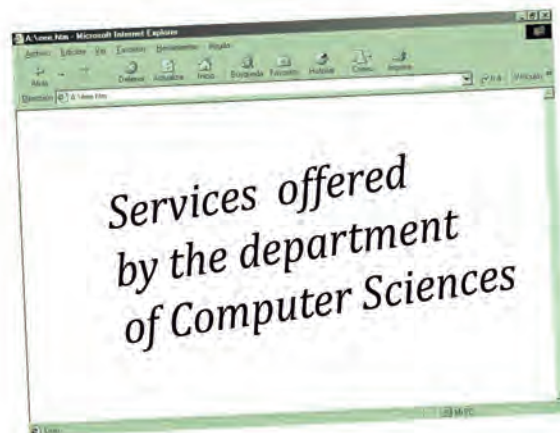
José Ramón Soca-Cabrera, Profesor Titular, Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México, e-mail: jsoca@yahoo.com

The author of this work declare no conflict of interests.

This item is under license Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher.

AGRARIAN UNIVERSITY OF HAVANA



DESIGN AND ASSEMBLY OF NETWORK PROJECTS
DESIGN AND ASSEMBLY OF EDUCATIONAL COMPUTER SCIENCES

Courses

- **Web Page Desing**
- **Programing Under Web Environment**
- **Programaming Under Windows Environment**
- **Geographic Information System**
- **Multimedia Desing**
- **Educational Television**