

ANÁLISIS DE EMISIONES TRANSITORIAS DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO AL ESCAPE DE UN MOTOR DE CICLO OTTO MULTIPUNTO A PARTIR DEL COMPORTAMIENTO DE LA RELACIÓN AIRE – COMBUSTIBLE Y DEL AVANCE DEL ENCENDIDO

Paúl A Montúfar Paz, Milton Quinga, Vicente Romero Hidalgo, Olga Barrera Cárdenas
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica,
Riobamba, Ecuador

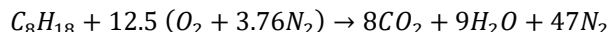
paul.montufar@esPOCH.edu.ec, milton.quina@esPOCH.edu.ec,
vicente.romero@esPOCH.edu.ec, olga.barrera@esPOCH.edu.ec

Abstract— This research analyzes the emissions of oxides of nitrogen, NOx, emitted by an internal combustion engine, indirect injection multipoint Renault 1.8 L and its behavior in function of the values of lambda to suggest strategies of control of the oxygen content, with a better Functional sampling at the time, to the exhaust of the engine in order to mitigate the production of these toxic emissions. The analysis of the production of these emissions was done experimentally in an engine dynamometer where the engine was subjected to different conditions of load and revolutions to find the habitual behavior of a motor of a light vehicle before the information obtained by the Electronic Control Module From the monitoring performed by a conventional high and low oxygen probe. The study aims to focus the incidence of this type of monitoring on the production of NOx and to propose alternatives that offer a greater range of measurements offering advantages from the environmental point of view to a compound that has a high degree of toxicity and affectation on the respiratory system causing a significant increase in cases of lung cancer.

Index Terms— NOx, lambda, dynamometer, oxygen sensor, ignition advance

I. INTRODUCCION

El motor de combustión interna con encendido provocado, SI o MEP, responde idealmente al comportamiento del ciclo Otto, el mismo que utiliza a la gasolina como su principal fuente de energía para generar el trabajo de propulsión requerido. Partiendo de un análisis termodinámico del motor en el cuál el Iso-octano, C_8H_{18} , entrega su poder calorífico inferior, PCI, al ciclo aproximadamente $42500 \frac{KJ}{Kg}$, se requiere de una relación estequiométrica entre los reactivos y productos.



La ecuación 1 muestra el balance químico que debe existir entre los compuestos para que se logre la mezcla entre el aire y combustible de un modo ideal y aunque esto difícilmente se cumple debido al carácter inestable de un motor donde cada una de sus variables cambian permanentemente, podemos apreciar como en los reactivos existe una importante presencia del nitrógeno, 79% en volumen del aire. Si bien antes de combustionarse la mezcla, el nitrógeno es un gas inerte, después de reaccionar en la cámara de combustión y

ante una elevada temperatura, superior a los 1800 °C, los óxidos de nitrógeno empiezan a formarse, los mismos que son causantes de un sinnúmero de problemas tales como: la lluvia ácida, incremento de problemas respiratorios y cáncer pulmonar entre otros [1].

El motor de encendido por combustión, SI, al ser una maquina termica generará altas temperaturas en la cámara y con ello en mayor o menor medida la producción de los NOx, más aún a mayores índices de carga y conforme el motor incrementa su recorrido, emisiones que, junto al monóxido de carbono, CO, los óxidos de azufre, SOx y el dióxido de carbono, CO2, contribuyen al efecto invernadero. [2]

Ante las temperaturas alcanzadas en la combustión en el interior de las cámaras del motor los óxidos de nitrógeno se forman en la siguiente escala de mayor a menor: $NO, NO_2, N_2O, NO_3, N_2O_3$. Siendo los principales los tres primeros.[3][4]

En el caso del óxido nítrico su formación responde principalmente a un mecanismo térmico, donde el nitrógeno de la atmosfera se oxida rompiendo su fuerte enlace triple presente entre los átomos del elemento y en base al mecanismo extendido de Zeldovich se producen las siguientes reacciones mostradas en las ecuaciones 2,3, 4 respectivamente.



En vista de la alta energía requerida para la formación de estas reacciones, 319 KJ/Kmol para el caso de la ecuación 2, se evidencia la relación con altas temperaturas de formación, en tanto⁽¹⁾ que para temperaturas inferiores a los 1800 K el mecanismo térmico de formación pierde importancia. [2]

La velocidad de reacción de formación del óxido nitroso es bastante inferior al tiempo de combustión lo que indica que la formación del gas es un proceso postcombustión, por lo cual surge la hipótesis de buscar las causas de la producción de óxido nítrico dentro y fuera del proceso de combustión como en aspectos característicos de la cámara como presión y temperatura. (Partially pre-mixed auto-ignition of gasoline to attain low , 2007) Si bien existe otros compuestos como el óxido nitroso NO2 que es

inversamente proporcional a la temperatura este componente siendo el segundo en concentración de la familia de los NOx no representa más del 20% del total de estos compuestos. [5]

El estudio realizado muestra la dependencia existente entre los óxidos de nitrógeno NOx, respecto a factores relacionados a la combustión, pero sobre todo a las características propias alcanzadas en el cilindro como la relación lambda λ y el avance de encendido a fin de plantear estrategias que logren menguar la producción de estos tóxicos compuestos.

II. DESARROLLO

Motor y Dinamómetro

Las mediciones de los óxidos de nitrógeno en función de los diferentes parámetros se las realizó en un motor Renault 1.1 l D4F740, Tabla 1, utilizando un dinamómetro de motor Borghi & Saveri el mismo que utiliza un mecanismo de control magnético. Tabla 2.

Tabla 1. Ficha técnica del motor Renault D4F740 donde se realizaron pruebas

Descripción	Valor	Unidad
Tipo motor	Normalmente aspirado	
Código	D4F740	
Combustible	Gasolina	
Cilindros	4	
Diámetro	69	mm.
Carrera	76.8	mm.
Relación de compresión	9.8:1	
Potencia	55@5500 rpm	Kw
Torque	107@3750 rpm	Nm
Año	2012	

Tabla 2, Especificaciones Dinamómetro

Marca	Borghi & Saveri
Referencia	FE600-SD
Tipo	Eddy Current
Rpm Max	13500
Medición torque	850 Nm – 0.12%fs
Potencia	493 hp
Precisión	0.5%

Analizador de Gases

El analizador de gases utilizado es el AVL modelo Ditest CDS, el cual permite obtener lecturas de CO₂, CO, O₂, NO, NO₂, HCS, con una resolución de 1 ppm utilizando como mecanismo de monitoreo near – infrared. El analizador además es compatible para mediciones a vehículos a diésel.

El analizador cumple con la norma 2004/22/EC (MID); OIML R99 Class 0.

Módulo de Control Electrónico, Ecu

El módulo de control electrónico ECU, utilizado para el monitoreo y control del motor es una Fh Electronics basado en el mapeo original del fabricante para el motor. El módulo electrónico permite controlar la apertura de la mariposa, ingresar el mapeo de inyección e incluye valores de corrección por altitud.

Las entradas disponibles son: temperatura del agua y aceite, presión del colector, sonda lambda, señal del cigüeñal CKP, árbol de levas CMP, 4 lectores de frecuencia, 8 entradas digitales Pull up y Pull down.

Las salidas para los actuadores son: 4 salidas de encendido de 10 A y 4 de 3 A, control de acelerador electrónico, 8 salidas digitales con protección y diagnóstico incluido, 4 salidas PWM para electroválvulas, 1 salida de tacómetro, 4 salidas de encendido y de inyectores más dos señales PWM para válvulas solenoides.

El protocolo de comunicación: Estándar MCD1 con HMI, protocolo CAN, puerto asíncrono RS232 56Kbit/s y 1 Puerto Ethernet 10 BASE-T para el flash de estrategia y comunicación con HMI.

Diseño de Experimentos, DOE

Como matriz de medición se consideró un diseño de experimentos DOE, en el cual estén presentes 3 factores: Velocidad del motor ω en rangos de 250 rpm, valor de lambda λ en rangos de 0.5 de 0.9 a 1.1 y carga del motor ζ de 25 a 100% en rangos de 25%, teniendo en cuenta que este último determina el porcentaje del torque total al que el motor se encuentra respecto a un 100% de abertura de la mariposa. Este DOE parte de 206 corridas con replica incluida por prueba donde se emparejan las diferentes combinaciones de factores posibles.

La escala para lambda λ se selecciono en base a las relaciones que suceden con más repitencia y son más significativas dentro del espectro de trabajo normal de un motor de combustión interna SI.

Los datos registrados fueron:

Tabla 3. Lecturas de variables del diseño de experimento, DOE

Parámetro	Representación	Unidad
Torque	ζ	Nm
Lambda	λ	
Avance de encendido	AE	°
Óxidos de nitrógeno	NOX	ppm
Velocidad del motor	ω	rpm
Dióxido de carbono	CO ₂	%
Carga		%

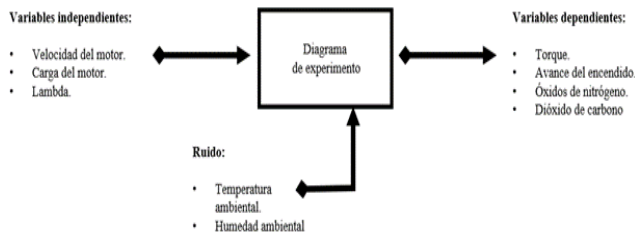


Fig. 1. Diagrama del experimento con las variables independientes, dependientes y ruido del motor sobre el dinamómetro y con el monitoreo del analizador de gases

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis porcentual de los componentes de los óxidos de nitrógeno muestra una mayoritaria presencia de óxido nítrico sobre el resto de formaciones llegando a ser en valores que oscilan entre el 95% y 99% en volumen respecto al dióxido de nitrógeno, NO_2 y al óxido nitroso N_2O .

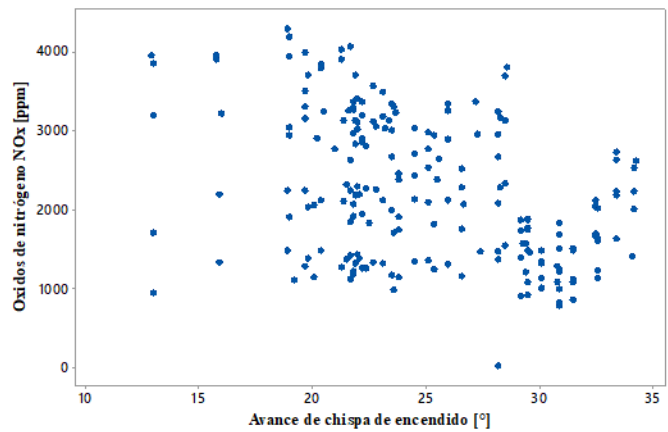
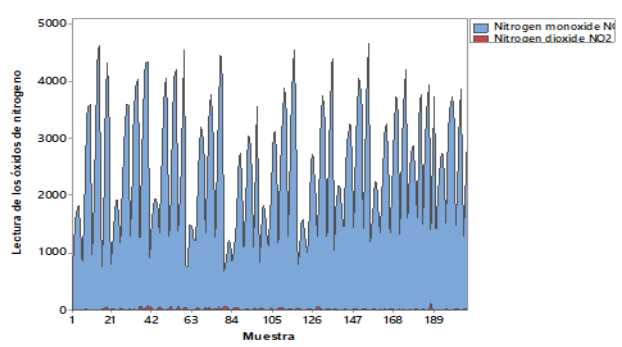


Fig. 4. Gráfica de dispersión para evaluar la correlación existente entre la producción de NOx y el avance de encendido

Al realizar el análisis de correlación entre las variables se aprecian los siguientes resultados:

La correlación existente entre el valor de lambda y los óxidos de nitrógeno es de 0.63 y con un valor de Pearson <0.05 nos indica con 95% de certeza que existe una alta correlación positiva entre las dos variables. Cuando se analiza respecto al valor del avance de encendido es posible concluir que su correlación es de -0.4 y con un valor de Pearson <0.05 nos indica con 95% de certeza que existe una mediana correlación negativa entre las dos variables.[6] [7]

A partir de estos resultados ayudado de una regresión es posible determinar el efecto de los predictores sobre la producción de NOx y se determina el efecto de lambda sobre el valor de los óxidos de nitrógeno. [4]

Fig. 2. Comparación en composición de los óxidos de nitrógeno.

Partiendo del análisis de las variables dependientes e independientes obtenidas a partir del diseño de experimentos de 3 factores se aprecia una fuerte correlación existente entre lambda y las emisiones de NOx y de igual modo entre el avance de encendido y los NOx. Para este propósito se midió la correlación existente entre las variables que mostraron ser buenos predictores para las emisiones de óxidos de nitrógeno, como lo es lambda y el avance de ignición como se puede visualizar en las figuras 2 y 3.[6]

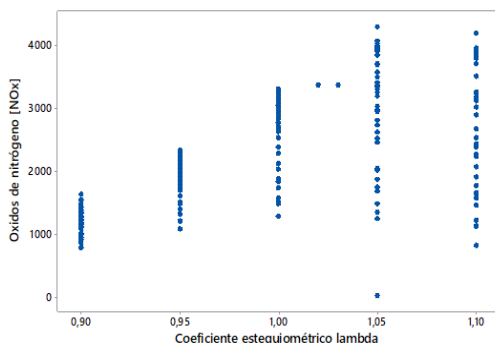


Fig. 3 Gráfica de dispersión para evaluar la correlación entre el valor de lambda y los óxidos de nitrógeno

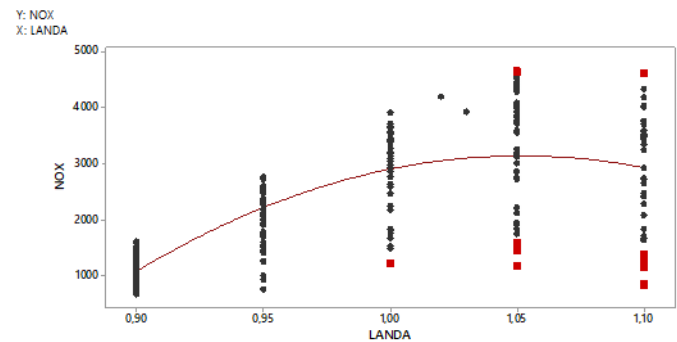


Fig. 5 Gráfica de regresión de los óxidos de nitrógeno a partir del valor de lambda

Los procesos de combustión donde existe una relación estequiométrica cercana a 15.4 y levemente empobrecidas muestran altas concentraciones de las emisiones de NOx y particularmente el óxido nítrico, NO, pues básicamente en esta zona existen altas concentraciones de super-equilibrio de radicales O y OH, si bien existieron valores atípicos en las muestras de laboratorio la ecuación de la regresión describe el comportamiento del fenómeno en un 52% y con un valor de $P < 0.05$ mostrando el comportamiento del contaminante a base de nitrógeno.[8][9]

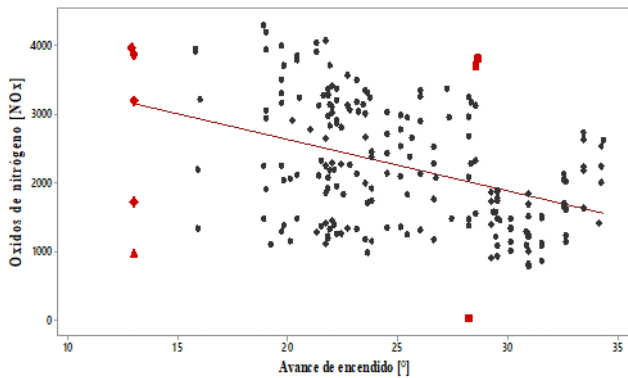


Fig. 6. Gráfica de dispersión de la producción de óxidos de nitrógeno, NOx, con regression

El ángulo de avance con que salta la chispa previo al punto muerto superior explica en menor medida la producción de NOx, se puede apreciar un R ajustado cercano al 20% y con una buena confiabilidad a la ecuación que describe el fenómeno $P < 0.05$, en base a esta curva es posible apreciar como el avance en ángulos inferiores aumentan la generación de NOx por una inadecuada combustión de la mezcla lo cual eleva en gran medida las temperaturas presentes en el cilindro principal causante de las emisiones pues en lugar de destinar la energía al movimiento del pistón cuando el avance de la chispa es el adecuado lo desperdicia en un incremento inadecuado en la temperatura de los gases. [9][10]

Altas temperaturas a causa de mezclas pobres y una mala sincronización de la combustión del Iso-octano, C8H18, son las causas principales para la formación de las emisiones estudiadas, en vista de que esta condición favorece la separación de las moléculas de oxígeno y nitrógeno, fuertemente unidas entre sí convirtiéndolos en radicales e incrementando la formación de óxidos de nitrógeno, figura 7.

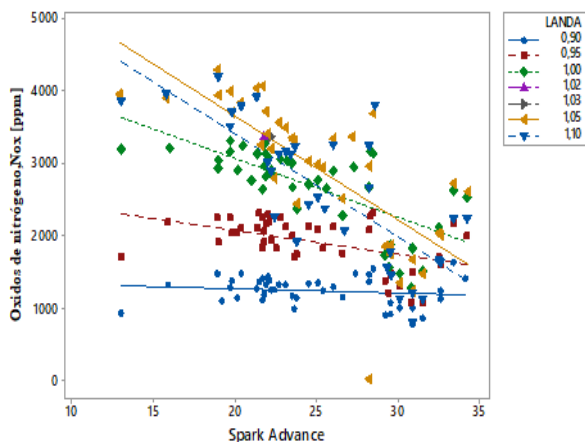


Fig. 7. Diagrama de dispersión por grupos del valor de lambda, Óxidos de nitrógeno NOx vs ángulo de avance.

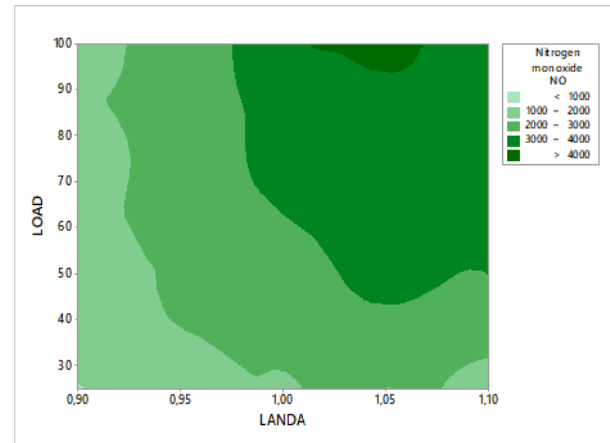


Fig. 8. Gráfica de concentración del monóxido de carbono en función de la proporción aire / combustible y de la carga impuesta al motor

A partir del análisis de resultados resultó útil encontrar las variables importantes que determinan la producción de óxidos de nitrógeno, el monóxido de nitrógeno incrementa sus valores para zonas de mezcla levemente pobre ($1 < \lambda < 1.05$) con cargas superiores al 40%, mientras que en mezclas ricas ($0.9 < \lambda < 0.95$) mantiene una producción inferior a las 1000 ppm conforme lo muestra la figura 10.

Al analizar la el comportamiento de los óxidos de nitrógeno se encuentra que en zonas de mezclas levemente empobrecidas y con el motor en el rango entre 1500 y 2000 rpm, así como entre 3500 y 4000 rpm también se produce un incremento importante en la producción de estas emisiones contaminantes (Fig. 9)

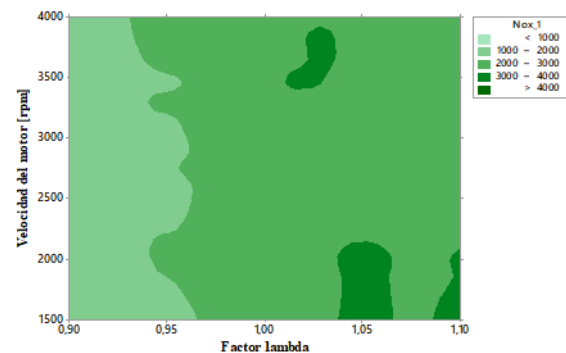


Fig. 9. Gráfico de contornos, en el eje x el factor lambda, en el eje y la velocidad del motor y los niveles expresados en función de la producción de los óxidos de nitrógeno, NOx

IV. CONCLUSIONES

Los óxidos de nitrógeno tienen un proceso de formación inherente a la propia combustión sin embargo sus diferentes componentes como son NO , NO_2 , N_2O , NO_3 , N_2O_3 , en orden de porcentajes en la composición, tienen diferentes factores que propician su formación.

En el caso del monóxido de carbono, NO, el principal componente dentro de este grupo como lo muestra la figura 2 tiene una marcada relación con el factor lambda, el avance de ignición y la carga a la que está sometida el motor.

Mientras la mezcla mantiene una proporción de aire combustible levemente inferiores a 13:1 disminuyen las emisiones de NO_x en tanto que un avance inadecuado del encendido, particularmente retrasado produce un incremento importante en dichas emisiones.

Motores funcionando a plena carga con déficit de oxígeno y con una mala sincronización del encendido provocan incrementos considerables en las emisiones sobre las 4000 ppm lo cual pone en manifiesto que parte de los factores que propician la formación de los óxidos tienen un origen postcombustión.

La cinética química del óxido nítrico es dominante respecto al óxido nitroso sin embargo existen zonas en las que la presencia del NO_2 es importante en zonas donde la conversión de NO a causa de alta concentración de oxígeno.

Una estrategia por desarrollar para el control de los óxidos de nitrógeno es el monitoreo de banda ancha de los sensores de oxígeno a fin de poder tener un mayor control sobre la mezcla en la combustión.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hill, S. C. y Douglas Smoot, L “*Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems*” Progress in Energy and Combustion Science, 2000, vol. 26 p. 417 – 458. [consultado el 5 de diciembre de 2017]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128500000113>
2. Payri, F y De Psantes, J *Motores de combustión alterna alternativos*. México. Editorial Reverte. 1016 p. p. 656 – 711
3. Degobert Paul. *Automobile et Pollution*. Editions Technip. Paris. 1992.
4. Payri, F., et al., (1979), “Soluciones a la contaminación de motores térmicos alternativos de automoción”, Monografía sobre medio ambiente, serie tecnología y recursos naturales, Vol. 1.
5. Crouse, W.H., (1971), “Automotive Emission Control”, McGraw-Hill, New York
6. Hollemans, B., et al. (1993), “Emission Comparison of LPG / Gasoline / diesel in passenger cars”, TNO road vehicle research institute.
7. Rajput R.K. *Internal Combustion Engines*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 879 p. p. 221-235.
8. Richard Stone. *Introduction to Internal Combustion Engines*. 3th ed. Londres. Antony Rowe Ltd. 635 p. p.98 – 109.
9. Pulkrabek Willard W. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. 2nd. Edition. Plateville. Ed. Prentice Hall. 395 p. p. 277-312
10. Bishop, G. A., Stedman D. H., De la Garza, J., and Dávalos, Vol. 31, No. 12. 3505-3510. *On-Road Remote Sensing of Vehicle Emissions in Mexico*. F., 1997. Environmental Science & Technology,
11. NaokiTakahashi. “The new concept 3-way catalyst for automotive lean-burn engine: NO_x storage and reduction catalyst” 1996. p. 63-69. disponible: [https://doi.org/10.1016/0920-5861\(95\)00173-5](https://doi.org/10.1016/0920-5861(95)00173-5)