

Estudio Del Comportamiento De Un Motor Ciclo Otto De Inyección Electrónica Respecto De La Estequiometría De La Mezcla Y Del Adelanto Al Encendido Para La Ciudad De Cuenca.

Rivera, Néstor¹; Chica, Juan¹; Zambrano, Iván²; García, Cristian¹

¹Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, Cuenca, Ecuador

²Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador

Resumen: La ciudad de Cuenca se encuentra a 2550 msnm, lo que ocasiona reducción de la potencia en los motores de los vehículos automotores debido a la disminución de la presión atmosférica y de la cantidad de oxígeno en el aire, acarreado un aumento en la emisión de contaminantes en los gases de escape y el incremento del consumo de combustible. A ello debe sumarse los tipos de combustibles disponibles en el mercado, que generan diferentes respuestas en los motores de combustión interna. Mediante un diseño experimental factorial de dos niveles con puntos intermedios se determina el grado de influencia que tiene la gasolina extra y súper, además de la estequiometría de la mezcla y del adelanto al encendido en el funcionamiento del motor. En base a optimización se modifica el punto de funcionamiento del motor consiguiendo mejorar las prestaciones en un 1.59% y reducir concentraciones de emisiones contaminantes hasta un 8%.

Palabras clave: Adelanto al encendido, emisiones contaminantes vehiculares, motor ciclo Otto, lambda.

Study Of The Behavior Of An Otto Engine Of Electronic Injection In Relation To The Stoichiometry Of The Mixture And The Advance To The Ignition For Cuenca City.

Abstract: The city of Cuenca is located at 2550 meters above sea level, which causes a decrease in engine power of motor vehicles due to decreased atmospheric pressure and the amount of oxygen in the air, bringing an increase in the emission of pollutants in the exhaust and increased fuel consumption. Add to that the fuel types available on the market, generating different responses in internal combustion engines. Using a factorial experimental design of two levels with intermediate points the degree of influence that the extra gas and super addition to the stoichiometry of the mix and advance the ignition engine operation is determined. Based on optimizing the operating point of the engine is modified achieving improved performance and emissions.

Keywords: Time ignition, vehicle emissions, Otto engine, lambda.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria en general y en la automotriz continuamente se realizan investigaciones que tienen como objeto la mejora en el desempeño de los sistemas. La inclusión de sistemas de gestión electrónica en vehículos ha contribuido a elevar la eficacia y la eficiencia de los sistemas en los que estos se implementan. Las mejoras conseguidas están estrechamente ligadas a las configuraciones y calibraciones de los sistemas (Pulkrabek, 2004) que son realizadas en laboratorios especializados que consideran al nivel del mar como referencia y el uso de combustibles disponibles en las regiones en donde se realizan las calibraciones antes mencionadas. La importancia del estudio planteado es la pérdida que causa al proceso de combustión el operar de la manera actual como se

muestra en (Castaño & Patiño, 2003), para nuestro caso el hecho que los motores de combustión interna operen bajo condiciones no óptimas en ciudades que sobrepasan los 2000 msnm ocasiona pérdidas económicas y ambientales producidas por el mayor consumo de combustible, la menor generación de potencia y la mayor concentración de contaminantes en los gases de escape (Calza & Ángel, 2011), de allí la necesidad de encontrar un punto de funcionamiento especial diferente al determinado por el fabricante para mejorar el desempeño del motor en las condiciones antes señaladas.

2. MARCO TEÓRICO

El motor de combustión interna alternativo de encendido provocado, es el encargado de transformar la energía termoquímica del combustible (gasolina) en energía mecánica, misma que posteriormente será utilizada para producir el desplazamiento del automóvil. La característica fundamental de este motor es que el inicio de la combustión se produce un aporte de energía externo al ciclo termodinámico, al hacer saltar una chispa en los electrodos de la bujía, debiendo producirse en el momento adecuado para conseguir que el proceso de combustión sea lo más eficiente posible. Entre las principales variables del motor se encuentran las siguientes: el factor Lambda, el Adelanto al encendido, el Régimen de Giro, la Carga y el Combustible. La altitud a la que trabajan los motores de combustión interna, tiene una influencia directa sobre su funcionamiento, debido a la pérdida de potencia por la disminución de la densidad del aire a mayores altitudes.

3. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Entre las estrategias más utilizadas en optimización y mejora continua se encuentra el diseño de experimentos mediante el Ciclo de Deming (Montgomery, 2012), que constituye una estrategia para conseguir mejoras continuas tanto en procesos como en productos, aplicando las etapas:

1. Diseño del plan experimental
2. Realización de las corridas experimentales.
3. Análisis de resultados.
4. Implementación de los resultados.

Se parte de la hipótesis de que un motor de combustión interna ciclo Otto puede trabajar de mejor manera que la prestablecida por el fabricante bajo las condiciones atmosféricas generadas en la ciudad de Cuenca.

3.1 Unidad Experimental

La unidad experimental utilizada para la realización de las pruebas es un vehículo pick up cuyas características se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Características del vehículo de experimentación

Tipo	Pick up
Motor	2.7 i
Potencia Máxima	152 HP @ 4800 RPM
Torque	240 Nm @4000 RPM
Cilindrada	2694 cm ³
Número de cilindros	4
Relación de Compresión	9.5
Sistema de combustible	MPFI Secuencial
Distribución	DOHC VVTI
Válvulas por cilindro	4

Como se muestra en la figura 1, para el desarrollo del experimento se hizo uso del banco dinamo métrico MAHA

LPS 3000 que consta de un freno dinamo métrico de corrientes parásitas que permite generar carga a más de medir la fuerza tractora y la potencia simultáneamente, la potencia se determina según (ISO, 2010).

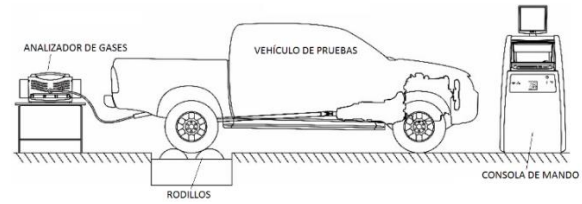


Figura 1. Vehículo en el banco dinamo métrico.

Para el análisis de la concentración de emisiones contaminantes en los gases de escape y el consumo de combustible se usa el analizador de gases MGT 5 y el contador AIC fuel respectivamente, cuya incertidumbre de medición es del 0.6% según datos del fabricante. Las características se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Características del banco dinamo métrico

Característica	Rango	Sensibilidad	Unidad
Potencia	0 – 520	0.1	Kw
Fuerza Tractora	0 - 12000	1	N
Monóxido de Carbono	0 – 10	0.01	%
Dióxido de Carbono	0 – 16	0.1	%
Oxígeno	0 – 21	0.01	%
Hidrocarburos no combustionados	0 – 5000	1	Ppm
Óxidos Nitrosos	0 – 5000	1	Ppm
Lambda	0-2	0.001	-
Consumo de combustible	0 – 120	0.01	l/h

3.2 Diseño Experimental

Se plantea un diseño experimental factorial de dos niveles con el objetivo de hallar la relación entre los factores de estudio y las variables de salida. Para la optimización se utiliza un diseño experimental de Superficie de respuesta Box Behnken cuyo objeto principal es encontrar un punto de operación del motor diferente del impuesto por el fabricante en el cual el comportamiento de una o más variables de respuesta sea mejor que el actual, dadas las condiciones especiales de la ciudad de Cuenca. De acuerdo a (Abu-Nada, Al-Hinti, Akash, & Al-Sarkhi, 2007) las variables más significativas dentro del funcionamiento del motor ciclo Otto son las que se describen a continuación.

3.2.1 Variables de respuesta

Las variables de respuesta son salidas del sistema cuyo valor se desea mejorar, fueron escogidas acorde a investigaciones sobre el tema y normativa local como se ve en (Kyriakides, Dimas, Lympelopoulou, Karonis, & Lois, 2013), (INEN, Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores.

Determinación de la Concentración de Emisiones de Escape en Condiciones de Marcha Mínima o Ralentí Prueba Estática, 2000), (INEN, Revisión Técnica Vehicular. Procedimientos, 2003), (Corporación para el mejoramiento del aire de Cuenca, 2006) y se muestran en la tabla 3.

Tabla 3: Variables de respuesta

Variable de respuesta	Símbolo	Unidad
Potencia	P	[kW]
Fuerza tractora	F	[N]
Monóxido de carbono	CO	[%]
Hidrocarburos no combustionados	HC	[ppm]
Óxidos nitrosos	NOx	[ppm]
Consumo específico combustible	C _{esp}	[g/kWh]

3.2.2 Factores de Inferencia

Los factores de inferencia son aquellos que producen cambios en las variables de salida, pueden ser controlados, de ruido o de estudio. Los factores controlables se pueden fijar en un punto o en un nivel de operación, su influencia en las variables de salida no se desea evaluar. Los factores de ruido son difíciles de controlar, pueden modificar el comportamiento de las variables de respuesta y su influencia se busca eliminar. Los factores de estudio son aquellos de los cuales se busca medir su influencia en las variables de respuesta del motor, los factores de inferencia se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Factores de inferencia

	Factores	Símbolo	Unidad
Controlables	Temperatura del refrigerante	T ref	[° C]
	Temperatura de la rodadura	T rod	[° C]
	Temperatura del lubricante	T lub	[° C]
	Apertura EGR	EGR	%
	Accionamiento VVTi	VVTi	%
Ruido	Temperatura del Aire	T aire	[° C]
	Temperatura del combustible	T comb	[° C]
	Presión Atmosférica	P atm	[Pa]
	Humedad relativa del aire	H rel	[%]
Estudio	Régimen de giro	η	[rpm]
	Carga	C'	[%]
	Lambda	Λ	-
	Adelanto al encendido	A	[°]
	Octanaje del combustible	R	[RON]

3.3 Corridas Preliminares

Para poder determinar el efecto de cada factor sobre las salidas del sistema son necesarios dos niveles, el objeto de incluir un nivel intermedio es para determinar si el comportamiento de la salida dentro del dominio de análisis es lineal o presenta curvatura. Para determinar los niveles de los factores se recurre a corridas preliminares en las que se varía un solo factor a la vez con el fin de establecer el rango de operación de cada factor.

3.3.1 Régimen de Giro

La velocidad de giro del motor es un factor importante tanto para las prestaciones como las emisiones contaminantes. Los niveles de este factor se basan en (INEN, Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Determinación de la Concentración de Emisiones de Escape en Condiciones de Marcha Mínima o Ralentí Prueba Estática, 2000), (INEN, Revisión Técnica Vehicular. Procedimientos, 2003) y (Corporación para el mejoramiento del aire de Cuenca, 2006), en las que el régimen de giro de ralentí se establece como el regulado por el motor con un límite máximo de 1100 rpm; para el caso de nuestra unidad experimental este régimen de giro a temperatura normal de funcionamiento se establece en 700 rpm. El segundo régimen de giro está normado en 2500 rpm, por lo que el nivel medio es 1600 rpm.

3.3.2 Carga

Los niveles de carga externa del motor se basan en el principio de funcionamiento del mismo y en la normativa ya citada. El nivel mínimo corresponde a la ausencia de carga externa es decir 0%, el nivel máximo corresponde al 100% de carga externa que es el máximo torque opositor que el motor puede soportar sin disminuir su velocidad de giro con el acelerador accionado totalmente y el nivel intermedio que corresponde al 50% de carga externa es el máximo torque opositor que el motor puede generar sin disminuir su velocidad de giro con el acelerador accionado en diferentes posiciones hasta conseguir que la presión en el colector de admisión sea la media entre la mínima (345 mBar) y máxima carga (735 mBar) es decir 540 mBar.

3.3.3 Lambda

Si bien se puede incrementar las prestaciones del motor a través de la modificación de la relación aire combustible no se debe descuidar el incremento que esto ocasiona en las emisiones contaminantes. Los valores de emisión de monóxido de carbono y de hidrocarburos no combustionados están limitados por (INEN, Gestión Ambiental Aire Vehículos automotores límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de gasolina, 2002). Para la corrida preliminar se sustituye el sensor de oxígeno del vehículo por un sensor de banda ancha y mediante un lazo de control se altera la relación aire combustible con el fin de obtener los valores de las emisiones en ralentí que se muestran en la figura 2.

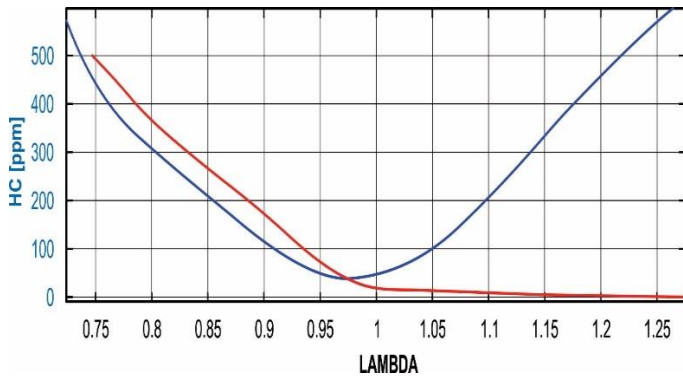


Figura 2. CO y HC vs. λ .

Los valores de λ mostrados en la tabla 5 son limitados por el 60% de lo que se señala en (INEN, Gestión Ambiental Aire Vehículos automotores límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de gasolina, 2002), con el fin de evitar que por efecto de otros factores se superen dichos límites.

Tabla 5: Valores límites de emisión

Variable	Límite Normado	Límite Admisible	Intervalo
CO	1%	0.6 %	$0.975 < \lambda$
HC	200 ppm	120 ppm	$0.926 < \lambda < 1.05$

El límite superior de λ es 1.05, el valor original al que funciona el motor es 1, por lo que por simetría el nivel inferior se establece en 0.95.

3.3.4 Adelanto al Encendido

La variación del adelanto al encendido puede incrementar o disminuir las prestaciones del motor al igual que las emisiones contaminantes. Los valores de adelanto para los niveles de carga y régimen de giro se muestran en la tabla 6.

Tabla 6: Valores de adelanto al encendido

Régimen [rpm]	Carga [%]	Adelanto [°]
700	0	10
2500	0	32
700	100	9
2500	100	24

El excesivo adelanto puede generar autoencendido y desembocar en el incremento de emisión de óxidos nitrosos, en cambio un punto de encendido retrasado genera pérdida de potencia y excesivo consumo de combustible. La detonación producida a causa de la modificación del adelanto al encendido se cuantifica basada en (Patente n° US8639432 B2, 2014), para lo cual es necesario extraer características de las señales de vibración adquiridas en las mismas condiciones de funcionamiento con 6 diferentes adelantos al encendido que parten desde el punto determinado por fabricante con incrementos de 2.5° hasta 12.5°. Para tal efecto se dispone de un acelerómetro que se ubica según (Rivera & Chica, 2015)

que aplica a motores recíprocos con potencias superiores a 100Kw. De las señales de aceleración adquiridas [m/s²] se extraen características estadísticas temporales como la energía (E), potencia (P), RMS, factor de cresta (FC) y curtosis (C). Con el fin de evaluar el efecto de la detonación en un solo factor, se ha generado el índice normalizado IN que se forma de la media de los efectos individuales de cada factor respecto del valor del motor original. El índice normalizado se calcula con la ecuación (1) que se muestra a continuación:

$$I_N = \frac{\left| \frac{E}{E_0} - 1 \right| + \left| \frac{C}{C_0} - 1 \right| + \left| \frac{RMS}{RMS_0} - 1 \right| + \left| \frac{FC}{FC_0} - 1 \right| + \left| \frac{P}{P_0} - 1 \right|}{5}$$

El valor de IN para el motor original es 0 y mientras menor sea la detonación el valor del índice se mantendrá bajo como se señala en la tabla 7.

Tabla 7: Índice Normalizado

η [rpm]	c' [%]	Incremento [°]	α [°]	I_N
2500	100	0	24	0
2500	100	2.5	26.5	0,52
2500	100	5	29	0,57
2500	100	7.5	31.5	0,66
2500	100	10	34	0,88
2500	100	12.5	36.5	1,89

En la figura 3. Se puede observar que acorde al incremento al adelanto al encendido el valor del índice se incrementa abruptamente a partir del valor de 7.5°, por lo cual adelantos generarán una fuerte detonación.

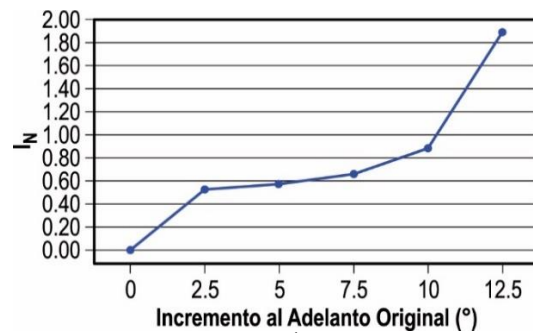


Figura 3. Índice Normalizado

El valor límite de incremento al adelanto al encendido es 7.5°, sin embargo a lo largo de la experimentación se llevan a cabo tratamientos con mezclas pobres y ricas que incrementan la posibilidad de generar detonación, por lo que se establece el nivel de incremento al adelanto al encendido en 5°, a partir de ello el valor del nivel medio es 0°, es decir el valor original del motor y por simetría el nivel mínimo es -5°. Para muestra de lo establecido se dispone de un sensor de presión en la bujía del cilindro número 1 para adquirir el comportamiento de la presión al interior del cilindro. La figura 4 y la tabla 8 describen que para los niveles de adelanto de 19° y 24° no se generan oscilaciones en el interior del cilindro que si se producen para el adelanto de 29°, el incremento de la amplitud de estas oscilaciones se ve reflejado en el valor del índice normalizado.

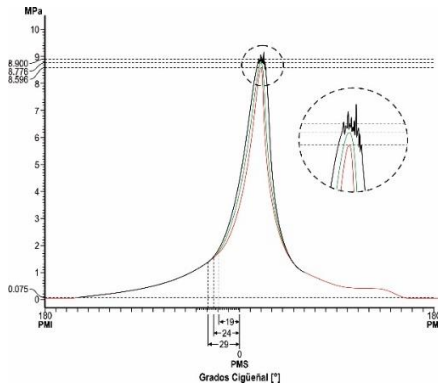


Figura 4. Presión en el cilindro 1

Tabla 8: Niveles de adelanto al encendido

RÉGIMEN	CARGA	NIVEL MÍNIMO	NIVEL CENTRAL	NIVEL MÁXIMO
[RPM]	[%]	(-)	0	(+)
700	0	5°	10°	15°
2500	0	27°	32°	37°
700	100	4°	9°	14°
2500	100	19°	24°	29°

3.3.5 Combustible

En la ciudad de Cuenca se dispone de las gasolinas extra y súper. Los niveles del factor combustible se determinan experimentalmente a través del número de octanos de investigación RON, para lo cual se miden mezclas de concentraciones de gasolina súper en extra. La gasolina extra tiene un RON medio de 81.9 la súper de 91.3, el punto medio de octanaje de 86.6 se consigue con una concentración de 23% de gasolina súper y 77% gasolina extra.

3.4 Tratamientos

Una vez seleccionados los niveles de cada uno de los factores que se muestran en la tabla 9 se procede a determinar los tratamientos de la corrida experimental.

Tabla 9: Niveles factoriales

FACTOR	MÍNIMO (-)	CENTRAL 0	MÁXIMO (+)
η [rpm]	700	1600	2500
c [%]	0	50	100
λ	0.95	1	1.05
α [°]	-5	0	5
R [RON]	81.9	86.6	91.3

Para el diseño experimental factorial de cinco factores y dos niveles tenemos 32 tratamientos en una repetición; cada tratamiento es una combinación única de los 5 factores en total se realizaron tres repeticiones lo que genera 96 tratamientos que incluyendo los 45 tratamientos con puntos centrales de la

superficie de respuesta generan un total de 141 corridas experimentales.

3.4.1 Aleatorización de las pruebas

La aleatorización de las pruebas se aplica como herramienta para eliminar efectos indeseables provocados por los factores ambientales que son de difícil control. El principio de aleatorización hace que el posible efecto de los factores de ruido se reparta “equitativamente” en todos los tratamientos, incrementa la posibilidad de que los errores de muestreo sean independientes lo cual es requisito para la validez de las pruebas estadísticas, también es una técnica para asegurar que los pequeños errores provocados debido a los equipos, factores ambientales y humanos se repartan de manera homogénea a lo largo de todos los tratamientos.

3.4.2 Protocolo de medición

Para garantizar la reproducibilidad y repetibilidad del experimento se tomaron las muestras con el algoritmo que se describe en la figura 5. Este algoritmo fue desarrollado con el objetivo de disminuir los efectos no deseados en la adquisición de datos basados en (Rivera & Chica, 2015).

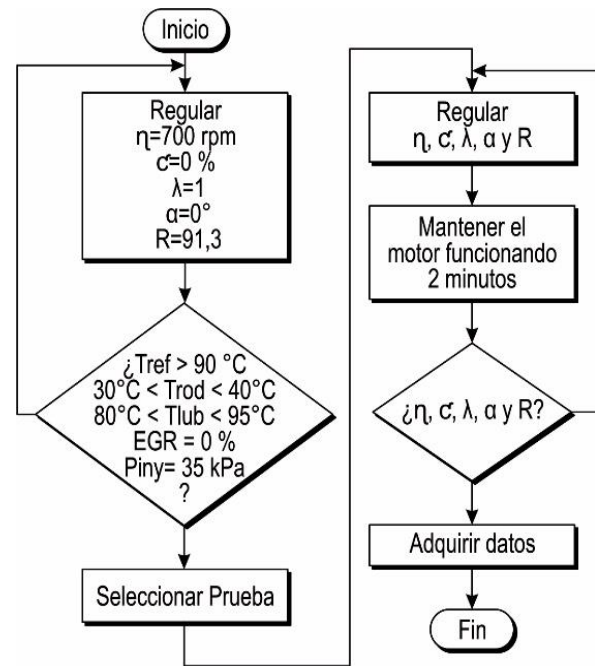


Figura 5. Protocolo de medición

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de resultados se utiliza el software de cálculo estadístico Minitab 17 ®.

4.1 Efectos principales y cruzados

Mediante el análisis de los diagramas de Pareto se obtiene la ponderación de los factores en las variables de respuesta del experimento. En la tabla 10 se muestran los factores e

interacciones que superan e nivel de significancia, ordenados desde el más influyente.

Tabla 10: Efectos principales y cruzados

Variables de Respuesta	Factores e interacciones de mayor inferencia							
	1	2	3	4	5	6	7	8
CO	λ	c'	$\lambda c'$					
HC	αR	λR	$\lambda c'$	$\lambda c \eta R$	$\lambda \alpha$	$c \eta R$	$\lambda \alpha c \eta$	ηR
CO ₂	λ	$\lambda c'$	c'					
O ₂	λ	$\lambda c'$						
NOx	λ	c'	η	$\lambda \eta$	$\lambda c'$	$\eta c'$	$\lambda \eta c'$	α
F	c'	$\eta c'$	η	Λ	$\lambda \eta c'$	$\alpha \eta$	$\Lambda c'$	$\lambda \eta$
P	η	c'	$\eta c'$	$\lambda \eta c'$	λ	$\lambda \eta$	$\Lambda c'$	$\alpha c'$
C esp	η	$\eta c'$	c'	λ	$\lambda \eta c'$	$\lambda \eta$	$\Lambda c'$	$\alpha \eta c'$

Las concentraciones de CO, HC y NOx en los gases de escape son sensibles a los factores e interacciones del experimento, su comportamiento se muestra en el diagrama de efectos principales mostrado en la figura 6.

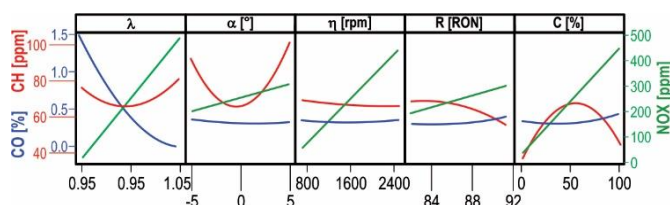


Figura 6. Efectos principales para la emisión de CO, HC y NOx.

4.2 Monóxido de Carbono

La emisión de CO depende principalmente del factor lambda, mientras más rica es la mezcla más alta es la emisión de CO, contrario a lo que ocurre cuando la mezcla es pobre. La mayor interacción es la producida por los factores lambda y carga. La condición crítica para el incremento la tasa de emisión de monóxido de carbono se da a 2500rpm, 100% de carga y utilizando gasolina súper, esta condición se representa en la superficie que se detalla en la figura 7.

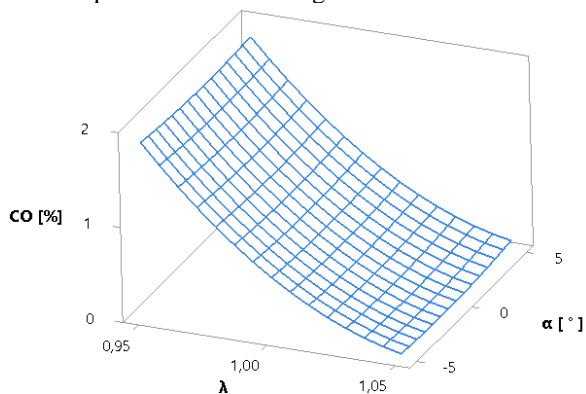


Figura 7. Emisión de CO en condición crítica

3.5 Hidrocarburos no combustionados

Los valores mínimos de emisión de HC no se consiguen en el punto original de funcionamiento del motor respecto del factor lambda y del adelanto al encendido, a más que disminuye considerablemente al aumentar el régimen de giro del motor y el octanaje del combustible. Los factores lambda y adelanto al encendido son los que más promueven las interacciones con otros factores en especial con el combustible. En la figura 8 se muestra la condición de mayor emisión de HC. Los valores de emisión de HC se incrementan ya sea para mezclas extremadamente ricas o pobres, igual que para elevados valores de adelanto al encendido. Para condiciones de funcionamiento con mezcla rica y estequiométrica la emisión de HC disminuye considerablemente utilizando gasolina de mayor octanaje, caso contrario de lo que ocurre con la aplicación de mezclas pobres, donde la emisión disminuye con el uso de combustible de bajo octanaje.

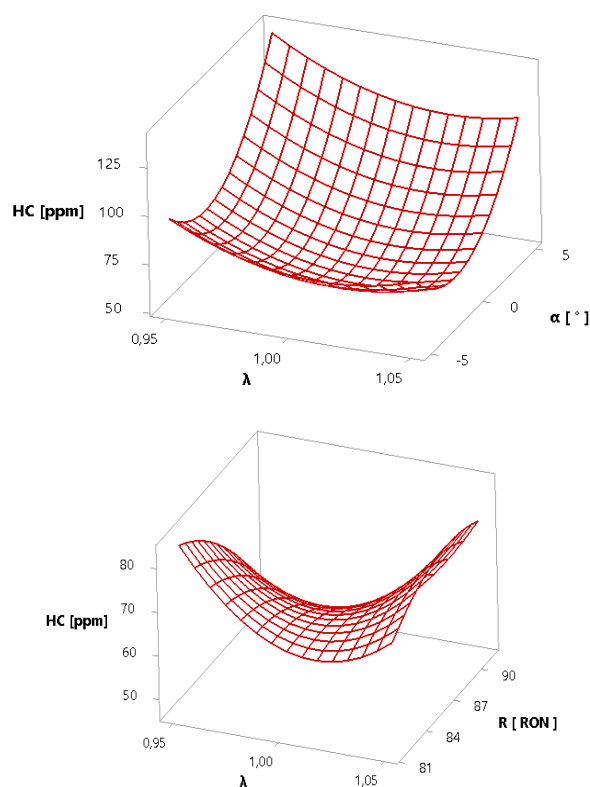


Figura 8. Emisión de HC en condición crítica

Para el caso del adelanto al encendido los valores de menor emisión de HC se consiguen en cualquier condición con valores de ligero retraso al encendido respecto del punto original de funcionamiento. En la figura 9 se puede apreciar que existe una condición de emisión mínima de HC que depende del combustible utilizado.

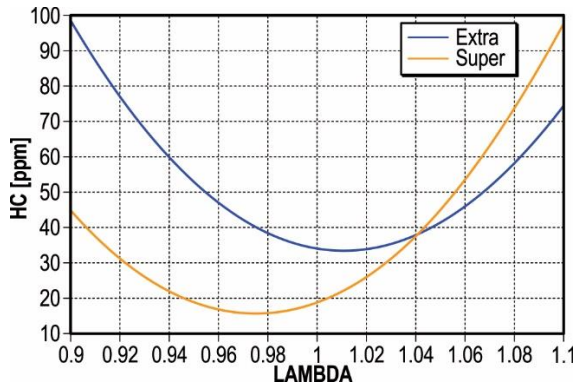


Figura 9. Mínima emisión de HC

Considerando los efectos principales e interacción de los factores se obtuvieron los valores mínimos de emisión de HC que se detallan en la tabla 11.

Tabla 11: Valores mínimos de emisión de HC

COMBUSTIBLE	λ	α [°]	HC [ppm]
EXTRA	1.012	-1.38	33
SUPER	0,975	-0.91	16

3.6 Óxidos Nitrosos

La emisión de NOx es muy sensible a todos los factores y se incrementa bajo condiciones de mezclas pobres, adelantos pronunciados al encendido, altos regímenes de giro, a más del alto octanaje del combustible y la elevada carga externa del motor. Los NOx incrementan su concentración en los gases de escape en condiciones que generen elevadas presiones y temperaturas en la cámara de combustión, como las detalladas en la figura 10.

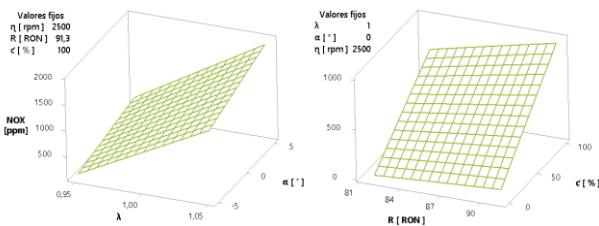


Figura 10. Emisión de NOx

3.7 Prestaciones del motor

Según lo expuesto en la tabla 10 la potencia y el torque son directamente proporcionales a η y c . Otros factores influyen de menor manera sobre estas prestaciones como se muestra en la figura 11.

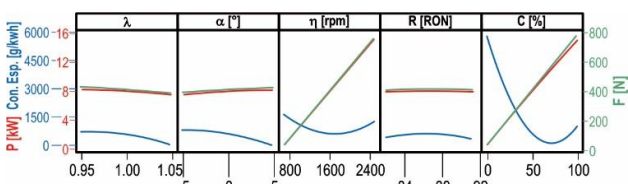


Figura 11. Efectos principales para P, F y Cesp.

Los valores máximos de F y P se mostrados en la tabla 12 se consiguen a 2500 rpm, 100 % de carga y distan de ser los que menores niveles de emisiones contaminantes generan.

Tabla 12: Valores máximos de F y P

COMBUSTIBLE	λ	α [°]	F [N]	P [kW]
EXTRA	0.95	5	1585	31,69
SUPER	0.95	5	1596	31,99

En la figura 12 se muestra que la fuerza tractora y la potencia incrementan su valor mientras mayor es el adelanto al encendido si se utiliza combustible de alto octanaje.

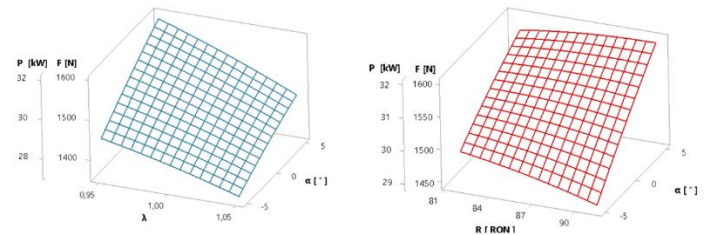


Figura 12. Fuerza tractora y Potencia en la rueda

3.8 Optimización de respuesta

Cada una de las variables de respuesta tiene su propia meta, cuyo objetivo es aumentar las prestaciones y disminuir la concentración de contaminantes en los gases de escape. Los valores objetivos de optimización se muestran en la tabla 14. Para la optimización se utiliza el método de la máxima pendiente.

Tabla 14: Optimización de respuesta

Respuesta	Meta	Objetivo	Unidad
P	Maximizar	31.9	[kW]
F	Maximizar	1596	[N]
CO	Minimizar	0	[%]
HC	Minimizar	16	[ppm]
NOx	Minimizar	0	[ppm]
Cesp	Minimizar	312.72	[g/kWh]

Como se ha dicho anteriormente las emisiones de CO y HC están restringidas por (INEN, Gestión Ambiental Aire Vehículos automotores límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de gasolina, 2002), pero el resto de prestaciones no tienen punto de referencia, por ello que se generan funciones de NOx, F, P y C normalizadas respecto del estado de funcionamiento normal del motor es decir $\lambda=1$, $\alpha=5$ y $R=91.3$. En la figura 13 se muestra los contornos generados por estas funciones en 2500 rpm y 100% de carga para a) gasolina súper y b) gasolina extra. Los límites establecidos corresponden a zonas en las que las que F y P se incrementan y Cesp junto a NOx disminuyen respecto del estado normal del motor. En la figura 13 se puede observar de blanco las zonas de funcionamiento en las que se

incrementan las prestaciones del motor sin que la emisión de CO y HC superen los límites normados y la emisión de NOx sea igual o inferior al motor original. La principal restricción que presenta el uso de gasolina súper al incremento de P y F es la emisión de CO, HC y NOx. El uso de gasolina extra conlleva la necesidad de trabajar con mezclas más ricas que las necesarias con súper para incrementar las prestaciones de igual forma limitadas por la emisión CO, HC y NOx.

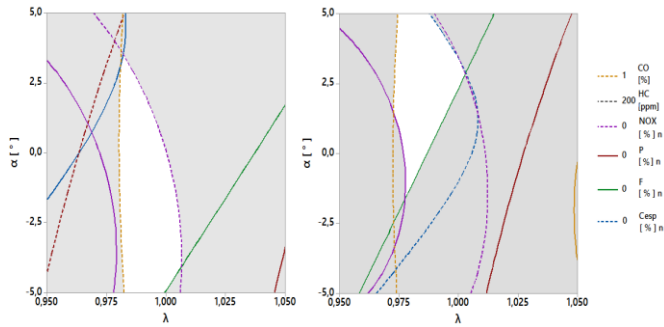


Figura 13. Zona de optimización para combustibles a) Súper b) Extra

Mediante el método de máxima pendiente se optimizó el proceso para obtener los resultados mostrados en la tabla 15.

Tabla 15: Resultados de la Optimización

Factor	Unidad	Condición normal	Óptimo súper	Óptimo extra
η	Rpm	2500	2500	2500
C^r	%	100	100	100
Λ	-	1	0,992	0,997
A	°	0	1,16	-0,26
R	RON	91,3	91,3	81,9
P	kW	29,51	29,98	29,47
F	N	1477	1500	1474
CO	%	0,6	0,74	0,51
HC	ppm	25	23	44
NOx	ppm	971	914	661
O ₂	%	0,56	0,65	0,59
CO ₂	%	15,01	14,98	14,95
C _{esp}	g/kWh	342,27	338,68	356,4

Las mejores prestaciones y disminución de contaminantes no se pueden conseguir con λ y α fijos, es por ello que se aplica los resultados de la optimización a diferentes condiciones de funcionamiento y combustibles. En la figura 14 se muestran las mejores configuraciones de funcionamiento del motor para gasolina súper y extra en función del régimen de giro, la carga del motor y la interacción de estos dos factores.

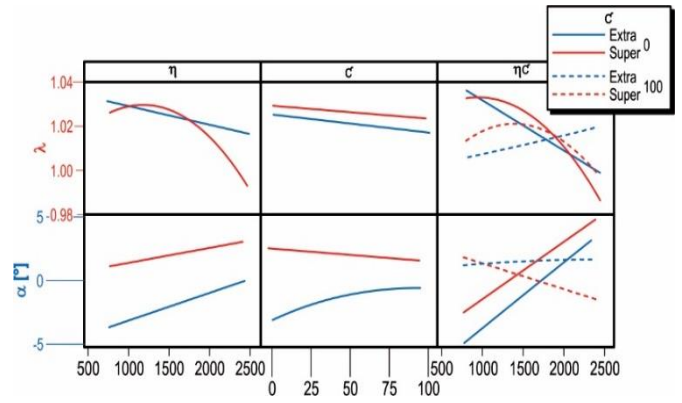


Figura 14. Optimización de λ y α en función de η y C^r

Los dos combustibles pueden trabajar con mezclas ligeramente pobres a bajas velocidades con niveles de carga externa baja; la mezcla debe enriquecerse acorde el motor se acelera y la carga aumenta. La gasolina súper puede trabajar en altas condiciones de carga y régimen de giro con mezcla ligeramente rica y un adelanto al encendido superior al establecido por el fabricante, contrario a lo que ocurre con la gasolina extra que no puede trabajar con adelantos superiores a los ya establecidos, debido a la pérdida de potencia e incremento del consumo de combustible y HC.

5. CONCLUSIONES

Las variables de respuesta del motor dependen directamente del combustible utilizado.

Optimizando el valor de λ y α para el uso de gasolina súper se consiguió incrementar la potencia del motor hasta un 1,59 % disminuyendo las emisiones de HC en 8%, NOx en 5.87% y el consumo específico en un 1.05%, con un incremento de 23.33% de CO que dista del límite impuesto por la normativa local.

En el caso de la gasolina extra los resultados muestran que se puede aproximar mucho el funcionamiento del motor al producido con gasolina súper en condiciones normales de operación. De la optimización de λ y α se obtuvo una disminución de tan solo el 0.14% de potencia, frente a una reducción del 15% de CO, 31.93% de NOx y un incremento del 76% de HC que no sobrepasa el límite establecido en (Corporación para el mejoramiento del aire de Cuenca, 2006).

Los resultados de la optimización arrojan que no se pueden mejorar las prestaciones del motor sin alterar las emisiones contaminantes y viceversa.

6. REFERENCIAS

Abu-Nada, E., Al-Hinti, I., Akash, B., & Al-Sarkhi, A. (2007). Thermodynamic analysis of spark-ignition engine using a gas mixture model for the working fluid. International Journal of Energy Research, 1031-1046.

Calza, P., & Ángel, P. (2011). Determinación de la Influencia de la Altura en Emisiones Contaminantes de un Vehículo con Motor de Ciclo Otto, de Inyección Electrónica de Gasolina. Quito: EPN.

Castaño, D., & Patiño, G. (2003). Estudio de los factores que inciden en el desempeño de motores de encendido provocado (MEP) convertidos a gas natural. Medellín: Universidad de Antioquia.

Corporación para el mejoramiento del aire de Cuenca, E. (2006). Codificación a la ordenanza que norma el establecimiento del sistema de revisión técnica vehicular de cuenca y la delegación de competencias a Cuencaire. Cuenca, Ecuador.

INEN. (2000). Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Determinación de la Concentración de Emisiones de Escape en Condiciones de Marcha Mínima o Ralentí Prueba Estática. INEN 2 203:2000. Quito, Ecuador.

INEN. (2002). Gestión Ambiental Aire Vehículos automotores límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de gasolina. INEN 2 204:2002. Quito, Ecuador.

INEN. (2003). Revisión Técnica Vehicular. Procedimientos. INEN 2 349:2003. Quito, Ecuador.

ISO. (2010). Road vehicles, Engine test code net power. ISO Standard 1585:1992.

Kyriakides, A., Dimas, V., Lymperopoulou, E., Karonis, D., & Lois, E. (2013). Evaluation of gasolina etanol water ternary mixtures used as fuel for an Otto engine. Fuel.

Matsuo, N., Shishime, K., HAYAKAWA, M., Morimoto, H., & Ohashi, M. (2014). Patente n° US8639432 B2.

Montgomery, D. (2012). Design and Analysis of Experiments. Arizona: John Wileys & Sons.

Pulkrabek, W. (2004). Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. New Jersey: Pearson Prentice Hall.

Rivera, N., & Chica, F. (2015). Estudio del comportamiento de un motorciclo Otto de inyección electrónica respecto de la estequiometría de la mezcla y del adelanto al encendido para la ciudad de Cuenca. Quito: EPN.



Néstor Diego Rivera Campoverde.

Magíster en Sistemas Automotrices por la Escuela Politécnica Nacional, Ingeniero Mecánico Automotriz, actualmente es Profesor de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Miembro del Grupo de Investigación de Ingeniería del

Transporte GIIT en la Línea de Investigación de Ingeniería del Mantenimiento Automotriz y Eficiencia Energética, Coordinador del Proyecto Cuyero en el que ha desarrollado trabajos enfocados a la detección y diagnóstico de fallos en motores de combustión interna mediante Inteligencia Artificial. Ha participado como ponente y revisor en varios Congresos Nacionales e Internacionales. Autor para correspondencia nrivera@ups.edu.ec.



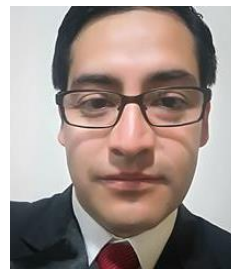
Juan Fernando Chica Segovia.

Nacido el 15 de abril de 1965 en Cuenca-Ecuador, toda su vida profesional se ha dedicado al mantenimiento y estudio de los vehículos motorizados; en el año 2012 se graduó de Ingeniero Mecánico Automotriz en la UPS y en el año 2016 obtuvo el título de Master en Sistemas Automotrices en la Escuela Politécnica Nacional; desde el año 2003 trabaja en la Universidad Politécnica Salesiana, como docente investigador, ha sido director del Proyecto “El biodiesel como alternativa para reducir las emisiones contaminantes en la ciudad de Cuenca”; actualmente es Jefe de Área profesional de la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz.



Oscar Iván Zambrano Orejuela.

Nació en Quito, en 1955. Simultáneamente, obtuvo los títulos de Bachiller en Ciencias de la Educación y Bachiller en Humanidades Modernas. Ingeniero Mecánico de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), donde ingresó como docente en 1982, posteriormente, en 1995 obtuvo el título de Magister en Sistemas Informáticos y en 2006 se graduó de Master en Diseño para Ingeniería en la Universidad Politécnica de Catalunya. En el año 2005, la EPN le otorgó el título de “Profesor”. Actualmente, es profesor principal titular y Subdecano de la Facultad de Ingeniería Mecánica, además, es director de varios proyectos de investigación.



Cristian Leonardo García García.

Ingeniero Mecánico Automotriz por la Universidad Politécnica Salesiana 2007, Máster Universitario en Ingeniería del Mantenimiento por la Universidad Politécnica de Valencia 2012, actualmente estudiante de Doctorado por la Universidad de Mérida Venezuela. Director de Carrera de Ingeniería Automotriz de la UPS-sede Cuenca. Docente Titular-Auxiliar de la UPS. Docente Maestría Sistemas Automotrices Universidad Politécnica Nacional, 2013-2015. Docente Maestría en Gestión del Mantenimiento, Universidad del Azuay, 2015. Responsable de proyectos de investigación en el área de mantenimiento predictivo para el diagnóstico de motores de combustión. Participación en Congresos nacionales e internacionales.