

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**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**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MASTER (MSc) EN  
SISTEMAS AUTOMOTRICES**

**NÉSTOR DIEGO RIVERA CAMPOVERDE**

**diegoriveracampoverde@hotmail.com**

**JUAN FERNANDO CHICA SEGOVIA**

**ing.fernandochica@hotmail.com**

**DIRECTOR: ING. IVÁN ZAMBRANO OREJUELA MSc.**

**ivan.zambrano@epn.edu.ec**

**QUITO, SEPTIEMBRE 2015**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Néstor Diego Rivera Campoverde y Juan Fernando Chica Segovia, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Néstor Diego Rivera Campoverde

---

Juan Fernando Chica Segovia

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo, fue desarrollado por: Néstor Diego Rivera Campoverde y Juan Fernando Chica Segovia, bajo mi supervisión.

---

Ing. Iván Zambrano O. MSc.

DIRECTOR DE TESIS

## AGRADECIMIENTO

A la unidad de Postgrados de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional en especial nuestro más sincero agradecimiento al Ing. Iván Zambrano, quien con su gestión hizo posible que la maestría de Sistemas Automotrices se dicte en la Ciudad de Cuenca, además como director de este trabajo de tesis, durante todo el proyecto aportó con sus conocimientos y su orientación, logrando así una óptima culminación de este proyecto investigativo.

Al Padre Javier Herrán Gómez Rector de la Universidad Politécnica Salesiana, quien nos brindó un lugar en donde formarnos como buenos cristianos y honrados ciudadanos, además del apoyo brindado para la realización de esta maestría.

De igual manera agradecer al Doctor Luis Tobar Vicerrector de la Universidad Politécnica Salesiana quien fue un pilar fundamental en el desarrollo de la maestría en la ciudad de Cuenca.

Un agradecimiento especial al Ingeniero Cristian García codirector de este trabajo, quien nos brindó el apoyo incondicional para el desarrollo y culminación de esta tesis.

También queremos agradecer a la Doctora Mary Vergara Prometeo de la Universidad de los Andes Mérida Venezuela, quien participó activamente en el diseño experimental con sus amplios conocimientos sobre los temas tratados.

Un agradecimiento especial al Ing. Juan Diego Valladolid por la colaboración en la realización de la presente investigación.

A todos los profesores de la maestría que con dedicación nos inculcaron el saber durante toda la vida estudiantil; además nos han guiado con entereza hacia el conocimiento académico y la formación humana.

Un agradecimiento a los Ingenieros: Jorge Fajardo Merchán, Juan Pablo Montero, Wilmer Contreras Urgilés, Pablo Campoverde Toledo y José Fernando Molina, quienes fueron parte fundamental del grupo de estudio de la maestría, que con el aporte de cada uno, se logró constituirse en un cimiento sólido en donde logramos forjar y acentuar nuestros conocimientos.

## **DEDICATORIA**

A mis padres Bertha y Diego, a mis hermanas Fernanda y Patricia, a mis primos y a mis amigos Carlos Pugo y Mario Zúñiga, por todo su esfuerzo y sacrificio durante todo este tiempo.

Para Verónica, Diego, David y Panchito, con todo mi amor.

**Néstor Diego**

## DEDICATORIA

A Dios, a quien ha hecho posible todo un universo, y quien me concedió la vida y la inteligencia para vivirla.

A mis padres que me dieron cariño; me enseñaron a caminar por el sendero del bien y me dejaron la mejor herencia que un hijo puede desear, como es: el estudio, la honradez y el trabajo.

A mis hijos Juan Fernando y José Eduardo, a quienes de todo corazón deseo que encuentren en el ejemplo, el esfuerzo, la honestidad y la constancia el verdadero tesoro que aliente sus espíritus y los guíe durante toda su vida.

A mi Esposa Mónica del Rocío, quien ha demostrado, a más de ser una compañera fiel, un apoyo en donde encuentro cobijo en los momentos más duros de mi vida, y a quien debo el estudio universitario.

A todos mis amigos y compañeros que durante los años que compartimos un pupitre de madera; unos libros de estudio; y un café con un cigarrillo; me supieron dar el ánimo y el aliento necesario para culminar con éxito esta carrera.

**Juan Fernando**

## RESUMEN

Este trabajo inicia con la descripción de los fundamentos básicos del motor, además de un breve análisis de la necesidad de lograr que el combustible líquido como la gasolina pase a un estado gaseoso, de tal manera que pueda formar una mezcla homogénea con el aire y de esta manera logre quemarse completamente dentro de la cámara de combustión del motor ciclo Otto.

Luego se hace referencia a la importancia de los sistemas de inyección actuales, que mantienen el control principalmente sobre el sistema de encendido y sobre el sistema de alimentación de combustible. Así mismo se citan los conceptos teóricos referidos al factor Lambda, adelanto al encendido, las gasolinas, la velocidad de giro y la Carga del motor, debido a que en la experimentación se trabaja sobre estos parámetros y elementos mencionados.

En el capítulo 2 se plantea la metodología para la experimentación, realizando la aplicación de técnicas de mejora continua; se definen las variables, conjuntamente con los elementos y equipos necesarios para la realización del experimento.

En el capítulo 3 se realizan diferentes corridas experimentales con el objetivo de adquirir datos del comportamiento del motor sometido a diferentes pruebas, luego se realiza un tratamiento de los datos adquiridos, para obtener caracteres sin errores que brindaran información valiosa para realizar el análisis de resultados y su validación.

En el capítulo 4 se presenta las conclusiones finales luego del desarrollo de esta investigación, también se hace las respectivas recomendaciones sobre este trabajo y para los futuros trabajos que se puedan desarrollar a partir de ésta tesis.



## PRESENTACIÓN

En la actualidad la ciudad de Cuenca cuenta con un parque automotor de aproximadamente 110000 vehículos, cantidad elevada en relación al número de habitantes, (según información proporcionada por la Unidad Municipal de Tránsito UMT); de esta cifra el 67% utiliza gasolina para su movilidad; a más de lo citado hay que considerar, que la urbe cuencana se encuentra a 2550 msnm, esto conlleva a que exista una disminución de la potencia de los motores de encendido provocado de aspiración natural, ya que al disminuir la presión y la temperatura atmosférica se afecta a la densidad y composición del aire, esto a su vez incide directamente sobre las prestaciones del motor, debido a que el motor tema de estudio, posee un control de lazo cerrado, que en el requerimiento de dosado estequiométrico obliga a la unidad de control electrónico a inyectar menos cantidad de combustible a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar, además la menor temperatura exterior obliga a avanzar el ángulo de encendido porque disminuye la velocidad de combustión.

Este trabajo se centra en realizar un estudio del comportamiento de un motor ciclo Otto de inyección electrónica respecto de la estequiometría de la mezcla y del adelanto al encendido para las condiciones de la ciudad de Cuenca; en principio se plantea un diseño experimental para determinar el grado de influencia que tienen la gasolina extra y súper, además de las condiciones de funcionamiento del motor tema de estudio.

El objetivo principal de esta investigación es lograr determinar la zona de mejor funcionamiento del motor de ciclo Otto para las condiciones ambientales de la ciudad de Cuenca, para esto es necesario instalar una computadora reprogramable para controlar y mejorar las prestaciones del motor, además de garantizar la independencia de variables para la corrida experimental, consiguiendo una disminución del consumo de combustible y de emisiones contaminantes provenientes de los gases de escape

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>DECLARACIÓN</b> .....	<i>ii</i>
<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<i>iii</i>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<i>iv</i>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<i>vi</i>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<i>vii</i>
<b>RESUMEN</b> .....	<i>viii</i>
<b>PRESENTACIÓN</b> .....	<i>ix</i>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	<i>x</i>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<i>xiv</i>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<i>xix</i>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b> .....	<i>xxi</i>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<i>1</i>
<b>FUNDAMENTOS Y MARCO TEÓRICO</b> .....	<i>1</i>
<b>1.1 FUNDAMENTOS</b> .....	<i>1</i>
<b>1.1.1 ANTECEDENTES</b> .....	<i>1</i>
<b>1.2 MARCO TEÓRICO</b> .....	<i>2</i>
1.2.1 EL FACTOR LAMBDA .....	<i>4</i>
1.2.2 EL ADELANTO AL ENCENDIDO.....	<i>4</i>
1.2.3 COMBUSTIBLE UTILIZADO EN MOTORES DE CICLO OTTO .....	<i>5</i>
1.2.4 VELOCIDAD DE GIRO Y CARGA DEL MOTOR.....	<i>7</i>
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<i>9</i>
<b>METODOLOGÍA PARA LA EXPERIMENTACIÓN</b> .....	<i>9</i>
<b>2.1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<i>9</i>
<b>2.2 APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE MEJORA CONTINUA</b> .....	<i>9</i>
<b>2.3 DEFINICIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL</b> .....	<i>10</i>
2.3.1. PLANEACIÓN DEL EXPERIMENTO .....	<i>12</i>
2.3.2 VARIABLES DE RESPUESTA.....	<i>12</i>
2.3.3 VARIABLES DE ESTUDIO .....	<i>13</i>
2.3.4 VARIABLES DE BLOQUEO .....	<i>14</i>
2.3.5 VARIABLES DE RUIDO .....	<i>15</i>
<b>2.3.6 UNIDAD EXPERIMENTAL</b> .....	<i>15</i>

2.3.6.1 Vehículo de Pruebas.....	16
2.3.6.2 Módulo de Control reprogramable.....	19
2.3.6.3 Banco Dinamométrico.....	22
2.3.6.4 Medidor de Flujo de Combustible.....	22
2.3.6.5 Pinza Amperimétrica.....	24
2.3.6.6 Analizador de Gases.....	26
<b>2.4 PRESENTACIÓN Y DESARROLLO DEL EXPERIMENTO.....</b>	<b>27</b>
2.4.1 DEFINICIÓN DE LOS NIVELES.....	28
2.4.2 RÉGIMEN DE GIRO.....	28
2.4.3 CARGA.....	29
2.4.4 LAMBDA.....	30
2.4.4.1 Adaptación de la Mezcla.....	30
2.4.5 INCREMENTO DEL ADELANTO AL ENCENDIDO.....	36
2.4.5.1 Caracterización de la señal de vibración.....	39
2.4.6 COMBUSTIBLE.....	49
2.4.7 TRATAMIENTOS.....	51
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>55</b>
<b>3.1 ALEATORIZACIÓN DE LAS PRUEBAS.....</b>	<b>55</b>
<b>3.2 TOMA DE DATOS.....</b>	<b>59</b>
3.2.1 PROTOCOLO DE MEDICIÓN.....	60
<b>3.3 TRATAMIENTO DE DATOS.....</b>	<b>62</b>
3.3.1 VALIDACIÓN DE DATOS.....	62
3.3.2 ESTIMACIÓN DE SIGNIFICANCIA.....	65
<b>3.4 REPRESENTACIÓN GRÁFICA Y ANÁLISIS.....</b>	<b>67</b>
3.4.1 MONÓXIDO DE CARBONO.....	67
3.4.2 HIDROCARBUROS NO COMBUSTIONADOS.....	71
3.4.3 DIÓXIDO DE CARBONO.....	76
3.4.4 OXÍGENO.....	80
<b>3.4.5 ÓXIDOS NITROSOS.....</b>	<b>84</b>
3.4.6 TIEMPO DE INYECCIÓN.....	88
3.4.7 CONSUMO.....	92
3.4.8 FUERZA TRACTORA.....	96

3.4.9 POTENCIA .....	100
<b>3.4.10 CONSUMO ESPECÍFICO.....</b>	<b>104</b>
3.4.11 OPTIMIZACIÓN .....	107
3.4.11.1 Optimización del Factor Lambda para Gasolina Súper.....	111
3.4.11.2 Optimización del Adelanto al Encendido para Gasolina Súper .....	112
3.4.11.3 Optimización del Factor Lambda para Gasolina Extra .....	114
3.4.11.4 Optimización del Adelanto al Encendido para Gasolina Extra .....	116
<b>3.5 RESULTADOS DE OPTIMIZACIÓN PARA GASOLINA SÚPER Y EXTRA.....</b>	<b>118</b>
3.5.1 POTENCIA RELATIVA .....	118
3.5.2 FUERZA TRACTORA RELATIVA .....	120
3.5.3 EMISIÓN RELATIVA DE MONÓXIDO DE CARBONO .....	123
3.5.4 EMISIÓN RELATIVA DE HIDROCARBUROS NO COMBUSTIONADOS .....	125
3.5.5 ÓXIDOS NITROSOS .....	127
3.5.6 DIÓXIDO DE CARBONO .....	130
3.5.7 OXÍGENO.....	132
3.5.8 TIEMPO DE INYECCIÓN RELATIVO.....	134
3.5.9 CONSUMO RELATIVO.....	137
3.5.10 CONSUMO ESPECÍFICO RELATIVO.....	139
<b><i>CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS .....</i></b>	<b><i>143</i></b>
<b>4.1 CONCLUSIONES.....</b>	<b>143</b>
<b>4.2 RECOMENDACIONES.....</b>	<b>145</b>
<b>4.3 FUTUROS TRABAJOS .....</b>	<b>146</b>
<b><i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</i></b>	<b><i>147</i></b>
<b>PAGINAS WEB: .....</b>	<b>148</b>
<b>TEMAS AFINES (TESIS EPN):.....</b>	<b>149</b>
<b>OTRAS PUBLICACIONES: .....</b>	<b>149</b>
<b><i>ANEXOS A .....</i></b>	<b><i>150</i></b>
<b><i>FIGURAS .....</i></b>	<b><i>150</i></b>
<b><i>ANEXOS B .....</i></b>	<b><i>172</i></b>
<b><i>TABLAS .....</i></b>	<b><i>172</i></b>
<b><i>ANEXOS C.....</i></b>	<b><i>176</i></b>
<b><i>NORMA UTILIZADA .....</i></b>	<b><i>176</i></b>
<b><i>ANEXOS D.....</i></b>	<b><i>189</i></b>

<b>DEFINICIÓN</b> .....	189
<b>D-1 DEFINICIÓN DE LA ESTEQUIOMETRÍA</b> .....	190

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. 1 Ciclos de Funcionamiento del motor Otto</i> .....	2
<i>Figura 1. 2 Ventana Lambda</i> .....	4
<i>Figura 1. 3 Punto de encendido en el diagrama presión volumen</i> .....	5
<i>Figura 1. 4 Número de Octanos</i> .....	6
<i>Figura 2. 1 Ciclo de Deming</i> .....	10
<i>Figura 2. 2 Etapas del Diseño Experimental</i> .....	11
<i>Figura 2. 3 Factores de Inferencia</i> .....	12
<i>Figura 2. 4 Vehículo de Pruebas</i> .....	16
<i>Figura 2. 5 Señales de los sensores CMP y CKP</i> .....	17
<i>Figura 2. 6 Sincronización de Señales CMP y CKP</i> .....	18
<i>Figura 2. 7 Valores del sensor de oxígeno</i> .....	19
<i>Figura 2. 8 Módulo de Control Reprogramable</i> .....	20
<i>Figura 2. 9 Cartografía Reprogramable</i> .....	20
<i>Figura 2. 9 (Continuación) Cartografía Reprogramable</i> .....	21
<i>Figura 2. 10 Disposición de Sensores y Actuadores</i> .....	21
<i>Figura 2. 11 Banco Dinamométrico MAHA LPS 3000</i> .....	22
<i>Figura 2. 7 Medidor de flujo de Combustible</i> .....	23
<i>Figura 2. 8 Alimentación de Combustible</i> .....	23
<i>Figura 2. 9 Interfaz del Banco Dinamométrico</i> .....	24
<i>Figura 2. 10 Pinza Amperimétrica</i> .....	25
<i>Figura 2. 11 Interfaz Gráfica</i> .....	26
<i>Figura 2. 12 Disposición del Analizador de Gases</i> .....	27
<i>Figura 2. 13 Sensor de Oxígeno de Banda Ancha</i> .....	31
<i>Figura 2. 14 Respuesta del Sensor de Oxígeno de Banda Ancha</i> .....	31
<i>Figura 2. 15 Lazo de Control</i> .....	32
<i>Figura 2. 16 Respuesta del Lazo de Control</i> .....	33
<i>Figura 2. 17 Circuito de Control</i> .....	33
<i>Figura 2. 18 Proceso para la Toma de Datos</i> .....	34
<i>Figura 2. 19 Formación de CO y HC en función de <math>\lambda</math></i> .....	35
<i>Figura 2. 20 Verificación del Punto de Encendido</i> .....	37
<i>Figura 2. 21 Cartografía de Encendido</i> .....	38
<i>Figura 2. 22 Señal Temporal de aceleración</i> .....	39

<i>Figura 2. 23 Variación de la Energía de la señal según el adelanto al encendido.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 2. 24 Variación de la Potencia de la señal según el adelanto al encendido.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 2. 25 Variación del RMS de la señal según el adelanto al encendido.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 2. 26 Variación del Factor de Cresta de la señal según el adelanto al encendido.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 2. 27 Variación de la Energía de la señal según el adelanto al encendido.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 2. 28 Factores normalizados .....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 2. 29 Índice Normalizado .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 2. 35 Presión en el cilindro 1 .....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 2. 30 Medición de Octanaje .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 2. 31 Octanaje de mezclas de Combustibles.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 3. 1 Laboratorio de experimentación.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 3. 2 Gráficas de residuos del Analizador de Gases .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 3. 3 Gráficas de Residuos Tarjeta NI Daq 6003 .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 3. 4 Gráficas de Residuos del Banco Dinamométrico .....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 3. 5 Dispersión de las Variables de Bloqueo.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 3. 6 Dispersión de las Variables de Ruido.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 3. 7 Diagrama de Pareto para CO.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 3. 8 Diagrama de Efectos Principales para CO .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 3. 9 Diagrama de Interacciones para CO .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 3. 10 Emisión de CO en función de <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math>.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 3. 11 Emisión de CO en función de <math>\zeta</math> y R .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3. 12 Zona de trabajo limitada por la emisión de CO.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3. 13 Diagrama de Pareto para HC .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 3. 14 Diagrama de Efectos Principales para HC .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 3. 15 Diagrama de interacciones para HC .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 3. 16 Emisión de HC en función de <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math>.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 3. 17 Emisión de HC en función de <math>\zeta</math> y R .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 3. 18 Emisión de HC según <math>\lambda</math> .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 3. 19 Zona de trabajo limitada por la emisión de HC .....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3. 20 Diagrama de Pareto para CO<sub>2</sub>.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 3. 21 Diagrama de Efectos Principales para CO<sub>2</sub> .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 3. 22 Diagrama de Interacciones para CO<sub>2</sub> .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 3. 23 Emisión de CO<sub>2</sub> en función de <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math>.....</i>	<i>78</i>

<i>Figura 3. 24 Emisión de CO<sub>2</sub> en función de R y <math>\alpha</math></i> .....	79
<i>Figura 3. 25 Gráficos de Contornos para la Emisión de CO<sub>2</sub></i> .....	80
<i>Figura 3. 26 Diagrama de Pareto para O<sub>2</sub></i> .....	80
<i>Figura 3. 27 Diagrama de Efectos Principales para O<sub>2</sub></i> .....	81
<i>Figura 3. 28 Diagrama de Interacciones para O<sub>2</sub></i> .....	81
<i>Figura 3. 29 Emisión de O<sub>2</sub> en función de <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math></i> .....	82
<i>Figura 3. 30 Emisión de O<sub>2</sub> en función de <math>\zeta</math> y R</i> .....	83
<i>Figura 3. 31 Emisión de O<sub>2</sub> en función de R y <math>\alpha</math></i> .....	83
<i>Figura 3. 32 Zona de trabajo limitada por la emisión de O<sub>2</sub></i> .....	84
<i>Figura 3. 33 Diagrama de Pareto para NO<sub>x</sub></i> .....	85
<i>Figura 3. 34 Diagrama de Efectos Principales para NO<sub>x</sub></i> .....	85
<i>Figura 3. 35 Diagrama de Interacciones para NO<sub>x</sub></i> .....	86
<i>Figura 3. 36 Emisión de NO<sub>x</sub> en función de <math>\eta</math> y <math>\zeta</math></i> .....	87
<i>Figura 3. 37 Emisión de NO<sub>x</sub> en función de <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math></i> .....	87
<i>Figura 3. 38 Zona de trabajo limitada por la emisión de NO<sub>x</sub></i> .....	88
<i>Figura 3. 39 Diagrama de Pareto para Tiempo de Inyección</i> .....	89
<i>Figura 3. 40 Diagrama de Efectos Principales para Tiempo de Inyección</i> .....	89
<i>Figura 3. 41 Diagrama de Interacciones para Tiempo de Inyección</i> .....	90
<i>Figura 3. 42 Tiempo de Inyección en función de <math>\eta</math> y <math>\zeta</math></i> .....	91
<i>Figura 3. 43 Tiempo de Inyección en función de <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math></i> .....	92
<i>Figura 3. 44 Diagrama de Pareto para Consumo</i> .....	92
<i>Figura 3. 45 Diagrama de Efectos Principales para Consumo</i> .....	93
<i>Figura 3. 46 Diagrama de Interacciones para Consumo</i> .....	93
<i>Figura 3. 47 Consumo en función de <math>\eta</math> y <math>\zeta</math></i> .....	94
<i>Figura 3. 48 Consumo en función de <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math></i> .....	95
<i>Figura 3. 49 Consumo en función de <math>\lambda</math> y R</i> .....	96
<i>Figura 3. 50 Diagrama de Pareto para Fuerza Tractora</i> .....	96
<i>Figura 3. 51 Diagrama de Efectos Principales para Fuerza Tractora</i> .....	97
<i>Figura 3. 52 Diagrama de Interacciones para Fuerza Tractora</i> .....	97
<i>Figura 3. 53 Fuerza Tractora en función de <math>\eta</math> y <math>\zeta</math></i> .....	98
<i>Figura 3. 54 Fuerza Tractora en función de <math>\alpha</math> y R</i> .....	99
<i>Figura 3. 55 Fuerza Tractora en función de <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math></i> .....	100
<i>Figura 3. 56 Diagrama de Pareto para Potencia</i> .....	100
<i>Figura 3. 57 Diagrama de Efectos Principales para Potencia</i> .....	101



<b>Figura 3. 58 Diagrama de Interacciones para Potencia</b> .....	102
<b>Figura 3. 59 Potencia en función de <math>\eta</math> y <math>\zeta</math></b> .....	103
<b>Figura 3. 60 Potencia en función de <math>R</math> y <math>\alpha</math></b> .....	103
<b>Figura 3. 61 Potencia en función de <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math></b> .....	104
<b>Figura 3. 62 Diagrama de Pareto para Consumo Específico</b> .....	105
<b>Figura 3. 63 Diagrama de Efectos Principales para Consumo Específico</b> .....	105
<b>Figura 3. 64 Diagrama de Interacciones para Consumo Específico</b> .....	106
<b>Figura 3. 65 Consumo Específico en función de <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math></b> .....	107
<b>Figura 3. 66 Metas de Optimización para <math>F</math> y <math>P</math></b> .....	108
<b>Figura 3. 67 Metas de Optimización para las Emisiones Contaminantes</b> .....	109
<b>Figura 3. 68 Zona de optimización para combustibles a) Súper b) Extra</b> .....	110
<b>Figura 3. 69 Optimización del factor <math>\lambda</math> en función <math>\zeta</math> y <math>\eta</math></b> .....	112
<b>Figura 3. 70 Optimización del factor <math>\alpha</math> en función <math>\zeta</math> y <math>\eta</math></b> .....	113
<b>Figura 3. 71 Respuesta absoluta del factor <math>\alpha</math> en función <math>\zeta</math> y <math>\eta</math></b> .....	114
<b>Figura 3. 72 Optimización del factor <math>\lambda</math> en función <math>\zeta</math> y <math>\eta</math> para gasolina extra</b> .....	115
<b>Figura 3. 73 Optimización del factor <math>\alpha</math> en función <math>\zeta</math> y <math>\eta</math> para gasolina extra</b> .....	117
<b>Figura 3. 74 Respuesta absoluta del factor <math>\alpha</math> en función <math>\zeta</math> y <math>\eta</math> para gasolina extra</b> ....	117
<b>Figura 3. 75 Potencia relativa usando gasolina súper</b> .....	119
<b>Figura 3. 76 Potencia relativa usando gasolina extra</b> .....	120
<b>Figura 3. 77 Fuerza tractora relativa usando gasolina súper</b> .....	122
<b>Figura 3. 78 Fuerza tractora relativa usando gasolina extra</b> .....	122
<b>Figura 3. 79 Emisión Relativa de Monóxido de Carbono usando gasolina súper</b> .....	124
<b>Figura 3. 80 Emisión Relativa de Monóxido de Carbono usando gasolina extra</b> .....	125
<b>Figura 3. 81 Emisión Relativa de Hidrocarburos no Combustionados usando gasolina súper</b> .....	126
<b>Figura 3. 82 Emisión Relativa de Hidrocarburos no Combustionados usando gasolina extra</b> .....	127
<b>Figura 3. 83 Emisión Relativa de Óxidos Nitrosos Relativos usando gasolina súper</b> 129	
<b>Figura 3. 84 Emisión Relativa de Óxidos Nitrosos Relativos usando gasolina extra</b> ..	129
<b>Figura 3. 85 Emisión Relativa de Dióxido de Carbono usando gasolina súper</b> .....	131
<b>Figura 3. 86 Emisión Relativa de Dióxido de Carbono usando gasolina extra</b> .....	131
<b>Figura 3. 87 Emisión Relativa de Oxígeno usando gasolina súper</b> .....	133
<b>Figura 3. 88 Emisión Relativa de Oxígeno usando gasolina extra</b> .....	134
<b>Figura 3. 89 Tiempo de Inyección Relativo usando gasolina súper</b> .....	136

<b>Figura 3. 90 Tiempo de Inyección Relativo usando gasolina extra .....</b>	<b>136</b>
<b>Figura 3. 91 Comportamiento de las emisiones respecto del factor lambda .....</b>	<b>137</b>
<b>Figura 3. 92 Consumo Relativo usando gasolina súper .....</b>	<b>138</b>
<b>Figura 3. 93 Consumo Relativo usando gasolina extra.....</b>	<b>139</b>
<b>Figura 3. 94 Consumo Específico Relativo usando gasolina súper.....</b>	<b>141</b>
<b>Figura 3. 95 Consumo Específico Relativo usando gasolina extra.....</b>	<b>141</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2. 1 Variables de respuesta</b> .....	13
<b>Tabla 2. 2 Variables de Estudio</b> .....	14
<b>Tabla 2. 3 Variables de Bloqueo</b> .....	15
<b>Tabla 2. 4 Variables de Ruido</b> .....	15
<b>Tabla 2. 5 Características del Vehículo de Pruebas</b> .....	16
<b>Tabla 2. 5 (Continuación) Características del Vehículo de Pruebas</b> .....	17
<b>Tabla 2. 6 Valores originales del vehículo de pruebas</b> .....	18
<b>Tabla 2. 7 Características del Medidor de flujo de Combustible</b> .....	24
<b>Tabla 2.8 Características de la Pinza amperimétrica y la Tarjeta Daq</b> .....	25
<b>Tabla 2. 9 Características del Analizador de Gases MGT 5</b> .....	26
<b>Tabla 2. 9 (Continuación) Características del Analizador de Gases MGT 5</b> .....	27
<b>Tabla 2. 10 Niveles del Factor Régimen de Giro</b> .....	29
<b>Tabla 2. 11 Niveles del Factor Carga</b> .....	29
<b>Tabla 2. 12 Límites máximos de emisiones de CO y HC</b> .....	30
<b>Tabla 2. 13 Emisión de CO y HC en función del factor Lambda</b> .....	34
<b>Tabla 2. 14 Intervalos del Factor Lambda para la emisión de CO y HC</b> .....	35
<b>Tabla 2. 15 Niveles del Factor Lambda</b> .....	36
<b>Tabla 2. 16 Valores absolutos de adelanto al encendido</b> .....	37
<b>Tabla 2. 17 Características del acelerómetro</b> .....	38
<b>Tabla 2. 18 Características temporales de la señal de aceleración</b> .....	45
<b>Tabla 2. 19 Índice Normalizado</b> .....	46
<b>Tabla 2. 20 Niveles del Factor Incremento del Adelanto al Encendido</b> .....	47
<b>Tabla 2. 21 Valores de Adelanto al encendido para la experimentación</b> .....	48
<b>Tabla 2. 21 (Continuación) Valores de Adelanto al encendido para la experimentación</b> .....	49
<b>Tabla 2. 22 Características del medidor de octanaje</b> .....	49
<b>Tabla 2. 23 Variación de octanaje para diferentes mezclas de combustible</b> .....	50
<b>Tabla 2. 24 Niveles Factoriales</b> .....	51
<b>Tabla 2. 25 Matriz del Diseño Experimental Factorial</b> .....	52
<b>Tabla 2. 25 (Continuación) Matriz del Diseño Experimental Factorial</b> .....	53
<b>Tabla 2. 26 Matriz del Diseño Experimental para puntos intermedios</b> .....	53

<b>Tabla 3. 1 Aleatorización de las Pruebas</b> .....	55
<b>Tabla 3. 2 (Continuación 1) Aleatorización de las Pruebas</b> .....	56
<b>Tabla 3. 3 (Continuación 2) Aleatorización de las Pruebas</b> .....	57
<b>Tabla 3. 4 (Continuación 3) Aleatorización de las Pruebas</b> .....	58
<b>Tabla 3. 5 (Continuación 4) Aleatorización de las Pruebas</b> .....	59
<b>Tabla 3. 6 Nombre de las muestras</b> .....	61
<b>Tabla 3. 7 Datos obtenidos de la experimentación</b> .....	62
<b>Tabla 3. 8 Emisión mínima de HC</b> .....	75
<b>Tabla 3. 9 Resultados de la Optimización del factor <math>\lambda</math> para gasolina súper</b> .....	111
<b>Tabla 3. 10 Resultados de la Optimización del factor <math>\alpha</math> para gasolina súper</b> .....	113
<b>Tabla 3. 11 Resultados de la Optimización del factor <math>\lambda</math> para gasolina extra</b> .....	114
<b>Tabla 3. 12 (Continuación) Resultados de la Optimización del factor <math>\lambda</math> para gasolina extra</b> .....	115
<b>Tabla 3. 13 Resultados de la Optimización del factor <math>\alpha</math> para gasolina extra</b> .....	116
<b>Tabla 3. 14 Potencia Relativa</b> .....	118
<b>Tabla 3. 15 (Continuación) Potencia Relativa</b> .....	119
<b>Tabla 3. 16 Fuerza Tractora Relativa</b> .....	121
<b>Tabla 3. 17 Emisión Relativa de Monóxido de Carbono</b> .....	123
<b>Tabla 3. 18 (Continuación) Emisión Relativa de Monóxido de Carbono</b> .....	124
<b>Tabla 3. 19 Emisión Relativa de Hidrocarburos no Combustionados</b> .....	125
<b>Tabla 3. 20 (Continuación) Emisión Relativa de Hidrocarburos no Combustionados</b> .....	126
<b>Tabla 3. 21 Emisión Relativa de Óxidos Nítricos Relativos</b> .....	128
<b>Tabla 3. 22 Emisión Relativa de Dióxido de Carbono</b> .....	130
<b>Tabla 3. 23 Emisión Relativa de Oxígeno</b> .....	132
<b>Tabla 3. 24 (Continuación) Emisión Relativa de Oxígeno</b> .....	133
<b>Tabla 3. 25 Tiempo de Inyección</b> .....	135
<b>Tabla 3. 26 Consumo Relativo</b> .....	137
<b>Tabla 3. 27 (Continuación) Consumo Relativo</b> .....	138
<b>Tabla 3. 28 Consumo Específico Relativo</b> .....	140

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXOS A</b> .....	150
<b>FIGURAS</b> .....	150
<i>Figura A-1 Emisión de CO vs <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math> para gasolina súper</i> .....	151
<i>Figura A-2 Emisión de CO vs <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math> para gasolina extra</i> .....	152
<i>Figura A-3 Emisión de CO vs <math>\alpha</math> y <math>\zeta</math> para gasolina súper</i> .....	152
<i>Figura A-4 Emisión de CO vs <math>\alpha</math> y <math>\zeta</math> para gasolina extra</i> .....	152
<i>Figura A-5 Emisión de CO vs <math>\alpha</math> y <math>\zeta</math> para gasolina extra 2500 rpm</i> .....	153
<i>Figura A-6 Emisión de CO vs <math>\zeta</math> y RON ralentí</i> .....	153
<i>Figura A-7 Emisión de CO vs <math>\zeta</math> y RON 2500 rpm</i> .....	154
<i>Figura A-8 Emisión de CO vs <math>\eta</math> y <math>\zeta</math> para mezcla de combustibles</i> .....	154
<i>Figura A-9 Emisión de CO vs <math>\lambda</math> y <math>\eta</math> para gasolina súper</i> .....	155
<i>Figura A-10 Emisión de CO vs <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math> para gasolina extra</i> .....	155
<i>Figura A-11 Emisión de CO vs <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math> para gasolina súper</i> .....	156
<i>Figura A-12 Emisión de CO vs <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math> para gasolina extra 2500 rpm</i> .....	156
<i>Figura A-13 Emisión de CO vs <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math> para gasolina súper 2500 rpm</i> .....	157
<i>Figura A-14 Emisión de HC vs <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math> para gasolina súper</i> .....	157
<i>Figura A-15 Emisión de HC vs <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math> para mezcla de combustibles</i> .....	158
<i>Figura A-16 Emisión de HC vs <math>\lambda</math> y <math>\eta</math> para gasolina súper</i> .....	158
<i>Figura A-17 Emisión de HC vs <math>\alpha</math> y <math>\zeta</math> para gasolina súper</i> .....	159
<i>Figura A-18 Emisión de HC vs <math>\alpha</math> y RON</i> .....	159
<i>Figura A-19 Emisión de HC vs <math>\alpha</math> y RON 2500 rpm</i> .....	160
<i>Figura A-20 Emisión de HC vs <math>\eta</math> y <math>\zeta</math> para gasolina súper</i> .....	160
<i>Figura A-21 Emisión de HC vs <math>\zeta</math> y <math>\alpha</math> para mezclas de combustibles</i> .....	161
<i>Figura A-22 Emisión de HC vs <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math> para gasolina súper</i> .....	161
<i>Figura A-23 Emisión de HC vs <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math> para gasolina extra</i> .....	162
<i>Figura A-24 Emisión de HC vs <math>\zeta</math> y <math>\eta</math> para gasolina súper</i> .....	162
<i>Figura A-25 Emisión de NOx vs <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math> para gasolina extra</i> .....	163
<i>Figura A-26 Emisión de NOx vs <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math> para gasolina súper</i> .....	163
<i>Figura A-27 Emisión de NOx vs RON y <math>\alpha</math></i> .....	164
<i>Figura A-28 Emisión de NOx vs RON y <math>\alpha</math></i> .....	164

<i>Figura A-29 Emisión de NOx vs RON y <math>\lambda</math> 2500 rpm</i> .....	165
<i>Figura A-30 Emisión de NOx vs <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math> para gasolina súper</i> .....	165
<i>Figura A-31 Emisión de NOx vs <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math> para gasolina extra</i> .....	166
<i>Figura A-32 Emisión de NOx vs <math>\alpha</math> y RON</i> .....	166
<i>Figura A-33 Emisión de NOx vs <math>\lambda</math> y RON</i> .....	167
<i>Figura A-34 Emisión de NOx vs <math>\eta</math> y <math>c</math> para gasolina extra</i> .....	167
<i>Figura A-35 Emisión de NOx vs <math>\eta</math> y <math>c</math> para gasolina súper</i> .....	168
<i>Figura A-36 Potencia vs <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math> para gasolina extra</i> .....	168
<i>Figura A-37 Potencia vs <math>\lambda</math> y <math>\alpha</math> para gasolina súper</i> .....	169
<i>Figura A-38 Potencia vs <math>\alpha</math> y RON</i> .....	169
<i>Figura A-39 Potencia vs <math>\lambda</math> y RON</i> .....	170
<i>Figura A-40 Instrumento virtual para la medición del tiempo de inyección y flujo de combustible</i> .....	171
<b>ANEXOS B</b> .....	172
<b>TABLAS</b> .....	172
<i>Tabla B-1 Resultados relativos de optimización gasolina súper</i> .....	173
<b>ANEXOS C</b> .....	176
<b>NORMA UTILIZADA</b> .....	176
<b>C-1 NORMA INEN 960 VEHÍCULOS AUTOMOTORES DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA NETA DEL MOTOR</b> .....	177
<b>C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 1)</b> .....	178
<b>C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 2)</b> .....	179
<b>C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 3)</b> .....	180
<b>C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 4)</b> .....	181
<b>C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 5)</b> .....	182
<b>C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 6)</b> .....	183
<b>C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 7)</b> .....	184
<b>C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 8)</b> .....	185
<b>C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 9)</b> .....	186
<b>C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 10)</b> .....	187
<b>C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 11)</b> .....	188
<b>ANEXOS D</b> .....	189
<b>DEFINICIÓN</b> .....	189
<b>D-1 DEFINICIÓN DE LA ESTEQUIOMETRÍA</b> .....	190

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTOS Y MARCO TEÓRICO

### 1.1 FUNDAMENTOS

Los vehículos que utilizan gasolina para su funcionamiento, necesitan que este combustible este en forma gaseosa para que pueda mezclarse de manera homogénea con el oxígeno del aire, al mismo tiempo se requiere que esta mezcla logre quemarse completamente dentro de la cámara de combustión.

En un inicio con la aparición del motor ciclo Otto y de manera muy rudimentaria se utilizó un carburador que hacía el trabajo de pasar del estado líquido a la gasolina al estado gaseoso y de esta manera quemarse en las mejores condiciones.

A pesar de que el carburador siendo un elemento practicante simple resolvió varios de los problemas de gasificación del combustible, sin embargo no pudo resolver los problemas de consumo y sobre todo de contaminación, ya que las normativas anticontaminantes cada vez más estrictas recayeron sobre el sistema de alimentación de los vehículos motorizados, por ser los causantes de la contaminación principalmente al aire, que poco a poco se convirtió en un gran problema para toda la humanidad; tanto es así que prácticamente el carburador dejo de ser parte del sistema de alimentación de los motores de combustión interna a gasolina.

La introducción del sistema de inyección para los motores a gasolina no hubiera sido posible de no ser por los avances en la electrónica, logrando principalmente mantener el control sobre el sistema de alimentación del combustible y del sistema de encendido.

#### 1.1.1 ANTECEDENTES

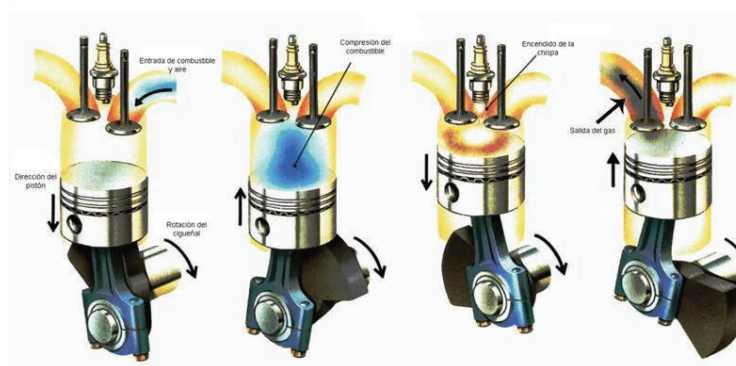
Hace aproximadamente ciento treinta años se construyó el primer automóvil impulsado por un motor de combustión interna de cuatro tiempos denominado ciclo Otto; este invento llego a convertirse en uno de los más importantes del siglo XX, ya que permitió

cambiar por completo la forma de vivir de todas las personas, facilitando su movilidad, llegando a ser un pilar fundamental para el progreso de los pueblos como dinamizador de la economía y además por convertirse en un sinónimo de libertad para los poseedores de los vehículos.

A pesar de todas sus indiscutibles ventajas, nadie se imaginó que con la aparición del automóvil también aparecerían una serie de problemas como por ejemplo, la marcada dependencia al petróleo y simultáneamente de contaminación, por estos motivos cada día los fabricantes de vehículos diseñan y construyen motores más eficientes con bajo consumo de combustible y con menores emisiones contaminantes, para esto ha sido imprescindible la aplicación de los sistemas de control electrónico en el control eficiente del motor de combustión interna de los vehículos motorizados.

## 1.2 MARCO TEÓRICO

El motor de combustión interna alternativo de encendido provocado, fue ideado y construido por el técnico alemán Nikolaus August Otto en 1876; quien utilizó gas de alumbrado para su funcionamiento, con un rendimiento del 15%; a esta patente se la denominó como Gasmotor.<sup>1</sup>



**Figura 1. 1 Ciclos de Funcionamiento del motor Otto**

**Fuente:** <http://especiales.ve.autocosmos.com/tipsyconsejos/noticias/2014/01/08/como-funciona-un-motor-de-cuatro-tiempos>

<sup>1</sup> Payri Francisco, Desantes J, Motores de combustión interna alternativos, Valencia, España, 2011. Pag 15.



El motor es el encargado de transformar la energía térmica 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.

En el motor tema de estudio la mezcla se produce fuera del cilindro durante el proceso de admisión, ha esto se lo denomina motores de mezcla homogénea.

Los motores de combustión interna alternativos obtienen un mejor desempeño a nivel del mar y a una temperatura ambiente de alrededor de los 17°C, (condiciones de aire estándar), pero los vehículos requieren moverse por todos los lugares a distintas altitudes y en distintos ambientes, por tales motivos la situación geográfica, la temperatura ambiente y la humedad influyen de manera directa sobre la cantidad de oxígeno contenida en el aire (densidad), por lo tanto la potencia de los motores tiende a disminuir.

Para que se produzca la combustión ideal dentro de la cámara de combustión se requiere que la mezcla de aire y combustible se mantenga en una relación de 14,7 partes de aire para quemar 1 parte de gasolina, esto se conoce como relación estequiométrica.

Un litro de gasolina requiere de aproximadamente de 10000 litros de aire para quemarse completamente, si existe un exceso de aire disminuye la velocidad de combustión y cuando carece del aire suficiente en la mezcla producirá que no se queme toda la gasolina. <sup>2</sup>

Si la formación de la mezcla es con un exceso de aire se le denomina “pobre” para este caso la combustión se hace lenta, produciéndose un calentamiento del motor y pérdida de potencia. Para el caso de una excesiva cantidad de gasolina se le denomina

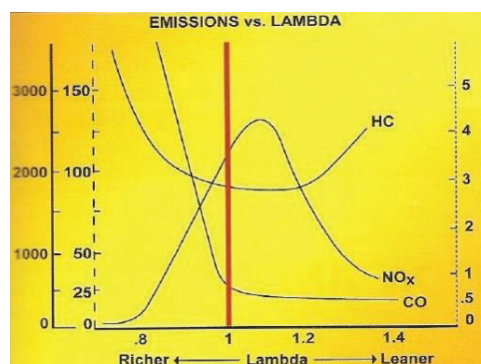
---

<sup>2</sup> Alonso Juan Manuel, Técnicas del Automóvil Motores, Madrid, España, 2000. Pag. 245.

“rica”, que al no haber suficiente aire, no se quema todo el combustible. Una vez que la mezcla aire-gasolina se encuentra dentro de la cámara de combustión al final de la compresión, debe producirse el salto de la chispa en la bujía para inflamar la mezcla, técnicamente se le debe llamar punto de encendido el cual está establecido para obtener la mayor potencia del motor.

### 1.2.1 EL FACTOR LAMBDA

Comúnmente designado con la letra griega " $\lambda$ " designa la proporción aire/combustible (en peso) en forma de mezcla que ingresa al cilindro de un motor de ciclo Otto, comparada con la proporción estequiométrica de la mezcla ideal, de 14,7 partes de aire en peso por 1 parte de combustible en peso (normalmente gasolina).<sup>3</sup>



**Figura 1. 2 Ventana Lambda**

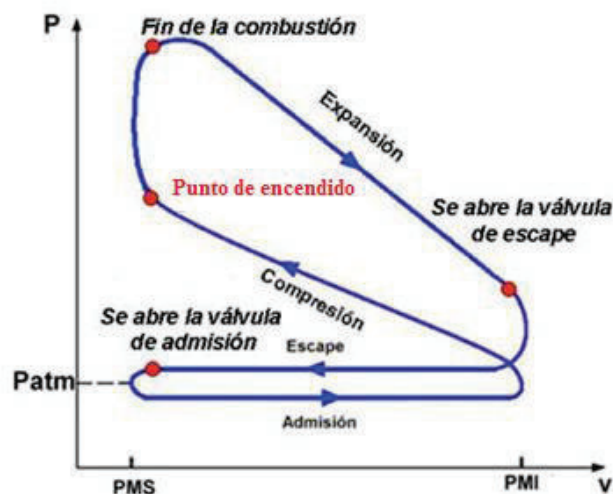
**Fuente:** [http://i1057.photobucket.com/albums/t389/manolossi\\_XXL/3\\_zpsb0df4bff.jpg](http://i1057.photobucket.com/albums/t389/manolossi_XXL/3_zpsb0df4bff.jpg)

### 1.2.2 EL ADELANTO AL ENCENDIDO

Desde el instante en el que salta la chispa en los electrodos de la bujía hasta el inicio de la combustión pasa un breve tiempo de aproximadamente 2 milisegundos, por este motivo es necesario que la chispa se origine con cierta antelación para que la máxima presión sobre la cabeza del pistón sea un poco después de sobrepasar al p.m.s., si el

<sup>3</sup> <http://sisteminyecc.blogspot.com/>

salto de chispa es muy prematuro, la máxima presión se producirá cuando el pistón este subiendo lo cual generara un frenado del émbolo en el movimiento ascendente y si el salto de chispa se produce demasiado tarde, la máxima presión se producirá cuando el pistón este lejos del p.m.s., en su carrera descendente; para los dos casos la potencia se verá disminuida en relación con el combustible consumido.<sup>4</sup>



*Figura 1. 3 Punto de encendido en el diagrama presión volumen*

*Fuente: [http://navarrof.orgfree.com/Docencia/Termodinamica/CiclosGeneracion/ciclo\\_otto.htm](http://navarrof.orgfree.com/Docencia/Termodinamica/CiclosGeneracion/ciclo_otto.htm)*

### 1.2.3 COMBUSTIBLE UTILIZADO EN MOTORES DE CICLO OTTO

Un combustible es una sustancia capaz de reaccionar exotérmicamente con el oxígeno del aire, transformando en energía asociada a su estructura molecular en energía térmica.<sup>5</sup>

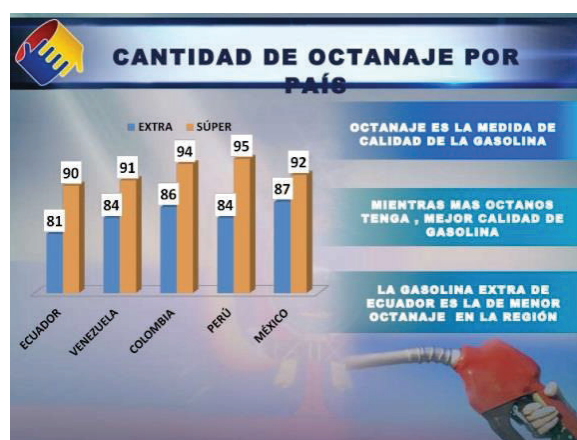
Los motores de ciclo Otto por lo general utilizan gasolina para su funcionamiento la misma que debe gasificar fácil y totalmente para quemarse dentro de la cámara de combustión. La característica principal de la gasolina es el índice de octano (*IO*) o

<sup>4</sup> Alonso Juan Manuel, Técnicas del Automóvil Motores, Madrid, España, 2000. Pag. 372.

<sup>5</sup> Payri Francisco, Desantes J, Motores de combustión interna alternativos, Valencia, España, 2011. Pag. 390.

también conocido como el número de octano (*NO*), que indica la capacidad de quemarse progresiva y homogéneamente a una determinada presión sin producir detonación.<sup>6</sup>

El número de octano es la resistencia a la autoinflamación de un combustible. En los motores ciclo Otto se desarrolla un frente de llama que avanza barriendo la mezcla de reactivos presentes en la cámara; la autoinflamación de esta en zonas aun no alcanzadas por el frente de llama provoca aumentos bruscos de presión (picado) muy perjudiciales para el motor: Cuanto mayor es el número de octano menor es la tendencia a que esto ocurra.



**Figura 1. 4 Número de Octanos**

**Fuente:** <http://pt.slideshare.net/PresidenciaEc/1-mejoramiento-de-la-calidad-de-gasolinas>

Para determinar la calidad antidetonante de una gasolina, se efectúan corridas de prueba en un motor, de donde se obtienen dos parámetros diferentes:

El Research Octane Number (Número de Octano de Investigación) que se representa como RON o simplemente R y que se determina efectuando a una velocidad de 600 revoluciones por minuto (rpm) y a una temperatura de entrada de aire de 125°F (51.7°C).

<sup>6</sup> Alonso Juan Manuel, Técnicas del Automóvil Motores, Madrid, España, 2000. Pag. 243.

El Motor Octane Number (Número de Octano del Motor) que se representa como MON o simplemente M y se obtiene mediante una corrida de prueba en una máquina operada a una velocidad de 900 revoluciones por minuto y con una temperatura de entrada de aire de 300°F (149°C). Para propósitos de comercialización y distribución de las gasolinas, los productores determinan el octanaje comercial, como el promedio de los números de octano de investigación (RON) y el octano del motor (MON), de la siguiente forma.<sup>7</sup>

$$\text{Numero de octano comercial} = \frac{\text{RON} + \text{MON}}{2} = \frac{R + M}{2} \quad (1.1)$$

En la mayoría de los países (incluyendo toda Europa y Australia) el número de octanaje que se indica en una bomba de combustible es el RON, pero en Canadá, los Estados Unidos, México y algunos otros países el número que se indica es el promedio del RON y el MON, al cual se le llama en algunas ocasiones el “Anti-Knock Index” AKI (Índice de Anti-Golpeteo).<sup>8</sup>

En el Ecuador el número de octano de las gasolinas aproximadamente están en 82 y 92 octanos para la gasolina extra y súper respectivamente.

#### **1.2.4 VELOCIDAD DE GIRO Y CARGA DEL MOTOR**

El par motor, depende esencialmente de la cantidad de combustible combustionado en los cilindros. Las fuerzas que se oponen a la rotación (rozamientos internos y resistencias externas al motor), llamado par resistente por estar en oposición al par motor, se lo denomina carga del motor.

---

<sup>7</sup> <http://www.ref.pemex.com/octanaje/que.htm>

<sup>8</sup> <http://www.bglat.com/articles/octanaje.html>

El par motor varía esencialmente de acuerdo con la cantidad de combustible que llena los cilindros y este depende de la posición de la mariposa de gases; entonces la velocidad de giro del motor dependerá en todo momento del valor de la carga y de la posición de la mariposa de gases.

El par motor varía básicamente de acuerdo con la cantidad de combustible que ingresa a los cilindros y por obvias razones depende de la posición de la mariposa de gases que controla el conductor, de tal manera que la velocidad del motor dependerá en todo momento del valor de la carga y de la posición de la mariposa de gases.

Entonces la regulación de la carga y las revoluciones del motor es un asunto de equilibrio entre las fuerzas que producen la rotación del cigüeñal y las que se oponen a este giro. Establecido un régimen de rotación, al variar la carga se crea un desequilibrio y debe ser variada la posición de la mariposa de gases a fin de restablecerlo. En este sentido existen un infinito número de combinaciones de regulación de la mariposa de gases y de la carga, para obtener la velocidad deseada de rotación del motor<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup>Alonso Juan Manuel, Técnicas del Automóvil Motores, Madrid, España, 2000. Pag. 63.

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA PARA LA EXPERIMENTACIÓN**

#### **2.1 INTRODUCCIÓN**

En la industria en general y de manera puntual en la industria automotriz continuamente se realizan investigaciones que tienen como objetivo la mejora en el desempeño de todos sistemas. La inclusión de la gestión electrónica en los vehículos ha contribuido a elevar la eficacia y la eficiencia de los sistemas en los que estos se implementan.

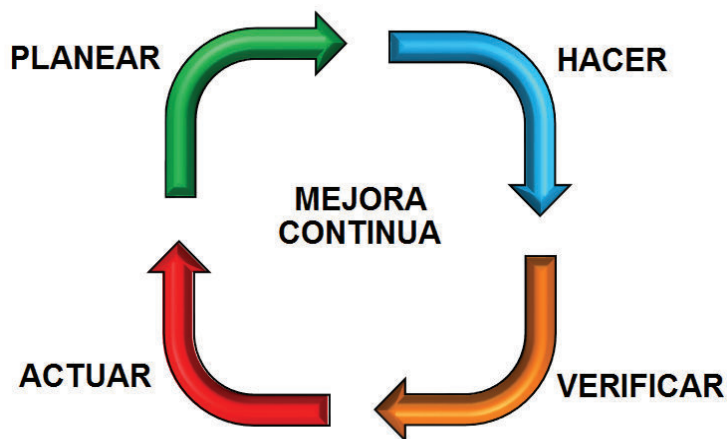
Las mejoras conseguidas están estrechamente ligadas a las configuraciones y calibraciones de los sistemas que se los realizan en laboratorios especializados en el tema, considerando el nivel del mar como referencia y el uso de combustibles disponibles en las regiones en donde se realizan las calibraciones antes mencionadas.

Este trabajo propone realizar un estudio del comportamiento de un motor ciclo Otto de inyección electrónica respecto de la estequiometría de la mezcla y del adelanto al encendido para las condiciones de la ciudad de Cuenca, para esto se plantea la instalación de una computadora reprogramable reemplazando a la original, con el objetivo poder controlar y monitorear el trabajo del motor, de manera puntual para la experimentación se iniciará con un diseño experimental para determinar el grado de influencia que tienen la gasolina extra y súper, además del dosado de la mezcla y del punto de encendido, en el funcionamiento del motor.

#### **2.2 APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE MEJORA CONTINUA**

Entre las estrategias más utilizadas en optimización y mejora continua se encuentra el diseño experimental mediante la aplicación del Ciclo de Deming, que constituye una estrategia para conseguir mejoras continuas tanto en procesos como en productos.

La estrategia de optimización de Deming propone la aplicación repetida del ciclo planear, hacer, verificar y actuar, como se muestra en la figura 2.1.



*Figura 2. 1 Ciclo de Deming*

Según se cita en la norma ISO 9000 las estrategias de mejora continua deben ser soportadas por técnicas estadísticas que a más de explicar la variabilidad ayudan a potenciar la eficacia y eficiencia de procesos y productos. Las técnicas estadísticas como el diseño experimental ayudan a comprender, describir, analizar, interpretar y generar modelos que expliquen la naturaleza, causa y alcance de dicha variabilidad.

### **2.3 DEFINICIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL**

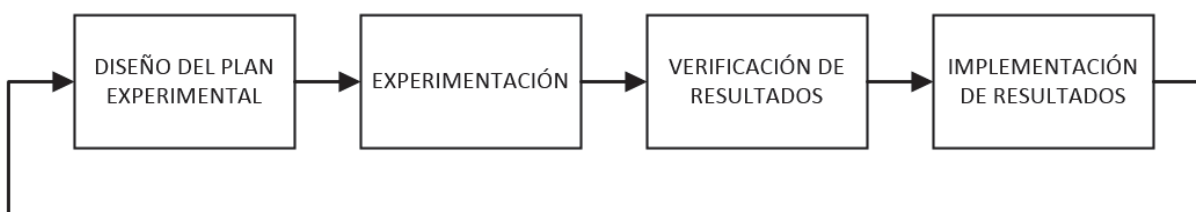
El diseño estadístico de experimentos es quizá la forma más eficaz de obtener información acerca de un proceso que al ser analizada estadísticamente genere evidencia objetiva para la mejora y optimización de dicho proceso. Se parte de la hipótesis de que un motor de combustión interna ciclo Otto puede trabajar de mejor manera que la preestablecida por el fabricante bajo las condiciones atmosféricas generadas en la ciudad de Cuenca, para esto se requiere instalar una computadora



reprogramable para visualizar y controlar varios parámetros de funcionamiento del motor.

El experimento plantea un cambio en las condiciones de funcionamiento del motor con el objetivo de medir el efecto del cambio de cada factor en el desempeño del motor generando conocimiento acerca de cada uno de los procesos que se dan al interior del sistema a través del análisis de los efectos generados en el desarrollo del experimento. Se plantea la planificación y realización de un conjunto de pruebas cuyo objetivo es generar datos que al ser analizados estadísticamente proporcionen evidencias objetivas para la mejora del proceso o producto analizado. Para iniciar la etapa de experimentación se requiere localizar un problema importante en el proceso que sea susceptible de atacarse mediante la implementación del diseño experimental.

El problema radica en la pérdida que causa al proceso el operar de la manera actual, para este 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 reflejadas en el mayor consumo de combustible, la menor generación de potencia y la mayor concentración de contaminantes en los gases de escape.<sup>10</sup> Para el desarrollo del diseño experimental en el marco del ciclo de Mejora Continua de Deming se plantea el desarrollo de cuatro etapas consecutivas que parten desde el diseño del plan experimental, la fase de experimentación, la verificación de resultados y la implementación de los resultados obtenidos como se muestra en la figura 2.2.



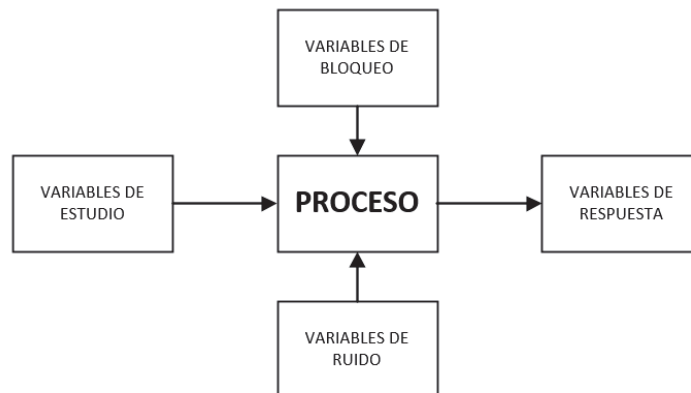
**Figura 2. 2 Etapas del Diseño Experimental**

<sup>10</sup> Caiza P., Portilla A., Determinación de la Influencia de la Altura en emisiones contaminantes de un vehículo con motor ciclo Otto de inyección electrónica de gasolina, Quito, Ecuador, 2011.

### 2.3.1. PLANEACIÓN DEL EXPERIMENTO

La primera acción a realizar es determinar el problema que se quiere atacar mediante la aplicación del diseño experimental y cuáles son los factores que inciden en las respuestas del sistema. El motor ciclo Otto es una máquina térmica que transforma la energía química contenida en el combustible en energía mecánica, durante este proceso se generan muchas transformaciones energéticas que generan diversas salidas que pueden ser cuantificadas de diversas formas.

Los factores que influyen en el funcionamiento del motor se clasifican en variables de entrada o también conocidas como factores de estudio, variables de bloqueo, variables de ruido y variables de respuesta como se muestra en la figura 2.3.



**Figura 2. 3 Factores de Inferencia**

### 2.3.2 VARIABLES DE RESPUESTA

Son las variables de salida del sistema cuyo valor interesa ajustar, el objeto principal de las técnicas de mejora continua es encontrar otra manera de operar el proceso en la cual el comportamiento de una o más variables de respuesta sea mejor que el actual; para el caso del motor Ciclo Otto se muestran en la tabla 2.1.

**Tabla 2. 1 Variables de respuesta**

<b>VARIABLE DE RESPUESTA</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>UNIDAD</b>
Monóxido de Carbono	CO	[ % ]
Hidrocarburos no combustionados	HC	[ ppm ]
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	[ % ]
Oxígeno	O <sub>2</sub>	[ % ]
Óxidos Nitrosos	NO <sub>x</sub>	[ ppm ]
Tiempo de Inyección	Tiny	[ ms ]
Consumo	C	[ l/h ]
Fuerza Tractora	F	[ N ]
Potencia	P	[ W ]

Los valores de emisión de monóxido de carbono y de hidrocarburos no combustionados están basados en los parámetros del fabricante del vehículo tema de estudio.

### **2.3.3 VARIABLES DE ESTUDIO**

Las variables de estudio o también llamados factores de entrada son aquellas que influyen directamente en las variables de respuesta y deben ser estrictamente independientes entre sí, es decir la variación de un factor de entrada no debe influir en la variación de otro factor de entrada, puesto que se generaría problemas en la realización del experimento.

Se deben escoger los factores que más incidan en las variables de respuesta y que sean de relativa sencillez de manipulación, para esto es necesario utilizar la computadora reprogramable para controlar las variables de estudio.

En la tabla 2.2 se muestran los factores escogidos.

**Tabla 2. 2 Variables de Estudio**

<b>VARIABLES DE ESTUDIO</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>UNIDAD</b>
Lambda	$\lambda$	[ m/m ]
Adelanto	$\alpha$	[ ° ]
Régimen de Giro	$\eta$	[ RPM ]
Carga	$\sigma$	[ % ]
Combustible	R	[ RON ]

#### **2.3.4 VARIABLES DE BLOQUEO**

Las variables de bloqueo también denominadas factores controlables son variables de entrada que se pueden fijar en un punto o en un nivel de operación y cuya influencia en las variables de salida no se desea evaluar o es nula, utilizando para tal efecto una computadora reprogramable.

Para este estudio las variables que pueden fijarse en valores constantes o de baja variabilidad, también es necesario anular el funcionamiento del sistema EGR y VVTI; a continuación se presentan en la tabla 2.3.

**Tabla 2. 3 Variables de Bloqueo**

<b>VARIABLES DE BLOQUEO</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
Temperatura del Refrigerante	$T_{ref}$	92	[ ° C ]
Temperatura de la banda de rodadura	$T_{rod}$	30	[ ° C ]
Temperatura del lubricante	$T_{lub}$	95	[ ° C ]
Variable Valve Timing intelligence	$VVTI$	0	%
Recirculación de gases de escape	$EGR$	0	%

### 2.3.5 VARIABLES DE RUIDO

Las variables de ruido son factores difíciles de controlar en condiciones normales de funcionamiento para la ciudad de Cuenca, dichos factores pueden modificar el comportamiento de las variables de respuesta, por lo tanto esta influencia se busca eliminar. Los factores de ruido se muestran en a tabla 2.4.

**Tabla 2. 4 Variables de Ruido**

<b>VARIABLES DE RUIDO</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>UNIDAD</b>
Temperatura del Aire	$T_{aire}$	[ ° C ]
Temperatura del Combustible	$T_{comb}$	[ ° C ]
Humedad relativa del Aire	$H_{rel}$	[ % ]
Presión Atmosférica	$P_{atm}$	[ Pa ]

### 2.3.6 UNIDAD EXPERIMENTAL

La unidad experimental se compone de todos los elementos a utilizar en el desarrollo del experimento, para la generación y obtención de datos.

### 2.3.6.1 Vehículo de Pruebas

El vehículo utilizado para la realización de las pruebas es un vehículo marca Toyota modelo Hilux 2.7 mostrado en la figura 2.4.



**Figura 2. 4 Vehículo de Pruebas**

Las características del vehículo de pruebas se muestran en la tabla 2.5.

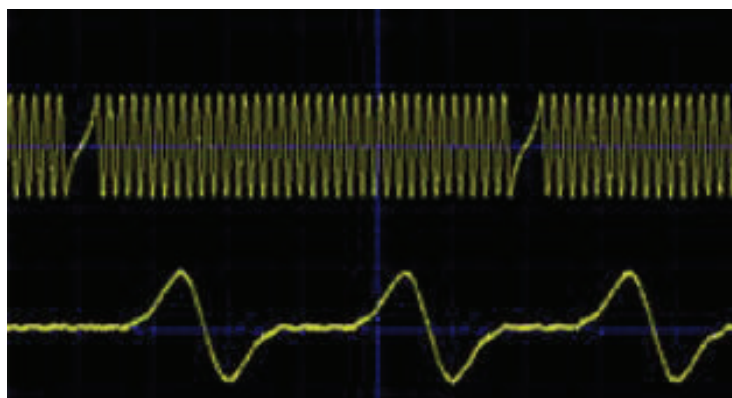
**Tabla 2. 5 Características del Vehículo de Pruebas**

Marca	Toyota
Modelo	Hilux
Tipo	Pick Up
Motor	2.7 i
Potencia Máxima	152 HP @ 4800 rpm
Torque	240 Nm @ 4000 rpm
Cilindrada	2694 cm <sup>3</sup>
Número de cilindros	4
Relación de Compresión	9.5
Sistema de combustible	MPFI Secuencial

**Tabla 2. 5 (Continuación) Características del Vehículo de Pruebas**

Distribución	DOHC VVTI
Válvulas por cilindro	4
Normativa	Euro 3
Emisión de CO <sub>2</sub>	178 g / km
Consumo medio	8.1 l / 100 km
Neumáticos	185/70 R14

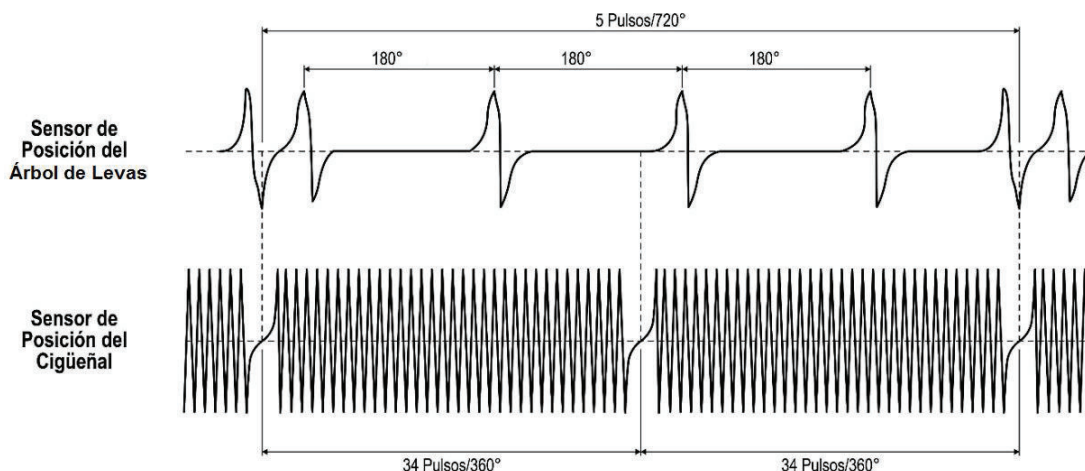
El sistema de inyección de combustible es multipunto secuencial que a más de la inyección controla el encendido, el sistema VVTI y el cuerpo de aceleración motorizado. Para la sincronización de la inyección y del encendido el motor cuenta con sensores de posición del cigüeñal CKP y del árbol de levas respectivamente CMP, ambos del tipo inductivo. En la figura 2.5 se muestra la sincronización de las dos señales tomadas en ralentí sin carga a una temperatura del refrigerante de 93°C.



**Figura 2. 5 Señales de los sensores CMP y CKP**

La rueda fónica del cigüeñal posee 34 dientes con dos faltantes, el sensor de posición del cigüeñal envía la señal analógica de voltaje en la que cada ciclo corresponde a 10° de giro del cigüeñal, los dos dientes faltantes sirven para determinar la posición del punto muerto superior del cilindro 1. Para determinar la posición del árbol de levas el eje está provisto de 5 salientes que generan 5 impulsos por cada vuelta del árbol de levas es decir cada dos vueltas del cigüeñal. Esta configuración de señales es conocida como 34+2+3 y hace referencia a la sincronización de las señales del CKP y

del CMP. La señal del CKP tiene un desfase de  $0^\circ$  respecto del punto muerto superior de los cilindros 1 y 4, mientras que la señal del CMP genera dos ciclos seguidos en la fase de compresión del cilindro 1 como se muestra en la figura 2.6.



**Figura 2. 6 Sincronización de Señales CMP y CKP**

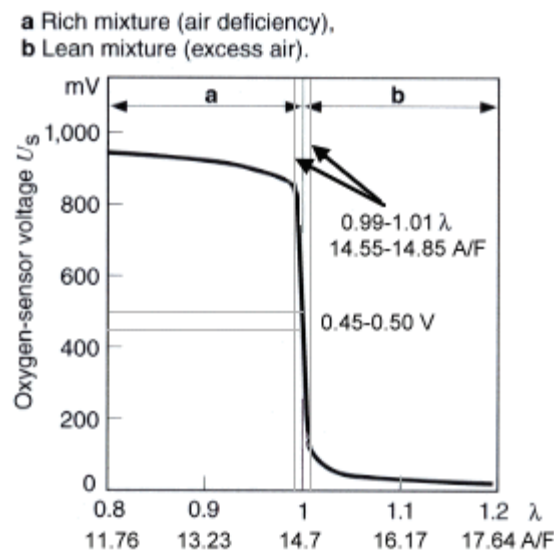
Para la experimentación de este motor se requiere partir de valores originales, esto significa que el motor debe trabajar en condiciones estándar, por lo tanto se procede a desactivar el sistema de recirculación de gases de escape (EGR), el sistema de variación de válvulas (VVTI), el sensor de detonación (KS), y por último se retira el catalizador de gases, todo esto únicamente mientras dure las pruebas. A continuación en la tabla 2.6 se presentan los valores originales del vehículo de pruebas.

**Tabla 2. 6 Valores originales del vehículo de pruebas**

REGIMEN [ RPM ]	CARGA [ % ]	CO [ % ]	HC [ ppm ]	CO2 [ % ]	O2 [ % ]	NOX [ ppm ]	Consumo [ l/h ]	F [ N ]	P [ kW ]	consumo esp [ kg/kwh ]
700	0	0,29	26	15,07	0,76	0	1,04	29	0,25	5,782
2500	0	0,28	14	15,05	0,53	21	3,4	28	0,59	6,825
700	100	0,41	28	15,31	0,67	105	1,19	145	2,05	1,929
2500	100	0,44	25	15,01	0,73	971	13,29	1477	29,51	0,629



También es necesario conocer el rango de funcionamiento del sensor de oxígeno del motor del vehículo de pruebas, estos datos servirán de base para la posterior experimentación (ya que luego este elemento será remplazado por un sensor de oxígeno de Banda Ancha), a continuación en la figura 2.7, se presenta el rango de funcionamiento del sensor de oxígeno propio del motor de pruebas.



**Figura 2.7** Valores del sensor de oxígeno

**Fuente:** *Gasoline Engine Management, Systems and Components, Konrad Reif, Springer Vieweg, Mumbai, 2014 ISBN-10: 3658039639*

### 2.3.6.2 Módulo de Control reprogramable

El sistema de inyección es controlado por la ECU quien se encarga de recibir las señales de los diferentes sensores, procesar esta información y controlar los actuadores en función de los datos de ingreso. Para relizar esta tarea la ECU tiene en su interior información preestablecida. Para poder establecer otros parámetros de funcionamiento diferentes a los impuestos por el fabricante del vehículo, es necesario gestionar la información a través de un módulo reprogramable en el cual se puedan modificar en tiempo real, factores como el adelanto al encendido y tiempo de inyección

mediante el cambio de la cartografía de control. El módulo de control reprogramable utilizado se muestra en la figura 2.8.

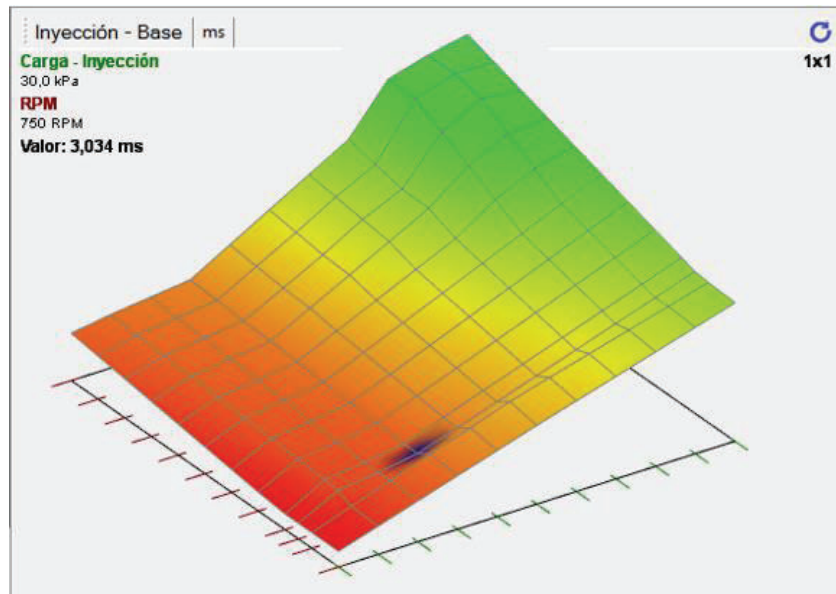


**Figura 2. 8 Módulo de Control Reprogramable**

El módulo de control reprogramable Haltech Sport 1000 permite la configuración y modificación de varios parámetros de funcionamiento del sistema de gestión electrónica del motor en tiempo real mediante su software ECU Manager. En la figura 2.9 se muestra la configuración de la cartografía para el tiempo de inyección.

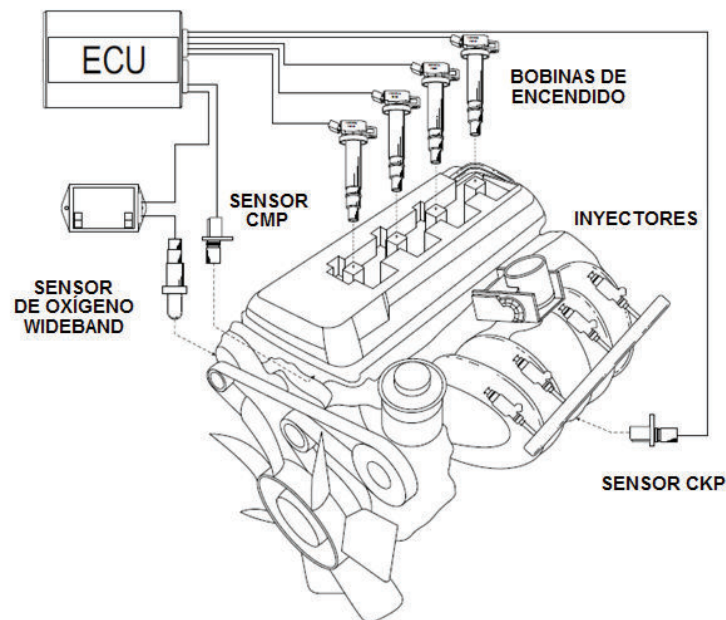
Inyección - Base		ms									
		Carga - Inyección kPa									
		0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	
RPM	5000	3,000	3,400	3,700	4,000	5,428	6,856	8,286	9,714	12,760	
	4500	2,742	3,270	3,570	3,882	5,244	6,604	8,052	9,328	12,670	
RPM	4000	2,484	3,140	3,440	3,764	5,058	6,352	7,818	8,940	11,780	
	3500	2,226	3,012	3,312	3,646	4,960	6,272	7,586	8,900	10,810	
Objetivo	3000	1,968	2,882	3,182	3,528	4,688	5,846	7,006	8,166	9,840	
	2500	1,710	2,752	3,052	3,412	4,504	5,596	6,688	7,780	8,872	
Objetivo	2000	1,452	2,624	2,924	3,294	4,318	5,344	6,368	7,394	8,420	
	1500	1,196	2,494	2,794	3,176	4,134	5,092	6,050	7,008	7,966	
Objetivo	1000	1,000	2,364	2,664	3,058	3,948	4,840	5,730	6,620	7,512	
	750	1,000	2,300	2,600	3,034	3,856	4,714	5,570	6,428	7,286	
Objetivo	500	1,000	1,866	2,732	3,598	4,466	5,332	6,066	6,774	7,482	
	0	1,000	1,800	2,600	3,400	4,200	5,000	5,760	6,520	7,280	
Valor de											

**Figura 2. 9 Cartografía Reprogramable**



**Figura 2. 9 (Continuación) Cartografía Reprogramable**

Para poder controlar el sistema de inyección a través del módulo reprogramable es necesario conectar el módulo con los diferentes sensores y actuadores, para luego configurarlo de tal manera que el motor funcione acorde a las necesidades del experimento. La ilustración de conexión se muestra en la figura 2.10.



**Figura 2. 10 Disposición de Sensores y Actuadores**

### 2.3.6.3 Banco Dinamométrico

Para el desarrollo del experimento, tanto para la toma de datos como para la generación de carga se utilizó el Banco dinamométrico MAHA LPS 3000 mostrado en la figura 2.11, este consta de un freno dinamométrico de corrientes parásitas que permite generar carga a más de medir la fuerza tractora y la potencia simultáneamente. Puede determinar la potencia según DIN 70020, EWG 80/1269, ISO 1585, SAE J1349 O JIS D1001. Para el efecto se ha determinado la potencia neta según NTE INEN 0960 1984, Vehículos Automotores, determinación de Potencia neta del motor.

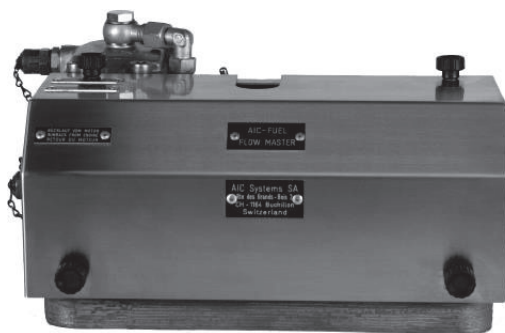


**Figura 2. 11 Banco Dinamométrico MAHA LPS 3000**

El banco consta de dos juegos de rodillos conectados a los frenos, que captan la velocidad y el par de giro; a más de ello el banco se conecta a una consola de sensores que permite monitorear condiciones ambientales como la presión atmosférica, humedad relativa y temperatura del aire. También se miden la temperatura del lubricante y la velocidad de giro del motor.

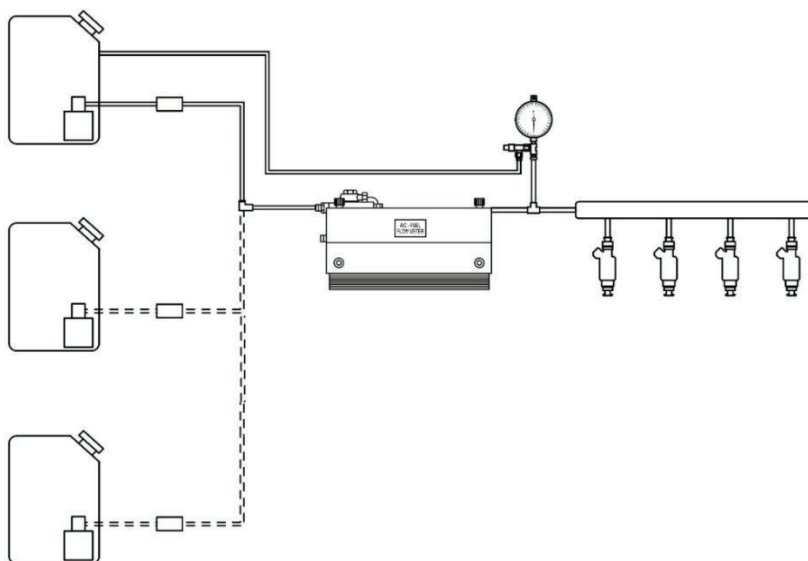
### 2.3.6.4 Medidor de Flujo de Combustible

El banco dinamométrico puede conectarse al contador de combustible AIC FUEL Flow Master 5004 mostrado en la figura 2.12, de donde obtiene la información sobre el flujo instantáneo de combustible, flujo promedio y cantidad de combustible consumido.



**Figura 2. 7 Medidor de flujo de Combustible**

El medidor de flujo de combustible contiene un generador de pulsos que produce 2000 pulsos por litro y tiene certificado de calibración vigente mediante SCS 077 / ISO / IEC 17025. Para el monitoreo constante de la presión y el cambio inmediato de combustible se utiliza la configuración mostrada en la figura 2.13.



**Figura 2. 8 Alimentación de Combustible**

Las características del medidor de flujo de combustible se muestran en la tabla 2.7

**Tabla 2. 7 Características del Medidor de flujo de Combustible**

Rango	0 a 120 l / h
Error Máximo	1 %
Repetitividad	0,2 %
Presión Máxima	5 Bar

El contador se conecta a la plataforma del Banco dinamométrico y la información generada se muestra en la figura 2.14.



**Figura 2. 9 Interfaz del Banco Dinamométrico**

### 2.3.6.5 Pinza Amperimétrica

Para la cuantificación y almacenamiento de los valores del tiempo de inyección se utiliza una pinza amperimétrica Tecpel CA-60 en conjunto con una tarjeta adquisidora de datos NI Daq 6003 mostradas en la figura 2.15.



**Figura 2. 10 Pinza Amperimétrica**

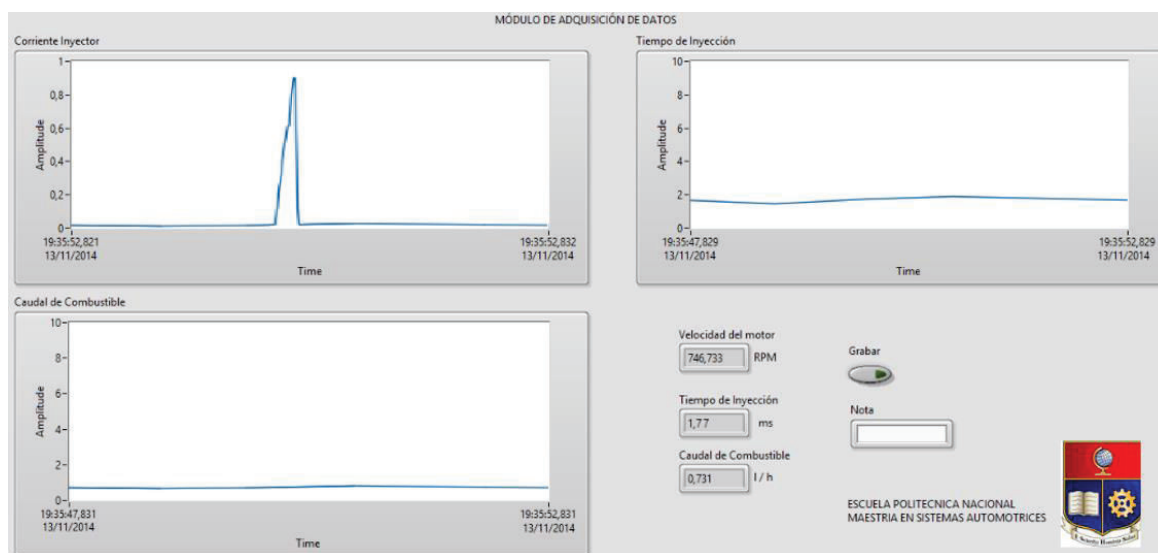
Se ha escogido utilizar una pinza amperimétrica en lugar de una sonda de voltaje, dada su facilidad de conexión y que no se necesita de un circuito atenuador para eliminar los picos generados por la bobina del inyector, a más de ello la tarjeta adquisidora de datos se conecta al medidor de flujo de combustible para poder almacenar los datos generados a través de un instrumento virtual VI. Las características de la pinza amperimétrica y la tarjeta adquisidora de datos se muestran en la tabla 2.8.

**Tabla 2.8 Características de la Pinza amperimétrica y la Tarjeta Daq**

CARACTERÍSTICA	VALOR	UNIDAD
Rango de medida	0.04 - 40	A
Resolución	1 / 10	mV / mA
Temperatura de Funcionamiento	0 – 50	° C
Sensibilidad	0.01	A
Velocidad de muestreo	100	kS / s
Resolución Digital	16	bits

La señal generada por la pinza amperimétrica se envía a la tarjeta Daq para que luego se procese en un instrumento virtual creado en la plataforma Labview® cuya interfaz gráfica se muestra en la figura 2.16. El instrumento virtual generado permite visualizar el comportamiento de la corriente del inyector que tiene como escala máxima de corriente 1 A, la escala total de tiempo se estable en 10 ms. La magnitud del tiempo

de inyección y del flujo de combustible se muestra en una escala de tiempo de 5 segundos, con el objeto de observar la estabilización de las señales. La escala de la magnitud del tiempo de inyección es de 10 ms y del flujo de combustible de 10 l/h. Los datos generados de las mediciones se muestran en ventanas y pueden ser exportados a una tabla.



**Figura 2. 11 Interfaz Gráfica**

### 2.3.6.6 Analizador de Gases

El analizador de gases utilizado para la experimentación es el MAHA MGT 5, que funciona mediante el método no dispersivo de absorción de infrarrojos para la medición de monóxido de carbono, hidrocarburos no combustionados, dióxido de carbono y a través de celdas electroquímicas para la medición de oxígeno y óxidos nitrosos. Las características del analizador se muestran en la tabla 2.9.

**Tabla 2. 9 Características del Analizador de Gases MGT 5**

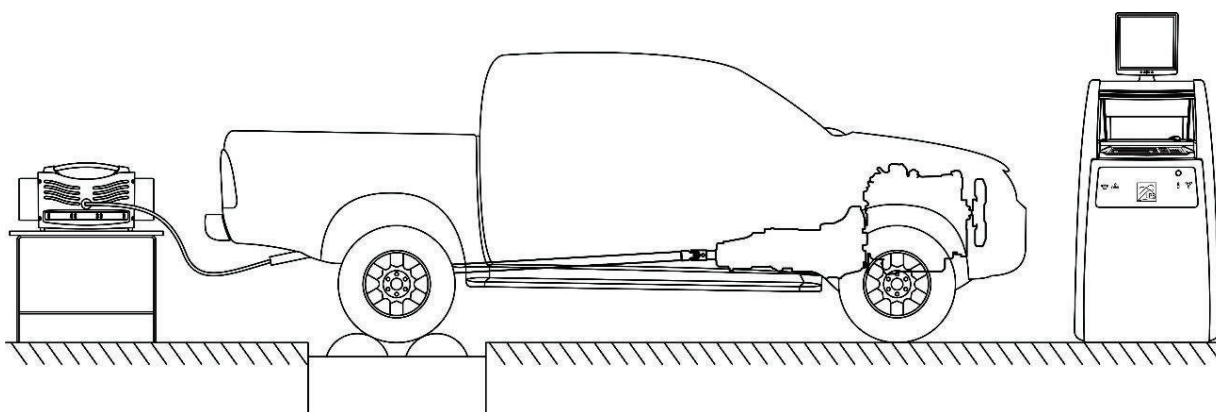
VARIABLE	SÍMBOLO	RANGO	UNIDAD
MONÓXIDO DE CARBONO	CO	0 - 10	%



**Tabla 2. 9 (Continuación) Características del Analizador de Gases MGT 5**

VARIABLE	SÍMBOLO	RANGO	UNIDAD
HIDROCARBUROS NO COMBUSTIONADOS	HC	0 - 5000	ppm
DIÓXIDO DE CARBONO	CO <sub>2</sub>	0 - 16	%
OXÍGENO	O <sub>2</sub>	0 - 21	%
ÓXIDOS NITROSOS	NO <sub>x</sub>	0 - 5000	ppm
FACTOR LAMBDA	$\lambda$	0 - 2	-

El analizador de gases MGT 5 forma parte del banco dinamométrico su conexión al escape del vehículo se da a través de una sonda como se muestra en la figura 2.17.



**Figura 2. 12 Disposición del Analizador de Gases**

## 2.4 PRESENTACIÓN Y DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

Se ha seleccionado un diseño experimental factorial de dos niveles con puntos intermedios que tiene por objeto determinar la influencia de las variables de entrada

sobre las variables de salida para aumentar las prestaciones del motor y disminuir el consumo de combustible y la emisión de gases contaminantes.

#### **2.4.1 DEFINICIÓN DE LOS NIVELES**

Para poder determinar el efecto de cada factor sobre las salidas del sistema son necesarios dos niveles, el objetivo de incluir un nivel intermedio es determinar si el comportamiento de la salida dentro del dominio de análisis es lineal o presenta curvatura. Los niveles deben ser lo suficientemente lejanos para producir cambios en las salidas evitando que esta distancia genere problemas en la operación del motor, para lo cual es imprescindible conocer la física del funcionamiento del mismo.

En muchos casos los niveles de los factores en los tratamientos experimentales pueden ser determinados por normativa o mediante la aplicación de corridas experimentales preliminares del proceso en la que se varíe sólo un factor a la vez.

#### **2.4.2 RÉGIMEN DE GIRO**

La velocidad de giro del motor es un factor importante tanto para las prestaciones como las emisiones contaminantes que son determinadas por el fabricante del automotor. Sin embargo para la experimentación es necesario basarse en la normativa vigente determinada como “CODIFICACIÓN A LA ORDENANZA QUE NORMA EL ESTABLECIMIENTO DEL SISTEMA DE REVISIÓN TÉCNICA VEHICULAR DE CUENCA Y LA DELEGACIÓN DE COMPETENCIAS A CUENCAIRE, CORPORACIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL AIRE DE CUENCA” donde se citan a las normas NTE INEN 2 203 2000 Gestión Ambiental, Aire, Vehículos Automotores. Determinación de la Concentración de Emisiones de Escape en Condiciones de Marcha Mínima o Ralentí Prueba Estática y la NTE INEN 2 349:2003 Revisión Técnica Vehicular Procedimientos, 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 la 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. Los niveles del factor se muestran en la tabla 2.10.

**Tabla 2. 10 Niveles del Factor Régimen de Giro**

<b>FACTOR</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>NIVEL MÍNIMO ( - )</b>	<b>NIVEL CENTRAL ( 0 )</b>	<b>NIVEL MÁXIMO ( + )</b>
RÉGIMEN DE GIRO	$\eta$	700 RPM	1600 RPM	2500 RPM

### 2.4.3 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 carga 0%, el nivel máximo corresponde al 100% de carga externa que es el máximo torque opositor que el motor puede generar sin disminuir su velocidad de giro con el acelerador accionado totalmente y el nivel intermedio que corresponde al 50% de carga externa que 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 (735 mBar) carga es decir 540 mBar. Los niveles del factor se muestran en la tabla 2.11.

**Tabla 2. 11 Niveles del Factor Carga**

<b>FACTOR</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>NIVEL MÍNIMO ( - )</b>	<b>NIVEL CENTRAL ( 0 )</b>	<b>NIVEL MÁXIMO ( + )</b>
CARGA	$c$	0 %	50%	100%

## 2.4.4 LAMBDA

La estequiometría de la mezcla aire combustible produce efectos en las emisiones contaminantes y las prestaciones del motor como la potencia el torque y el consumo de combustible. 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, siendo este la principal limitante del factor lambda.

Los límites establecidos se muestran en la tabla 2.12.

**Tabla 2. 12 Límites máximos de emisiones de CO y HC**

AÑO Y MODELO	CO [ % ]		HC [ ppm ]	
	0 - 1500 msnm	1500 - 3000 msnm	0 - 1500 msnm	1500 - 3000 msnm
2000 Y POSTERIORES	1.0	1.0	200	200
1990 A 1999	3.5	4.5	650	750
1989 Y ANTERIORES	5.5	6.5	1000	1200

### 2.4.4.1 Adaptación de la Mezcla

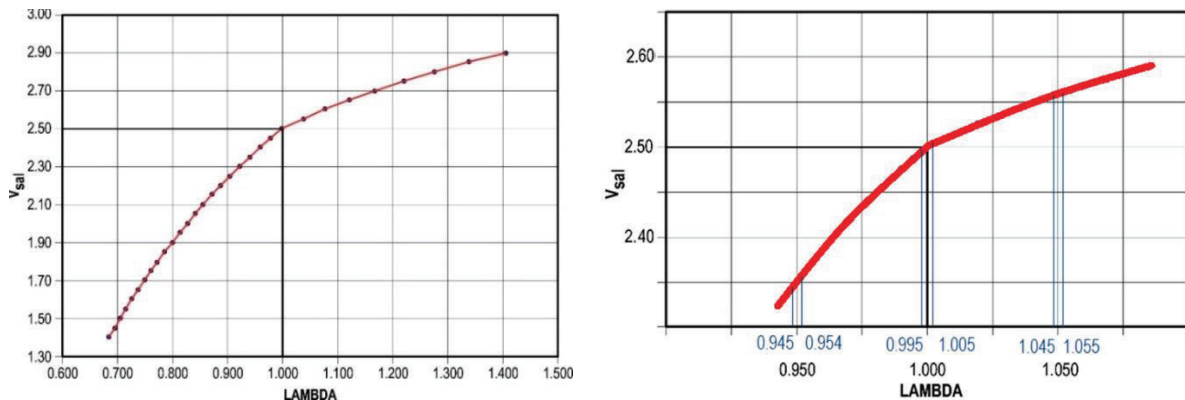
Para establecer los niveles del factor lambda es necesario alterar el punto normal de funcionamiento del motor obtener los valores de las emisiones de contaminantes y analizar los posibles valores de lambda a adoptar. Para lograr modificar el punto de funcionamiento del motor se sustituye el sensor de oxígeno original del sistema de inyección por un sensor de banda ancha mostrado en la figura 2.18, que tiene la cualidad de generar una señal analógica en función de la relación aire combustible mediante la medición de la concentración de oxígeno en los gases de escape.



**Figura 2. 13 Sensor de Oxígeno de Banda Ancha**

El sensor de oxígeno de banda ancha se conecta al módulo wideband que recibe la señal generada por el sensor y genera una señal de voltaje variable que en lo posterior será tratada para conseguir trabajar con diferentes valores de estequiometría.

La respuesta del sensor medida en voltios respecto del factor lambda se comporta como dos parábolas que se intersectan en el punto de mezcla ideal en el que lambda es igual a 1 y la señal toma el valor de 2.5 V, valores de voltaje superiores a 2.5 V denotan mezclas pobres y el dozado de la mezcla se rige a la ecuación (2.1) de la primera parábola; valores de voltaje de salida inferiores a 2.5 V denotan mezcla rica y el dozado de la mezcla se rige a la ecuación (2.2) de la segunda parábola como se muestra en la figura 2.19.



**Figura 2. 14 Respuesta del Sensor de Oxígeno de Banda Ancha**

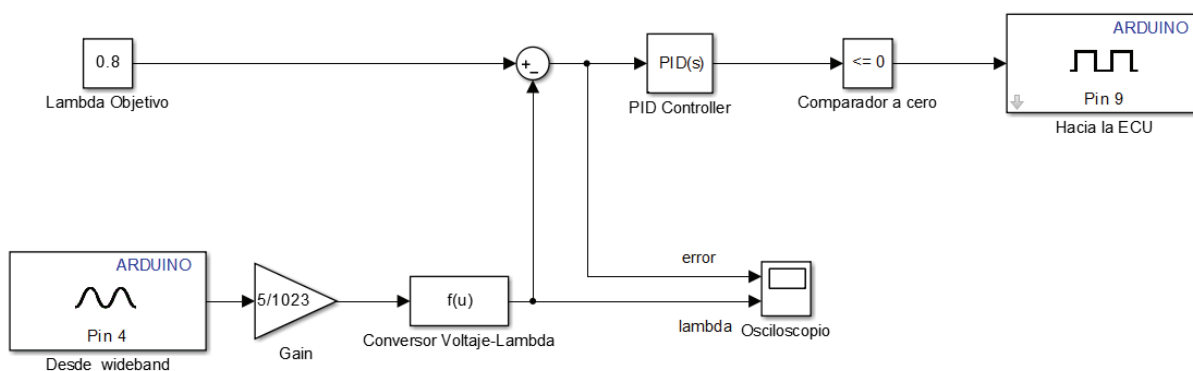
$$\lambda = -5V^2 + 12V - 4.5 \quad (2.1)$$

$$\lambda = 1.023V^2 - 1,571V + 3.048 \quad (2.2)$$

La señal que proviene del módulo wideband es enviada a un lazo de control para poder generar una señal equivalente a la del sensor de oxígeno de banda estrecha con el cual viene equipado el motor originalmente.

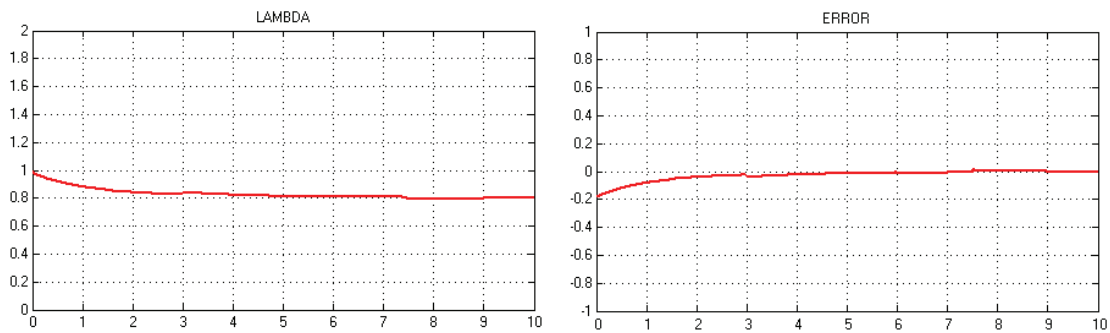
El objetivo del lazo de control es enviar una señal trucada al módulo de control para que este realice las correcciones del tiempo de inyección y así poder controlar la mezcla a través del propio sistema de inyección pero retroalimentado por el sensor de oxígeno de banda ancha.

El sistema de inyección original del vehículo está diseñado para funcionar siempre con mezcla estequiométrica en estados estacionarios de funcionamiento, es por ello que el módulo de control mediante la señal del sensor de oxígeno de banda corta solo es capaz de determinar cualitativamente el estado de la mezcla, es decir sólo si la mezcla es rica o pobre. El lazo de control contiene un generador de referencia donde se determina el valor del lambda objetivo, para el ejemplo de la figura 2.20 el sistema está puesto a punto para trabajar con un lambda igual a 0.8 que se compara mediante la retroalimentación en el lambda medido a través del wideband para generar el error.



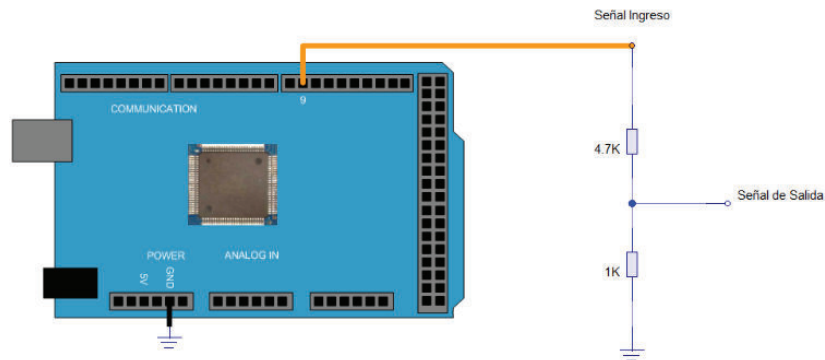
**Figura 2. 15 Lazo de Control**

Para tratar el error se utiliza un controlador PID sintonizado para generar una salida retardada pero estable. EL tiempo en que se consigue que la salida ingrese en una banda de tolerancia del +-2% es de 7 segundos. El lambda medido en el sensor de banda ancha y el error se muestra en la figura 2.21.



**Figura 2. 16 Respuesta del Lazo de Control**

A la salida del PID se encuentra un comparador a cero que genera una salida de 0 V cuando el valor de entrada es negativo y genera 5V cuando el valor de ingreso es positivo. Este valor de voltaje ingresa a un partidor de tensión mostrado en la figura 2.22 en donde mediante los valores de las resistencias se genera una señal que varía de 0.02 a 0.87 V.



**Figura 2. 17 Circuito de Control**

El procedimiento de medición mostrado en la figura 2.23 se rige mediante la norma NTE INEN 2 203:2000 Gestión Ambiental Aire Vehículos automotores determinación de la concentración de emisiones de escape en condiciones de marcha mínima o ralentí, prueba estática. El vehículo en estudio cumple con los literales 5.4 de la norma, por lo cual para la obtención de los datos estos pasos se obvian del procedimiento.



**Figura 2. 18 Proceso para la Toma de Datos**

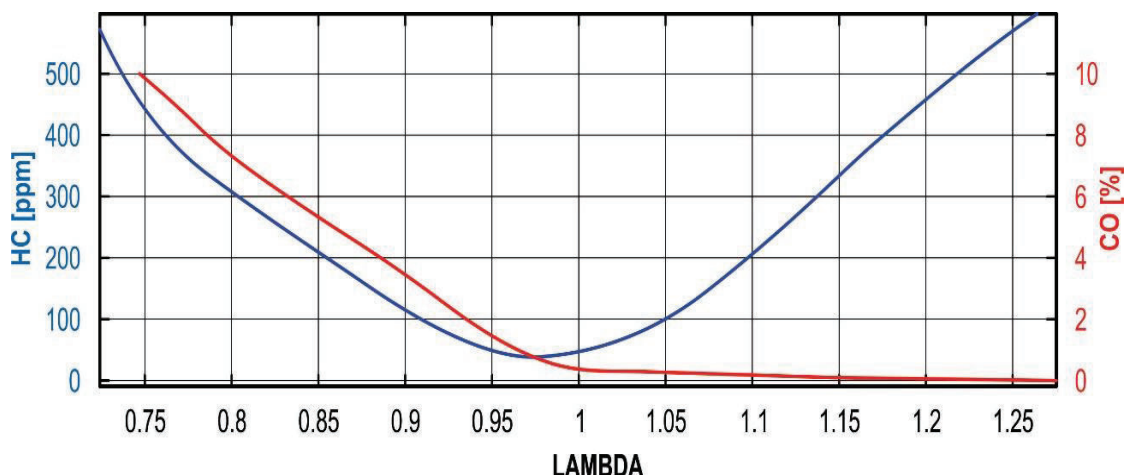
Para la verificación de la dependencia de las emisiones contaminantes del factor lambda se tomaron 13 muestras con diferentes valores de dosificación en intervalos de 0.05 para el valor de lambda. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.13.

**Tabla 2. 13 Emisión de CO y HC en función del factor Lambda**

LAMBDA	CO [ % ]	HC [ ppm ]
0,75	9,86	446
0,8	7,3	320
0,85	5,4	217
0,9	3,2	125
0,95	1,83	88
0,99	0,32	43
1	0,12	45
1,01	0,04	65
1,05	0,02	118
1,1	0,01	228
1,15	0	325
1,2	0	467
1,25	0	568



Para poder verificar de mejor manera los resultados obtenidos se representan de forma gráfica en la figura 2.24 en la que se aprecia el comportamiento tanto del monóxido de carbono y de los hidrocarburos no combustionados.



**Figura 2. 19 Formación de CO y HC en función de  $\lambda$**

Del comportamiento de las emisiones comparamos los valores obtenidos con los valores límites y segmentamos los intervalos en los cuales la variación de lambda no genere que se sobrepase los valores impuestos por la norma. A más de ello se considera el error al tomar las muestras y un margen de seguridad que se ha impuesto en el 60 % del valor límite de la norma. Los valores se muestran en la tabla 2.14.

**Tabla 2. 14 Intervalos del Factor Lambda para la emisión de CO y HC**

COMPUESTO	LÍMITE	INTERVALO	60% LÍMITE	INTERVALO
CO	1 [%]	$0.96 < \lambda$	0.6 [%]	$0.975 < \lambda$
HC	200 [ppm]	$0.87 < \lambda < 1.07$	120 [ppm]	$0.926 < \lambda < 1.05$

De donde se determinan los niveles del factor lambda, para el caso del nivel máximo el factor se limita a 1.05 debido a la emisión de hidrocarburos no combustionados y para el nivel mínimo se establece en 0.95 debido al promedio de los límites de hidrocarburos no combustionados y monóxido de carbono a más de establecer

simetría en el nivel mínimo y máximo respecto del valor de funcionamiento actual del motor que es lambda igual a 1, que dicho sea de paso será considerado para la toma de muestras en el punto central del diseño factorial como se presenta en la tabla 2.15.

**Tabla 2. 6 Niveles del Factor Lambda**

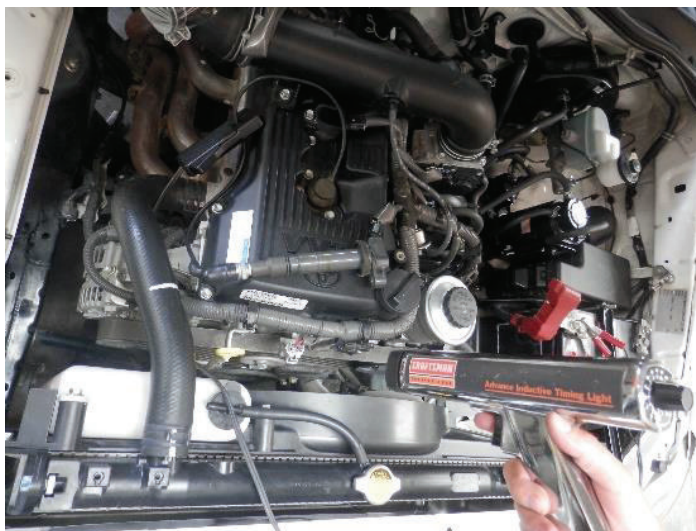
<b>FACTOR</b>	<b>NIVEL MÍNIMO ( - )</b>	<b>NIVEL CENTRAL ( 0 )</b>	<b>NIVEL MÁXIMO ( + )</b>
LAMBDA	0,95	1	1,05

#### **2.4.5 INCREMENTO DEL ADELANTO AL ENCENDIDO**

La variación del adelanto al encendido puede incrementar o disminuir las prestaciones del motor al igual que las emisiones contaminantes, el excesivo adelanto puede generar autoencendido y desembocar en el incremento de emisión de óxidos nitrosos, caso contrario si el punto de encendido esté retrasado genera pérdida de potencia y excesivo consumo de combustible.

Para poder establecer los niveles del factor adelanto al encendido se realizó una corrida experimental en la cual se modificó únicamente este parámetro de funcionamiento, para lo cual se utiliza el módulo de encendido reprogramable Haltech Sport 1000.

Inicialmente se verifican los valores de adelanto al encendido para los niveles de los factores velocidad de giro del motor y carga designados. Debido a que los parámetros de identificación generados por la unidad de control y transmitidos al scanner no se encuentran el adelanto al encendido este valor debe ser medido de forma manual, haciendo uso de una lámpara estroboscópica ajustable y del banco dinamométrico para ejercer la carga como se muestra en la figura 2.25.



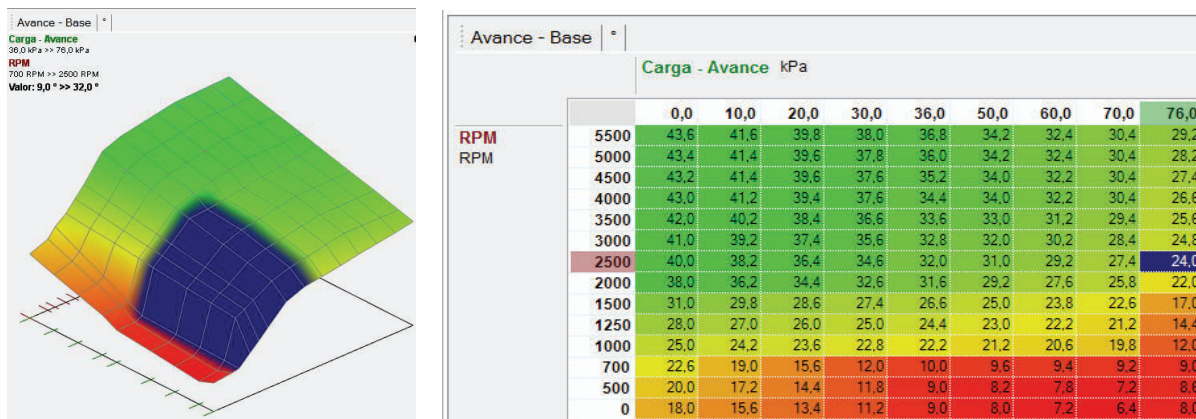
**Figura 2. 20 Verificación del Punto de Encendido**

Los valores de adelanto de encendido obtenidos para los niveles de carga y régimen de giro se muestran en la tabla 2.16.

**Tabla 2. 16 Valores absolutos de adelanto al encendido**

<b>RÉGIMEN</b> <b>[ rpm ]</b>	<b>CARGA</b> <b>[ % ]</b>	<b>ADELANTO</b> <b>[ ° ]</b>
700	0	10
1600	0	21
2500	0	32
700	50	9
1600	50	20
2500	50	30
700	100	9
1600	100	16
2500	100	24

Dentro del software ECU Manager se configuran los puntos obtenidos para obtener un mapa predeterminado para el motor Toyota 2.7 VVTI mostrado en la figura 2.26.



**Figura 2. 21 Cartografía de Encendido**

El principal limitante del adelanto al encendido es la detonación; cuando el adelanto es muy pronunciado se genera el autoencendido que debe ser cuantificado para poder establecer el nivel de variación del ángulo de adelanto al encendido. Para poder determinar el nivel de detonación se plantea el método de análisis de vibración mediante la extracción de características de la señal tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia. Se dispone de un acelerómetro que se ubica mediante la norma ISO 10816-6 “Mechanical Vibration - Evaluation of machine Vibration by measurements on nonrotating park” que se aplica a motores recíprocos con potencias superiores a 100Kw. Las propiedades del acelerómetro ACS 3411LN se muestran en la tabla 2.17.

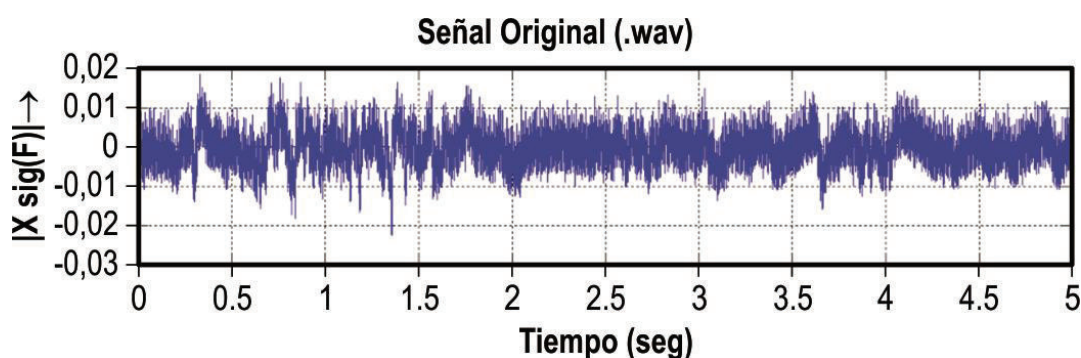
**Tabla 2. 7 Características del acelerómetro**

CARACTERÍSTICA	VALOR	UNIDAD
Tipo	Uniaxial	
Sensibilidad	1.02	mV/g
K Calibración	1.02	%

### 2.4.5.1 Caracterización de la señal de vibración.

Para poder cuantificar la detonación producida a causa de la modificación del adelanto al encendido es necesario extraer características de las señales de vibración adquiridas en las mismas condiciones de funcionamiento con diferentes adelantos al encendido.

Para cada una de las muestras de aceleración el intervalo de medición total es de 5 segundos con una frecuencia de muestreo de 65536 Hz, cada intervalo tiene un total 327680 muestras que se almacenan en formato .wav como se muestra en la figura 2.27, para su posterior análisis en el software de cálculo Matlab®.



*Figura 2. 22 Señal Temporal de aceleración*

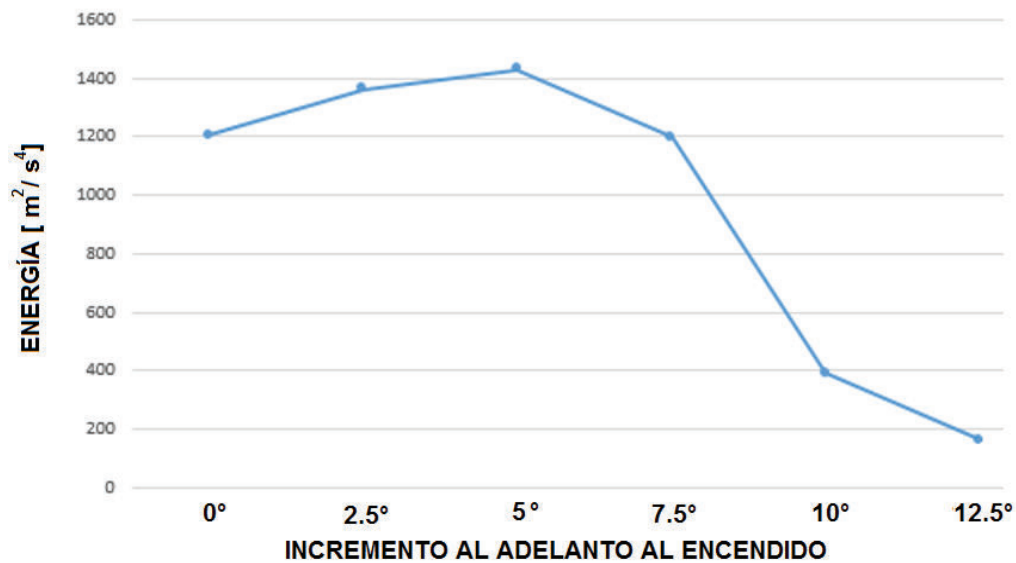
De las 6 señales de aceleración adquiridas [ $\text{m/s}^2$ ] se extraen características como la energía, potencia, RMS, factor de cresta y curtosis.

#### 2.4.5.1.1 Energía

La función de energía de una señal representa la energía disipada por una resistencia de 1 ohm cuando se le aplica un voltaje  $X(i)$  equivalente a la señal de aceleración. Para el caso de las señales discretas la energía se define por la ecuación 2.3.

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2 \quad (2.3)$$

Los valores obtenidos de energía se representan en la figura 2.28, en la que se puede notar la tendencia de la energía de la señal en función del incremento del adelanto al encendido.



**Figura 2. 23 Variación de la Energía de la señal según el adelanto al encendido**

En la figura se aprecia que el valor de la energía de la señal se incrementa hasta un adelanto de 29° que equivale a una desviación de 5 ° respecto del valor de adelanto original, a partir de este valor se puede apreciar que el valor de la energía se reduce drásticamente.

#### 2.4.5.1.2 Potencia

Es la energía por unidad de tiempo en un intervalo (número total de muestras), para señales discretas se expresa en la ecuación 2.4.

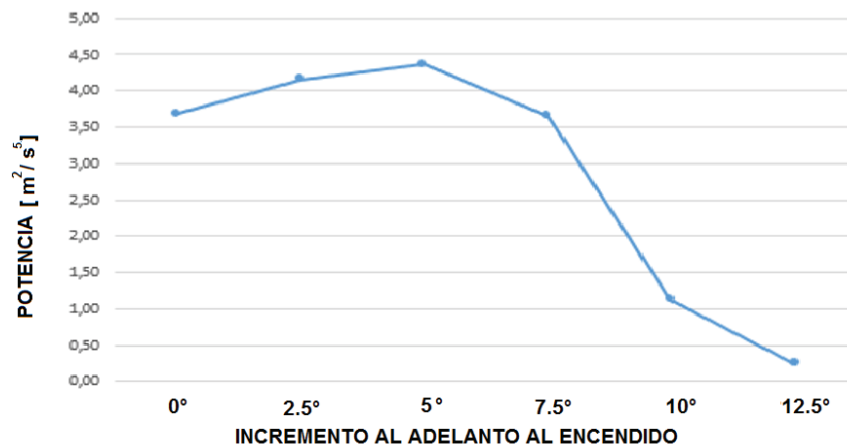
$$P = \frac{1}{N_2 - N_1 + 1} \sum_{i=N_1}^{N_2} x_i^2 \quad (2.4)$$

Donde

$N_2 - N_1$  es el rango de medición en número de muestras

$x(i)$  es el valor muestral de aceleración

Los valores obtenidos de potencia se representan en la figura 2.29, en la que se puede notar la tendencia de la energía de la señal en función del incremento del adelanto al encendido.



**Figura 2. 24 Variación de la Potencia de la señal según el adelanto al encendido**

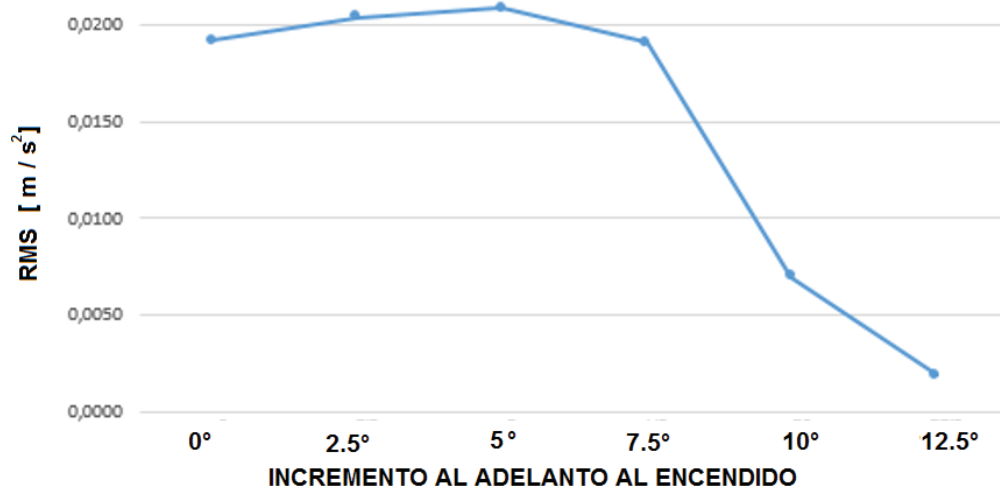
Puede observarse en la figura que el valor de la potencia tiene un comportamiento similar al de la energía, que es normal puesto que para todas las muestras el intervalo de medición es el mismo.

#### 2.4.5.1.3 RMS

El RMS (Root Mean Square) es un estadístico global, que se define como la raíz cuadrada del promedio de la suma de los cuadrados de los valores de la señal en el intervalo de análisis. Su comportamiento es análogo al de la potencia y la energía. Se determina mediante la ecuación 2.5.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2.5)$$

Los valores obtenidos de RMS se representan en la figura 2.30, en la que se puede notar la tendencia de la energía de la señal en función del incremento del adelanto al encendido.



**Figura 2. 25 Variación del RMS de la señal según el adelanto al encendido**

Puede observarse que al igual que la potencia y la energía el valor del RMS permanece estable hasta un incremento de 10 ° al adelanto al encendido a partir del cual el valor decrece abruptamente.

#### 2.4.5.1.4 Factor de Cresta

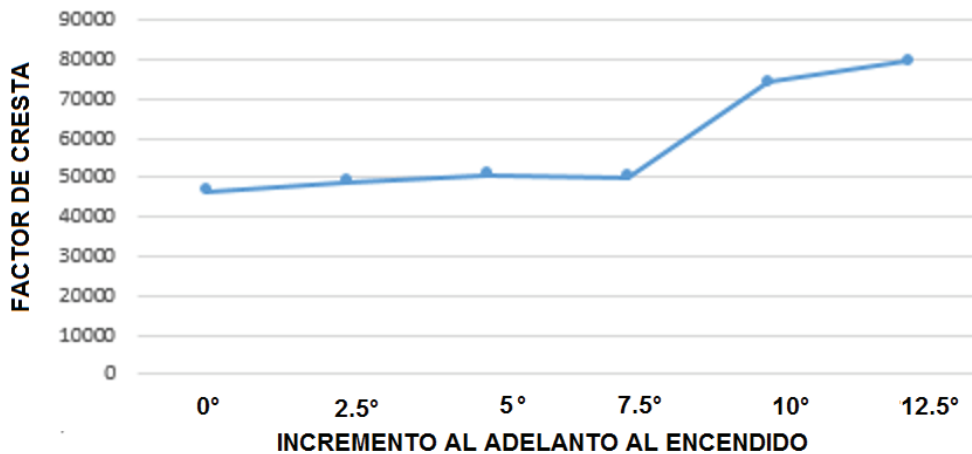
El Factor de Cresta es una medida normalizada de la amplitud del pico máximo respecto del RMS. Este factor se incrementa con la presencia de pocos picos de gran amplitud causados por la detonación al interior de los cilindros, el numerador adquiere



un alto valor por la magnitud del pico y el denominador de bajo cuando los picos son relativamente pocos. Se determina mediante la ecuación 2.6.

$$FC = \frac{|x_{max}|}{RMS} \quad (2.6)$$

Los valores obtenidos del factor de cresta se representan en la figura 2.31, en la que se puede notar la tendencia de la energía de la señal en función del incremento del adelanto al encendido.



**Figura 2. 26 Variación del Factor de Cresta de la señal según el adelanto al encendido**

Se puede apreciar en la figura el incremento del factor de cresta acorde se va incrementando el adelanto al encendido, este incremento es pequeño hasta una desviación al adelanto de 7.5° punto en el cual el factor de cresta empieza a incrementarse con una tasa muy superior.

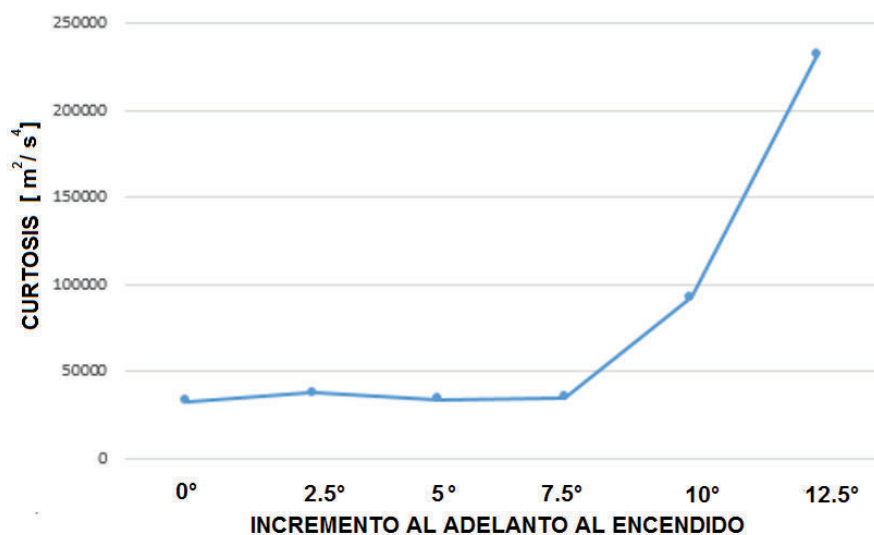
#### 2.4.5.1.5 Curtosis

Es el cuarto momento normalizado de la señal. El momento es normalizado por la raíz cuadrada de la varianza. Es una medida relacionada con la cantidad y la amplitud de picos presentes en la señal. Mientras más elevado es el número de picos o mayor es

la amplitud de los mismos, la curtosis tiende a crecer. Se determina mediante la ecuación 2.7.

$$C = n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 / \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.7)$$

Los valores obtenidos del factor de cresta se representan en la figura 2.32, en la que se puede notar la tendencia de la energía de la señal en función del incremento del adelanto al encendido.



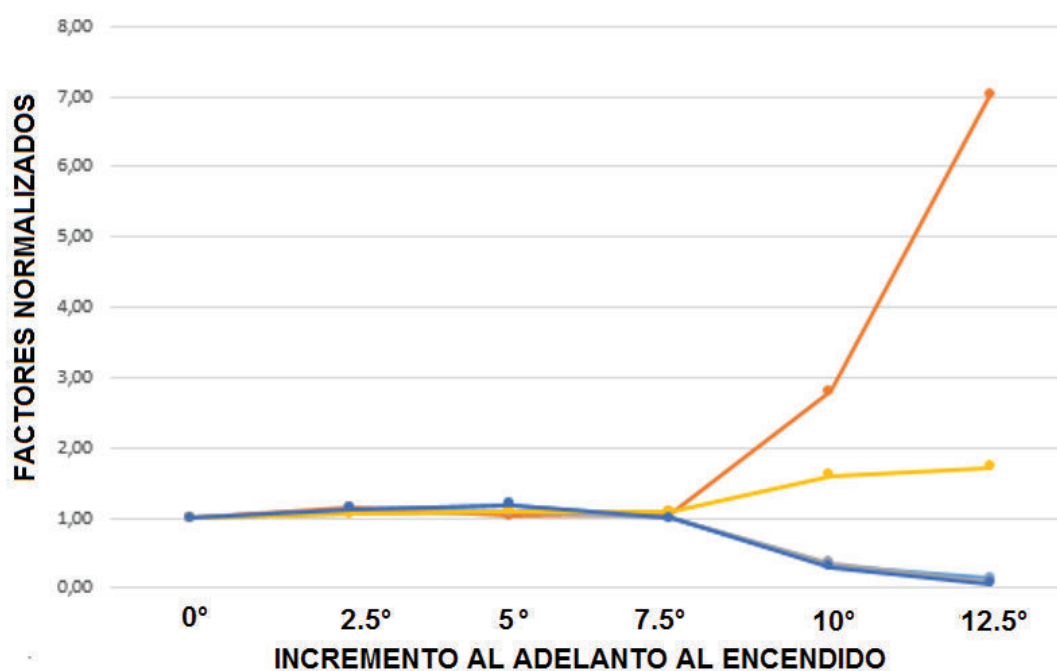
**Figura 2. 27 Variación de la Energía de la señal según el adelanto al encendido**

Se puede observar en la figura 2.31 que el valor del factor de curtosis permanece casi constante hasta un incremento de 7.5° a partir del cual el valor del factor se incrementa abruptamente. Para poder cuantificar de mejor forma los efectos de la detonación se han normalizado todos los factores obtenidos respecto al motor con su sistema de control original. Los resultados obtenidos de la normalización se muestran en la tabla 2.18.

**Tabla 2. 8 Características temporales de la señal de aceleración**

INCREMENTO DEL ADELANTO AL ENCENDIDO	ENERGÍA	FACTOR DE CURTOSIS	RMS	FACTOR DE CRESTA	POTENCIA INTERVALO
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2.5°	1,13	1,15	1,06	1,05	1,13
5°	1,19	1,02	1,09	1,09	1,19
7.5°	0,99	1,06	0,99	1,08	0,99
10°	0,32	2,80	0,36	1,60	0,31
12.5°	0,14	7,02	0,10	1,71	0,07

En la figura 2.33 se puede apreciar el comportamiento de las diferentes características de la señal de vibración en diferentes niveles de adelanto al encendido.



**Figura 2. 28 Factores normalizados**

Con el fin de poder evaluar el efecto de la detonación en un solo factor, se ha generado el índice normalizado que se forma de la media de los efectos individuales de cada factor respecto del valor normalizado del motor original. El índice normalizado se calculó con la ecuación 2.8.

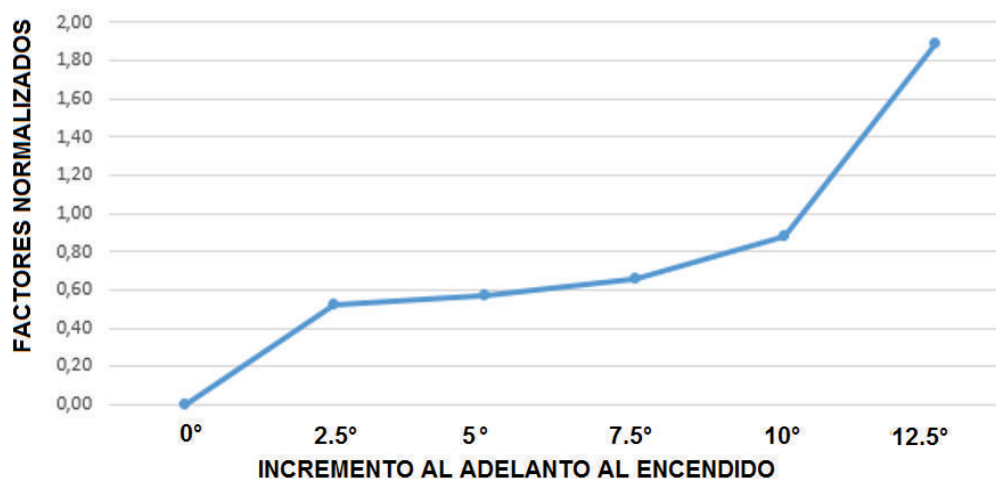
$$I_N = \frac{\left| \frac{E}{E_0} - 1 \right| + \left| \frac{C}{C_0} - 1 \right| + \left| \frac{RMS}{RMS_0} - 1 \right| + \left| \frac{FC}{FC_0} - 1 \right| + \left| \frac{P}{P_0} - 1 \right|}{5} \quad (2.8)$$

El valor el índice normalizado para el motor original es 0 y mientras menor sea la detonación el valor del índice se mantendrá bajo. Los valores obtenidos se muesran en la tabla 2.19.

**Tabla 2. 19 Índice Normalizado**

<b>INCREMENTO DEL ADELANTO AL ENCENDIDO</b>	<b>ÍNDICE NORMALIZADO</b>
0°	0
2.5°	0,52
5°	0,57
7.5°	0,66
10°	0,88
12.5°	1,89

En la figura 2.34 puede apreciarse observarse 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 valores superiores de incremento generaran una fuerte detonación.



**Figura 2. 29 Índice Normalizado**

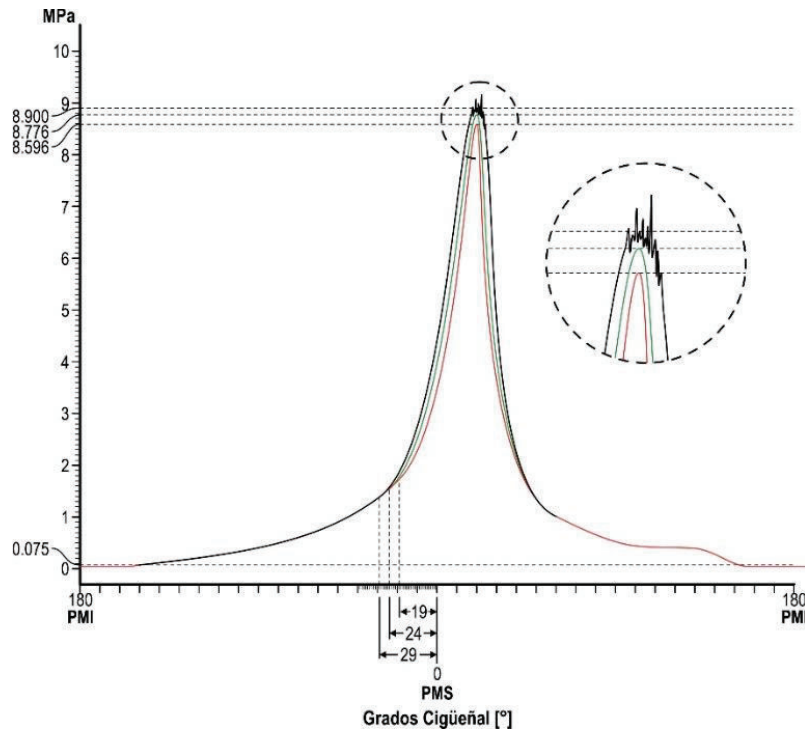
Puede apreciarse que el valor límite de incremento al adelanto al encendido es  $7.5^\circ$  a 2500 RPM y 100% de carga externa al motor, con una mezcla en lambda igual a 1; pero a lo largo de la experimentación se llevaran a cabo tratamientos con mezcla pobre que incrementan la posibilidad de generar detonación por lo que se establece el nivel de incremento al adelanto al encendido en  $5^\circ$ , a partir de ello el valor del nivel medio es  $0^\circ$  es decir el valor original del motor y por simetría el valor mínimo es de  $-5^\circ$ . Los niveles del factor se muestran en la tabla 2.20.

**Tabla 2. 9 Niveles del Factor Incremento del Adelanto al Encendido**

FACTOR	NIVEL MÍNIMO ( - )	NIVEL CENTRAL ( 0 )	NIVEL MÁXIMO ( + )
INCREMENTO AL ENCENDIDO	$-5^\circ$	$0^\circ$	$5^\circ$

Para comprobar lo establecido se dispone de un sensor de presión en la bujía del cilindro número 1 y se realizaron tomas del comportamiento de la presión al interior del cilindro para la condición más proclive a la detonación que es el motor a 2500 RPM y con 100 % de carga externa. En la figura 2.35 puede apreciarse que para los niveles

de adelanto de  $19^\circ$  y  $24^\circ$  no se generan oscilaciones en el interior del cilindro que si se producen para el adelanto de  $29^\circ$ , aunque mínimas ya se presentan oscilaciones cercanas al valor de presión máxima que se establece en 8.9 MPa; el incremento de la amplitud de estas oscilaciones se ve reflejado en el valor del índice normalizado y puede producir desde pérdidas de potencia hasta daños físicos en el pistón y la cámara de combustión.



**Figura 2. 35 Presión en el cilindro 1**

Acorde a los diferentes niveles de los factores de carga y velocidad del motor los valores de adelanto al encendido absoluto se muestran en la tabla 2.21.

**Tabla 2. 10 Valores de Adelanto al encendido para la experimentación**

RÉGIMEN [ RPM ]	CARGA [ % ]	NIVEL MÍNIMO ( - )	NIVEL CENTRAL ( 0 )	NIVEL MÁXIMO ( + )
700	0	5	10	15
1600	0	16	21	26

**Tabla 2. 11 (Continuación) Valores de Adelanto al encendido para la experimentación**

<b>RÉGIMEN [ RPM ]</b>	<b>CARGA [ % ]</b>	<b>NIVEL MÍNIMO ( - )</b>	<b>NIVEL CENTRAL ( 0 )</b>	<b>NIVEL MÁXIMO ( + )</b>
2500	0	27	32	37
700	50	4	9	14
1600	50	15	20	25
2500	50	25	30	35
700	100	4	9	14
1600	100	11	16	21
2500	100	19	24	29

#### 2.4.6 COMBUSTIBLE

En nuestro medio se disponen de dos tipos de combustible para motores de combustión interna ciclo Otto, las gasolinas extra y súper. Para determinar los niveles del factor combustible se han caracterizado experimentalmente el número de octanos de investigación RON, el número de octanos de motor MON y el índice de detonación AKI. Para tal efecto se utiliza el analizador Shatox SX-150 que usa una probeta para la muestra y un patrón de comparación para determinar los factores ya descritos. Las características del instrumento se muestran en la tabla 2.22.

**Tabla 2. 12 Características del medidor de octanaje**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Número de Octano	RON	40 – 125
Error	RON	± 0.5
Sensibilidad	RON	± 0.1
Tiempo de Medida	s	1 – 5
Vida útil	Años	6

Se realizan diferentes mezclas de combustibles partiendo de gasolina extra pura con concentraciones de gasolina súper en incrementos del 10% de volumen hasta llegar a la gasolina súper. Los instrumentos utilizados se muestran en la figura 2.35.



**Figura 2. 30 Medición de Octanaje**

Se tomaron 5 muestras de cada concentración generando un total de 55 muestras cuyo resultado se muestra en la tabla 2.23.

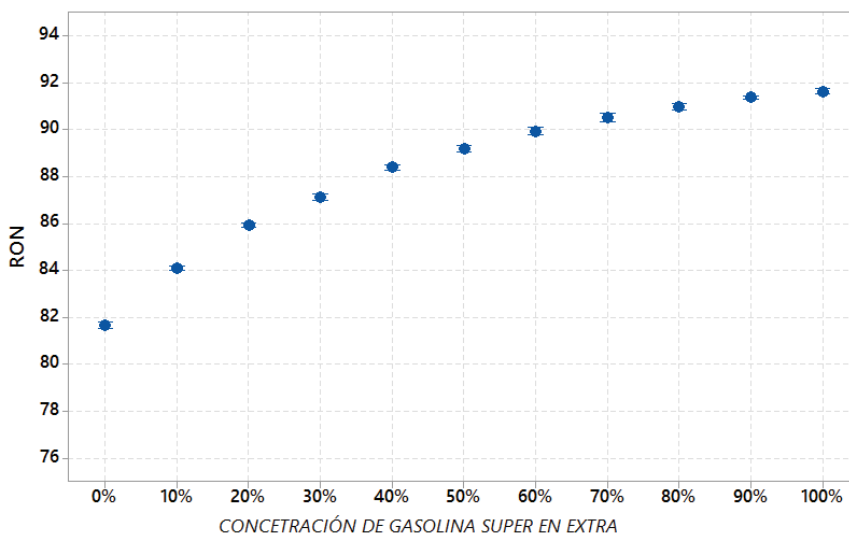
**Tabla 2. 23 Variación de octanaje para diferentes mezclas de combustible**

		CONCENTRACIÓN DE GASOLINA SÚPER EN EXTRA										
		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
RON		82,1	84,2	85,8	87,1	88,3	89	90	90,7	91,1	91,4	91,5
		81,8	84	86	87,3	88,4	89,1	89,8	90,5	91	91,4	91,3
		81,8	84,1	85,9	87,1	88,3	89,3	90,1	90,4	91	91,3	91,3
		81,9	84	85,9	87	88,4	89,2	89,9	90,6	90,8	91,4	91,2
		81,9	84,1	85,9	87,1	88,5	89,2	89,8	90,3	90,9	91,3	91,2

La gasolina extra tiene un RON medio de 81.9, la súper de 91.3, el punto medio de octanaje de 86.6 que se consigue con una concentración de 23% de gasolina súper y 77% gasolina extra. En la figura 2.37 puede apreciarse que con pequeñas concentraciones de gasolina súper en extra se consigue mayor incremento de octanaje



en la mezcla que con altas concentraciones en donde la tasa de incremento es mucho menor.



**Figura 2. 31 Octanaje de mezclas de Combustibles**

## 2.4.7 TRATAMIENTOS

Una vez seleccionados los niveles de cada uno de los factores que se muestran en la tabla 2.24 se procede a determinar cada uno de los tratamientos de la corrida experimental.

**Tabla 2. 24 Niveles Factoriales**

FACTOR	SIMBOLO	UNIDAD	NIVEL MÍNIMO ( - )	NIVEL CENTRAL ( 0 )	NIVEL MÁXIMO ( + )
RÉGIMEN	$\eta$	RPM	700	1600	2500
CARGA	$\zeta$	%	0	50	100
LAMBDA	$\lambda$	-	0.95	1	1.05
ADELANTO	$\alpha$	°	-5	0	5
COMBUSTIBLE	R	RON	81.9	86.6	91.3

Para el diseño experimental factorial de cinco factores y dos niveles se tienen  $2^5$  tratamientos en una repetición; cada tratamiento es una combinación única de los 5 factores y en total se realizan tres repeticiones que generan un total de 96 tratamientos.

En la tabla 2.25 se muestra la matriz del diseño con respectiva notación de Yates, que permiten representar de manera sencilla cada tratamiento para el posterior cálculo de los efectos de interés.

**Tabla 2. 13 Matriz del Diseño Experimental Factorial**

LAMBDA	ADELANTO	RPM	COMBUSTIBLE	CARGA	$\lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\zeta$	YATES
0,95	-5	700	81,9	0	-	-	-	-	-	( 1 )
0,95	-5	700	81,9	100	-	-	-	-	+	$\zeta$
0,95	-5	700	91,3	0	-	-	-	+	-	R
0,95	-5	700	91,3	100	-	-	-	+	+	$R\zeta$
0,95	-5	2500	81,9	0	-	-	+	-	-	$\eta$
0,95	-5	2500	81,9	100	-	-	+	-	+	$\eta\zeta$
0,95	-5	2500	91,3	0	-	-	+	+	-	$\eta R$
0,95	-5	2500	91,3	100	-	-	+	+	+	$\eta R\zeta$
0,95	5	700	81,9	0	-	+	-	-	-	$\alpha$
0,95	5	700	81,9	100	-	+	-	-	+	$\alpha\zeta$
0,95	5	700	91,3	0	-	+	-	+	-	$\alpha R\zeta$
0,95	5	700	91,3	100	-	+	-	+	+	$\alpha R\zeta$
0,95	5	2500	81,9	0	-	+	+	-	-	$\alpha\eta$
0,95	5	2500	81,9	100	-	+	+	-	+	$\alpha\eta\zeta$
0,95	5	2500	91,3	0	-	+	+	+	-	$\alpha\eta R$
0,95	5	2500	91,3	100	-	+	+	+	+	$\alpha\eta R\zeta$
1,05	-5	700	81,9	0	+	-	-	-	-	$\lambda$
1,05	-5	700	81,9	100	+	-	-	-	+	$\lambda\zeta$
1,05	-5	700	91,3	0	+	-	-	+	-	$\lambda R$
1,05	-5	700	91,3	100	+	-	-	+	+	$\lambda R\zeta$
1,05	-5	2500	81,9	0	+	-	+	-	-	$\lambda\eta$

**Tabla 2. 14 (Continuación) Matriz del Diseño Experimental Factorial**

LAMBDA	ADELANTO	RPM	COMBUSTIBLE	CARGA	$\lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\zeta$	YATES
1,05	-5	2500	81,9	100	+	-	+	-	+	$\lambda\eta\zeta$
1,05	-5	2500	91,3	0	+	-	+	+	-	$\lambda\eta R$
1,05	-5	2500	91,3	100	+	-	+	+	+	$\lambda\eta R\zeta$
1,05	5	700	81,9	0	+	+	-	-	-	$\lambda\alpha$
1,05	5	700	81,9	100	+	+	-	-	+	$\lambda\alpha\zeta$
1,05	5	700	91,3	0	+	+	-	+	-	$\lambda\alpha R\zeta$
1,05	5	700	91,3	100	+	+	-	+	+	$\lambda\alpha R\zeta$
1,05	5	2500	81,9	0	+	+	+	-	-	$\lambda\alpha\eta$
1,05	5	2500	81,9	100	+	+	+	-	+	$\lambda\alpha\eta\zeta$
1,05	5	2500	91,3	0	+	+	+	+	-	$\lambda\alpha\eta R$
1,05	5	2500	91,3	100	+	+	+	+	+	$\lambda\alpha\eta R\zeta$

Para determinar la curvatura de las respuestas se tomaron muestras también en puntos medios, la matriz de la superficie de respuesta se muestra en la tabla 2.26.

**Tabla 2. 15 Matriz del Diseño Experimental para puntos intermedios**

LAMBDA	ADELANTO	RPM	COMBUSTIBLE	CARGA	$\lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\zeta$
0,95	0	1600	86,6	50	-	0	0	0	0
1,05	0	1600	86,6	50	+	0	0	0	0
1	-5	1600	86,6	50	0	-	0	0	0
1	5	1600	86,6	50	0	+	0	0	0
1	0	700	86,6	50	0	0	-	0	0
1	0	2500	86,6	50	0	0	+	0	0
1	0	1600	81,9	50	0	0	0	-	0
1	0	1600	91,3	50	0	0	0	+	0
1	0	1600	86,6	0	0	0	0	0	-
1	0	1600	86,6	100	0	0	0	0	+
1	0	1600	86,6	50	0	0	0	0	0

De la matriz de la superficie de respuesta se desprende la ortogonalidad del diseño, ya que los coeficientes de las columnas son independientes entre sí, lo que garantiza que los coeficientes de las regresiones también lo serán.

## CAPITULO III

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 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.

El principio de aleatorización 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. El orden de medición queda establecido como se muestra en la tabla 3.1.

*Tabla 3. 1 Aleatorización de las Pruebas*

ORDEN DE MEDICIÓN	# TRATAMIENTO	$\lambda$	$\alpha$ [°]	$\eta$ [rpm]	R [RON]	$c$ [%]	# REPETICIÓN
1	42	1	0	1600	86,6	100	2
2	24	1,05	-5	2500	91,3	100	1
3	70	1,05	5	700	91,3	0	2
5	95	1,05	-5	700	91,3	100	3
6	69	1,05	5	700	81,9	100	2
6	96	1,05	-5	2500	81,9	0	3
7	102	1,05	5	700	91,3	0	3
9	17	1,05	-5	700	81,9	0	1
11	57	0,95	5	2500	81,9	100	2
12	52	0,95	5	700	81,9	0	2

**Tabla 3. 2 (Continuación 1) Aleatorización de las Pruebas**

<b>ORDEN DE MEDICIÓN</b>	<b># TRATAMIENTO</b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b><math>\alpha</math> [ ° ]</b>	<b><math>\eta</math> [rpm]</b>	<b>R [RON]</b>	<b><math>\epsilon</math> [%]</b>	<b># REPETICIÓN</b>
13	11	0,95	5	700	91,3	0	1
13	59	0,95	5	2500	91,3	100	2
14	34	1,05	0	1600	86,6	50	1
14	89	0,95	5	2500	81,9	100	3
15	73	1,05	5	2500	81,9	100	2
17	8	0,95	-5	2500	91,3	100	1
19	97	1,05	-5	2500	81,9	100	3
20	91	0,95	5	2500	91,3	100	3
20	92	1,05	-5	700	81,9	0	3
21	9	0,95	5	700	81,9	0	1
22	80	0,95	-5	2500	81,9	0	3
23	83	0,95	-5	2500	91,3	100	3
25	38	1	0	2500	86,6	50	1
25	67	1,05	-5	2500	91,3	100	2
25	101	1,05	5	700	81,9	100	3
26	94	1,05	-5	700	91,3	0	3
27	20	1,05	-5	700	91,3	100	1
27	58	0,95	5	2500	91,3	0	2
29	93	1,05	-5	700	81,9	100	3
30	87	0,95	5	700	91,3	100	3
33	28	1,05	5	700	91,3	100	1
34	45	0,95	-5	700	81,9	100	2
35	75	1,05	5	2500	91,3	100	2
36	12	0,95	5	700	91,3	100	1
37	19	1,05	-5	700	91,3	0	1
39	1	0,95	-5	700	81,9	0	1
42	41	1	0	1600	86,6	0	2
44	98	1,05	-5	2500	91,3	0	3
47	49	0,95	-5	2500	81,9	100	2

**Tabla 3. 3 (Continuación 2) Aleatorización de las Pruebas**

<b>ORDEN DE MEDICIÓN</b>	<b># TRATAMIENTO</b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b><math>\alpha</math> [ ° ]</b>	<b><math>\eta</math> [rpm]</b>	<b>R [RON]</b>	<b><math>\epsilon</math> [%]</b>	<b># REPETICIÓN</b>
48	13	0,95	5	2500	81,9	0	1
48	47	0,95	-5	700	91,3	100	2
48	76	0,95	-5	700	81,9	0	3
50	6	0,95	-5	2500	81,9	100	1
51	36	1	5	1600	86,6	50	1
52	84	0,95	5	700	81,9	0	3
52	106	1,05	5	2500	91,3	0	3
53	14	0,95	5	2500	81,9	100	1
53	23	1,05	-5	2500	91,3	0	1
55	29	1,05	5	2500	81,9	0	1
56	22	1,05	-5	2500	81,9	100	1
57	10	0,95	5	700	81,9	100	1
57	48	0,95	-5	2500	81,9	0	2
58	5	0,95	-5	2500	81,9	0	1
59	53	0,95	5	700	81,9	100	2
61	26	1,05	5	700	81,9	100	1
61	56	0,95	5	2500	81,9	0	2
62	88	0,95	5	2500	81,9	0	3
63	25	1,05	5	700	81,9	0	1
64	39	1	0	1600	81,9	50	1
64	50	0,95	-5	2500	91,3	0	2
66	33	0,95	0	1600	86,6	50	1
67	27	1,05	5	700	91,3	0	1
67	62	1,05	-5	700	91,3	0	2
69	74	1,05	5	2500	91,3	0	2
70	3	0,95	-5	700	91,3	0	1
71	99	1,05	-5	2500	91,3	100	3
72	35	1	-5	1600	86,6	50	1
72	79	0,95	-5	700	91,3	100	3

**Tabla 3. 4 (Continuación 3) Aleatorización de las Pruebas**

<b>ORDEN DE MEDICIÓN</b>	<b># TRATAMIENTO</b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b><math>\alpha</math> [ ° ]</b>	<b><math>\eta</math> [rpm]</b>	<b>R [RON]</b>	<b><math>\epsilon</math> [%]</b>	<b># REPETICIÓN</b>
73	68	1,05	5	700	81,9	0	2
74	78	0,95	-5	700	91,3	0	3
77	85	0,95	5	700	81,9	100	3
78	16	0,95	5	2500	91,3	100	1
78	21	1,05	-5	2500	81,9	0	1
80	77	0,95	-5	700	81,9	100	3
80	105	1,05	5	2500	81,9	100	3
81	103	1,05	5	700	91,3	100	3
82	72	1,05	5	2500	81,9	0	2
82	90	0,95	5	2500	91,3	0	3
83	81	0,95	-5	2500	81,9	100	3
83	107	1,05	5	2500	91,3	100	3
84	54	0,95	5	700	91,3	0	2
85	4	0,95	-5	700	91,3	100	1
86	64	1,05	-5	2500	81,9	0	2
88	61	1,05	-5	700	81,9	100	2
89	30	1,05	5	2500	81,9	100	1
91	18	1,05	-5	700	81,9	100	1
91	51	0,95	-5	2500	91,3	100	2
92	7	0,95	-5	2500	91,3	0	1
92	71	1,05	5	700	91,3	100	2
93	40	1	0	1600	91,3	50	2
97	2	0,95	-5	700	81,9	100	1
98	32	1,05	5	2500	91,3	100	1
98	43	1	0	1600	86,6	50	3
98	100	1,05	5	700	81,9	0	3
99	15	0,95	5	2500	91,3	0	1
99	44	0,95	-5	700	81,9	0	2
99	46	0,95	-5	700	91,3	0	2



**Tabla 3. 5 (Continuación 4) Aleatorización de las Pruebas**

ORDEN DE MEDICIÓN	# TRATAMIENTO	$\lambda$	$\alpha$ [°]	$\eta$ [rpm]	R [RON]	$\epsilon$ [%]	# REPETICIÓN
99	60	1,05	-5	700	81,9	0	2
99	65	1,05	-5	2500	81,9	100	2
102	82	0,95	-5	2500	91,3	0	3
104	37	1	0	700	86,6	50	1
104	86	0,95	5	700	91,3	0	3
104	104	1,05	5	2500	81,9	0	3
106	63	1,05	-5	700	91,3	100	2
107	31	1,05	5	2500	91,3	0	1
107	55	0,95	5	700	91,3	100	2
107	66	1,05	-5	2500	91,3	0	2

### 3.2 TOMA DE DATOS

El desarrollo de las corridas experimentales se llevó a cabo en los Laboratorios de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.



**Figura 3. 1 Laboratorio de experimentación**

Las pruebas iniciaron en noviembre de 2014 y culminaron a finales de enero de 2015. Para tal efecto se ubica y asegura el vehículo de pruebas en el banco dinamométrico, a más de los sistemas de adquisición de datos como se muestra en la figura 3.1

### 3.2.1 PROTOCOLO DE MEDICIÓN

Para garantizar la reproducibilidad y repetibilidad del experimento se tomaron las muestras acorde al protocolo que se describe a continuación:

- Preparar instrumentos de medición
- Encender el motor
- Confirmar temperatura del refrigerante mayor a 90 ° C
- Confirmar temperatura de la banda de rodadura entre 30 y 40 ° C
- Confirmar temperatura del lubricante entre 80 y 95 ° C
- Seleccionar la prueba a realizar según el orden de aleatorización
- Adquirir datos de las condiciones ambientales
- Apagar el motor
- Seleccionar el tipo de combustible a utilizar
- Encender el motor
- Confirmar presión de inyección igual a 35 kPa
- Estabilizar el régimen de giro del motor acorde a la prueba
- Establecer el valor de carga en el banco dinamométrico
- Comprobar el valor de la presión del colector de admisión
- Regular el valor del adelanto al encendido
- Regular el valor del factor lambda
- Confirmar el valor de lambda en el analizador de gases
- Mantener el motor funcionando bajo las condiciones de la prueba por tres minutos
- Adquirir los datos de todas las variables planteadas

- Liberar la carga del motor
- Establecer el régimen de giro del motor en ralentí.
- Regular el adelanto al encendido en  $10^\circ$
- Regular el factor lambda en 1
- Mantener el motor funcionando por dos minutos
- Apagar el motor

Los datos se almacenaron en tres diferentes ordenadores para lo cual aplicando la norma ISO 14224 "Gestión de los Datos de Mantenimiento" se establece el nombre para cada archivo correspondiente a un tratamiento experimental.

El nombre del archivo contiene información del vehículo de pruebas, el banco utilizado y la combinación de factores del tratamiento experimental a más del número de repetición tal como se muestra en la tabla 3.2.

**Tabla 3. 6 Nombre de las muestras**

Marca, cilindrada y modelo	Banco	$\lambda$	$\alpha$ [ $^\circ$ ]	$\eta$ [ rpm ]	R [ RON ]	$\zeta$ [ % ]	Número de repetición	Fecha
Hilux 2.7 2007	LPS300 0	0.95	4,5,19,27	700	81.9	0	1	18/11/201 4
		1	9,10,35,22	1600	86.6	50	2	
		1.05	14,15,29,37	2500	91.3	100	3	

Los datos obtenidos en el banco dinamométrico, analizador de gases, contador de combustible y pinza amperimétrica se almacenaron mediante el formato que se muestra en la tabla 3.3.

**Tabla 3. 7 Datos obtenidos de la experimentación**

NOMBRE DEL TRATAMIENTO	$\lambda$	$\alpha$ [°]	$\eta$ [rpm]	R [RON]	$\epsilon$ [%]	CO [%]	HC [ppm]	CO2 [%]	O2 [%]	NOX [ppm]	Tiempo de inyección [ms]	Consumo [l/h]	F [N]	P [Kw]	T Aceite [°C]	T AIRE [°C]
hilux-2.7-2007-LP300-0.95-5-800-81,9-0-1-22oct2014	0,95	-5	700	81,9	0	1,52	99	13,9	0,08	0	2,60	1,15	22	0,12	94	32,4
hilux-2.7-2007-LP300-1.05-5-800-81,9-0-1-21oct2014	1,05	5	700	81,9	0	0,02	19	14,2	1,19	26	2,57	0,61	24	0,13	89	27,1
hilux-2.7-2007-LP300-0.95-15-800-81,9-0-1-21oct2014	0,95	5	700	81,9	0	1,49	194	14	0,06	0	2,36	1,24	25	0,15	85	27,7
hilux-2.7-2007-LP300-1.05-15-800-81,9-0-1-22oct2014	1,05	-5	2500	81,9	0	0,01	28	13,9	1,02	9	2,25	0,47	22	0,10	79	34,2
hilux-2.7-2007-LP300-0.95-27-2500-81,9-0-1-22oct2014	0,95	-5	2500	81,9	0	1,41	48	14,3	0	0	2,82	4,75	22	0,45	88	27,1
hilux-2.7-2007-LP300-1.05-27-2500-81,9-0-1-22oct2014	1,05	5	2500	81,9	0	0	36	14,2	0,94	116	2,68	3,28	21	0,42	81	32,7
hilux-2.7-2007-LP300-0.95-37-2500-81,9-0-1-21oct2014	0,95	5	2500	81,9	0	1,89	103	13,9	0	8	2,54	3,44	23	0,46	91	27,4
hilux-2.7-2007-LP300-1.05-37-2500-81,9-0-1-21oct2014	1,05	-5	700	91,3	0	0,02	21	14,2	1,23	123	2,51	3,51	23	0,47	94	27,4
hilux-2.7-2007-LP300-0.95-5-800-91,3-0-1-21oct2014	0,95	-5	700	91,3	0	1,63	137	13,9	0,04	1	2,56	1,19	24	0,12	89	27,3
hilux-2.7-2007-LP300-1.05-5-800-91,3-0-1-22oct2014	1,05	5	700	91,3	0	0,01	42	14	1,17	34	2,50	1,18	22	0,13	94	32,7
hilux-2.7-2007-LP300-0.95-15-800-91,3-0-1-22oct2014	0,95	5	700	91,3	0	1,41	137	14,2	0,05	0	2,34	1,25	25	0,15	86	26,5
hilux-2.7-2007-LP300-1.05-15-800-91,3-0-1-22oct2014	1,05	-5	2500	91,3	0	0,01	30	14,1	1,02	20	2,23	0,21	22	0,14	85	32,7
hilux-2.7-2007-LP300-0.95-27-2500-91,3-0-1-21oct2014	0,95	-5	2500	91,3	0	1,6	69	14	0	1	2,86	3,64	21	0,41	89	26,8
hilux-2.7-2007-LP300-1.05-27-2500-91,3-0-1-22oct2014	1,05	5	2500	91,3	0	0,01	49	13,8	1,34	111	2,68	3,51	21	0,42	94	32,7

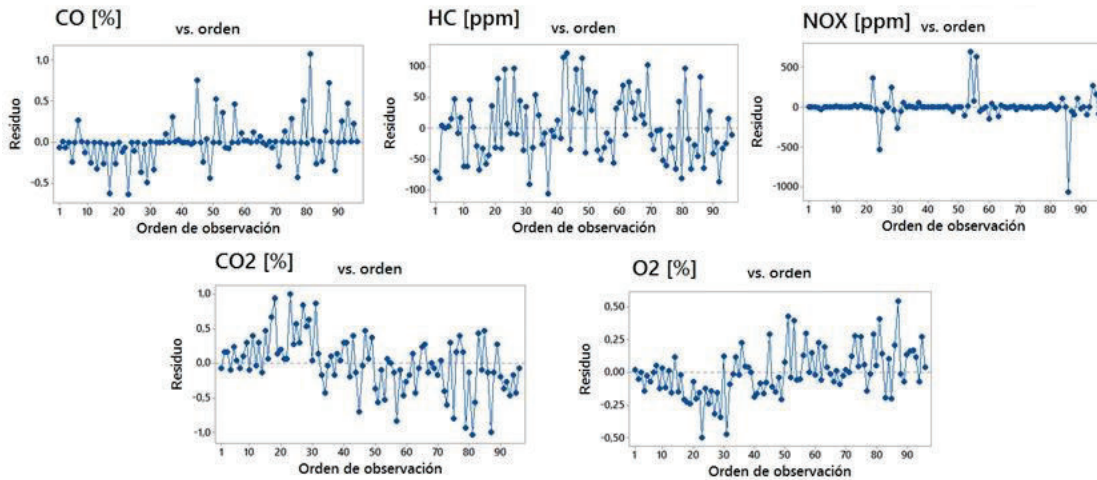
Los formatos utilizados son compatibles con el programa de análisis estadístico Minitab® en el cual se realiza el tratamiento de los datos.

### 3.3 TRATAMIENTO DE DATOS

Los resultados de las mediciones asocian siempre alguna imprecisión, por lo que los modelos estadísticos a desarrollar van a depender de las limitaciones de exactitud y precisión. Por tal motivo antes de utilizar los datos obtenidos se deben validar para evitar la introducción de errores.

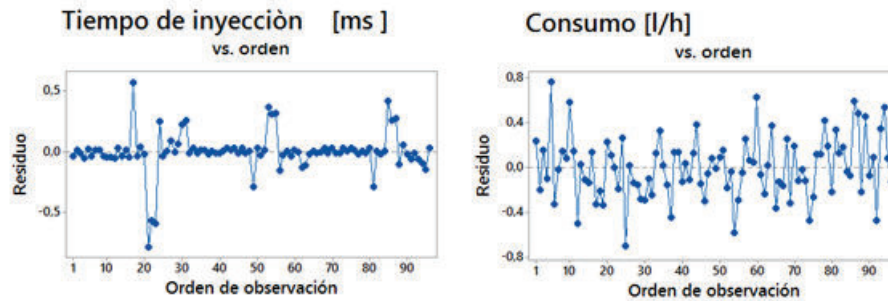
#### 3.3.1 VALIDACIÓN DE DATOS

Para comprobar los efectos de la aleatorización en la realización de las corridas experimentales se grafican los residuos de cada salida frente al orden de toma de la muestra, agrupados según el equipo con el que fueron obtenidos los resultados. En la figura 3.2 se muestran las gráficas de residuos para las salidas medidas por el analizador de gases, donde se puede apreciar la inexistencia de patrones definidos o la dependencia de cualquier muestra respecto de la anterior.



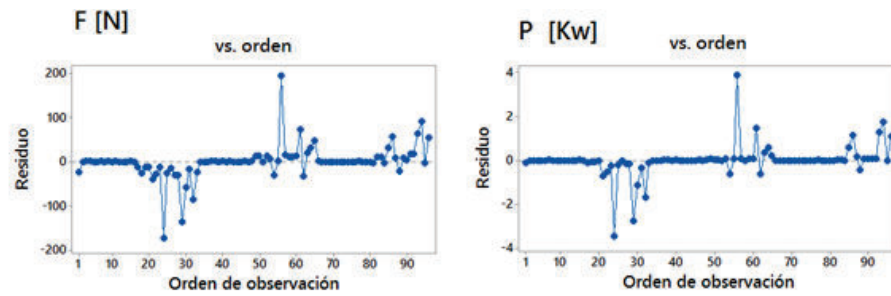
**Figura 3. 2 Gráficas de residuos del Analizador de Gases**

Los datos obtenidos a través de la tarjeta adquisidora NI Daq 6003, el contador de combustible y la pinza amperimétrica se muestran en la figura 3.3 donde se puede confirmar el supuesto de independencia de errores.



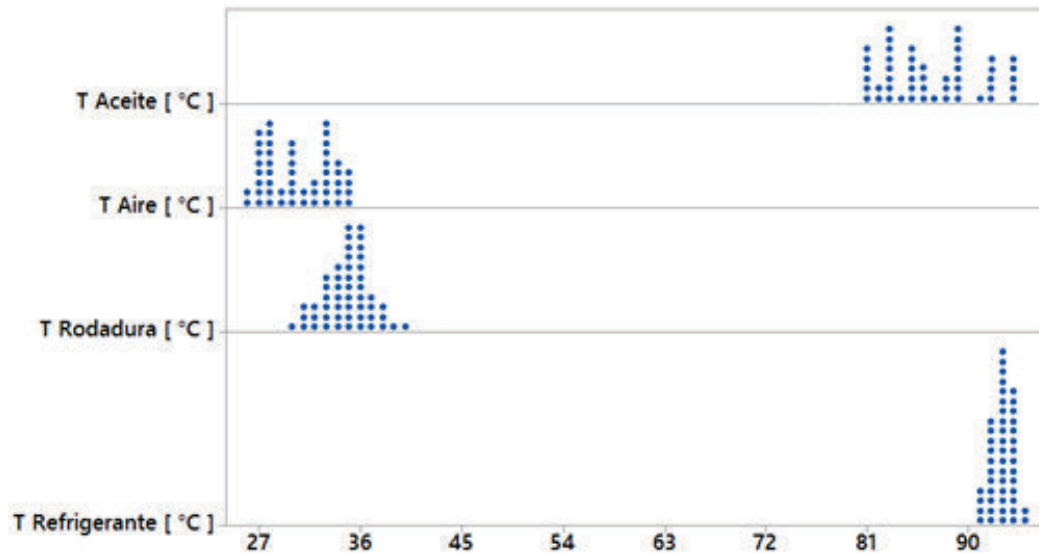
**Figura 3. 3 Gráficas de Residuos Tarjeta NI Daq 6003**

Las respuestas medidas en el banco dinamométrico y mostrado en la figura 3.4 tienen comportamiento similar a los anteriores y entre sí, debido a que la medición directa es de la fuerza tractora y la potencia se obtiene mediante cálculo.



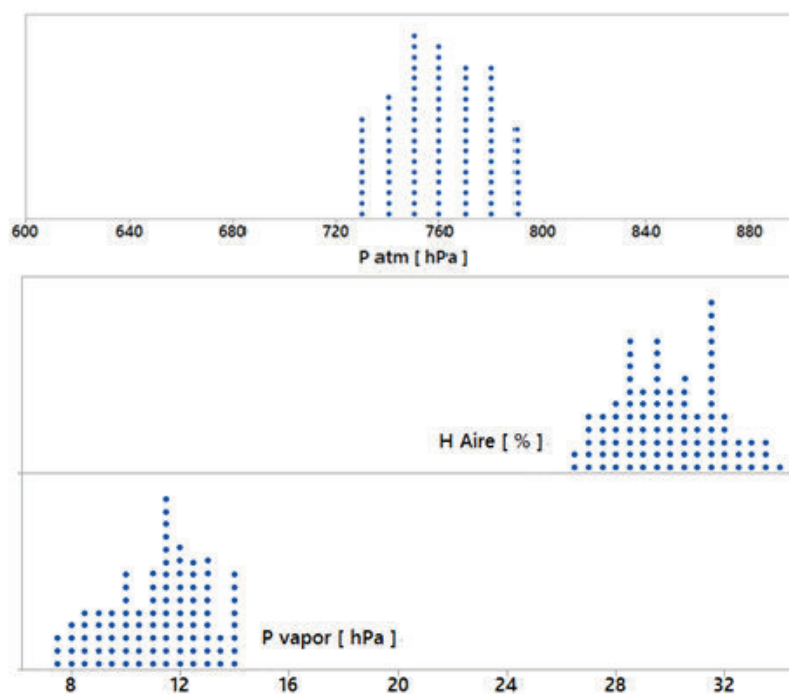
**Figura 3. 4 Gráficas de Residuos del Banco Dinamométrico**

Para evitar que los factores de bloqueo ejerzan influencia sobre las salidas a analizar se verifica el cumplimiento de los valores enunciados en el protocolo para el muestreo. La dispersión de las variables de bloqueo se muestra en la figura 3.5.



**Figura 3. 5 Dispersión de las Variables de Bloqueo**

Los valores de humedad del aire, presión de vapor y presión atmosférica en el instante de la toma de datos se muestra en la figura 3.6 La variación de la presión atmosférica es inferior al 4 % de la media.



**Figura 3. 6** *Dispersión de las Variables de Ruido*

### 3.3.2 ESTIMACIÓN DE SIGNIFICANCIA

Una vez obtenidas las respuestas correspondientes a cada tratamiento se completa la matriz del diseño factorial con el objeto de extraer características como el contraste de cada una de las respuestas respecto de cada uno de los factores.

El contraste de un factor consiste en la diferencia entre la sumatoria de las respuestas de una variable para el nivel máximo del factor y la sumatoria de las respuestas para el nivel mínimo del mismo factor, aplicado al total de las repeticiones del diseño experimental, como se describe en la ecuación 3.1.

$$\begin{aligned}
 \text{Contraste } \lambda = & \lambda + \lambda\alpha + \lambda\eta + \lambda\alpha\eta + \lambda R + \lambda\alpha R + \lambda\eta R + \lambda\alpha\eta R + \alpha c + \lambda\alpha\eta c + \lambda R c \\
 & + \lambda\alpha R c + \lambda\eta R c + \lambda\alpha\eta R c - (1) - \alpha - \eta - \alpha\eta - \alpha\eta R - c - \alpha c - \eta c \\
 & - \alpha\eta c - R c - \alpha R c - \eta R c - \alpha\eta R c
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

El efecto del factor es la variación de una respuesta ocasionada por el cambio del factor del nivel mínimo al máximo. Se determina mediante en la ecuación 3.2.

$$Efecto \lambda = \frac{1}{n2^{k-1}} Contraste \lambda$$

$$Efecto \lambda = \frac{1}{96} Contraste \lambda \quad (3.2)$$

La suma de cuadrados del efecto del factor se expresa como:

$$SC_{\lambda} = \frac{1}{n2^k} (Contraste \lambda)^2 \quad (3.3)$$

La suma de cuadrados totales se define por:

$$SC_T = SC_{\lambda} + SC_{\alpha} + SC_R + SC_{\eta} + SC_c + SC_2 \quad (3.4)$$

$$SC_2 = SC_{\lambda\alpha} + SC_{\alpha R} + SC_{R\eta} + SC_{\lambda\eta} + SC_{\lambda c} + SC_{\lambda R} + SC_{\alpha c} + SC_{Rc} + SC_{\eta c} + SC_{Rc} \quad (3.5)$$

$$SC_E = SC_T - SC_{\lambda} \quad (3.6)$$

$$SC_E = SC_T - SC_{\lambda} \quad (3.7)$$

Para determinar el modelo matemático que explique el comportamiento de una respuesta en función de los factores se toman los valores de los efectos y se los divide entre dos obteniendo el valor del coeficiente del mencionado factor en la ecuación. Para medir la calidad global del diseño de regresión múltiple se calcula el coeficiente de determinación  $R_D$  que explica la variabilidad presente en los datos y expresada en el modelo obtenido, mientras mejor se ajuste el modelo el comportamiento de una variable el coeficiente se aproximará al valor de 1, caso contrario tendrá valores bajos



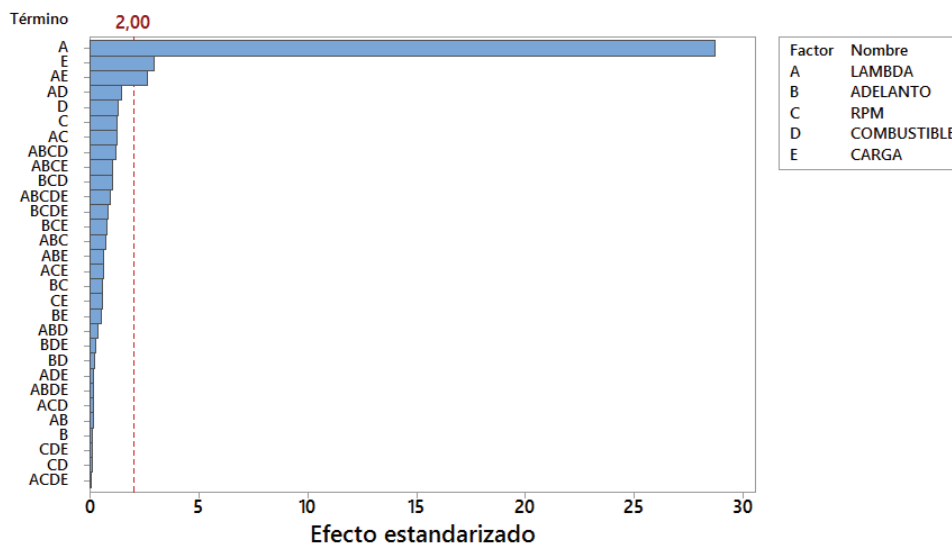
o próximos a 0, el valor mínimo del coeficiente se establece en 0.7 (70%). El coeficiente de determinación se calcula mediante (3.8).

$$R_D^2 = \frac{SC_T - SC_E}{SC_T} * 100 \quad (3.8)$$

### 3.4 REPRESENTACIÓN GRÁFICA Y ANÁLISIS

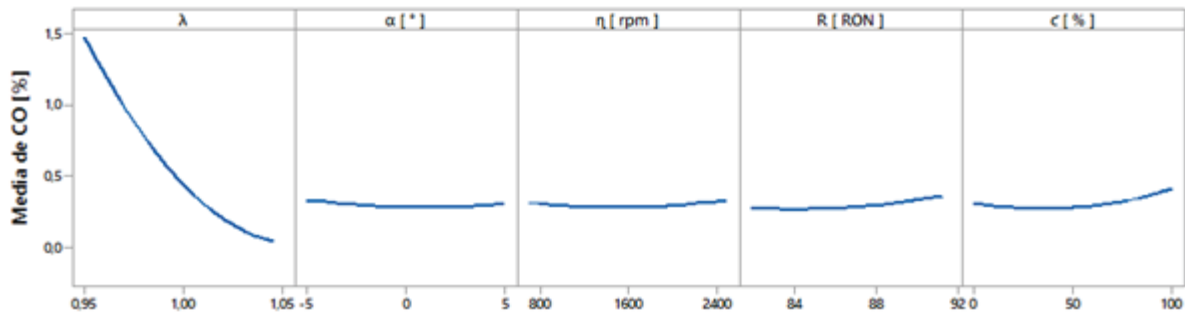
#### 3.4.1 MONÓXIDO DE CARBONO

En el diagrama de Pareto mostrado en la figura 3.7 se señala la ponderación de los efectos principales e interacciones de factores sobre la emisión de monóxido de carbono en la que destaca el factor lambda como principal influencia, seguido de lejos de la carga del motor y de la interacción de estos dos factores.



**Figura 3. 7 Diagrama de Pareto para CO**

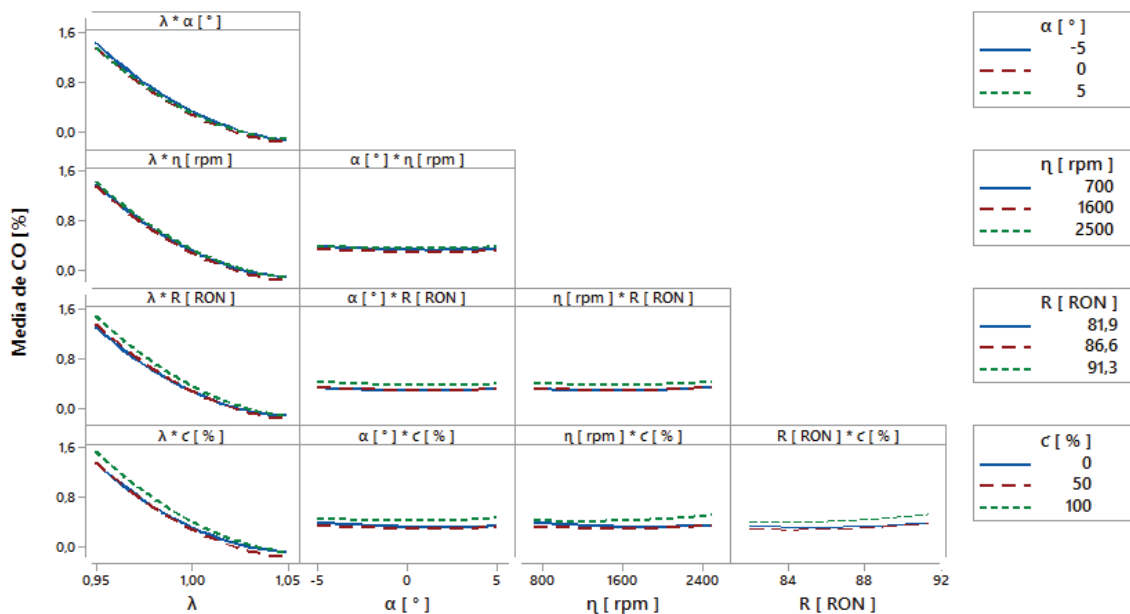
El comportamiento de la concentración de monóxido de carbono respecto de los factores considerados en la corrida experimental se representa en el diagrama de efectos principales que se muestra en la figura 3.8.



**Figura 3. 8 Diagrama de Efectos Principales para CO**

Corroborando lo enunciado en el diagrama de Pareto la mayor sensibilidad de la variable se da respecto del factor lambda generando elevados valores de emisión de monóxido de carbono en mezclas ricas y valores bajos para mezclas pobres; a más de ello se puede apreciar su casi nula dependencia del adelanto de encendido, el régimen de giro y el octanaje del combustible. Para valores elevados de carga del motor se genera un leve incremento en la emisión de monóxido de carbono.

En la gráfica de interacción mostrada en la figura 3.9 no se encuentran cruces importantes que denotan la interacción entre dos o más factores. La única interacción que se genera de forma leve es entre los factores lambda y carga.



**Figura 3. 9 Diagrama de Interacciones para CO**

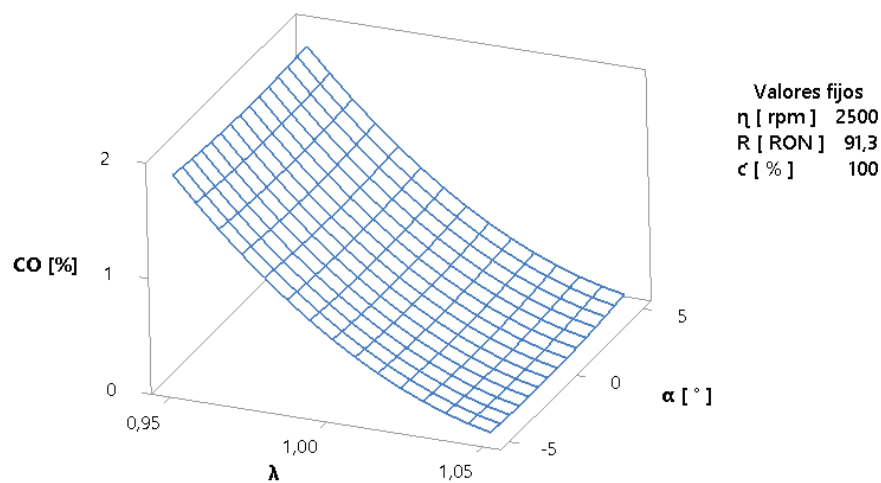
Como se evidenció en el diagrama de Pareto solo existe una interacción doble dada por los factores lambda y carga en el que se puede evidenciar en la gráfica de interacciones con un ligero cruce entre las curvas correspondientes a 0, 50 y 100 % de carga en la primera columna que representa el factor lambda. Mediante el método de los mínimos cuadrados se obtiene una regresión de segundo orden que describe el comportamiento de la emisión de monóxido de carbono en función de los cinco factores estudiados (3.9).

$$\begin{aligned}
 CO [\%] = & 134.5 - 245 \lambda - 0.061 \alpha + 0.000123 \eta - 0.111 R + 0,0082 c + 124.3 \lambda^2 \\
 & + 0.00163 \alpha^2 + 0.000001 \eta^2 + 0.00185 R^2 + 0.000032 c^2 + 0.0762 \lambda \alpha \\
 & - 0.000285 \lambda \eta - 0.2035 \lambda R - 0.01963 \lambda c + 0.000002 \alpha \eta - 0.000279 \alpha R \\
 & + 0.000069 \alpha c - 0.000001 \eta R + 0.000001 \eta c + 0.000092 R c \quad (3.9)
 \end{aligned}$$

El coeficiente de determinación es igual a:

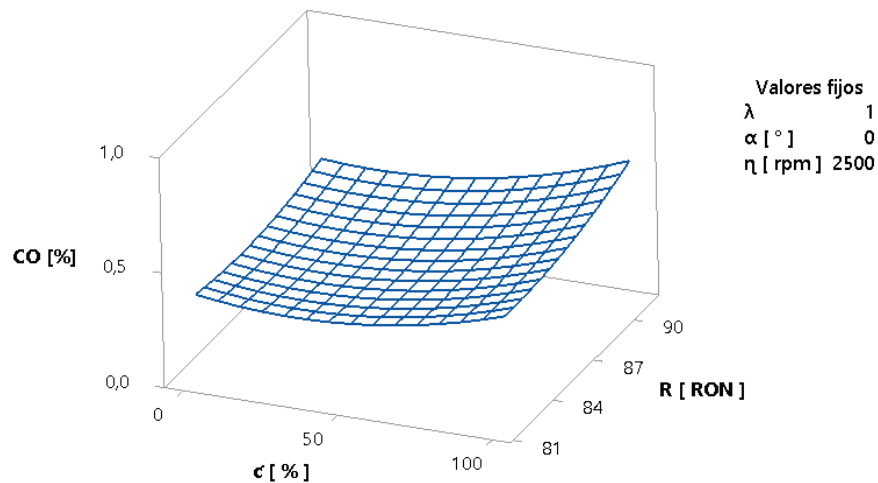
$$R_D^2 = 97.72\%$$

De la información obtenida en el diagrama de Pareto y las gráficas de efectos principales e interacciones se establece la condición más crítica para incrementar la tasa de emisión de monóxido de carbono, la misma que se representa en la superficie de respuesta que se detalla en la figura 3.10.



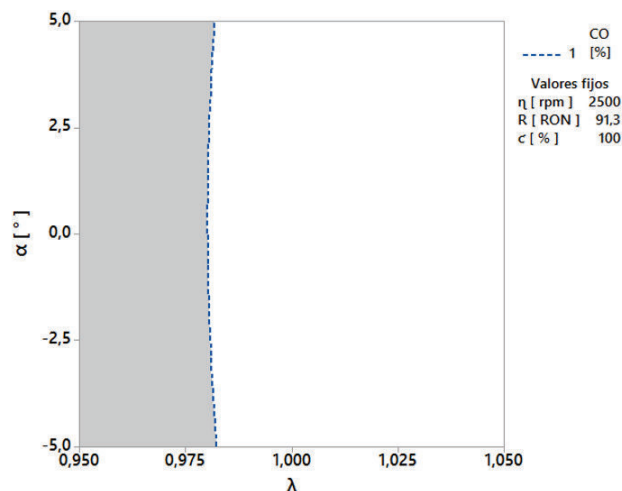
**Figura 3. 10 Emisión de CO en función de  $\lambda$  y  $\alpha$**

En la figura 3.11 se puede notar la leve dependencia que tiene el monóxido de carbono del octanaje del combustible a bajas cargas, mientras que a elevadas cargas incrementa levemente su valor al aumentar el octanaje del combustible.



**Figura 3. 11 Emisión de CO en función de  $c$  y  $R$**

Para representar el rango de funcionamiento del motor en función de  $\lambda$  y  $\alpha$  dentro de la tolerancia dispuesta por la normativa local se utiliza una gráfica de contorno en las condiciones que potencian la emisión de monóxido de carbono. En la figura 3.12 se muestra de blanco la zona de trabajo en la cual la emisión de CO no excede los valores señalados en la normativa local vigente y de gris la zona en la que los valores de CO superan los límites establecidos.

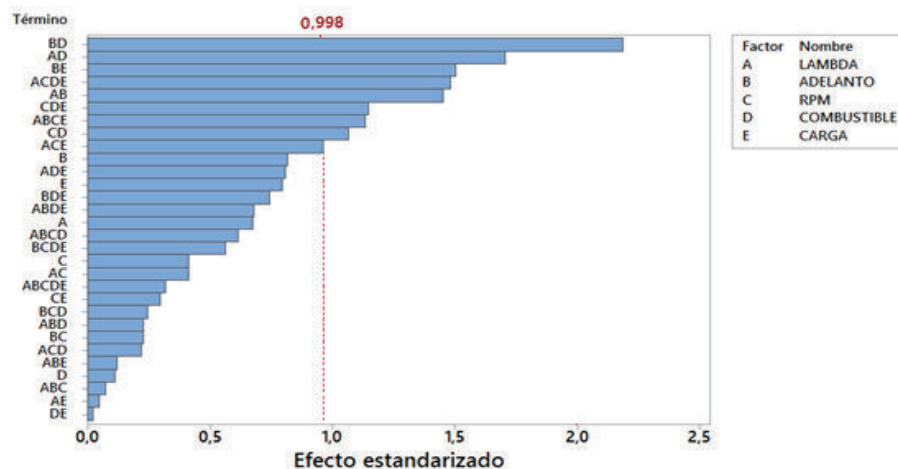


**Figura 3. 12 Zona de trabajo limitada por la emisión de CO**

El valor máximo admitido en la emisión de monóxido de carbono es de 1 % que se produce para un factor lambda igual a 0,981 y un adelanto de 5°.

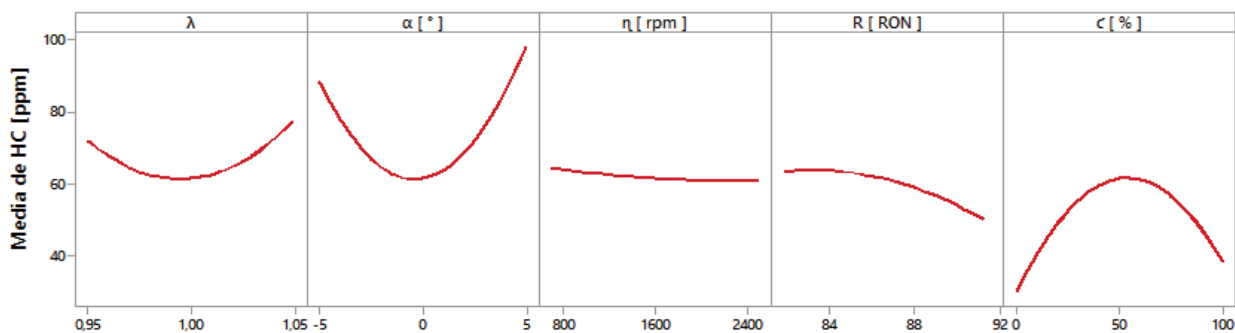
### 3.4.2 HIDROCARBUROS NO COMBUSTIONADOS

El diagrama de Pareto mostrado en la figura 3.13 señala como principales responsables en la emisión de hidrocarburos no combustionados a cinco interacciones dobles, dos interacciones triples y dos interacciones cuádruples en las que intervienen todos los factores, es decir la emisión de hidrocarburos no combustionados es sensible a todos los factores de la corrida experimental.



**Figura 3. 13 Diagrama de Pareto para HC**

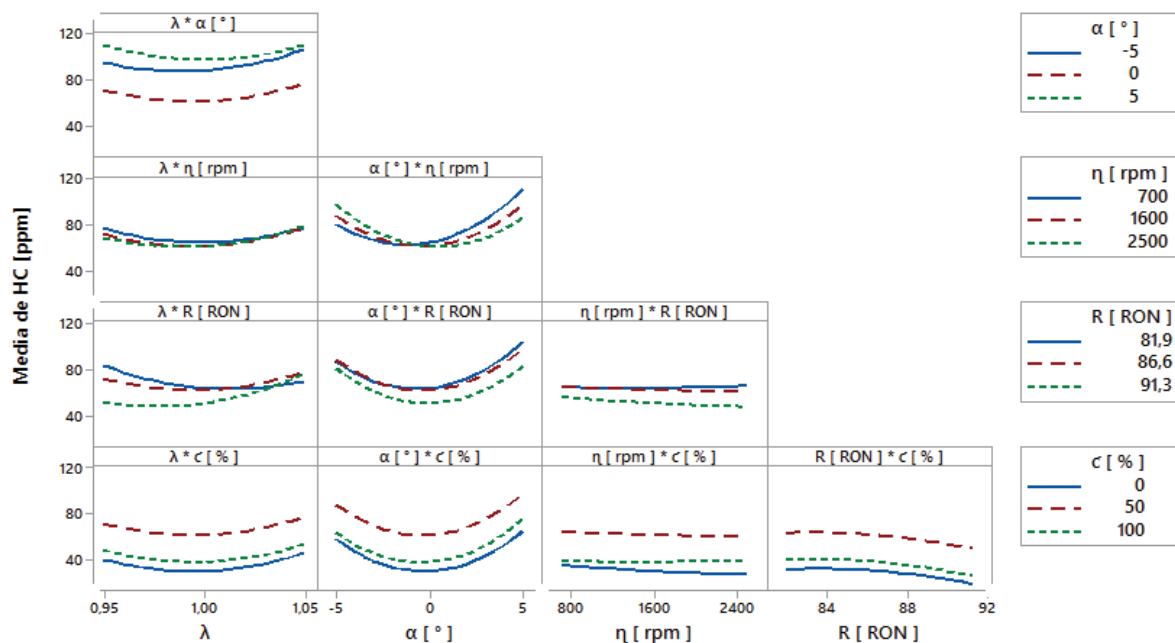
En el diagrama de efectos principales mostrado en la figura 3.14 se puede apreciar que la concentración de hidrocarburos no combustionados es muy sensible a todos los factores del experimento.



**Figura 3. 14 Diagrama de Efectos Principales para HC**

Los valores mínimos de emisión de HC no se encuentran en el punto original de funcionamiento del motor, respecto del factor lambda y del adelanto al encendido, a más de que dicha emisión disminuye considerablemente al incrementarse el régimen de giro del motor y el octanaje del combustible.

En el diagrama de interacciones mostrado en la figura 3.15 Se muestra que las principales interacciones entre factores son adelanto-combustible, lambda-combustible y adelanto-régimen de giro, existen otras interacciones pero con menor grado de influencia.



**Figura 3. 15 Diagrama de interacciones para HC**

Los factores lambda y adelanto al encendido son los que más promueven las interacciones con otros factores en especial con el combustible.

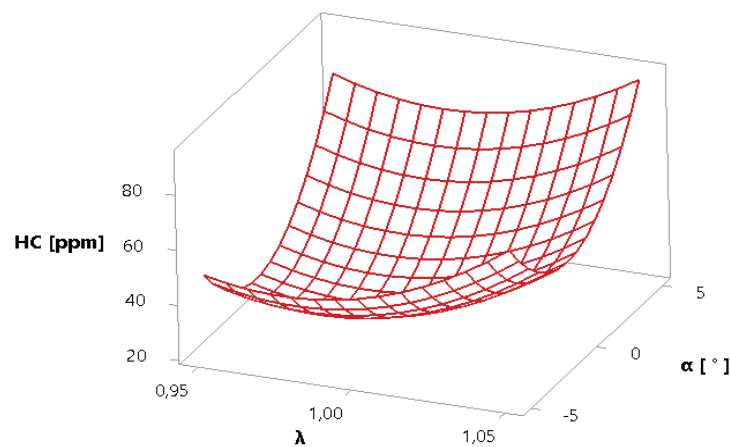
La ecuación que describe el comportamiento de la emisión de hidrocarburos no combustionados se muestra en la ecuación 3.9.

$$\begin{aligned}
 HC [ppm] = & 7236 - 14068 \lambda + 29.8 \alpha - 0.013 \eta - 3 R + 1.33 c + 5263 \lambda^2 + 1.266 \alpha^2 \\
 & + 0.000001 \eta^2 - 0.219 R^2 - 0.01094 c^2 - 11.1 \lambda \alpha + 0.053 \lambda \eta + 40.46 \lambda R \\
 & - 0.04 \lambda c - 0.00235 \alpha \eta - 0.164 \alpha R + 0.0046 \alpha c - 0.00057 \eta R \\
 & + 0.000049 \eta c + 0.0023 R c
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

El coeficiente de determinación es:

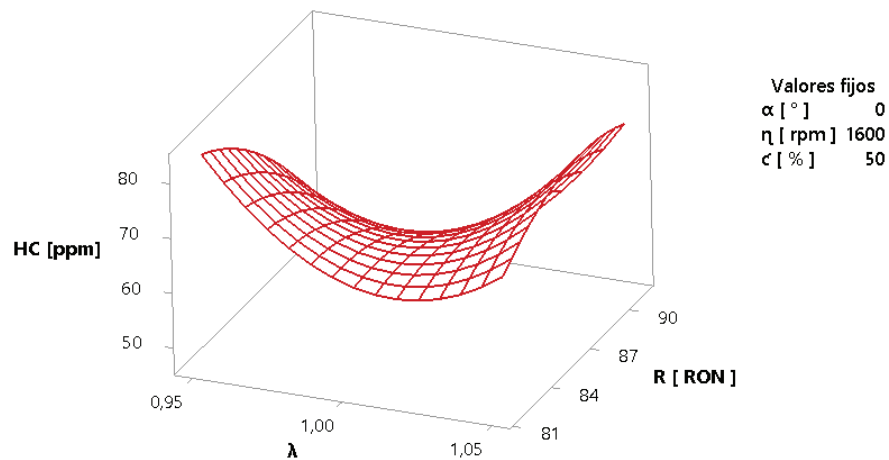
$$R_D^2 = 90.21\%$$

En la figura 3.16 se muestra la emisión de HC presenta comportamiento cuadrático en función de los factores lambda y adelanto al encendido, para la condición crítica de emisión que se da en ralentí. Los valores de emisión de HC se incrementan ya sea para mezclas extremadamente ricas o pobres, igual que para elevados valores pronunciados de adelanto y retraso al punto de encendido.



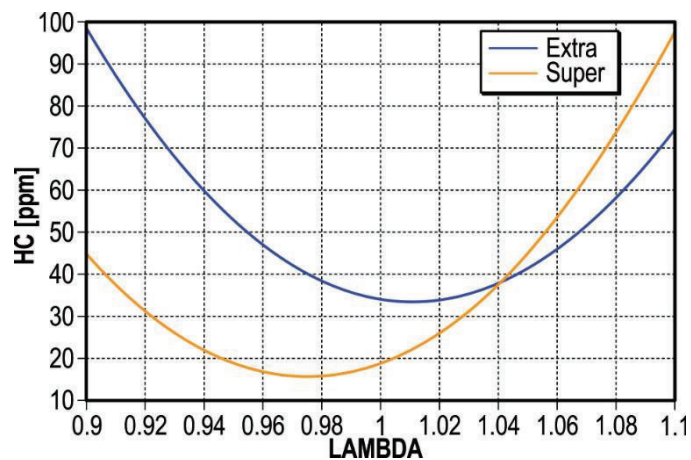
**Figura 3. 16 Emisión de HC en función de λ y α**

En la figura 3.17 se detalla que 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 3. 17 Emisión de HC en función de  $\lambda$  y R**

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 3.18 se puede apreciar que existe una condición de emisión mínima de HC que depende del combustible utilizado.



**Figura 3. 18 Emisión de HC según  $\lambda$**

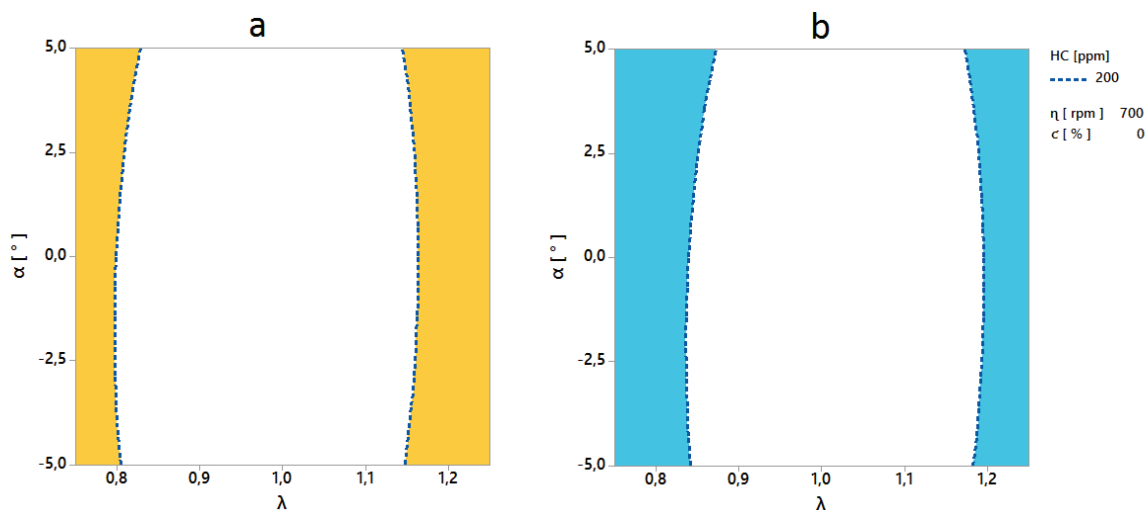


El uso de gasolina súper genera menores emisiones de HC que la gasolina extra en el intervalo  $\lambda < 1,042$  a partir del cual el comportamiento se invierte. Considerando los efectos principales e interacción de los factores se obtienen los valores mínimos de emisión de HC que se detallan en la tabla 3.4.

**Tabla 3. 8 Emisión mínima de HC**

COMBUSTIBLE	$\lambda$	$\alpha$ [ ° ]	HC [ppm]
EXTRA	1.012	-1.38	33
SUPER	0,975	-0.91	16

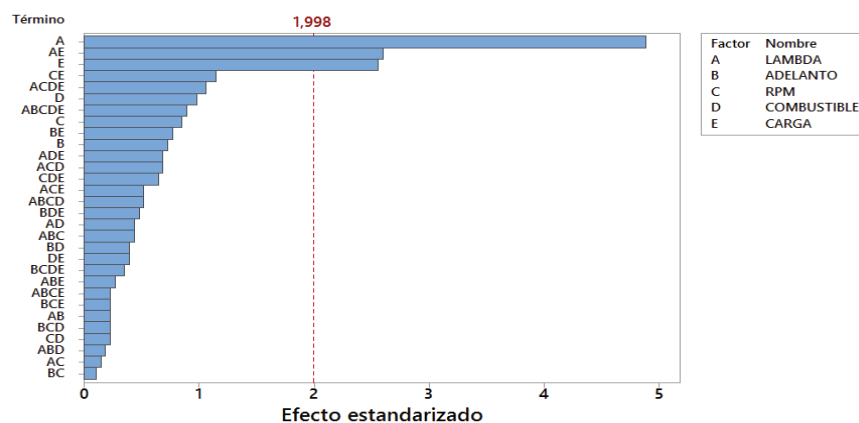
El rango de funcionamiento del motor en el cual la emisión de HC no sobrepasa el límite determinado en la normativa local vigente se representa a través de los contornos de la superficie. En la figura 3.19a y 3.19b se aprecia de blanco la zona de trabajo en la que el motor puede funcionar sin sobrepasar la emisión de 200 ppm de HC utilizando gasolina súper y gasolina extra respectivamente. Se muestra de color amarillo la zona en la que las posibles combinaciones de  $\lambda$  y  $\alpha$  generan emisiones superiores al límite para el caso de la gasolina súper, mientras que para la gasolina extra esta zona de exclusión se muestra de azul. Ambas gráficas se obtienen en la condición de emisión de HC más severa, que es en ralentí sin carga, tal como señala la norma.



**Figura 3. 19 Zona de trabajo limitada por la emisión de HC**

### 3.4.3 DIÓXIDO DE CARBONO

En el diagrama de Pareto mostrado en la figura 3.20 se señala la ponderación de los efectos principales e interacciones de factores sobre la emisión de dióxido de carbono en la que destaca el factor lambda como principal influencia, seguido de la interacción entre los factores lambda y carga y finalmente del factor carga. Puede apreciarse que son los mismos factores que inciden sobre la generación de monóxido de carbono.



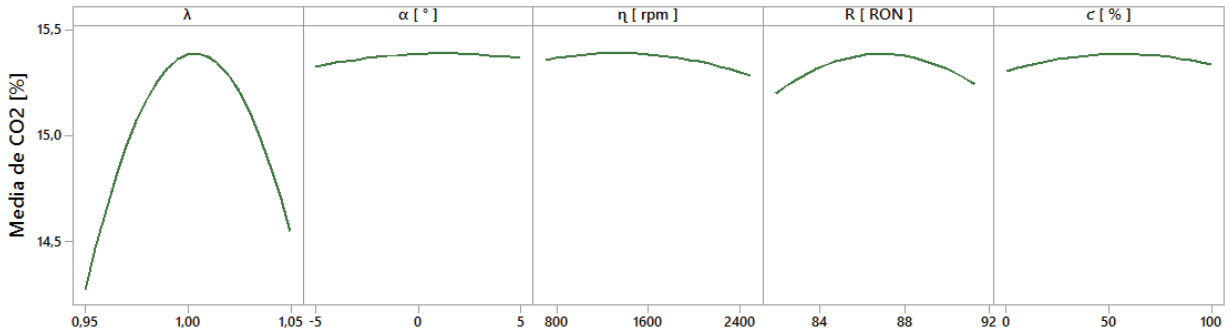
**Figura 3. 20 Diagrama de Pareto para CO2**

El comportamiento de la concentración de dióxido de carbono respecto de los factores considerados en la corrida experimental se representa en el diagrama de efectos principales que se muestra en la figura 3.21. Puede apreciarse que el valor máximo de emisión de CO<sub>2</sub> se produce con la mezcla próxima a la estequiométrica disminuyendo su concentración tanto en mezclas ricas como en pobres.

La emisión de CO<sub>2</sub> es poco sensible al adelanto al encendido dentro de los niveles escogidos del factor, se puede apreciar la existencia de un valor máximo muy próximo al punto de funcionamiento original del motor, para adelantos superiores o inferiores al descrito, la concentración de CO<sub>2</sub> disminuye.

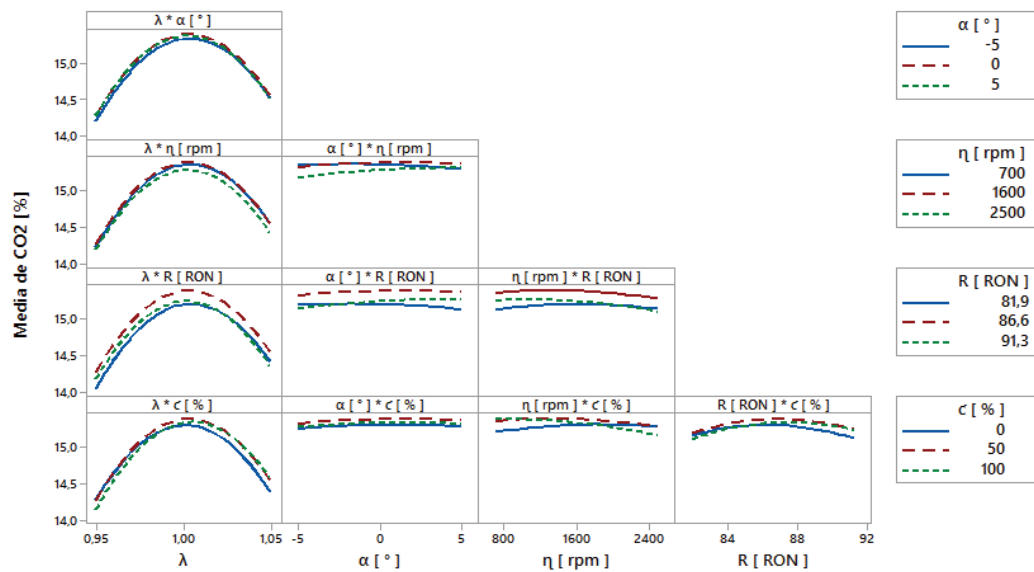
Respecto del régimen de giro la emisión de CO<sub>2</sub> disminuye ligeramente al incrementarse la velocidad de giro del motor.

Acorde al octanaje del combustible la emisión de CO<sub>2</sub> es mayor utilizando gasolina súper en comparación con el uso de extra, pero presenta un máximo de concentración utilizando mezcla de los combustibles para obtener un RON cercano al nivel intermedio.



**Figura 3. 21 Diagrama de Efectos Principales para CO2**

En el diagrama de interacciones mostrado en la figura 3.22 se puede corroborar lo enunciado en el diagrama de Pareto, puesto que la interacción más fuerte es la que se produce entre los factores lambda y carga donde se produce el cruce de los efectos producidos por el factor lambda a diferentes valores de carga.



**Figura 3. 22 Diagrama de Interacciones para CO2**

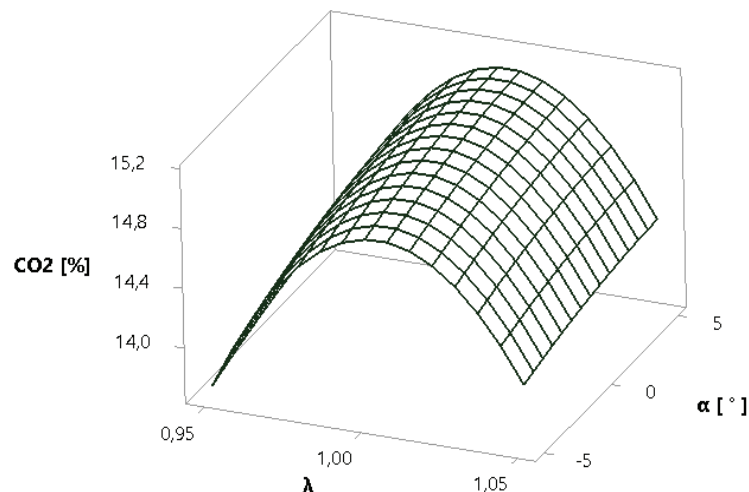
La ecuación que describe el comportamiento de la emisión de dióxido de carbono se muestra en la ecuación 3.10.

$$\begin{aligned}
 CO_2 [\%] = & -451.9 + 802 \lambda - 0.099 \alpha + 0.00161 \eta + 1.49R - 0.0433c - 391.3 \lambda^2 \\
 & - 0.00153 \alpha^2 - 0.000001 \eta^2 - 0.0740 R^2 - 0.000025 c^2 - 0.087 \lambda \alpha \\
 & - 0.000486 \lambda \eta - 0.199 \lambda R + 0.0337 \lambda c + 0.00001 \alpha \eta + 0.0199 \alpha R \\
 & + 0.000012 \alpha c - 0.00001 \eta R - 0.000002 \eta c + 0.000173 R c \quad (3.10)
 \end{aligned}$$

El coeficiente de determinación es:

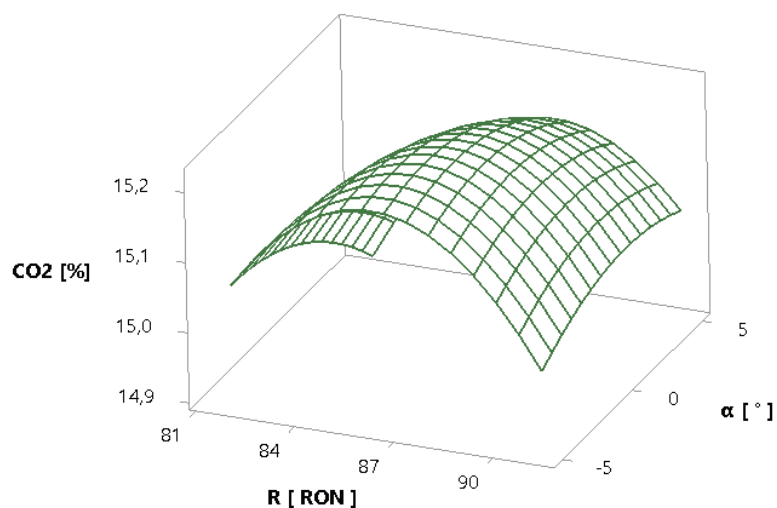
$$R_D^2 = 91,31\%$$

En la figura 3.23 se muestra la emisión de CO<sub>2</sub> que presenta comportamiento cuadrático en función del factor lambda y lineal respecto del adelanto al encendido, para la condición de mayor emisión que se da en ralentí. Los valores de emisión de CO<sub>2</sub> disminuyen ya sea para mezclas extremadamente ricas o pobres, igual que para elevados valores pronunciados de adelanto y retraso al punto de encendido.



**Figura 3. 23 Emisión de CO<sub>2</sub> en función de λ y α**

La mayor emisión de CO<sub>2</sub> con mezcla ligeramente pobre  $\lambda = 1.006$  y un adelanto al punto de encendido original de  $\alpha = -0.75$ , utilizando gasolina súper. Es posible incrementar la concentración utilizando gasolinas con octanajes intermedios, como se muestra en la figura 3.24 la emisión de CO<sub>2</sub> alcanza su máximo valor utilizando combustible de 87,7 octanos que se consigue al mezclar 30% de gasolina súper en 70% de gasolina extra.



**Figura 3. 24 Emisión de CO<sub>2</sub> en función de R y  $\alpha$**

La concentración de CO<sub>2</sub> depende de las combinaciones de los factores  $\lambda$ ,  $\alpha$ , y del combustible utilizado. En la figura 3.25a y 3.25b se muestran las representaciones de contornos de las emisiones de dióxido de carbono para gasolina extra y súper respectivamente, en función de los factores  $\lambda$  y  $\alpha$ . La emisión de CO<sub>2</sub> se cuantifica en la escala de colores que parte desde 14.2% hasta 15.2% para las diferentes combinaciones de los factores  $\lambda$  y  $\alpha$ . La gasolina súper permite trabajar en zonas con adelanto al encendido más pronunciado que la gasolina extra sin disminuir la concentración de CO<sub>2</sub> en los gases de escape.

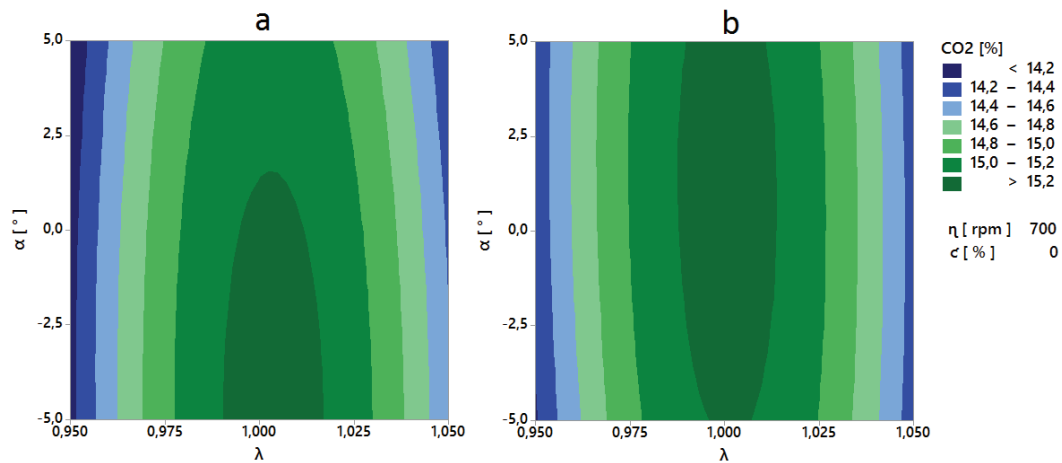


Figura 3. 25 Gráficos de Contornos para la Emisión de CO2

### 3.4.4 OXÍGENO

La presencia de oxígeno en los gases de escape se debe principalmente al factor lambda y a la interacción entre los factores lambda y carga, como puede apreciarse en el diagrama de Pareto mostrado en la figura 3.26.

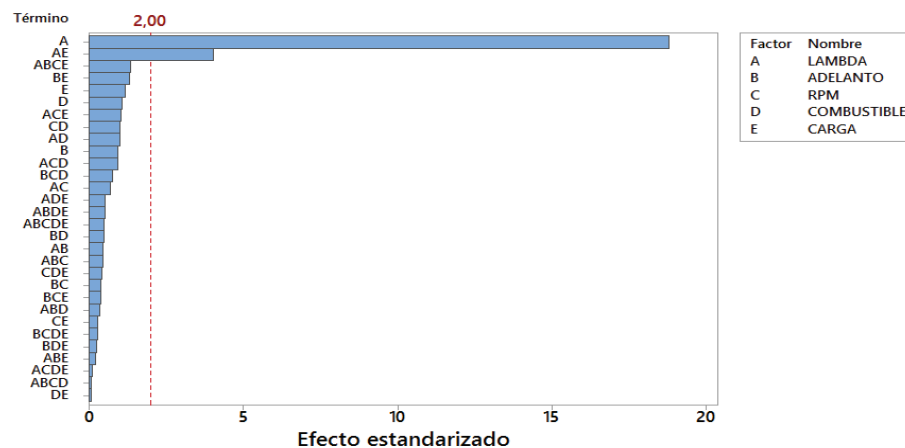
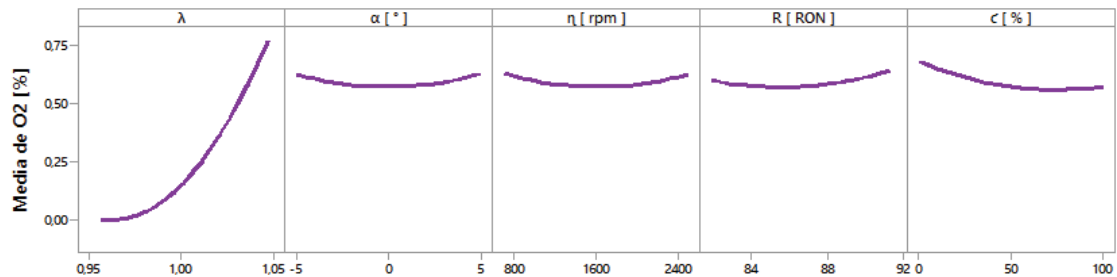


Figura 3. 26 Diagrama de Pareto para O<sub>2</sub>

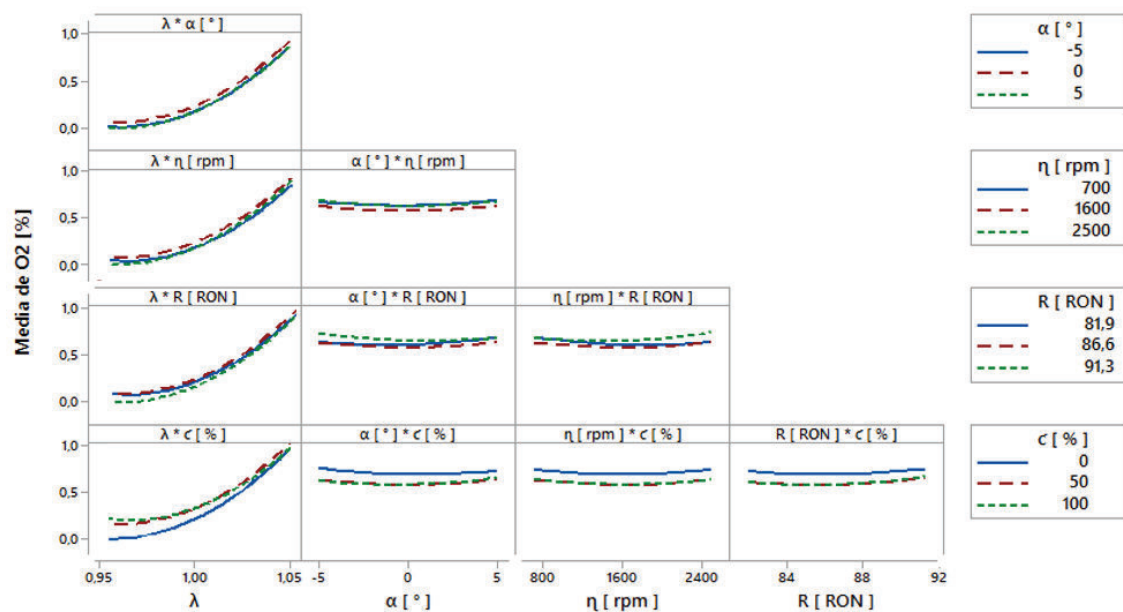
En el diagrama de efectos principales mostrado en la figura 3.27 puede apreciarse que la concentración de O<sub>2</sub> en los gases de escape depende principalmente del factor lambda que ocasiona bajas concentraciones de O<sub>2</sub> al aplicar mezclas ricas e

incrementa la emisión al aplicar mezclas pobres. Respecto del adelanto al encendido se obtiene un mínimo de emisión en valores próximos al punto original de encendido del motor.



**Figura 3. 27 Diagrama de Efectos Principales para O<sub>2</sub>**

En el diagrama de interacciones mostrado en la figura 3.28 se puede corroborar lo enunciado en el diagrama de Pareto, puesto que la interacción más fuerte es la que se produce entre los factores lambda y carga donde se produce el cruce de los efectos producidos por el factor lambda a diferentes valores de carga. El factor lambda es el que más promueve interacciones con otros factores en especial con el combustible.



**Figura 3. 28 Diagrama de Interacciones para O<sub>2</sub>**

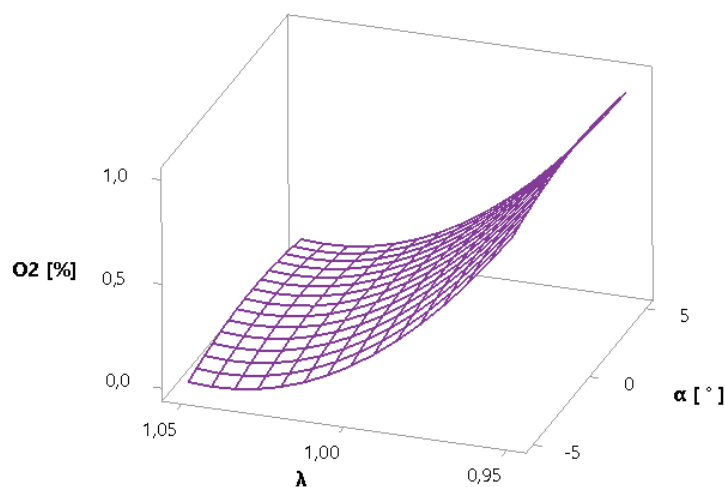
La ecuación que describe el comportamiento de la emisión de oxígeno se muestra en 3.11.

$$\begin{aligned}
 O_2 [\%] = & -92.1 + 221 \lambda + 0.091 \alpha - 0.00129 \eta - 0.5 R + 0,16 c + 109.3 \lambda^2 + 0.0027 \alpha^2 \\
 & + 0.000001 \eta^2 + 0.00234 R^2 + 0.000023 c^2 + 0.005 \lambda \alpha + 0.00049 \lambda \eta \\
 & + 0.09 \lambda R - 0.0217 \lambda c - 0.000002 \alpha \eta - 0.00112 \alpha R + 0.000063 \alpha c \\
 & + 0.000007 \eta R - 0.000001 \eta c + 0.000029 R c
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

El coeficiente de determinación es:

$$R_D^2 = 89.43\%$$

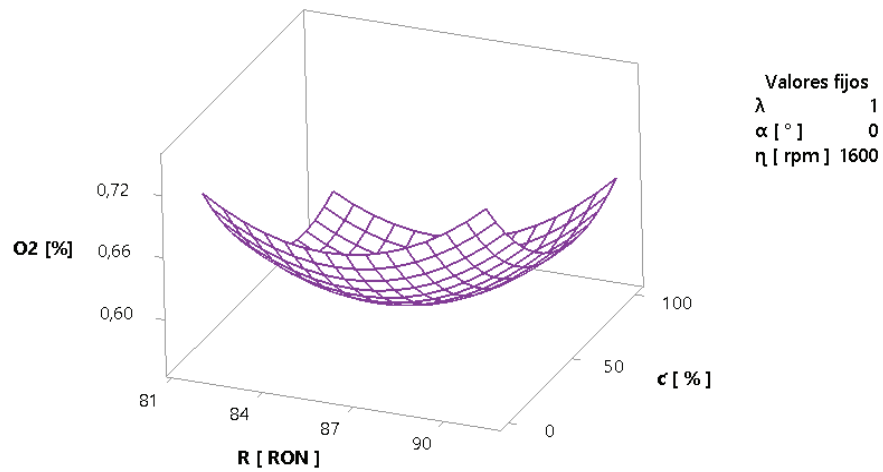
En la figura 3.29 se muestra que la emisión de  $O_2$  presenta comportamiento cuadrático respecto del factor lambda y es poco dependiente del adelanto al encendido. Los valores de emisión de  $O_2$  se incrementan para mezclas extremadamente pobres.



**Figura 3. 29 Emisión de  $O_2$  en función de  $\lambda$  y  $\alpha$**

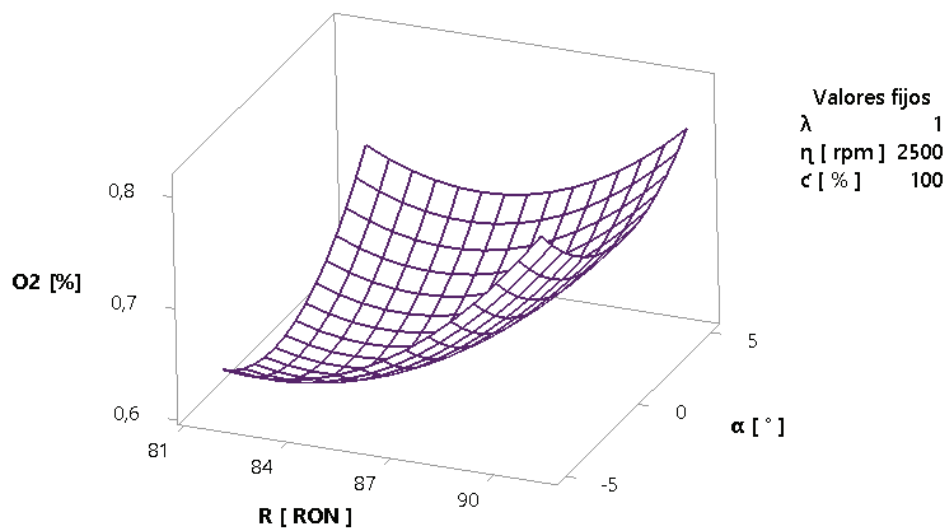
La emisión de  $O_2$  que se produce al utilizar gasolina extra y súper es más o menos similar para condiciones de baja carga, al incrementar la carga el uso de gasolina súper incrementa la concentración de  $O_2$  en los gases de escape respecto de la emisión generada con el uso de gasolina extra, como se muestra en la figura 3.30.





**Figura 3. 30 Emisión de  $O_2$  en función de  $\alpha$  y R**

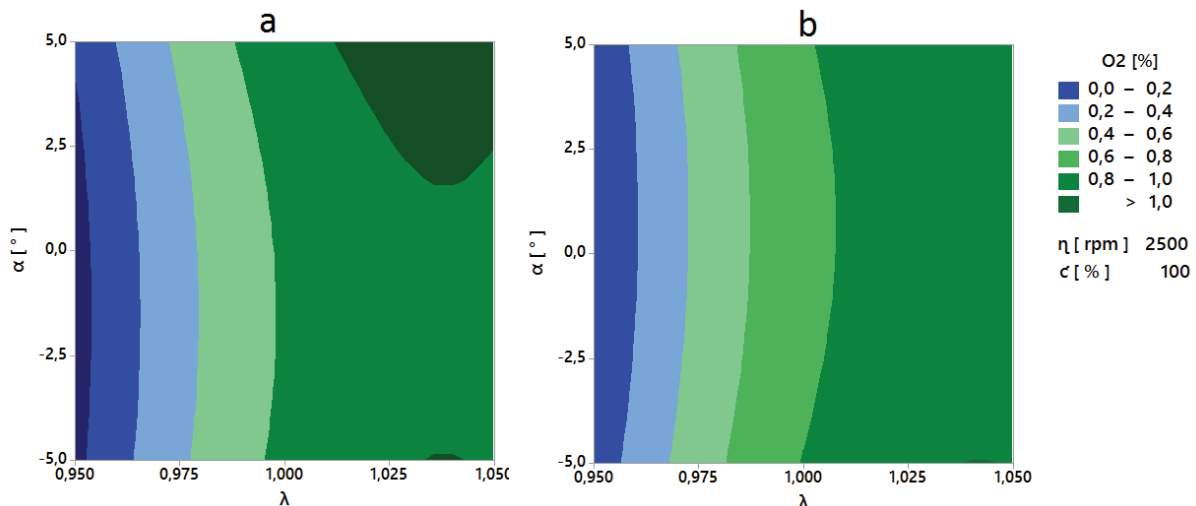
La concentración de  $O_2$  alcanza su valor mínimo utilizando gasolina de bajo octanaje con el punto de encendido retrasado  $5^\circ$  respecto del valor original. En la figura 3.31. se aprecia que el valor de emisión incrementa al utilizar gasolina súper con adelantos pronunciados al encendido, generando el valor máximo con  $5^\circ$  de incremento al adelanto original.



**Figura 3. 31 Emisión de  $O_2$  en función de R y  $\alpha$**

Las diferentes combinaciones de los factores  $\lambda$ ,  $\alpha$ , y del combustible utilizado generan diversos valores de emisión de  $O_2$ .

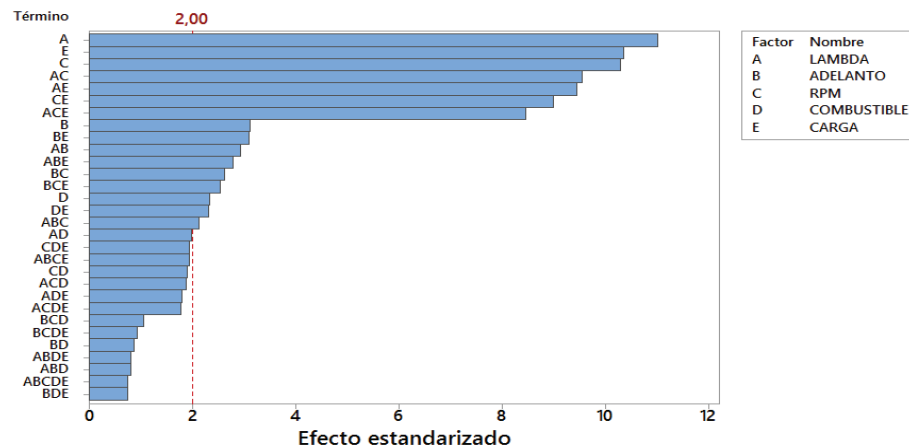
En la figura 3.32a y 3.32b se muestran las representaciones de contornos de las emisiones de  $O_2$  para gasolina extra y súper respectivamente, en la condición de funcionamiento más extrema donde se requiere que la emisión de oxígeno sea mínima, en función de los factores  $\lambda$  y  $\alpha$ . La gasolina súper permite trabajar de mejor manera con mezcla pobre que la gasolina extra sin concentración de  $O_2$  en los gases de escape se incremente.



**Figura 3. 32 Zona de trabajo limitada por la emisión de  $O_2$**

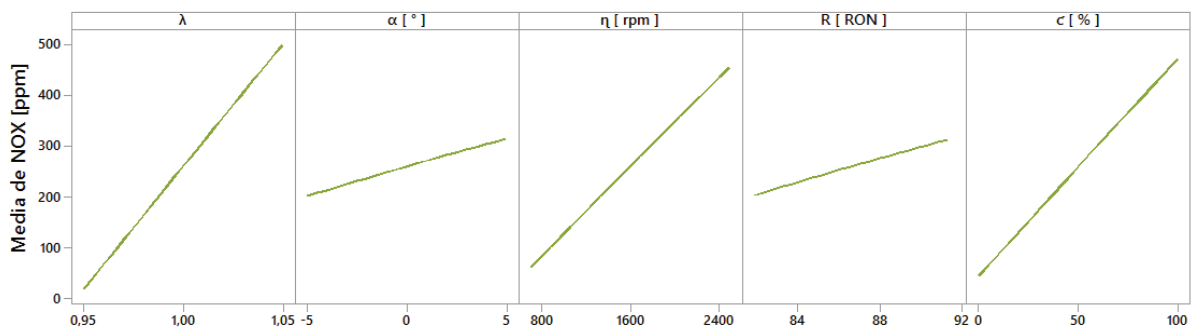
### 3.4.5 ÓXIDOS NITROSOS

La emisión de  $NO_x$  es sensible a todos los factores de la corrida experimental, ya sea como efecto principal o como interacciones. Los factores que independientemente más inciden en la emisión de  $NO_x$  son  $\lambda$ , la carga del motor y la velocidad de giro, tal y como se muestra en la figura 3.33.



**Figura 3. 33 Diagrama de Pareto para NOx**

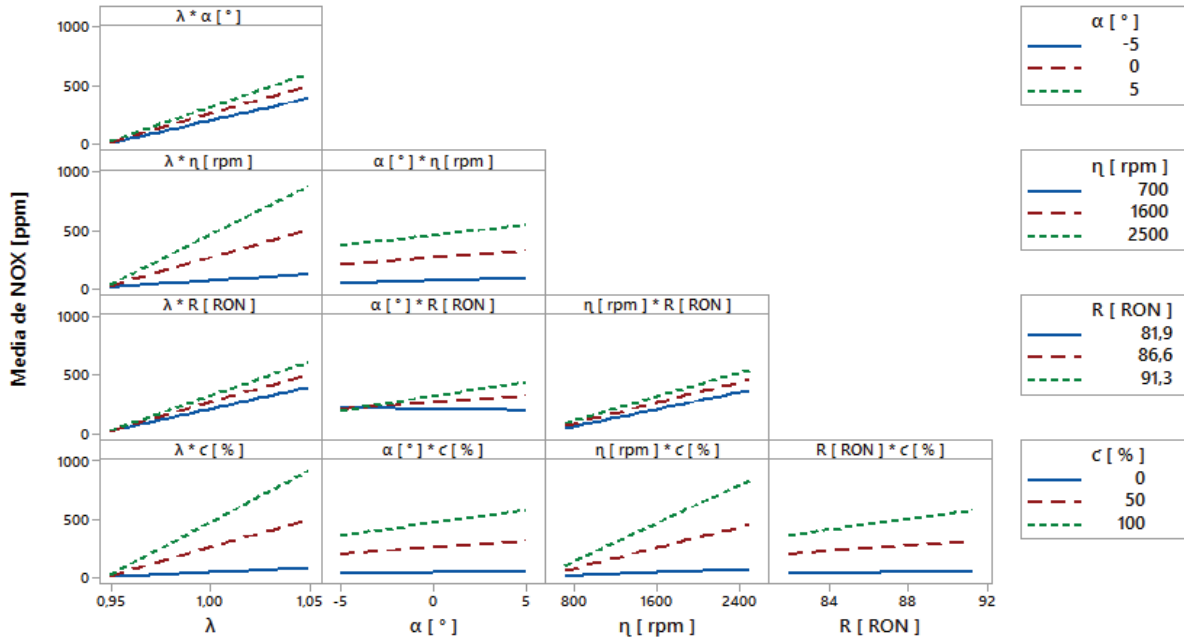
En el diagrama de efectos principales mostrado en la figura 3.34 se aprecia que la emisión de NOx se incrementa bajo condiciones de mezclas pobres, adelantos pronunciados al encendido, altos regímenes de giro, a más del alto octanaje del combustible y la elevada carga externa del motor. Los NOx incrementan su concentración en los gases de escape en condiciones que generen elevadas presiones y temperaturas en la cámara de combustión.



**Figura 3. 34 Diagrama de Efectos Principales para NOx**

En la matriz de interacciones mostrada en la figura 3.35 se puede apreciar que los cruces más pronunciados son provocados por el factor lambda para generar las interacciones más fuertes con los factores régimen de giro y carga; otras interacciones

de menor ponderación se dan entre los factores régimen de giro y carga y entre los factores adelanto al encendido y carga.



**Figura 3. 35 Diagrama de Interacciones para NOx**

La ecuación que describe el comportamiento de la emisión de óxidos nitrosos se muestra en (3.12).

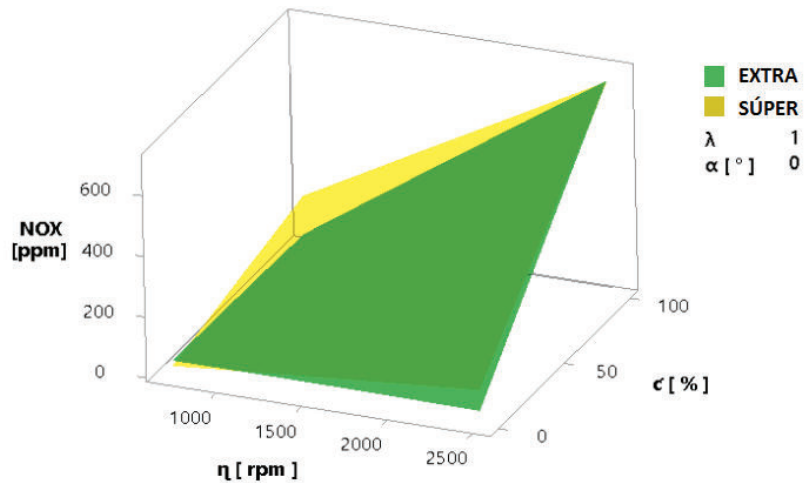
$$\begin{aligned}
 NOx [ppm] = & 25105 - 24421 \lambda - 445 \alpha - 4,76 \eta - 219 R - 102,4 c - 325 \lambda^2 \\
 & - 0,07 \alpha^2 - 0,000002 \eta^2 - 0,08 R^2 - 0,0007 c^2 + 192 \lambda \alpha \\
 & + 4,141 \lambda \eta + 221 \lambda R + 81,7 \lambda c + 0,00715 \alpha \eta + 2,80 \alpha R + 0,212 \alpha c \\
 & + 0,0076 \eta R + 0,003731 \eta c + 0,220 R c + 0,220 R c \quad (3.12)
 \end{aligned}$$

El coeficiente de determinación es:

$$R_D^2 = 93.37\%$$

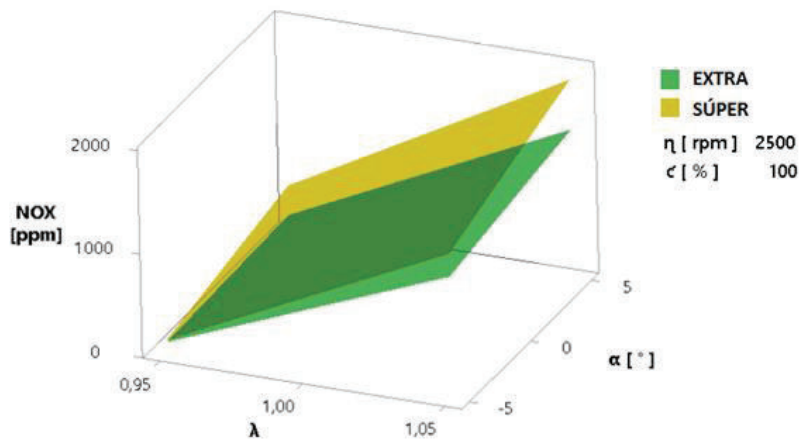
Dentro de las condiciones de operación normal del motor la emisión de NOx es sensible al régimen de giro y a la carga, en la figura 3.36 se muestra la relación de la

concentración de NOx tanto para gasolina súper como para extra. Puede apreciarse que bajo condiciones de elevada carga y bajo régimen de giro la gasolina súper genera mayores emisiones de NOx que la gasolina extra.



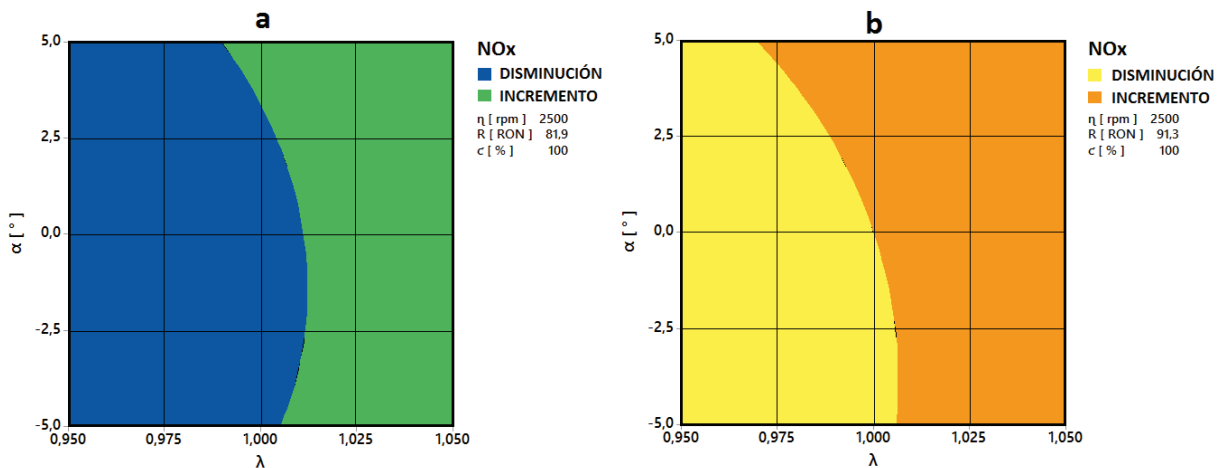
**Figura 3. 36 Emisión de NOx en función de  $\eta$  y  $c$**

En la figura 3.37 se muestra que la emisión de NOx disminuye con el uso de gasolina extra respecto de la súper. Se aprecia que la mayor concentración de NOx se da utilizando mezclas pobres y adelanto el punto de encendido en 5° respecto del valor original, la gráfica fue obtenida para la condición crítica de emisión que se consigue a 2500 rpm con una carga externa de 100%.



**Figura 3. 37 Emisión de NOx en función de  $\lambda$  y  $\alpha$**

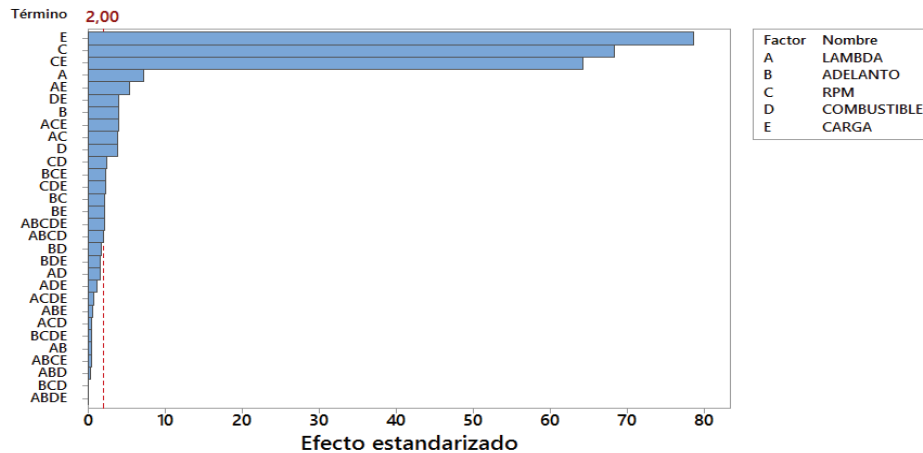
Cuando el motor funciona en altos regímenes de giro y soporta elevadas cargas se produce la mayor concentración de NOx en los gases de escape, en estas condiciones las emisiones de NOx pueden disminuir o incrementarse dependiendo de los valores de lambda y adelanto al encendido con los que trabaje el motor. En la figura 3.38 se puede apreciar las zonas de trabajo en las que la concentración de NOx disminuye o incrementa en función de la combinación de los factores antes citados, en comparación con las emisiones producidas por un motor operando en el punto original de funcionamiento utilizando gasolina súper. En la figura 3.38a se muestra de azul la zona donde el motor emite menor concentración de NOx utilizando gasolina extra, de verde se muestra la zona donde las emisiones de NOx incrementan y la curva que se forma en la unión de ambas zonas muestran las posibles combinaciones de  $\lambda$  y  $\alpha$  en las que el motor emite la misma concentración de NOx que en las condiciones originales de operación. De igual forma en la figura 3.38b se muestra la zona en la que las emisiones de NOx disminuyen o se incrementan utilizando gasolina súper. Puede notarse que el uso de gasolina extra genera una zona más amplia de trabajo que permite disminuir la concentración de NOx.



**Figura 3. 38 Zona de trabajo limitada por la emisión de NOx**

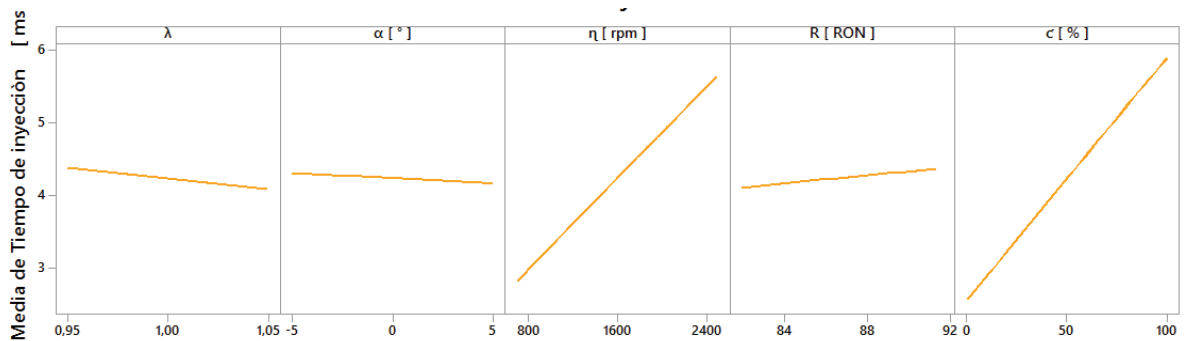
### 3.4.6 TIEMPO DE INYECCIÓN

El tiempo de inyección depende principalmente de la carga del motor y del régimen de giro, seguidos de la interacción de estos dos factores como puede verse en el diagrama de Pareto indicado en la figura 3.39. El factor lambda y la interacción entre lambda y carga tienen menor influencia que los factores antes descritos.



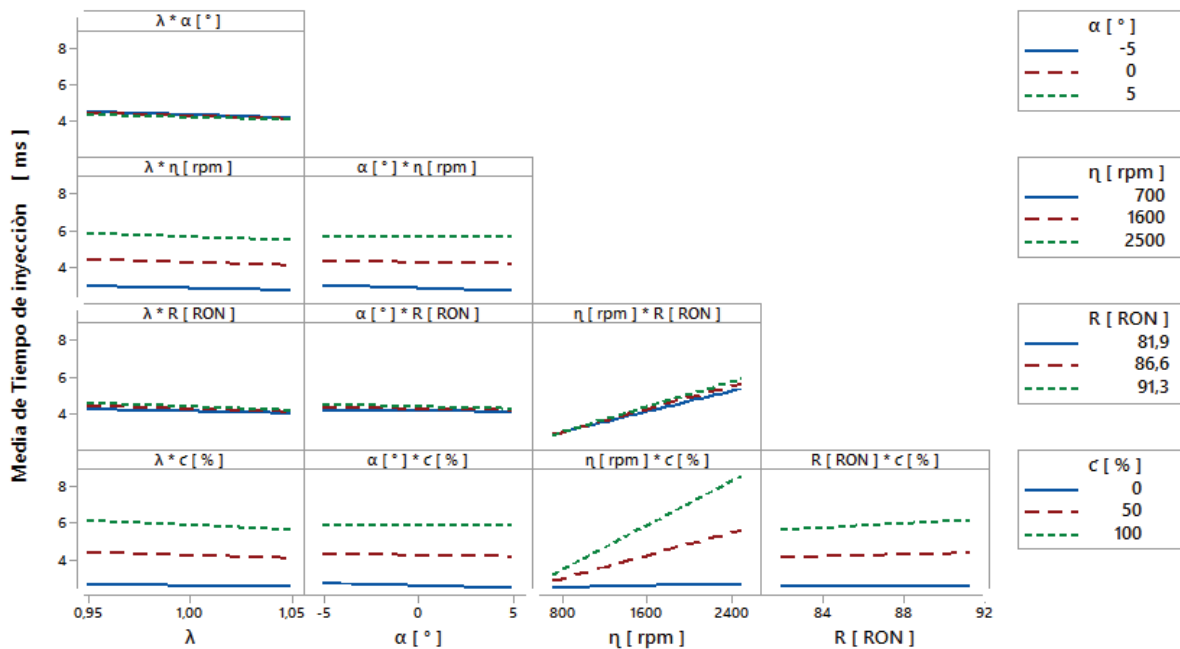
**Figura 3. 39 Diagrama de Pareto para Tiempo de Inyección**

En el diagrama de efectos principales mostrado en la figura 3.40 se puede apreciar que el mayor incremento del tiempo de inyección se genera cuando aumenta el régimen de giro y la carga del motor. El tiempo de inyección aumenta para valores de lambda inferiores a 1 y disminuye acorde el lambda aumenta. Existe una ligera dependencia del adelanto al encendido en cuyo caso el tiempo de inyección aumenta para retrasos al punto de encendido original.



**Figura 3. 40 Diagrama de Efectos Principales para Tiempo de Inyección**

En el diagrama de interacciones mostrado en la figura 3.41 se puede notar que el cruce más fuerte se produce en la interacción de los factores régimen de giro y carga, corroborando lo señalado en el diagrama de Pareto. Otras interacciones que se producen aunque con menor influencia son las que se dan entre los factores lambda y carga a más de lambda y régimen de giro, es decir el factor lambda es el que más interacción entre factores promueve.



**Figura 3. 41 Diagrama de Interacciones para Tiempo de Inyección**

La ecuación que describe el comportamiento del tiempo de inyección se muestra en la ecuación 3.13.

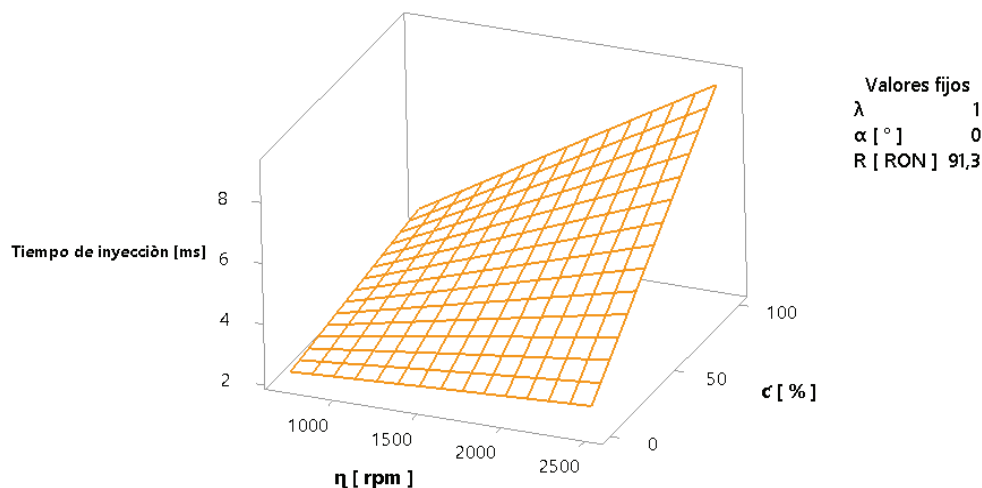
$$\begin{aligned}
 t_{iny}[ms] = & -17,3 + 25 \lambda + 0,084 \alpha - 0,00192 \eta - 0,22 R - 0,0254 c - 2,7 \lambda^2 \\
 & - 0,00027 \alpha^2 - 0,0000001 \eta^2 - 0,00031 R^2 - 0,000003 c^2 \\
 & + 0,039 \lambda \alpha - 0,000761 \lambda \eta - 0,222 \lambda R - 0,0403 \lambda c + 0,000020 \alpha \eta \\
 & - 0,00210 \alpha R + 0,000258 \alpha c + 0,000033 \eta R + 0,000029 \eta c \\
 & + 0,000611 R c
 \end{aligned} \tag{3.13}$$



El coeficiente de determinación es:

$$R_D^2 = 99.21\%$$

En la figura 3.42 se puede notar la dependencia del tiempo de inyección de los factores régimen de giro y carga. En valores de carga próximos al 0% el tiempo de inyección presenta un incremento a cualquier velocidad de giro del motor, producto de la interacción de estos dos factores. Al incrementarse la carga el tiempo de inyección aumenta acorde al régimen de giro generando el valor máximo a 2500 rpm y 100% de carga. Cabe destacar que la superficie representa el comportamiento del tiempo de inyección para las condiciones originales de operación utilizando gasolina súper.



**Figura 3. 42 Tiempo de Inyección en función de  $\eta$  y  $c$**

En la figura 3.43 se muestra el comportamiento del tiempo de inyección respecto del adelanto al encendido como del factor lambda, para las gasolina extra y súper. Para ambos combustibles se puede apreciar la disminución del tiempo de inyección según la mezcla se empobrece. Para el caso del adelanto al encendido usando gasolina súper el tiempo de inyección disminuye, caso contrario de lo que sucede utilizando gasolina extra, debido a la interacción de los factores.

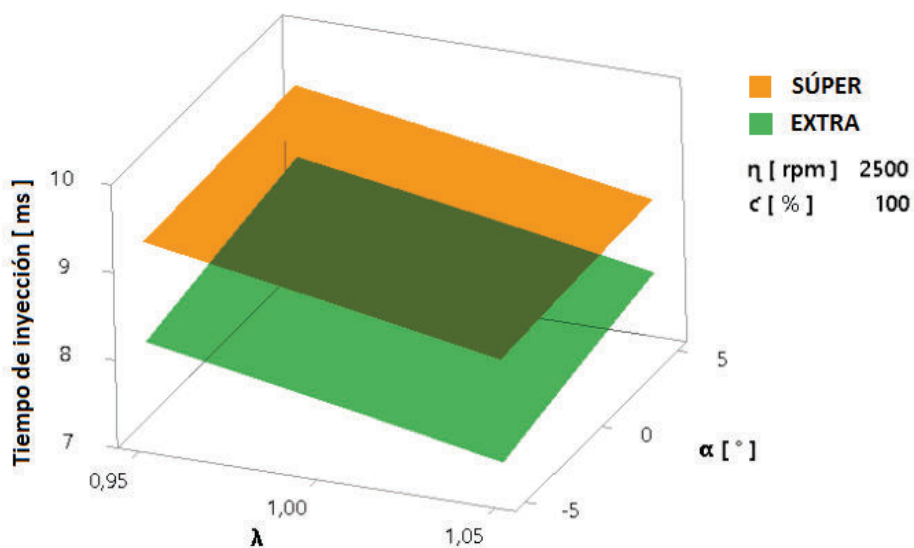


Figura 3. 43 Tiempo de Inyección en función de  $\lambda$  y  $\alpha$

### 3.4.7 CONSUMO

El principal factor que incide en el consumo de combustible es la carga seguido de la interacción de los factores carga y régimen de giro, la carga del motor y el factor lambda, según indica el diagrama de Pareto mostrado en la figura 3.44.

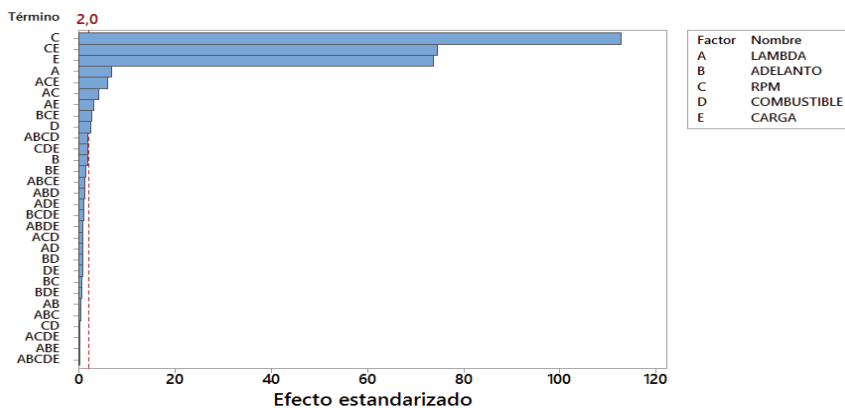
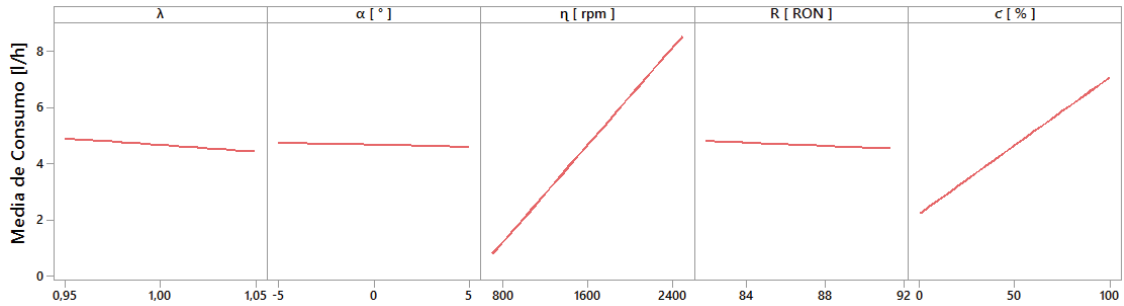


Figura 3. 44 Diagrama de Pareto para Consumo

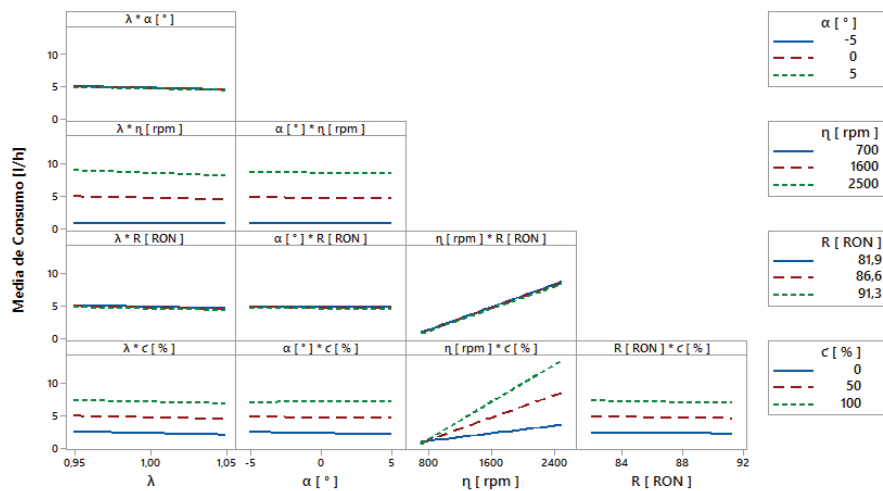
En el diagrama de efectos principales mostrado en la figura 3.45 se puede apreciar que el consumo de combustible se incrementa considerablemente al aumentar el

régimen de giro y la carga del motor. El consumo disminuye cuando se utilizan mezclas pobres a más de cuando se utilizan valores de adelanto al encendido por encima del punto original designado por el fabricante. En cuanto al a uso de combustibles el consumo disminuye al utilizar gasolina súper respecto de la gasolina extra.



**Figura 3. 45 Diagrama de Efectos Principales para Consumo**

Entre las interacciones generadas destaca la producida entre el régimen de giro y la carga, tal como se muestra en el diagrama de interacciones mostrado en la figura 3.46. Otra interacción importante que se produce es la que asocia a los factores lambda y régimen de giro, las demás interacciones presentan débil influencia en el consumo de combustible.



**Figura 3. 46 Diagrama de Interacciones para Consumo**

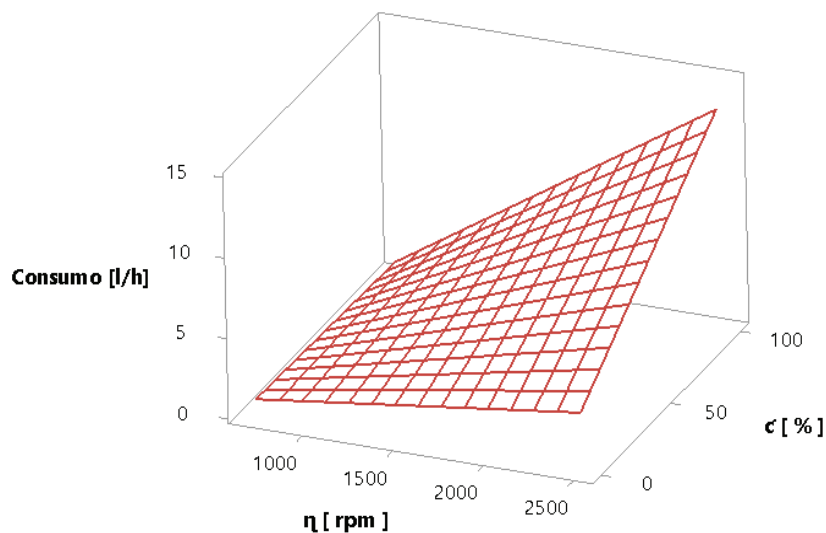
La ecuación que describe el comportamiento del consumo de combustible se muestra en la ecuación 3.13.

$$\begin{aligned}
 C \left[ \frac{l}{h} \right] = & -4 + 5 \lambda + 0,083 \alpha + 0,00673 \eta - 0,00 R - 0,0194 c - 2,7 \lambda^2 \\
 & - 0,00027 \alpha^2 - 0,000000 \eta^2 - 0,0001 R^2 - 0,000003 c^2 + 0,040 \lambda \alpha \\
 & - 0,00401 \lambda \eta + 0,021 \lambda R - 0,0022 \lambda c - 0,000004 \alpha \eta - 0,00178 \alpha R \\
 & + 0,000480 \alpha c - 0,000014 \eta R + 0,000057 \eta c - 0,000245 R c \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

El coeficiente de determinación es:

$$R_D^2 = 98.3\%$$

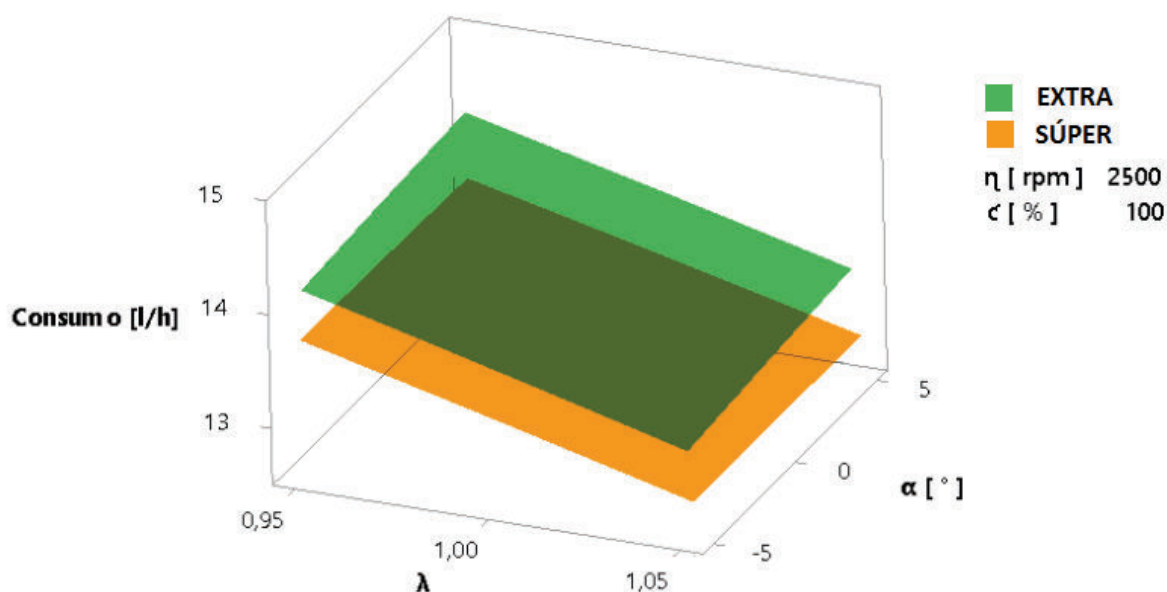
En la imagen mostrada en la figura 3.47 se puede apreciar la relación existente entre el consumo, el régimen de giro y la carga del motor, para las condiciones originales de funcionamiento del motor. Para bajos niveles de carga el incremento del régimen de giro ocasiona un leve incremento en el consumo, caso contrario de lo que ocurre en altos niveles de carga en donde el consumo es muy sensible al régimen de giro.



**Figura 3. 47 Consumo en función de  $\eta$  y  $c$**

En la figura 3.48 se puede notar la dependencia del consumo de combustible de los factores lambda, adelanto al encendido y del combustible utilizado.

En la condición de mayor consumo del motor se aprecia que el consumo disminuye cuando se utilizan mezclas pobres y puntos de encendido retrasados al original, acorde la mezcla se enriquece y punto e encendido se adelanta el consumo se incrementa, puede notarse también que el consumo ocasionado es menor utilizando gasolina súper que extra.



**Figura 3. 48 Consumo en función de  $\lambda$  y  $\alpha$**

El consumo del motor disminuye acorde se incrementa el octanaje del combustible, en la figura 3.49 se muestra la relación existente entre el factor lambda, el octanaje del combustible y el consumo en la condición de máxima carga a 2500 rpm y el punto de encendido original del motor. La combinación de factores que genera el menor consumo de combustible es utilizar gasolina súper aplicando mezclas pobres, contrario de lo que sucede utilizando gasolina extra y mezclas pobres.

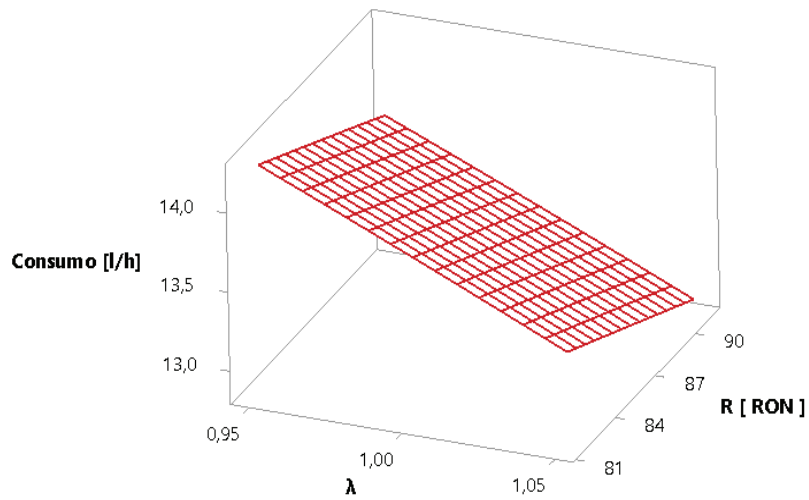


Figura 3. 49 Consumo en función de  $\lambda$  y R

### 3.4.8 FUERZA TRACTORA

La fuerza tractora depende principalmente de la carga externa del motor, el régimen de giro y de la interacción de estos dos factores tal como se muestra en el diagrama de Pareto de la figura 3.50. Luego se encuentran con menor significancia los factores lambda y adelanto al encendido junto a interacciones con otros factores, como el combustible.

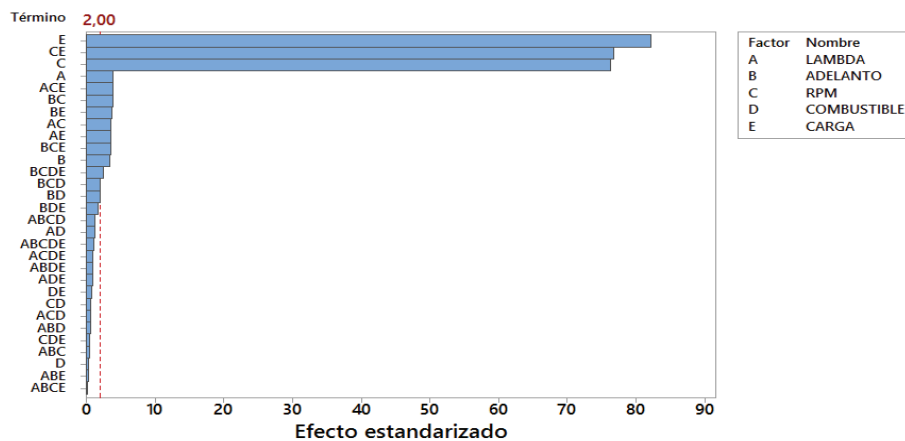
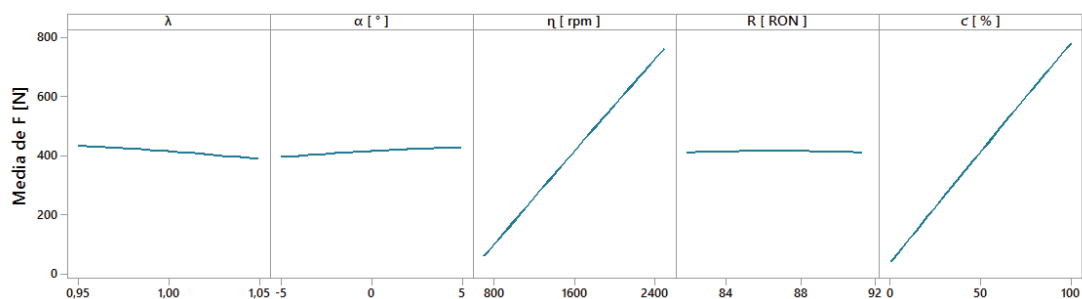


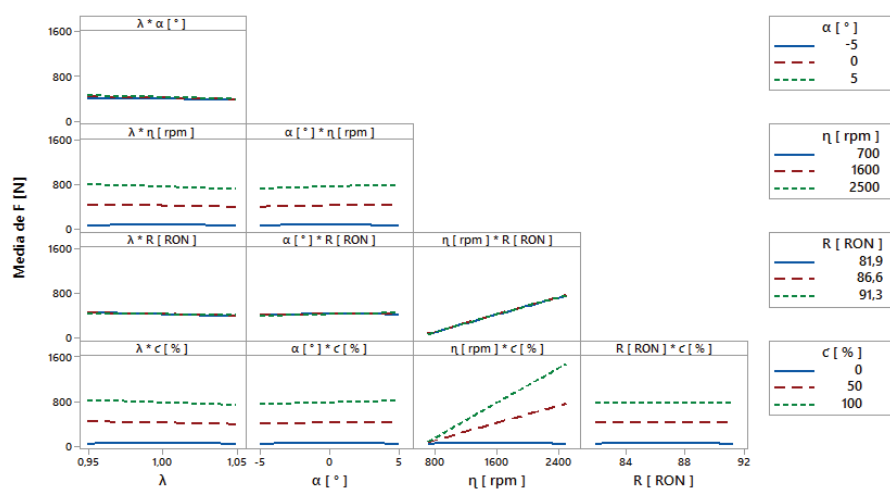
Figura 3. 50 Diagrama de Pareto para Fuerza Tractora

En el diagrama de efectos principales mostrado en la figura 3.51 se puede corroborar que las máximas influencias que tiene la fuerza tractora son la carga y el régimen de giro del motor. La fuerza tractora se incrementa cuando se utilizan mezclas ricas y adelantos al encendido por encima del punto original. Respecto del combustible utilizado no se puede apreciar cambios grandes en la salida respecto del octanaje.



**Figura 3. 51 Diagrama de Efectos Principales para Fuerza Tractora**

En el diagrama de interacciones indicado en la figura 3.52 se muestra que la interacción más fuerte es la producida por los factores de la carga y régimen de giro. Puede verse que el factor combustible produce cruces con los factores lambda, adelanto al encendido y régimen de giro, es decir que si bien el octanaje no posee un efecto principal fuerte interactúa con otros factores generando cambios en la fuerza tractora.



**Figura 3. 52 Diagrama de Interacciones para Fuerza Tractora**

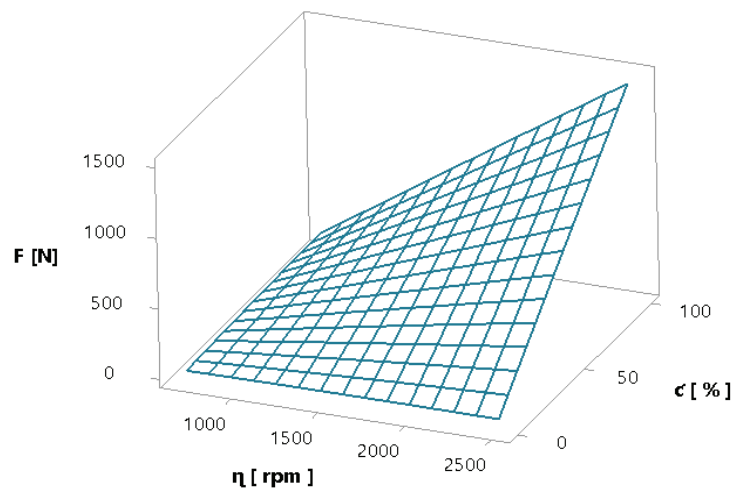
La ecuación que describe el comportamiento de la fuerza tractora se muestra en (3.14).

$$\begin{aligned}
 F [N] = & -268 + 668 \lambda - 11,7 \alpha + 0,458 \eta - 9 R + 3,83 c - 1927 \lambda^2 - 0,19 \alpha^2 \\
 & - 0,000005 \eta^2 - 0,22 R^2 - 0,0019 c^2 - 45,3 \lambda \alpha - 0,489 \lambda \eta \\
 & + 45,7 \lambda R - 8,80 \lambda c + 0,00369 \alpha \eta + 0,590 \alpha R + 0,0635 \alpha c \\
 & + 0,00055 \eta R + 0,007815 \eta c + 0,0008 R c
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

El coeficiente de determinación es:

$$R_D^2 = 99.39\%$$

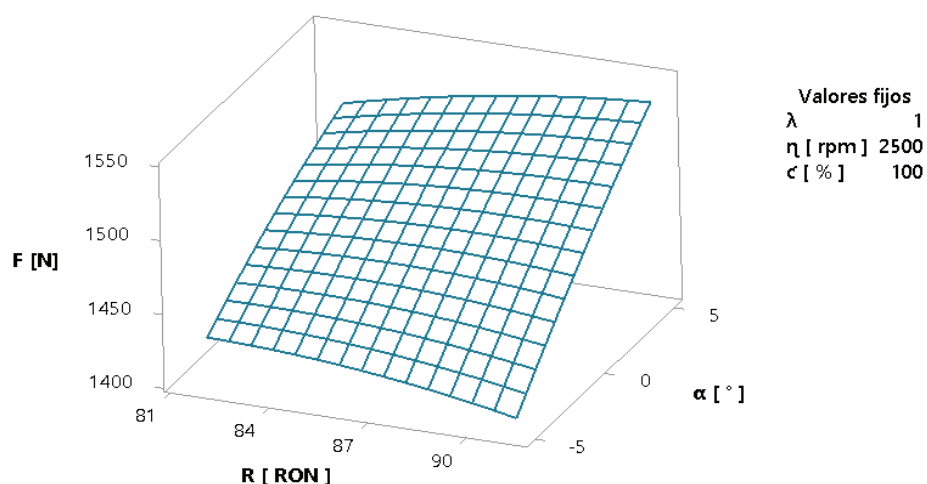
En la imagen mostrada en la figura 3.53 se puede apreciar la relación existente entre la fuerza tractora, el régimen de giro y la carga del motor, para las condiciones originales de funcionamiento del motor. Cuando la carga se mantiene en valores próximos a cero el incremento del régimen de giro no ocasiona cambios en la fuerza producida por el motor, lo que no ocurre en altos niveles de carga en donde la fuerza tractora es muy sensible al régimen de giro.



**Figura 3. 53 Fuerza Tractora en función de  $\eta$  y  $c$**

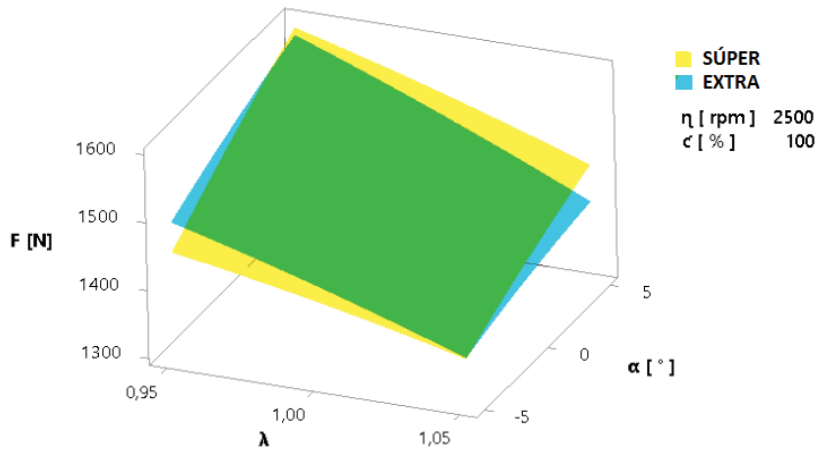


El uso de gasolina súper incrementa la fuerza tractora generada por el motor, no sólo en el punto de funcionamiento original sino también para valores de adelanto al encendido, superiores al establecido por el fabricante. En la figura 3.54 puede apreciarse la dependencia que la fuerza tractora mantiene con el octanaje del combustible, en donde a mayor octanaje mayor es la fuerza producida para valores del punto de encendido mayores o igual a impuesto por el fabricante; para valores de relativo retraso al punto de encendido la fuerza tractora disminuye al utilizar combustible de alto octanaje, en cuyo caso se consigue una leve mejora utilizando gasolina extra.



**Figura 3. 54 Fuerza Tractora en función de  $\alpha$  y R**

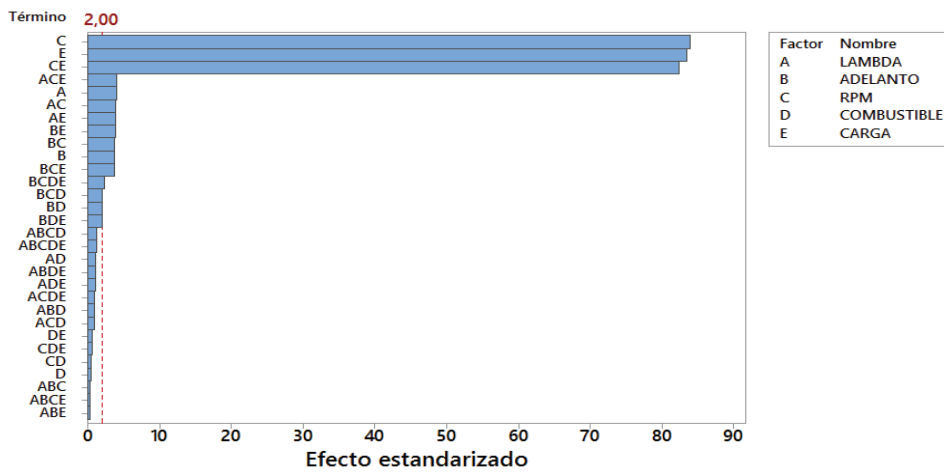
En la imagen mostrada en la figura 3.55 se puede apreciar la diferencia entre la fuerza tractora producida al utilizar gasolina súper y extra a 2500 rpm y 100% de carga. Puede apreciarse que la diferencia más grande se da cuando más pronunciado es el adelanto al encendido, para valores de adelanto por debajo del punto original de funcionamiento la fuerza tractora producida es la misma para los dos tipos de combustible. De igual forma se analiza lo que ocurre respecto del factor lambda, puede notarse que la mayor diferencia de la fuerza tractora generada se da al aplicar mezclas ricas en donde el uso de gasolina extra genera mayor fuerza tractora que la súper siempre y cuando los valores de adelanto al encendido sean inferiores al original del motor.



**Figura 3. 55 Fuerza Tractora en función de  $\lambda$  y  $\alpha$**

### 3.4.9 POTENCIA

La Potencia depende principalmente de la carga externa del motor, el régimen de giro y de la interacción de estos dos factores tal como se muestra en el diagrama de Pareto de la figura 3.56. Luego se encuentran con menor significancia los factores lambda y adelanto al encendido junto a interacciones con otros factores, como el combustible. Puede apreciarse que el orden del nivel de significancia de los factores es el mismo que muestra el análisis de Pareto para la fuerza tractora.

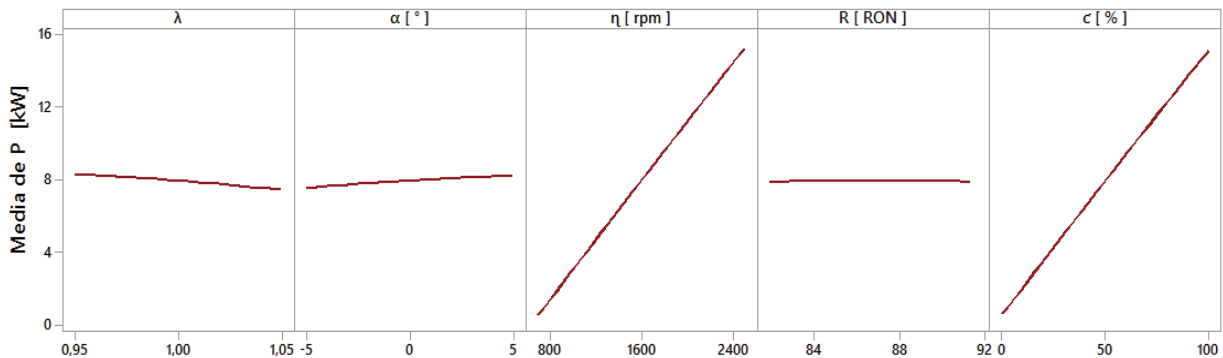


**Figura 3. 56 Diagrama de Pareto para Potencia**

En el diagrama de efectos principales mostrado en la figura 3.57 se puede corroborar que las máximas influencias que tiene la potencia son la carga y el régimen de giro del motor.

Además se puede notar que el comportamiento de la potencia es creciente bajo ciertas condiciones, es decir que la potencia se incrementa paulatinamente cuando se utilizan mezclas ricas y de igual manera cuando existen adelantos al encendido por superiores del punto original.

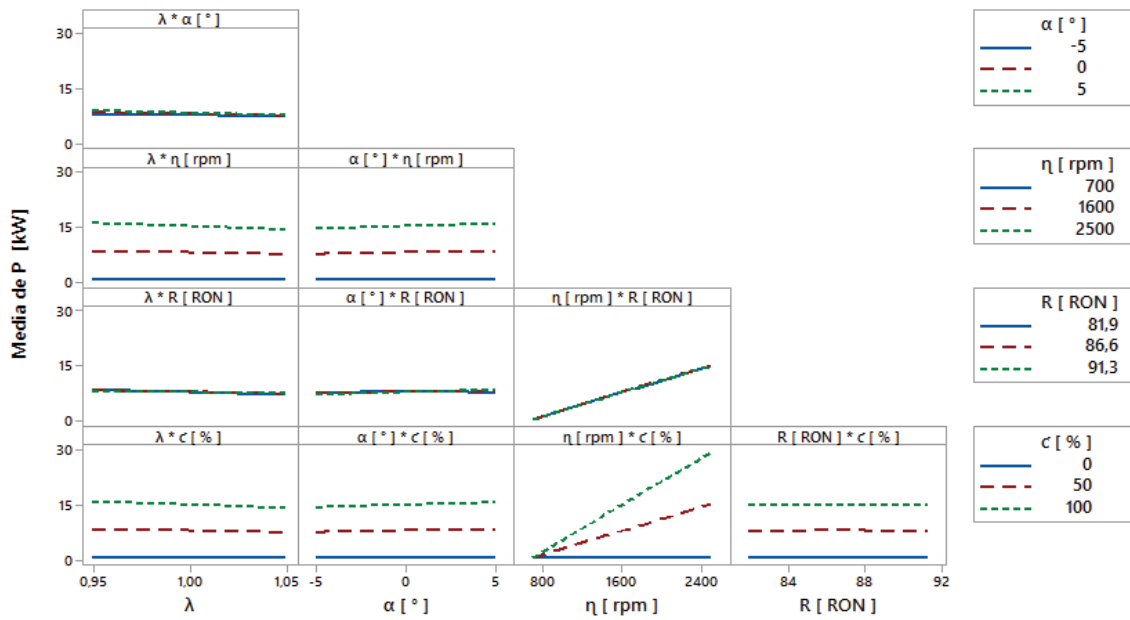
En referencia al combustible utilizado, no se puede apreciar mayores cambios en la salida respecto del octanaje.



**Figura 3. 57 Diagrama de Efectos Principales para Potencia**

En el diagrama de interacciones indicado en la figura 3.58 se muestra que la interacción más fuerte es la producida por los factores carga y régimen de giro.

Puede verse que el factor combustible produce cruces con los factores lambda, adelanto el punto de encendido y régimen de giro, esto significa que si por un lado el octanaje no posee un efecto principal fuerte, en cambio interactúa con otros factores generando cambios en la potencia del motor.



**Figura 3. 58 Diagrama de Interacciones para Potencia**

La ecuación que describe el comportamiento de la Potencia se muestra en la ecuación 3.15.

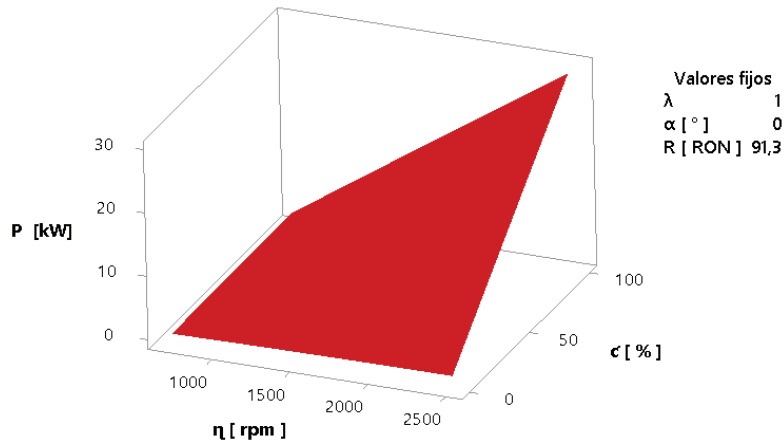
$$\begin{aligned}
 P \text{ [kW]} = & 2 + 4 \lambda - 0,344 \alpha + 0,01013 \eta - 0,26 R + 0,0614 c - 32 \lambda^2 \\
 & - 0,0032 \alpha^2 - 0,0000001 \eta^2 - 0,0036 R^2 - 0,000038 c^2 - 0,924 \lambda \alpha \\
 & - 0,01007 \lambda \eta + 0,870 \lambda R - 0,1726 \lambda c + 0,000071 \alpha \eta + 0,01333 \alpha R \\
 & + 0,001307 \alpha c + 0,000005 \eta R + 0,000160 \eta c + 0,000058 R c \quad (3.15)
 \end{aligned}$$

El coeficiente de determinación es:

$$R_D^2 = 99.42\%$$

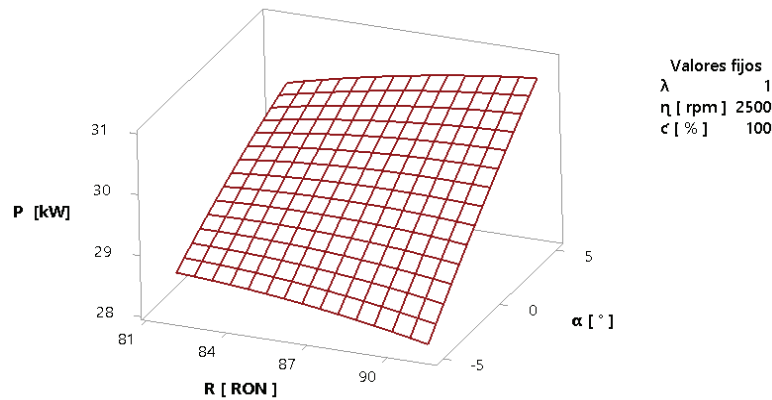
En la imagen mostrada en la figura 3.59 se puede apreciar la relación existente entre la potencia, el régimen de giro y la carga del motor, para las condiciones originales de funcionamiento del motor. Cuando la carga se mantiene en valores próximos a cero el incremento del régimen de giro no ocasiona cambios en la potencia producida por

el motor, lo que no ocurre en altos niveles de carga en donde la potencia se incrementa a la par con el régimen de giro.



**Figura 3. 59 Potencia en función de  $\eta$  y  $c$**

El uso de gasolina súper incrementa la potencia del motor, no sólo en el punto de funcionamiento original sino también para valores de adelanto al encendido, superiores al establecido por el fabricante. En la figura 3.60 puede apreciarse la dependencia que la potencia mantiene con el octanaje del combustible, en donde a mayor octanaje mayor es la potencia generada, para valores de punto de encendido mayores o igual al impuesto por el fabricante; para valores de relativo retraso al punto de encendido la potencia disminuye al utilizar combustible de alto octanaje, en cuyo caso se consigue una leve mejora utilizando gasolina extra.

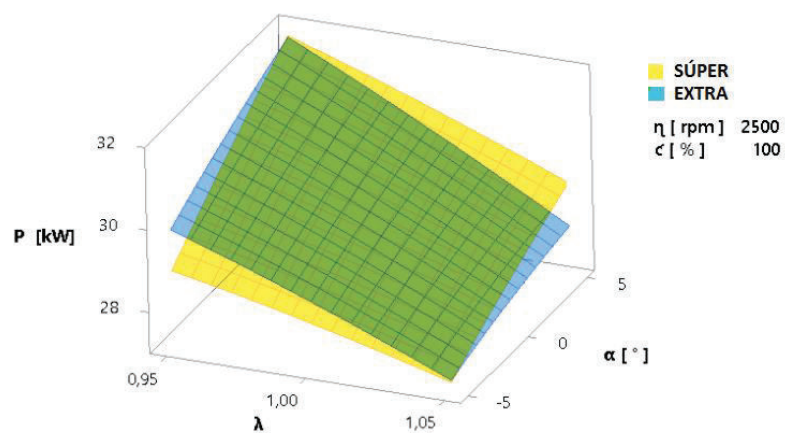


**Figura 3. 60 Potencia en función de R y  $\alpha$**

En la imagen mostrada en la figura 3.61 se puede apreciar la diferencia entre la potencia producida al utilizar gasolina súper y extra a 2500 rpm y 100% de carga.

Puede apreciarse que la diferencia más grande se da cuando más pronunciado es el adelanto al encendido, para valores de adelanto por debajo del punto original de funcionamiento la potencia producida es la misma para los dos tipos de combustible.

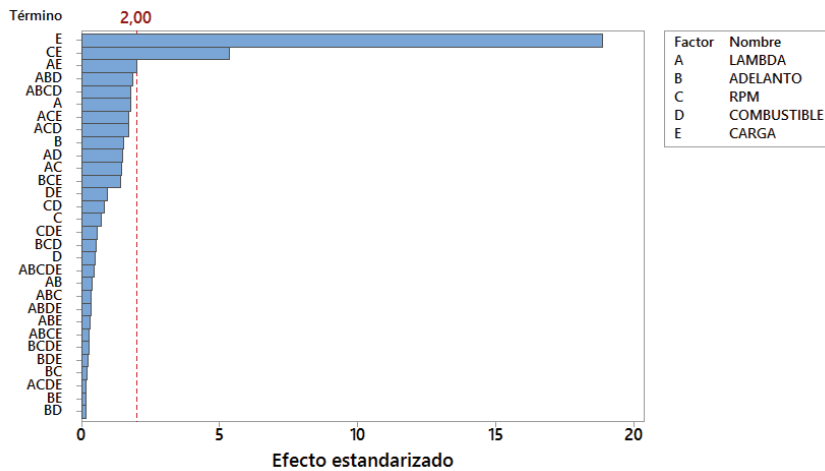
De igual forma se analiza lo que ocurre respecto del factor lambda, puede notarse que la mayor diferencia de potencia se da al aplicar mezclas ricas en donde el uso de gasolina extra genera mayor potencia que la súper siempre y cuando los valores de adelanto al encendido sean inferiores al original del motor.



**Figura 3. 61 Potencia en función de  $\lambda$  y  $\alpha$**

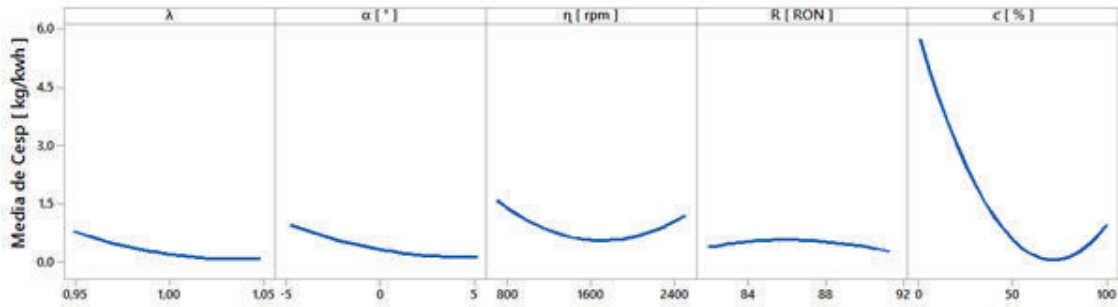
### 3.4.10 CONSUMO ESPECÍFICO

En el diagrama de Pareto mostrado en la figura 3.62 se puede apreciar que los factores que más inciden en el consumo específico del motor son la carga y la interacción de la carga con el régimen de giro. Apenas por debajo del límite de significancia se encuentra la interacción entre el factor lambda y la carga del motor.



**Figura 3. 62 Diagrama de Pareto para Consumo Específico**

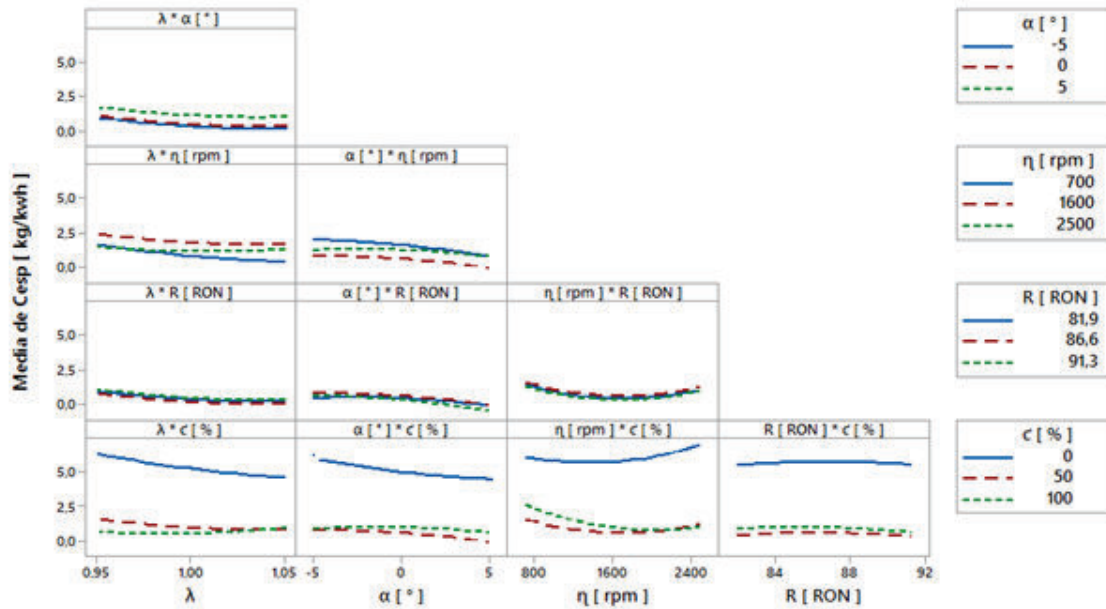
En el diagrama de efectos principales mostrado en la figura 3.63 se puede corroborar que los principales factores de los cuales depende el consumo específico son la carga y el régimen de giro. Luego de ello puede notarse que el consumo específico disminuye ligeramente para condiciones de uso de mezcla pobre y adelanto al encendido por encima del punto original. También se nota disminución al utilizar gasolina súper.



**Figura 3. 63 Diagrama de Efectos Principales para Consumo Específico**

En el diagrama de interacciones mostrado en la figura 3.64 se muestra que la interacción más fuerte es la producida entre el régimen de giro y la carga, luego de ello

están otras interacciones con menor significancia, pero que a la larga generan algún efecto en la salida.



**Figura 3. 64 Diagrama de Interacciones para Consumo Específico**

La ecuación que describe el comportamiento de la Potencia se muestra en la ecuación 3.16.

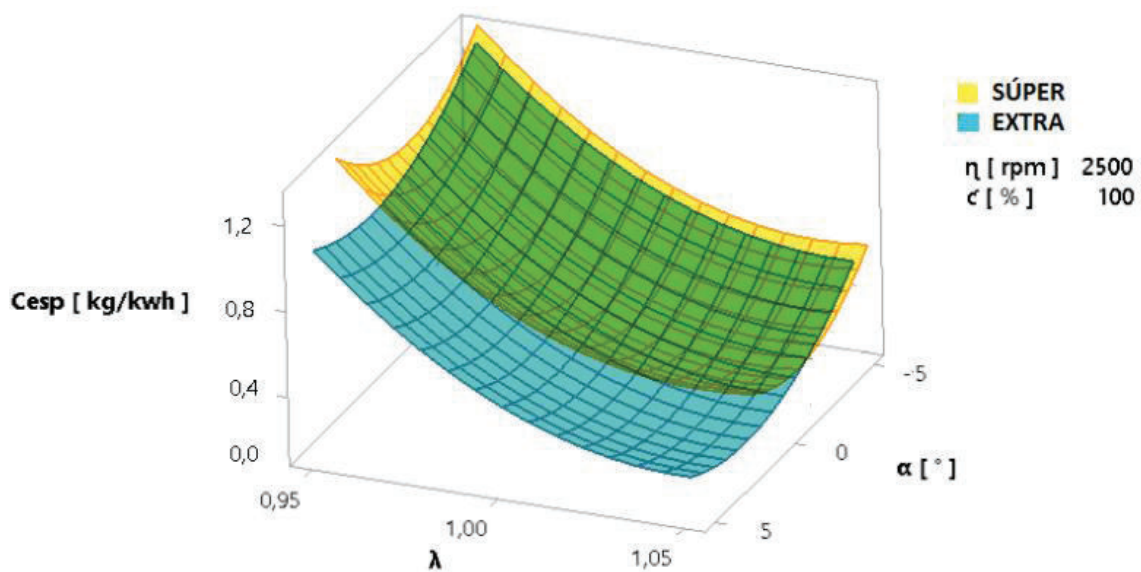
$$\begin{aligned}
 C_{esp} \left[ \frac{g}{kwh} \right] = & -156062 + 178768 \lambda + 302 \alpha - 9,21 \eta + 2020 R - 304 c - 95786 \lambda^2 \\
 & - 9,5 \alpha^2 + 0,001028 \eta^2 - 10,8 R^2 + 1,117 c^2 + 46 \lambda \alpha + 5,78 \lambda \eta \\
 & - 152 \lambda R + 198,1 \lambda c + 0,0422 \alpha \eta - 6,39 \alpha R + 1,133 \alpha c \\
 & + 0,0071 \eta R - 0,01378 \eta c - 0,365 R c
 \end{aligned} \quad (3.16)$$

El coeficiente de determinación es:

$$R_D^2 = 92.96\%$$



El consumo específico depende de dos variables de salida como son el consumo y la potencia generada por el motor. En la imagen mostrada en la figura 3.65 se puede observar como el consumo específico del motor disminuye utilizando gasolina súper en cualquier circunstancia de funcionamiento. Ambos combustible presentan similares comportamientos pero es en condiciones de elevado adelanto al encendido que la diferencia del consumo específico es mayor. El motor tiene mayor consumo específico utilizando gasolina extra debido a que consume más combustible y genera menor potencia.



**Figura 3. 65 Consumo Específico en función de  $\lambda$  y  $\alpha$**

### 3.4.11 OPTIMIZACIÓN

Dentro del funcionamiento del motor de combustión interna ciclo Otto, cada una de las variables de respuesta tiene su propia meta, cuyo objetivo es aumentar las prestaciones del motor y disminuir la concentración de contaminantes en los gases de escape. Para cada etapa de funcionamiento las metas de la optimización son diferentes, en la figura 3.66 se puede apreciar el diagrama de cubos en donde se distinguen los puntos de funcionamiento en los cuales es necesario maximizar las prestaciones del motor como la Potencia y la Fuerza Tractora para cada uno de los combustibles utilizados. En

condiciones de funcionamiento sin carga no es necesario maximizar las prestaciones del motor, puesto que en dichas circunstancias el trabajo generado no es aprovechado para la propulsión del vehículo, si no únicamente para el accionamiento de accesorios propios del motor.

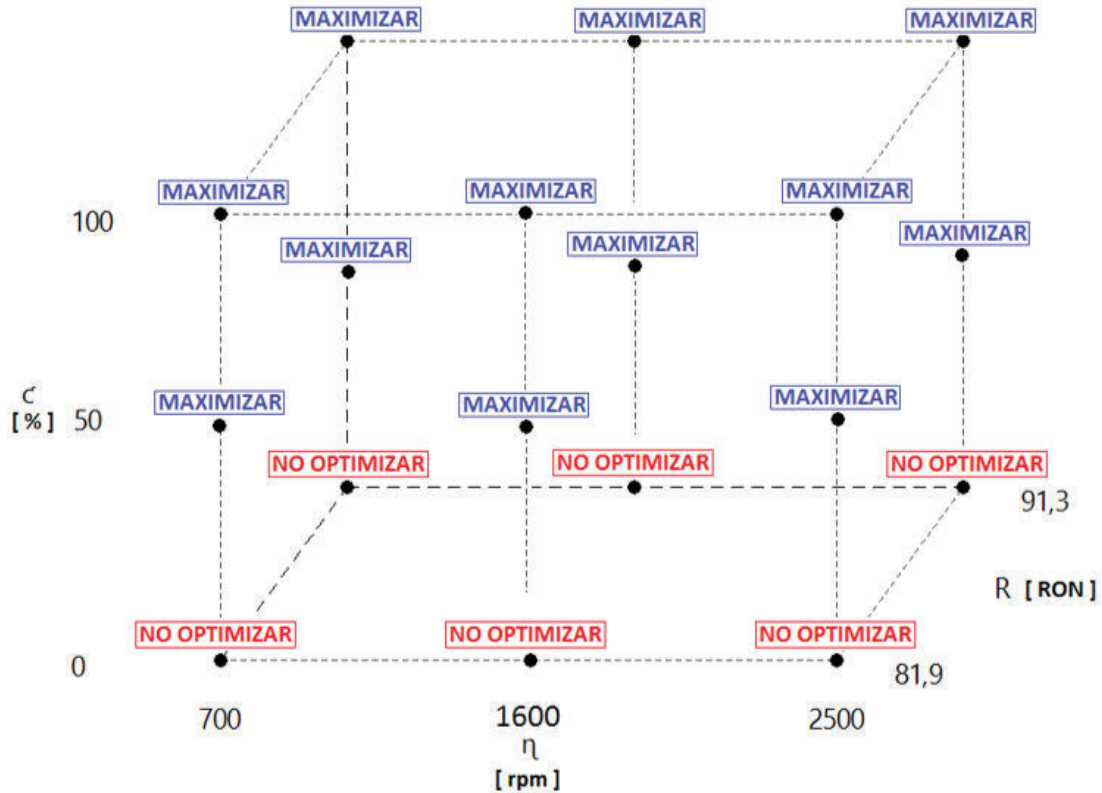
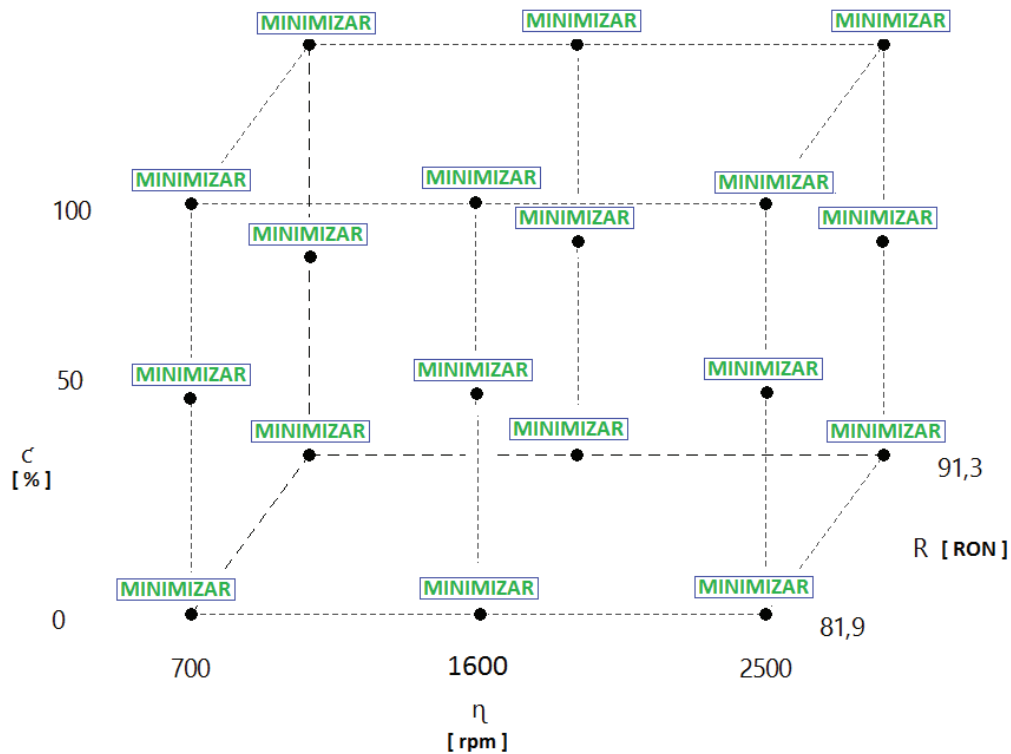


Figura 3. 66 Metas de Optimización para F y P

Las emisiones contaminantes en los gases de escape se producen siempre que exista combustión, por lo que a diferencia de las prestaciones del motor el objetivo de la optimización es siempre minimizar la emisión de Monóxido de Carbono, Hidrocarburos no combustionados y Óxidos Nitrosos en cualquier condición de funcionamiento. El consumo específico del motor tiene las mismas metas de las emisiones contaminantes, tal como se muestra en la figura 3.67.

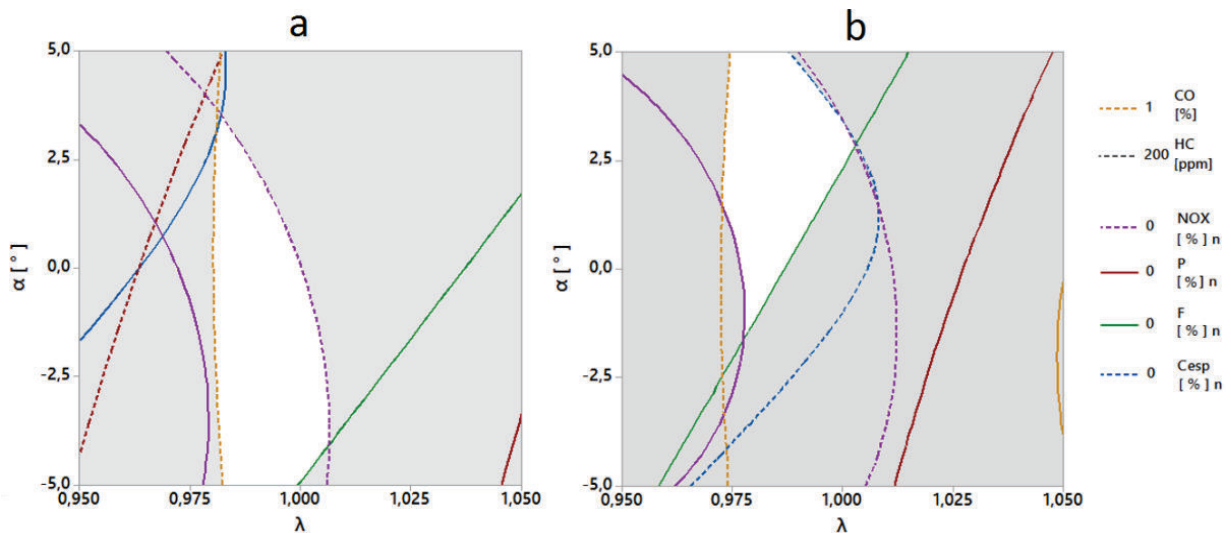


**Figura 3. 67 Metas de Optimización para las Emisiones Contaminantes**

Aplicando contornos de las superficies de respuesta de cada una de las variables de salida para los 18 puntos mostrados en los diagramas de cubos se establece una zona de trabajo en la que las prestaciones del motor aumentan y las emisiones contaminantes disminuyen. Como se ha dicho anteriormente las emisiones de CO y HC están restringidas por la normativa local, pero el resto de prestaciones no tienen punto de referencia, es 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 3.68 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, 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 3. 68 Zona de optimización para combustibles a) Súper b) Extra**

El objetivo principal de la optimización es encontrar un punto de funcionamiento diferente al actual en donde los valores de las variables de salida alcancen un punto de mayor deseabilidad, para este caso es aumentar las prestaciones y disminuir emisiones los contaminantes.

Como dentro del funcionamiento del motor no se pueden establecer como constantes el régimen de giro y la carga externa tendremos como resultado un grupo de combinaciones de los factores lambda y adelanto al encendido para cada tipo de combustible utilizado en las diferentes condiciones de funcionamiento.

Para cada uno de los puntos de funcionamiento mostrados en las figura 3.66 y 3.67 se calculan los factores lambda y adelanto al encendido según la ecuación de cada

variable de respuesta, con el objeto de encontrar el valor máximo o mínimo según sea el caso, como es muy difícil que todas las variables de respuesta generen los mismos valores de los factores antes mencionados, para cada uno de los combustibles utilizados se busca la zona donde se da la máxima pendiente de ascenso o descenso al punto en cuestión. Este método es conocido como la máxima pendiente y genera puntos de funcionamiento del proceso que si bien no están en su valor óptimo están muy cerca del mismo.

### 3.4.11.1 Optimización del Factor Lambda para Gasolina Súper

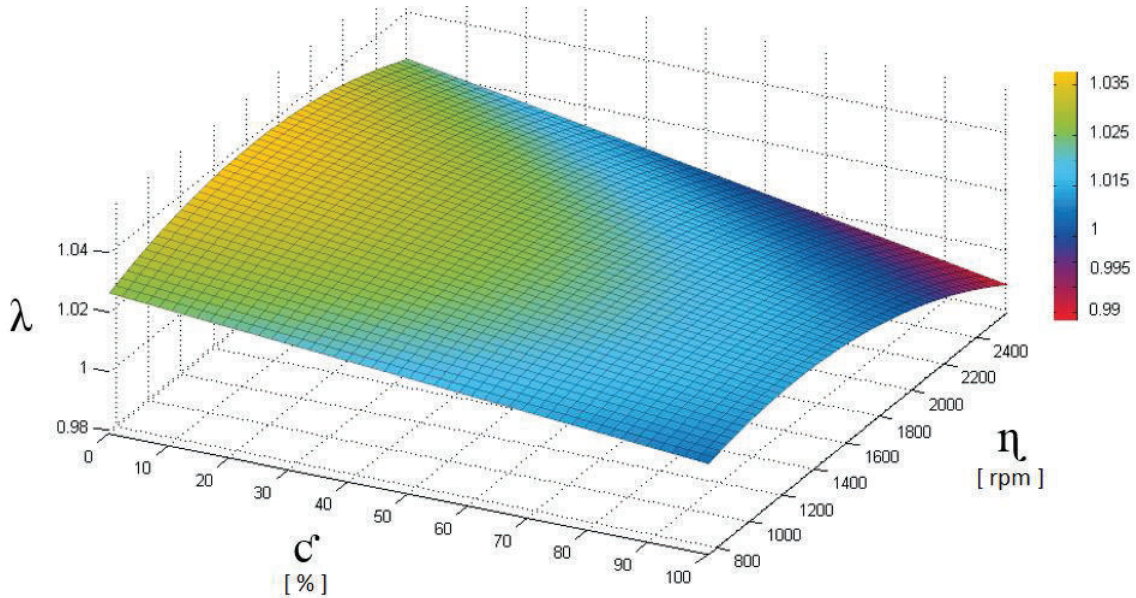
Para las diferentes condiciones de funcionamiento se han determinado los diferentes valores del factor lambda que generan mayores prestaciones y menores emisiones contaminantes en conjunto. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 3.5.

**Tabla 3. 9 Resultados de la Optimización del factor  $\lambda$  para gasolina súper**

$\eta$ [ rpm ]	$c$ [ % ]	$\lambda$
700	0	1,025
1600	0	1,038
2500	0	1,026
700	50	1,017
1600	50	1,025
2500	50	1,009
700	100	1,009
1600	100	1,012
2500	100	0,992

Los valores de lambda obtenidos dependen de la carga del motor y del régimen de giro. En la figura 3.69 se definen tres zonas de funcionamiento, a bajas velocidades de giro y poca carga externa del motor es conveniente utilizar mezcla ligeramente pobre, mostrada de color amarillo; acorde se incrementa el régimen de giro y la carga se

trabaja con mezcla próxima a la ideal representada de color azul, para finalmente utilizar mezcla ligeramente rica mostrada de color rojo en zonas de elevadas prestaciones.



**Figura 3. 69 Optimización del factor  $\lambda$  en función  $\phi$  y  $\omega$**

A diferencia de la configuración de funcionamiento original del motor en el cual el factor lambda se establece en un valor constante de 1, la optimización determina que el factor lambda sea variable y no permanezca fijo en cualquier estado de funcionamiento estacionario del proceso.

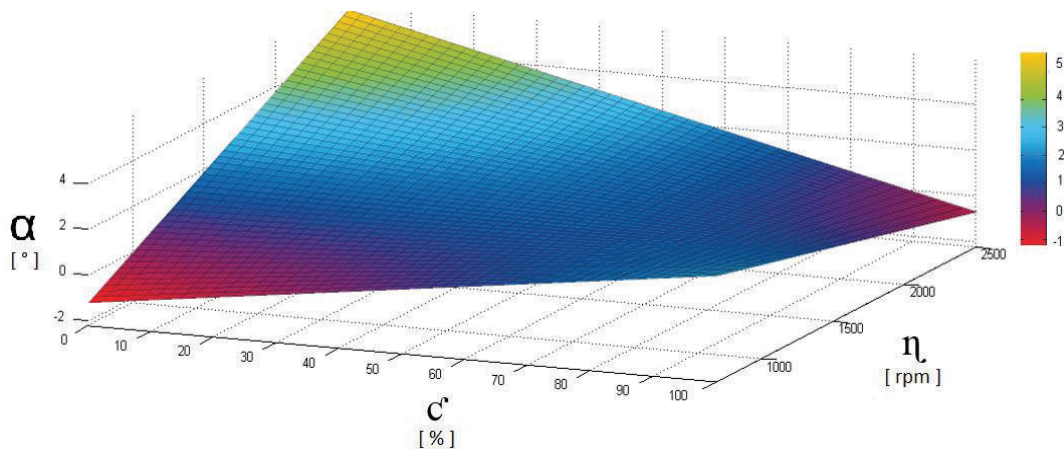
### 3.4.11.2 Optimización del Adelanto al Encendido para Gasolina Súper

Los resultados de la optimización del adelanto al encendido para el uso de gasolina súper se muestran en la tabla 3.6.

**Tabla 3. 10 Resultados de la Optimización del factor  $\alpha$  para gasolina súper**

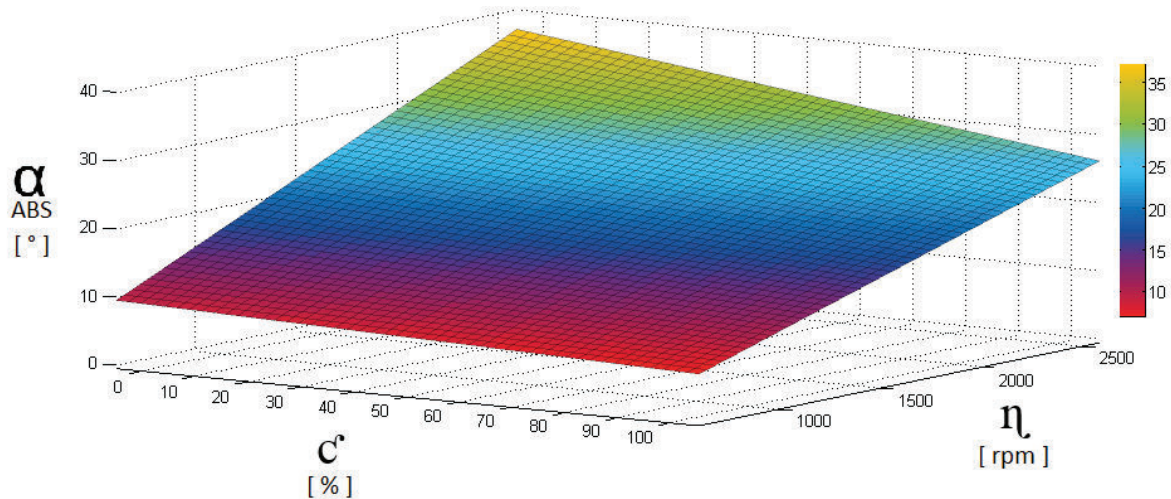
$\eta$ [ rpm ]	$\zeta$ [ % ]	$\alpha$ [ ° ]
700	0	-0,75
1600	0	1,65
2500	0	2,55
700	50	0,055
1600	50	0,955
2500	50	1,855
700	100	-0,64
1600	100	0,26
2500	100	1,16

De igual forma la variación al adelanto al encendido no se establece en un valor constante. En la figura 3.70 se puede apreciar que en las zonas de color rojo el adelanto al encendido se establece en valores negativos lo que conlleva a retrasar el punto de encendido original del motor, esto sucede en ralentí y a elevadas velocidades de giro con alta carga externa al motor. A más de ello se establece una zona de color violeta en la que se mantiene el adelanto al encendido optimizado es igual al punto determinado por el fabricante. Las zonas mostradas de azul claro y de amarillo denotan adelantos positivos al encendido.



**Figura 3. 70 Optimización del factor  $\alpha$  en función  $\zeta$  y  $\eta$**

En la figura 3.71 se muestra el resultado de la modificación del mapa original de encendido considerando la optimización propuesta para el uso de gasolina súper.



**Figura 3. 71** Respuesta absoluta del factor  $\alpha$  en función  $\phi$  y  $\eta$

### 3.4.11.3 Optimización del Factor Lambda para Gasolina Extra

Para las diferentes condiciones de funcionamiento se han determinado los diferentes valores del factor lambda que generan mayores prestaciones y menores emisiones contaminantes en conjunto. Los valores obtenidos utilizando gasolina Extra se muestran en la tabla 3.7.

**Tabla 3. 11** Resultados de la Optimización del factor  $\lambda$  para gasolina extra

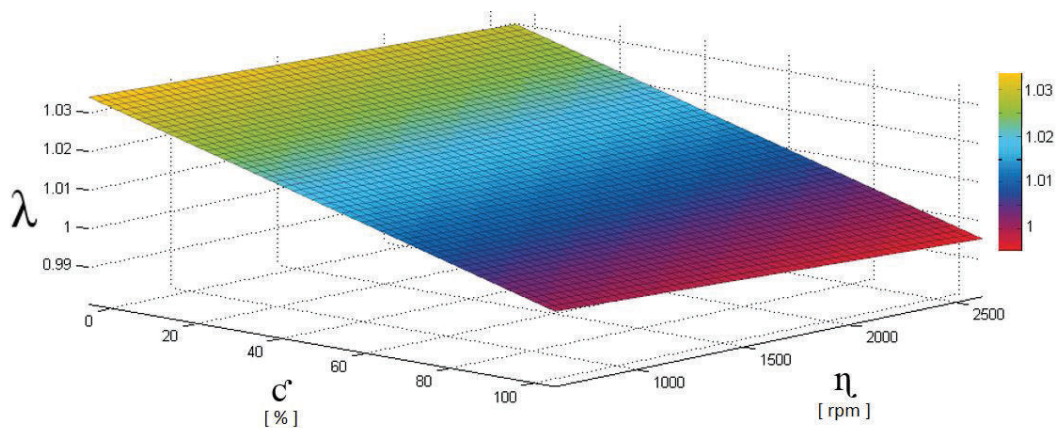
$\eta$ [ rpm ]	$\phi$ [ % ]	$\lambda$
700	0	1,035
1600	0	1,033
2500	0	1,03
700	50	1,028
1600	50	1,025
2500	50	1



**Tabla 3. 12 (Continuación) Resultados de la Optimización del factor  $\lambda$  para gasolina extra**

$\eta$ [ rpm ]	$c$ [ % ]	$\lambda$
700	50	1,028
1600	50	1,025
2500	50	1
700	100	1,02
1600	100	1
2500	100	0,997

Los valores de lambda obtenidos dependen de la carga del motor y del régimen de giro. En la figura 3.72 se definen tres zonas de funcionamiento, a bajas velocidades de giro y poca carga externa del motor es conveniente utilizar mezcla ligeramente pobre mostrada de color amarillo; acorde se incrementa el régimen de giro y la carga se trabaja con mezcla próxima a la ideal representada de color azul, para finalmente utilizar mezcla ligeramente rica mostrada de color rojo en zonas de elevadas prestaciones.



**Figura 3. 72 Optimización del factor  $\lambda$  en función  $c$  y  $\eta$  para gasolina extra**

A diferencia de la configuración de funcionamiento original del motor en el cual el factor lambda se establece en un valor constante de 1, la optimización determina que el factor lambda sea variable y no permanezca fijo en cualquier estado de funcionamiento estacionario del proceso.

#### 3.4.11.4 Optimización del Adelanto al Encendido para Gasolina Extra

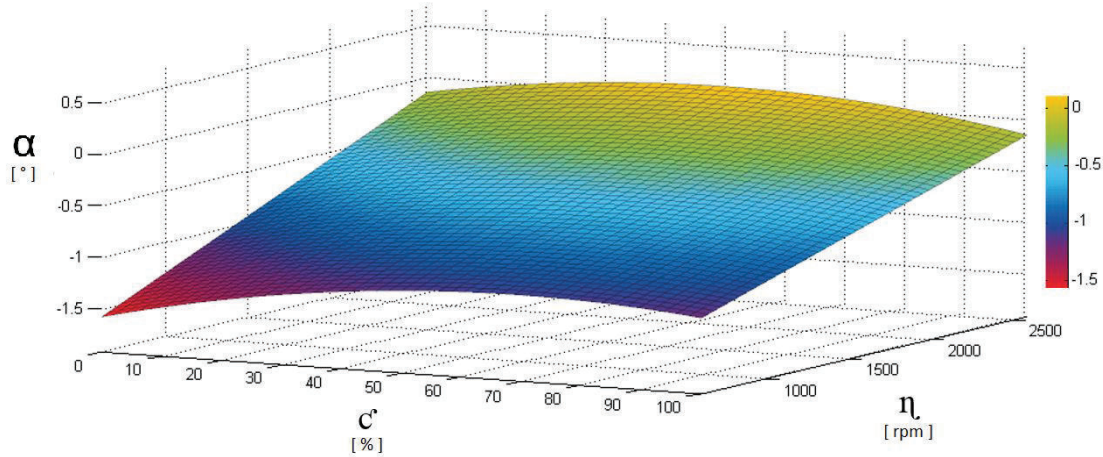
Los resultados de la optimización del adelanto al encendido para el uso de gasolina súper se muestran en la tabla 3.8.

**Tabla 3. 13 Resultados de la Optimización del factor  $\alpha$  para gasolina extra**

$\eta$ [ rpm ]	$c$ [ % ]	$\alpha$
700	0	-1,38
1600	0	-0,98
2500	0	0,605
700	50	-1,2231
1600	50	-0,8953
2500	50	0,1725
700	100	-1,0662
1600	100	-0,8106
2500	100	-0,26

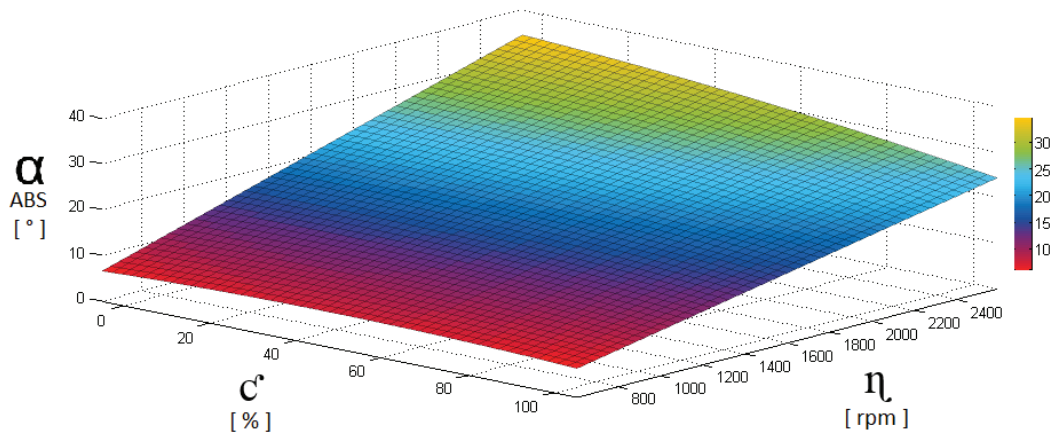
De igual forma la variación al adelanto al encendido no se establece en un valor constante. En la figura 3.73 se puede apreciar que en las zonas de color rojo el adelanto al encendido se establece en valores negativos lo que conlleva a retrasar el punto de encendido original del motor, esto sucede en ralentí y a elevadas velocidades de giro con alta carga externa al motor. A más de ello se establece una zona de color violeta en la que se mantiene el adelanto al encendido optimizado que es igual al punto

determinado por el fabricante. Las zonas mostradas de amarillo denotan adelantos positivos al encendido.



**Figura 3. 73 Optimización del factor  $\alpha$  en función  $c$  y  $\eta$  para gasolina extra**

En la figura 3.74 se muestra el resultado de la modificación del mapa original de encendido considerando la optimización propuesta para el uso de gasolina extra.



**Figura 3. 74 Respuesta absoluta del factor  $\alpha$  en función  $c$  y  $\eta$  para gasolina extra**

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 preestablecido 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.

### 3.5 RESULTADOS DE OPTIMIZACIÓN PARA GASOLINA SÚPER Y EXTRA

Las configuraciones obtenidas tras el proceso de optimización fueron implementadas en el motor y probadas en tres repeticiones, para valores de carga del 0, 50 y 100% combinados con valores de régimen de giro de 700, 1600 y 2500 rpm.

#### 3.5.1 POTENCIA RELATIVA

La Potencia relativa hace referencia a la relación entre la potencia del motor utilizando la configuración obtenida en el proceso de optimización y la potencia del motor en las condiciones originales impuestas por el fabricante. En la tabla 3.9 se muestra los resultados de las mediciones de Potencia y los resultados del cálculo utilizando el modelo obtenido y el error generado.

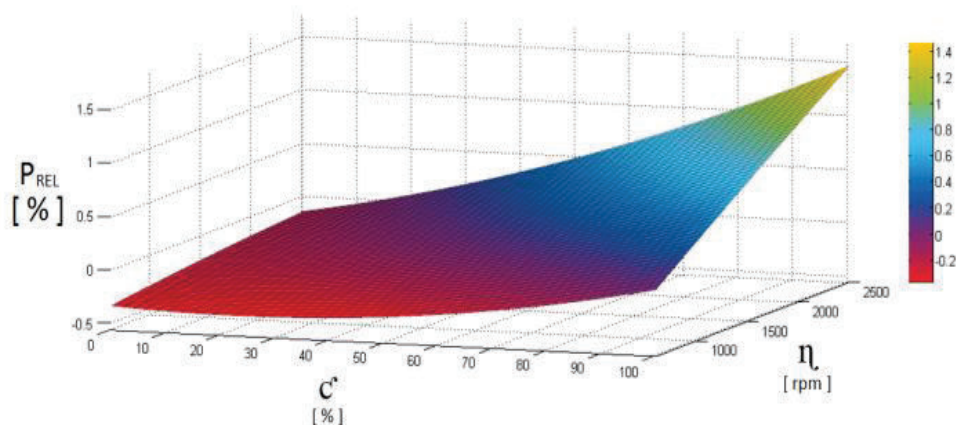
**Tabla 3. 14 Potencia Relativa**

$\lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\epsilon$	Pmed	Pcal	Error (%)
1,025	0,750	700	91,3	0	0,219	0,2208	0,84
1,038	1,650	1600	91,3	0	0,49	0,4872	-0,58
1,026	2,550	2500	91,3	0	0,59	0,5881	-0,32
1,017	0,055	700	91,3	50	0,41	0,4192	2,24
1,025	0,955	1600	91,3	50	7,93	7,9487	0,24
1,009	1,855	2500	91,3	50	15,18	15,557	2,49
1,009	-0,640	700	91,3	100	0,42	0,4416	5,15

**Tabla 3. 15 (Continuación) Potencia Relativa**

$\lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\zeta$	Pmed	Pcal	Error (%)
1,012	0,260	1600	91,3	100	15,17	15,001	-1,12
0,992	1,160	2500	91,3	100	29,98	29,837	-0,48
1,032	-1,565	700	81,9	0	0,2	0,2036	1,80
1,033	-0,918	1600	81,9	0	0,48	0,4733	-1,40
1,028	-0,270	2500	81,9	0	0,58	0,5812	0,21
1,021	-1,118	700	81,9	50	0,39	0,4106	5,29
1,017	-0,562	1600	81,9	50	7,9	7,9553	0,70
1,013	-0,006	2500	81,9	50	15,07	14,729	-2,26
1,005	-1,190	700	81,9	100	0,41	0,4172	1,74
1,001	-0,725	1600	81,9	100	14,93	14,953	0,15
0,997	-0,260	2500	81,9	100	29,47	28,965	-1,72

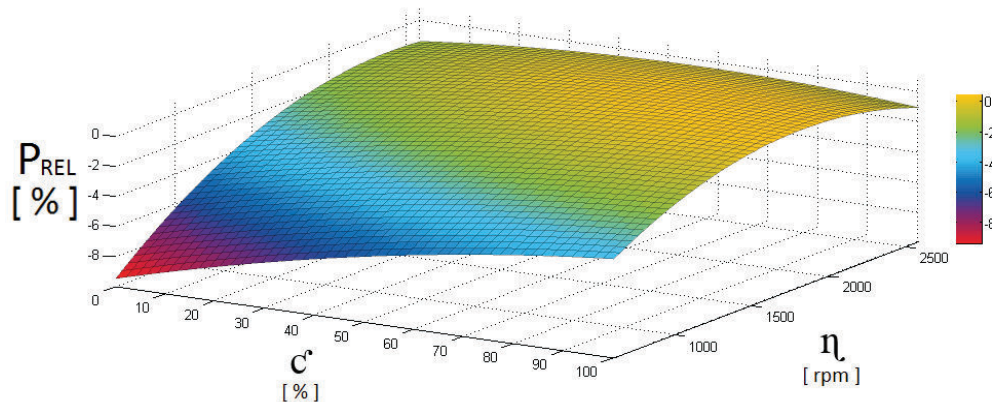
En la figura 3.75 se observa la medición con gasolina súper, en la que se examina los puntos más relevantes, observándose que la potencia relativa del motor a 700 rpm, sin carga, tiene una disminución del 0.45%, la cual se representa de color rojo, siendo la menor disminución de los valores medidos; sin que esto presente inconvenientes ya que la potencia en este punto se requiere únicamente para el funcionamiento del propio motor y de sus sistemas auxiliares.



**Figura 3. 75 Potencia relativa usando gasolina súper**

En el punto más alto de color amarillo que se observa en la gráfica, medido a 2500 rpm y con carga del 100% se obtiene un incremento del 1.59% de la potencia relativa del motor, siendo el mayor aumento de los valores medidos.

En la figura 3.76 se observa la medición con gasolina extra y considerando los puntos más relevantes, se observa que la potencia relativa a 700 rpm, sin carga, tiene una disminución del 9.09%, siendo la mayor disminución de los valores medidos



**Figura 3. 76 Potencia relativa usando gasolina extra**

En el punto más alto que se observa en la gráfica mostrado de color amarillo, medido a 2500 rpm y con carga del 100% se obtiene una disminución del 0.13% de la potencia relativa, siendo la menor disminución de los valores medidos, que de manera global es una reducción prácticamente despreciable y considerando las modificaciones se comporta de manera muy similar al uso con gasolina súper.

### 3.5.2 FUERZA TRACTORA RELATIVA

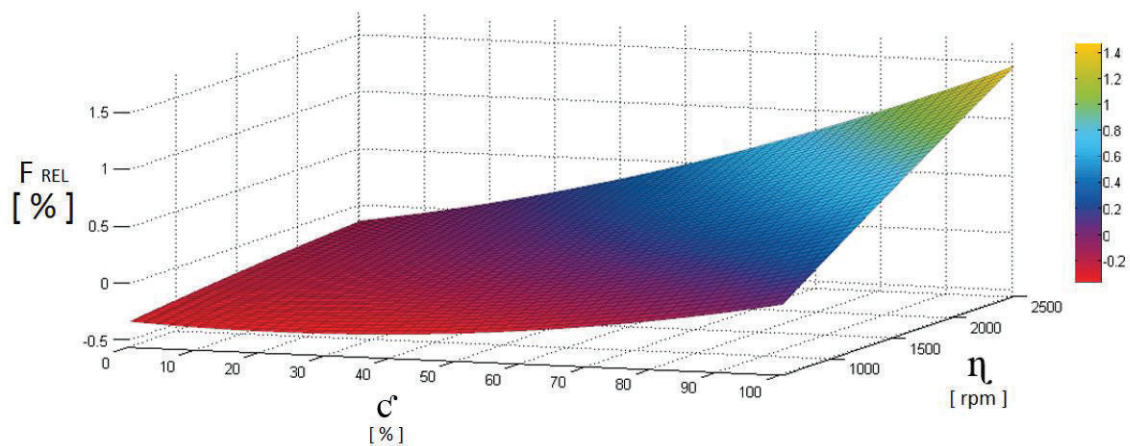
La Fuerza Tractora relativa hace referencia a la relación entre la Fuerza tractora producida por el motor utilizando la configuración obtenida en el proceso de optimización y la fuerza tractora producida en las condiciones originales impuestas por

el fabricante. En la tabla 3.10 se muestra los resultados de las mediciones de la Fuerza Tractora y los resultados del cálculo utilizando el modelo obtenido y el error generado.

**Tabla 3. 16 Fuerza Tractora Relativa**

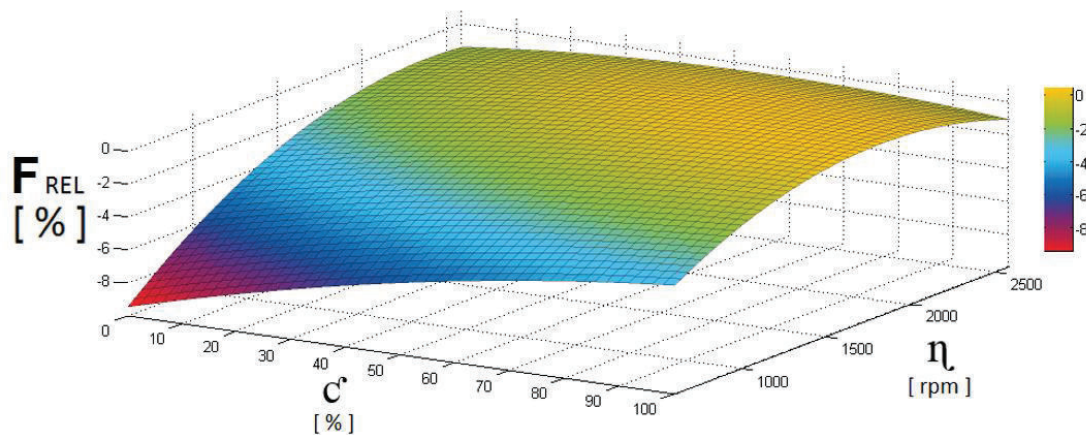
$\lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\zeta$	Fmed	Fcal	Error (%)
1,025	0,750	700	91,3	0	28	28	0,86
1,038	1,650	1600	91,3	0	35	35	-0,60
1,026	2,550	2500	91,3	0	33	33	-0,32
1,017	0,055	700	91,3	50	52	53	2,29
1,025	0,955	1600	91,3	50	416	417	0,24
1,009	1,855	2500	91,3	50	411	421	2,54
1,009	-0,640	700	91,3	100	66	69	5,21
1,012	0,260	1600	91,3	100	782	773	-1,13
0,992	1,160	2500	91,3	100	1501	1493	-0,48
1,032	-1,565	700	81,9	0	27	27	1,81
1,033	-0,918	1600	81,9	0	34	34	-1,41
1,028	-0,270	2500	81,9	0	32	32	0,21
1,021	-1,118	700	81,9	50	51	54	5,35
1,017	-0,562	1600	81,9	50	413	416	0,71
1,013	-0,006	2500	81,9	50	409	400	-2,29
1,005	-1,190	700	81,9	100	65	66	1,76
1,001	-0,725	1600	81,9	100	775	776	0,16
0,997	-0,260	2500	81,9	100	1474	1448	-1,73

En la figura 3.77 se observa la medición con gasolina súper y considerando los puntos más relevantes, se observa que la fuerza tractora relativa del motor a 700 rpm, sin carga, tiene una disminución del 0.06%, presentado de color rojo, siendo la menor disminución de los valores medidos, además al ser una reducción muy baja no afecta al desempeño del vehículo.



**Figura 3. 77 Fuerza tractora relativa usando gasolina súper**

En el punto más alto de la gráfica presentado de color amarillo, medido a 2500 rpm y con carga del 100% se obtiene un aumento de 1.59% de la fuerza tractora relativa, siendo el valor del mayor aumento de los valores medidos. En la figura 3.78 se muestra la medición con gasolina extra y considerando los puntos más relevantes, se observa que la fuerza tractora relativa a 700 rpm sin carga, tiene una disminución del 3.57%, representado de color rojo en la gráfica, siendo el punto de mayor reducción de la fuerza tractora de los valores medidos.



**Figura 3. 78 Fuerza tractora relativa usando gasolina extra**



En el punto más alto que se observa de color amarillo, medido a 2500 rpm y con carga del 100% se obtiene una disminución del 0.12% de la fuerza tractora relativa, siendo la menor disminución de los valores medidos, que de manera global es una reducción prácticamente despreciable y considerando las modificaciones se comporta de manera muy similar al uso con la gasolina súper.

### 3.5.3 EMISIÓN RELATIVA DE MONÓXIDO DE CARBONO

La emisión relativa de monóxido de carbono hace referencia a la relación entre la emisión de CO producida por el motor utilizando la configuración obtenida en el proceso de optimización y la emisión de CO producida en las condiciones originales impuestas por el fabricante. En la tabla 3.11 se muestra los resultados de las mediciones de la emisión de CO y los resultados del cálculo utilizando el modelo obtenido y el error generado.

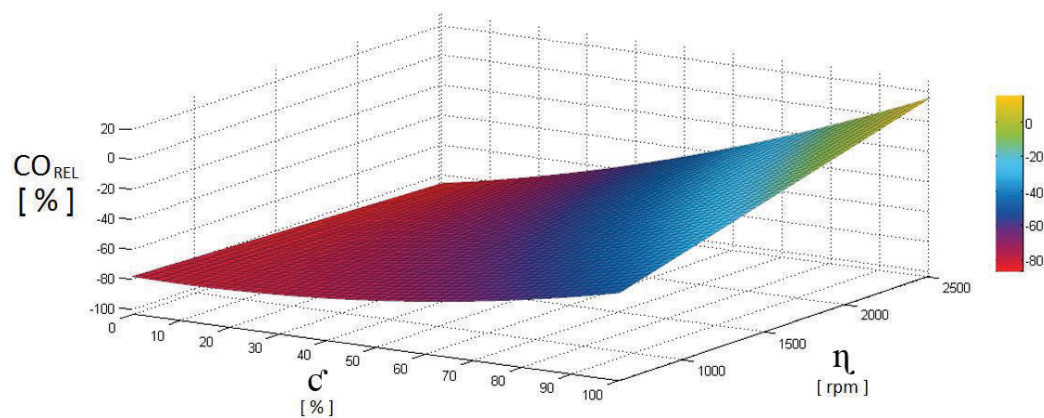
**Tabla 3. 17 Emisión Relativa de Monóxido de Carbono**

$\Lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\zeta$	CO (med)	CO (cal)	Error (%)
1,025	0,750	700	91,3	0	0,14	0,1404	0,29
1,038	1,650	1600	91,3	0	0,06	0,0618	3,00
1,026	2,550	2500	91,3	0	0,07	0,0704	0,53
1,017	0,055	700	91,3	50	0,16	0,1592	-0,51
1,025	0,955	1600	91,3	50	0,14	0,1374	-1,88
1,009	1,855	2500	91,3	50	0,28	0,2903	3,69
1,009	-0,640	700	91,3	100	0,38	0,3845	1,18
1,012	0,260	1600	91,3	100	0,32	0,3254	1,70
0,992	1,160	2500	91,3	100	0,74	0,7246	-2,08
1,032	-1,565	700	81,9	0	0,26	0,2593	-0,26
1,033	-0,918	1600	81,9	0	0,36	0,3633	0,91
1,028	-0,270	2500	81,9	0	0,38	0,3844	1,17
1,021	-1,118	700	81,9	50	0,39	0,3942	1,07

**Tabla 3. 18 (Continuación) Emisión Relativa de Monóxido de Carbono**

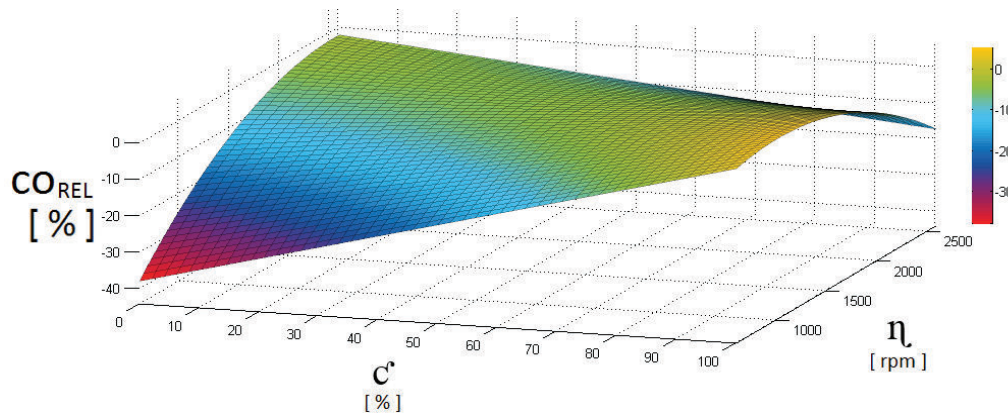
$\Lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\zeta$	CO (med)	CO (cal)	Error (%)
1,017	-0,562	1600	81,9	50	0,44	0,4323	-1,75
1,013	-0,006	2500	81,9	50	0,35	0,3591	2,60
1,005	-1,190	700	81,9	100	0,51	0,5100	0,01
1,001	-0,725	1600	81,9	100	0,43	0,4245	-1,29
0,997	-0,260	2500	81,9	100	0,51	0,5103	0,06

En la figura 3.79 se muestra la medición con gasolina súper y considerando los puntos más relevantes, se observa que el CO relativo a 1600 rpm, sin carga, tiene una disminución del 83.78%, presentado de color rojo, siendo el punto de mayor disminución del CO de los valores medidos, considerado como una importante reducción de este tipo de emisión.



**Figura 3. 79 Emisión Relativa de Monóxido de Carbono usando gasolina súper**

En el punto más alto de la gráfica de color amarillo, medido a 2500 rpm y con carga del 100% existe un aumento del 23.33% del CO relativo, siendo el mayor aumento de los valores medidos. En la figura 3.80 se muestra la medición con gasolina extra y considerando los puntos más relevantes, se observa que el CO relativo a 700 rpm, sin carga, tiene una disminución del 40%, mostrado de color rojo, siendo la mayor disminución.



**Figura 3. 80 Emisión Relativa de Monóxido de Carbono usando gasolina extra**

En el punto más alto de la gráfica presentado de color amarillo medido a 1600 rpm y con carga del 100% se obtiene una disminución del 1.92% del CO relativo, siendo la menor disminución de los valores medidos, además en todas las condiciones de prueba se observó disminución del CO con este tipo de gasolina.

### 3.5.4 EMISIÓN RELATIVA DE HIDROCARBUROS NO COMBUSTIONADOS

La Emisión Relativa de Hidrocarburos no Combustionados hace referencia a la relación entre la emisión de HC producida por el motor utilizando la configuración obtenida en el proceso de optimización y la emisión de HC producida en las condiciones originales impuestas por el fabricante.

En la tabla 3.12 se muestra los resultados de las mediciones de HC y los resultados del cálculo utilizando el modelo obtenido y el error generado.

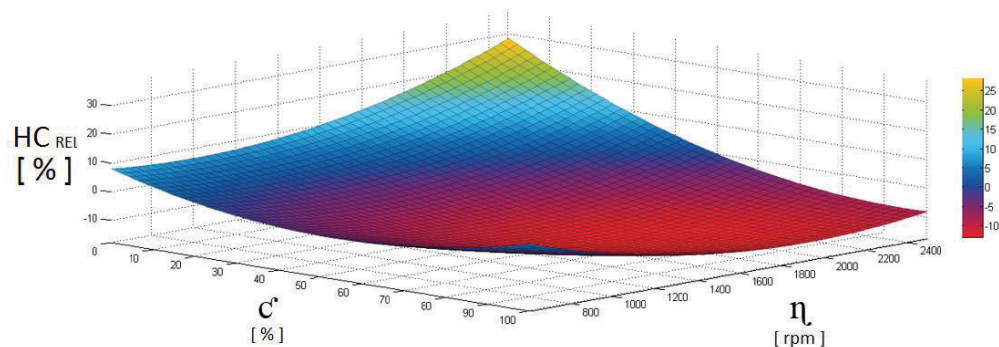
**Tabla 3. 19 Emisión Relativa de Hidrocarburos no Combustionados**

$\Lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$c$	HC (med)	HC (cal)	Error (%)
1,025	0,750	700	91,3	0	29	29,02	0,01
1,038	1,650	1600	91,3	0	22	22,24	1,08

**Tabla 3. 20 (Continuación) Emisión Relativa de Hidrocarburos no Combustionados**

$\Lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\zeta$	HC (med)	HC (cal)	Error (%)
1,026	2,550	2500	91,3	0	18	17,77	-1,28
1,017	0,055	700	91,3	50	60	57,74	-3,76
1,025	0,955	1600	91,3	50	61	62,30	2,13
1,009	1,855	2500	91,3	50	50	50,06	0,12
1,009	-0,640	700	91,3	100	30	29,73	-0,89
1,012	0,260	1600	91,3	100	31	31,50	1,60
0,992	1,160	2500	91,3	100	23	23,30	1,28
1,032	-1,565	700	81,9	0	30	30,00	-0,01
1,033	-0,918	1600	81,9	0	24	24,34	1,42
1,028	-0,270	2500	81,9	0	14	13,56	-3,13
1,021	-1,118	700	81,9	50	58	57,06	-1,62
1,017	-0,562	1600	81,9	50	70	69,68	-0,46
1,013	-0,006	2500	81,9	50	57	55,73	-2,22
1,005	-1,190	700	81,9	100	35	34,13	-2,48
1,001	-0,725	1600	81,9	100	40	39,55	-1,11
0,997	-0,260	2500	81,9	100	44	42,35	-3,76

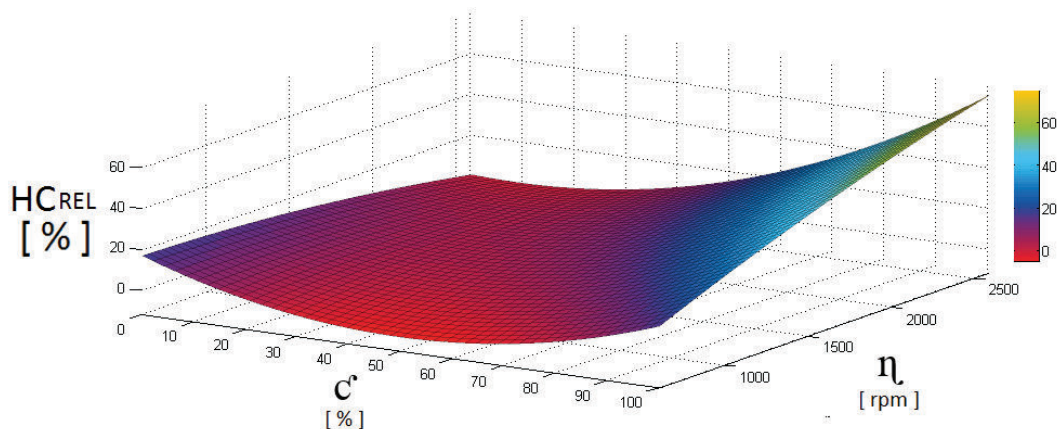
En la figura 3.81 se ve la medición con gasolina súper y considerando los puntos más relevantes, se observa que los HC relativo a 2500 rpm, sin carga, tiene un aumento del 28.57%, presentado de color rojo siendo el mayor aumento de los valores medidos.



**Figura 3. 81 Emisión Relativa de Hidrocarburos no Combustionados usando gasolina súper**

En el punto más alto de la gráfica mostrado de color amarillo, medido a 1600 rpm y con carga del 50% se obtiene una disminución del 10.29% de los HC relativo, siendo la mayor disminución de los valores medidos.

En la figura 3.82 se aprecia la medición con gasolina extra y considerando los puntos más relevantes, se observa que los HC relativo a 2500 rpm, sin carga, se mantiene inalterable 0.0%, representado con color rojo.



**Figura 3. 82 Emisión Relativa de Hidrocarburos no Combustionados usando gasolina extra**

En el punto más alto de la gráfica presentado de color amarillo, medido a 2500 rpm y con carga del 50% se obtiene un aumento del 76.0% de los HC relativo, siendo el mayor aumento de los valores medidos.

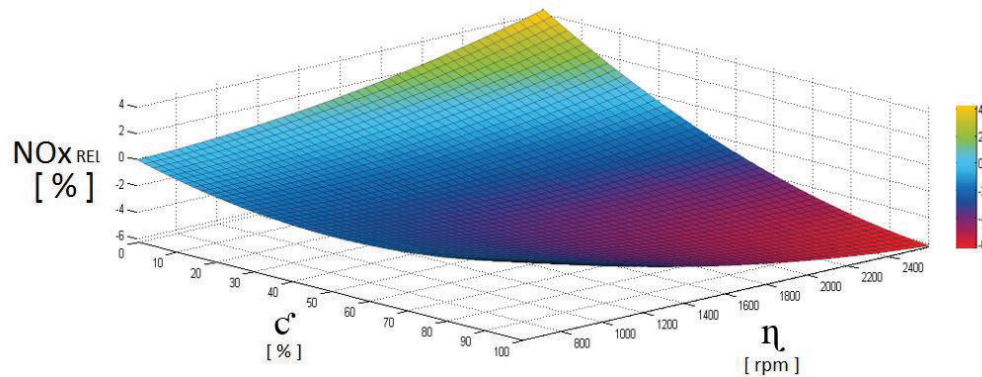
### 3.5.5 ÓXIDOS NITROSOS

La emisión relativa de Óxidos Nitrosos hace referencia a la relación entre la emisión de NO<sub>x</sub> producida por el motor utilizando la configuración obtenida en el proceso de optimización y la emisión de NO<sub>x</sub> producida en las condiciones originales impuestas por el fabricante. En la tabla 3.13 se muestra los resultados de las mediciones de NO<sub>x</sub> y los resultados del cálculo utilizando el modelo obtenido y el error generado.

**Tabla 3. 21 Emisión Relativa de Óxidos Nitrosos Relativos**

$\lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\epsilon$	Nox (med)	Nox (cal)	Error (%)
1,025	0,750	700	91,3	0	1	1	0,86
1,038	1,650	1600	91,3	0	47	48	1,55
1,026	2,550	2500	91,3	0	109	110	0,96
1,017	0,055	700	91,3	50	79	75	-4,60
1,025	0,955	1600	91,3	50	299	293	-2,09
1,009	1,855	2500	91,3	50	306	309	1,09
1,009	-0,640	700	91,3	100	178	174	-2,26
1,012	0,260	1600	91,3	100	543	539	-0,66
0,992	1,160	2500	91,3	100	914	915	0,11
1,032	-1,565	700	81,9	0	1	1	-0,76
1,033	-0,918	1600	81,9	0	44	45	2,91
1,028	-0,270	2500	81,9	0	98	98	-0,19
1,021	-1,118	700	81,9	50	80	83	3,72
1,017	-0,562	1600	81,9	50	301	294	-2,21
1,013	-0,006	2500	81,9	50	307	305	-0,81
1,005	-1,190	700	81,9	100	158	162	2,22
1,001	-0,725	1600	81,9	100	331	340	2,85
0,997	-0,260	2500	81,9	100	661	657	-0,65

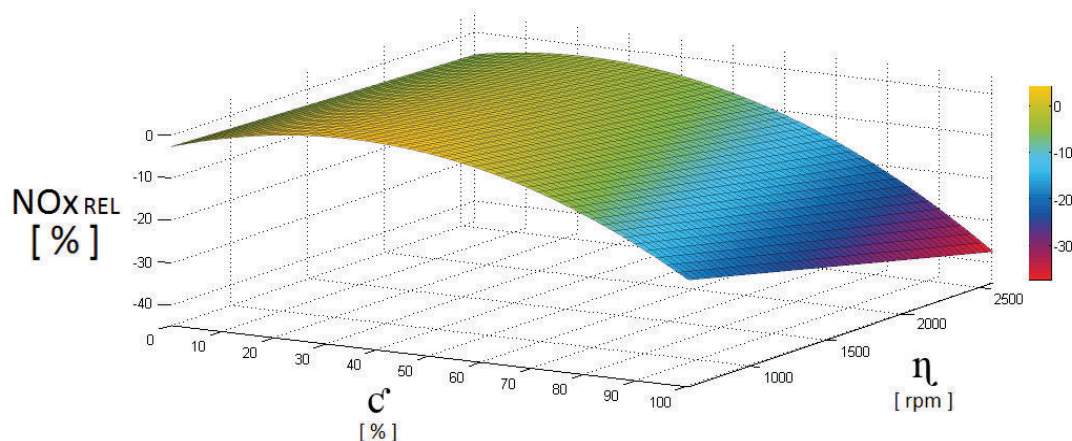
En la figura 3.83 se presenta la gráfica de la medición del comportamiento de los óxidos nitrosos, cuando al realizar las pruebas con gasolina súper, se puede notar que los NOx relativo tienen un aumento del 2.83%, para esta medición se estableció un giro del motor a 2500 revoluciones por minuto y sin estar sometido a carga, lo cual produce un aumento significativo de estas emisiones, siendo el mayor aumento de los valores medidos.



**Figura 3. 83 Emisión Relativa de Óxidos Nitrosos Relativos usando gasolina súper**

En el punto más alto que se observa de color amarillo, medido a 2500 rpm y con carga del 100% se obtiene una disminución de 5.87% de NOx relativo, siendo la mayor reducción de los valores medidos.

En la figura 3.84 se muestra la medición con gasolina extra y considerando los puntos más relevantes, se observa que los NOx relativo a 700 rpm, sin carga, se mantiene inalterable 0.0%, representado con color rojo en la gráfica.



**Figura 3. 84 Emisión Relativa de Óxidos Nitrosos Relativos usando gasolina extra**

En el punto más alto que se observa de color amarillo, medido a 1600 rpm y con carga del 100% se obtiene una disminución de 42.53% de NOx relativo, siendo la mayor disminución de los valores medidos.

### 3.5.6 DIÓXIDO DE CARBONO

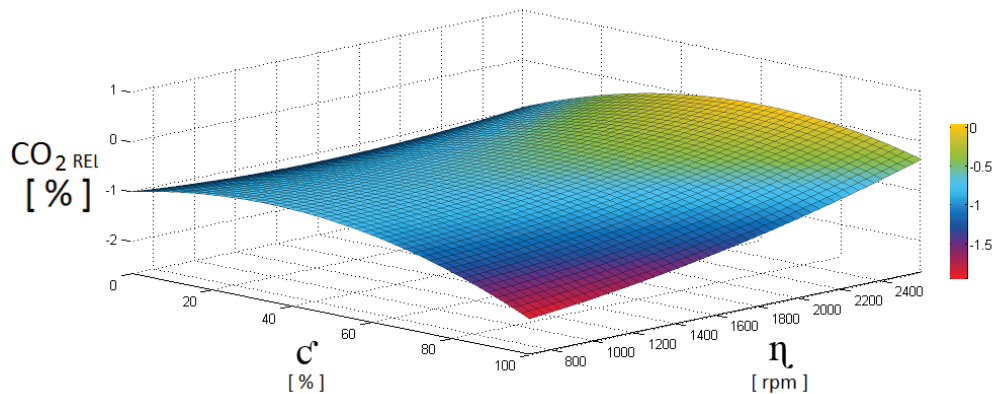
La Emisión Relativa de Dióxido de Carbono hace referencia a la relación entre la emisión de CO<sub>2</sub> producida por el motor utilizando la configuración obtenida en el proceso de optimización y la emisión de CO<sub>2</sub> producida en las condiciones originales impuestas por el fabricante. En la tabla 3.14 se muestra los resultados de las mediciones de CO<sub>2</sub> y los resultados del cálculo utilizando el modelo obtenido y el error generado.

**Tabla 3. 22 Emisión Relativa de Dióxido de Carbono**

$\lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\zeta$	CO2 (med)	CO2 (cal)	Error (%)
1,025	0,750	700	91,3	0	14,87	15,14	1,81
1,038	1,650	1600	91,3	0	14,95	14,80	-0,99
1,026	2,550	2500	91,3	0	14,93	15,13	1,36
1,017	0,055	700	91,3	50	15,18	15,18	0,00
1,025	0,955	1600	91,3	50	15,17	15,23	0,39
1,009	1,855	2500	91,3	50	15,16	15,12	-0,24
1,009	-0,640	700	91,3	100	15,01	15,21	1,36
1,012	0,260	1600	91,3	100	14,98	14,79	-1,24
0,992	1,160	2500	91,3	100	14,98	14,93	-0,32
1,032	-1,565	700	81,9	0	15,01	15,25	1,58
1,033	-0,918	1600	81,9	0	15,09	15,05	-0,26
1,028	-0,270	2500	81,9	0	15,01	14,45	-3,73
1,021	-1,118	700	81,9	50	15,13	15,00	-0,84
1,017	-0,562	1600	81,9	50	15,03	15,51	3,20
1,013	-0,006	2500	81,9	50	15,12	14,86	-1,69
1,005	-1,190	700	81,9	100	15,08	15,02	-0,43
1,001	-0,725	1600	81,9	100	15,09	14,98	-0,76
0,997	-0,260	2500	81,9	100	14,95	15,26	2,09



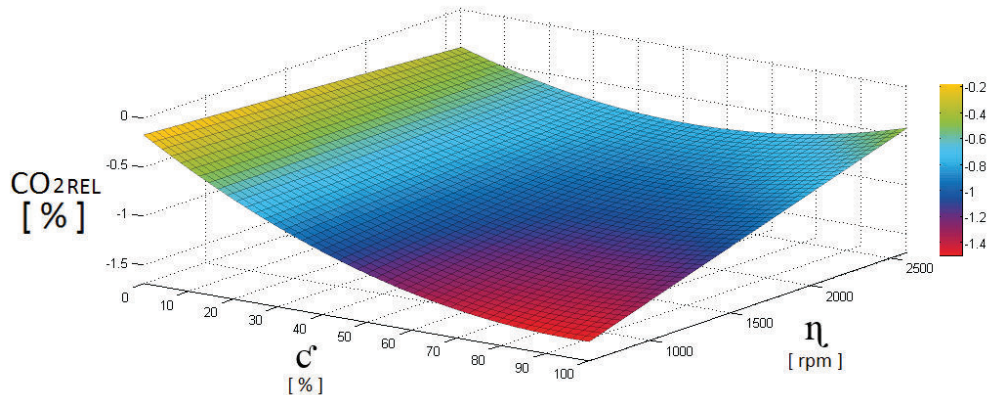
En la figura 3.85 se muestra la medición con gasolina súper y considerando los puntos más relevantes, se observa que el CO<sub>2</sub> relativo a 2500 rpm, con una carga del 100%, tiene una disminución de 0.19%, representado con color rojo, siendo la cifra menor de los valores medidos.



**Figura 3. 85 Emisión Relativa de Dióxido de Carbono usando gasolina súper**

En el punto más alto que se observa de color amarillo, medido a 700 rpm y con carga del 100% se obtiene una disminución de 2.02% de CO<sub>2</sub> relativo, siendo valor máximo de disminución del dióxido de carbono de los valores medidos.

En la figura 3.86 se muestra la medición con gasolina extra y considerando los puntos más relevantes, se observa que el CO<sub>2</sub> relativo a 1600 rpm, con una carga del 0%, tiene una disminución de 0.19%, representado de color rojo, siendo la menor disminución de los valores medidos.



**Figura 3. 86 Emisión Relativa de Dióxido de Carbono usando gasolina extra**

En el punto más alto que se observa de color amarillo, medido a 700 rpm y con carga del 100% se obtiene una disminución de 1.56% de CO<sub>2</sub> relativo, siendo el valor de máxima disminución de los valores medidos.

### 3.5.7 OXÍGENO

La Emisión Relativa de Oxígeno hace referencia a la relación entre la emisión de O<sub>2</sub> producida por el motor utilizando la configuración obtenida en el proceso de optimización y la emisión de O<sub>2</sub> producida en las condiciones originales impuestas por el fabricante. En la tabla 3.15 se muestra los resultados de las mediciones de O<sub>2</sub> y los resultados del cálculo utilizando el modelo obtenido y el error generado.

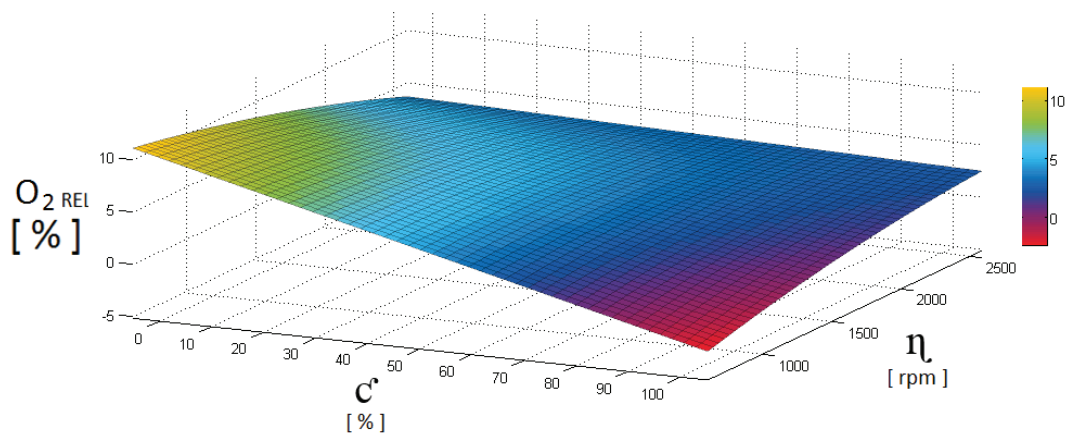
**Tabla 3. 23 Emisión Relativa de Oxígeno**

$\lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\zeta$	O2	O2	Error (%)
1,025	0,750	700	91,3	0	0,86	0,859	-0,14
1,038	1,650	1600	91,3	0	0,78	0,773	-0,91
1,026	2,550	2500	91,3	0	0,87	0,899	3,33
1,017	0,055	700	91,3	50	0,69	0,688	-0,36
1,025	0,955	1600	91,3	50	0,68	0,706	3,84
1,009	1,855	2500	91,3	50	0,66	0,639	-3,20
1,009	-0,640	700	91,3	100	0,67	0,654	-2,46
1,012	0,260	1600	91,3	100	0,66	0,653	-1,06
0,992	1,160	2500	91,3	100	0,57	0,566	-0,76
1,032	-1,565	700	81,9	0	0,89	0,898	0,88
1,033	-0,918	1600	81,9	0	0,73	0,729	-0,15
1,028	-0,270	2500	81,9	0	0,82	0,807	-1,57
1,021	-1,118	700	81,9	50	0,64	0,642	0,35

**Tabla 3. 24 (Continuación) Emisión Relativa de Oxígeno**

$\lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\zeta$	O2	O2	Error (%)
1,017	-0,562	1600	81,9	50	0,63	0,623	-1,10
1,013	-0,006	2500	81,9	50	0,65	0,665	2,38
1,005	-1,190	700	81,9	100	0,69	0,711	3,03
1,001	-0,725	1600	81,9	100	0,64	0,631	-1,43
0,997	-0,260	2500	81,9	100	0,59	0,595	0,89

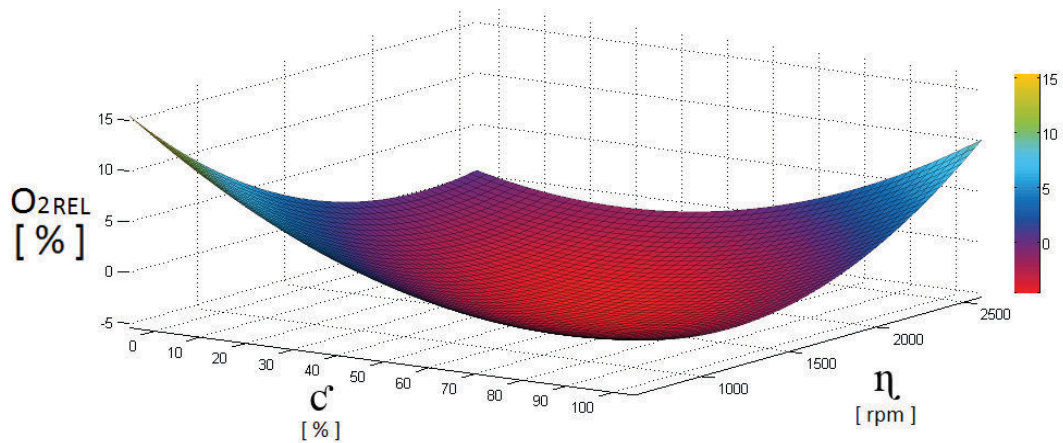
En la figura 3.87 se ve la medición con gasolina súper y considerando los puntos más relevantes, se observa que el O<sub>2</sub> relativo a 700 rpm, con una carga del 0%, tiene una disminución de 1.47%, representado de color rojo, siendo la mayor disminución de los valores medidos.



**Figura 3. 87 Emisión Relativa de Oxígeno usando gasolina súper**

En el punto más alto que se observa de color amarillo, medido a 700 rpm y con carga del 0.0% se obtiene un aumento de 11.68% de O<sub>2</sub> relativo, siendo el mayor incremento de los valores medidos.

En la figura 3.88 se muestra la medición con gasolina extra y considerando los puntos más relevantes, se observa que el  $O_2$  relativo a 700 rpm, con una carga del 0%, tiene un aumento de 15.58%, representado con color rojo, siendo el mayor aumento de los valores medidos, por estar en un punto con mezcla pobre.



**Figura 3. 88 Emisión Relativa de Oxígeno usando gasolina extra**

En el punto más alto que se observa de color amarillo, medido a 2500 rpm y con carga del 0% se obtiene un aumento de 1.20% de  $O_2$  relativo, siendo la mayor disminución de los valores medidos.

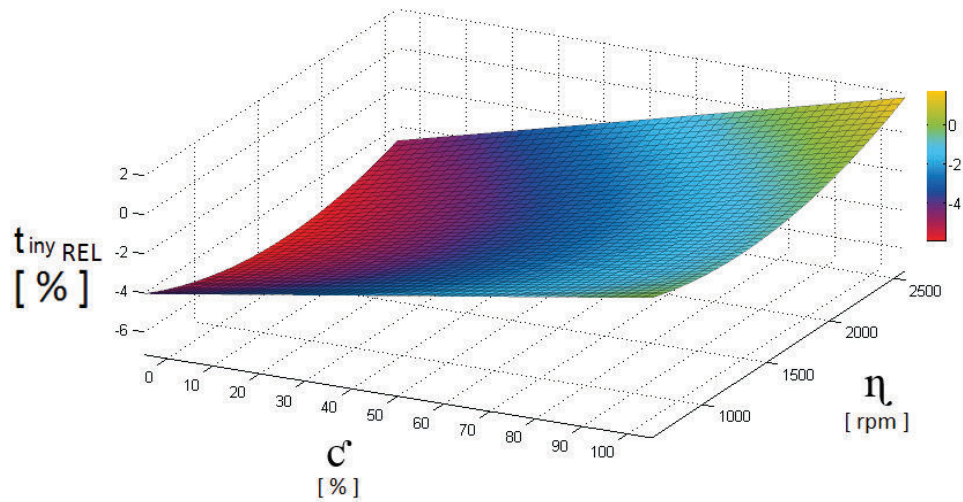
### 3.5.8 TIEMPO DE INYECCIÓN RELATIVO

El Tiempo de Inyección relativo hace referencia a la relación entre el tiempo de inyección generado utilizando la configuración obtenida en el proceso de optimización y el tiempo de inyección producido en las condiciones originales impuestas por el fabricante. En la tabla 3.16 se muestra los resultados de las mediciones del tiempo de inyección y los resultados del cálculo utilizando el modelo obtenido y el error generado.

**Tabla 3. 25 Tiempo de Inyección**

$\lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\zeta$	t iny (med)	t iny (cal)	Error (%)
1,025	0,750	700	91,3	0	1,968	2,042	-3,798
1,038	1,650	1600	91,3	0	2,304	2,367	-2,739
1,026	2,550	2500	91,3	0	2,457	2,577	-4,865
1,017	0,055	700	91,3	50	2,446	2,503	-2,311
1,025	0,955	1600	91,3	50	4,056	4,138	-2,034
1,009	1,855	2500	91,3	50	5,653	5,699	-0,816
1,009	-0,640	700	91,3	100	3,600	3,621	-0,576
1,012	0,260	1600	91,3	100	6,521	6,581	-0,913
0,992	1,160	2500	91,3	100	9,539	9,506	0,3491
1,032	-1,565	700	81,9	0	2,101	2,115	-0,656
1,033	-0,918	1600	81,9	0	2,382	2,455	-3,082
1,028	-0,270	2500	81,9	0	2,580	2,647	-2,591
1,021	-1,118	700	81,9	50	2,610	2,589	0,8195
1,017	-0,562	1600	81,9	50	4,426	4,349	1,7363
1,013	-0,006	2500	81,9	50	5,400	5,573	-3,221
1,005	-1,190	700	81,9	100	3,629	3,641	-0,314
1,001	-0,725	1600	81,9	100	6,623	6,642	-0,277
0,997	-0,260	2500	81,9	100	9,920	9,678	2,4401

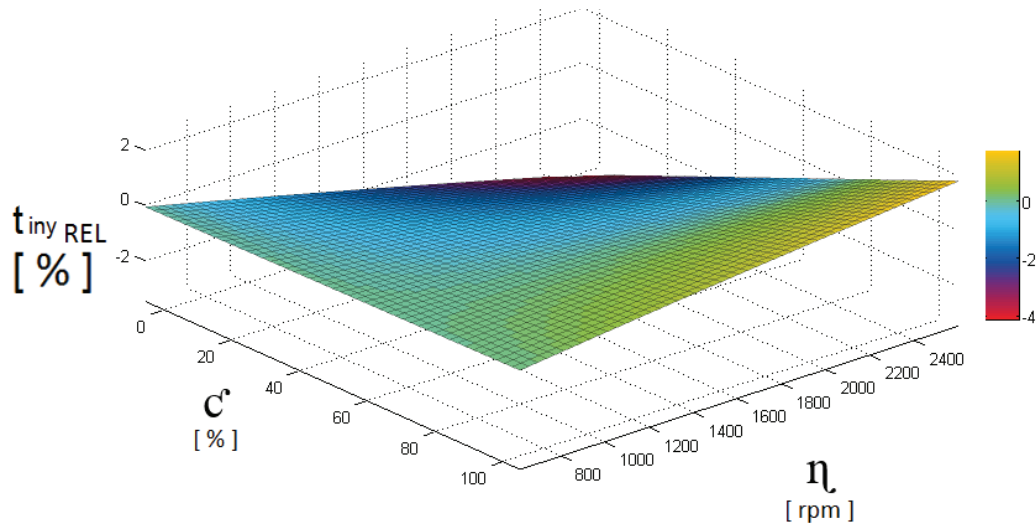
En la figura 3.89 se observa la medición con gasolina súper y considerando los puntos más relevantes, se observa que el  $T_{iny}$  relativo a 2500 rpm, con una carga del 0%, tiene una disminución de 4.86%, representado con color rojo, siendo la mayor disminución de los valores medidos.



**Figura 3. 89 Tiempo de Inyección Relativo usando gasolina súper**

En el punto más alto que se observa de color amarillo, medido a 2500 rpm y con carga del 100% se obtiene un aumento de 0.34% de  $T_{iny}$  relativo, siendo el valor de mayor incremento de los valores medidos.

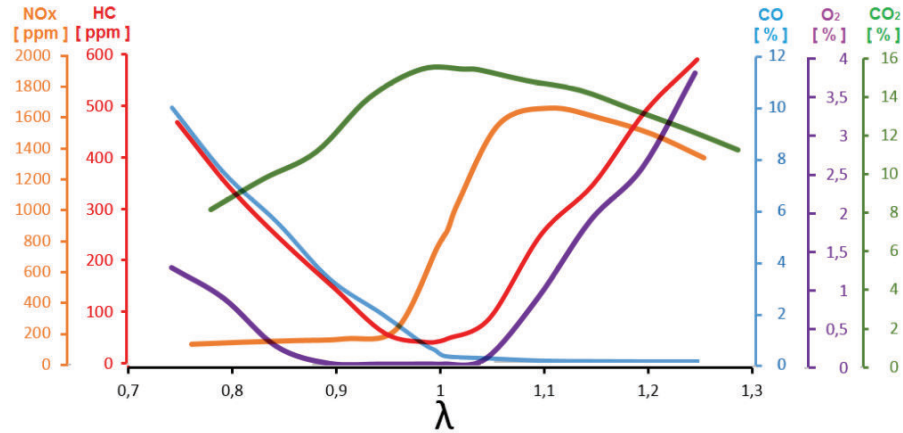
En la figura 3.90 se ve la medición con gasolina extra y considerando los puntos más relevantes, se observa que el  $T_{iny}$  relativo a 2500 rpm, con una carga del 50%, tiene una disminución de 3.22%, representado de color rojo, siendo la mayor disminución de los valores medidos.



**Figura 3. 90 Tiempo de Inyección Relativo usando gasolina extra**

En el punto más alto que se observa de color amarillo, medido a 2500 rpm y con carga del 100% se obtiene un aumento de 2.44 de  $T_{iny}$  relativo, siendo el mayor aumento de los valores medidos.

En la figura 3.91 se presenta las curvas de comportamiento de las emisiones de gases de escape respecto del factor lambda.



**Figura 3. 91** Comportamiento de las emisiones respecto del factor lambda

### 3.5.9 CONSUMO RELATIVO

El Consumo relativo hace referencia a la relación entre el consumo generado utilizando la configuración obtenida en el proceso de optimización y el consumo producido en las condiciones originales impuestas por el fabricante. En la tabla 3.17 se muestra los resultados de las mediciones del consumo y los resultados del cálculo utilizando el modelo obtenido y el error generado.

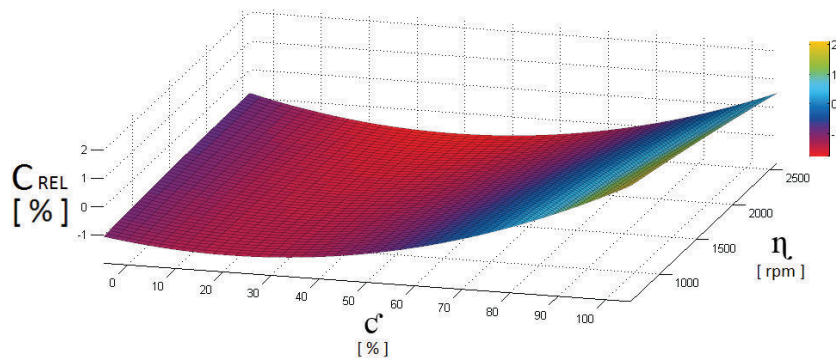
**Tabla 3. 26** Consumo Relativo

$\lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\epsilon$	C (med)	C (cal)	Error (%)
1,025	0,750	700	91,3	0	0,9	0,917	1,87
1,038	1,650	1600	91,3	0	2,13	2,116	-0,67
1,026	2,550	2500	91,3	0	3,37	3,276	-2,78

**Tabla 3. 27 (Continuación) Consumo Relativo**

$\lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\zeta$	C (med)	C (cal)	Error (%)
1,017	0,055	700	91,3	50	0,69	0,664	-3,72
1,025	0,955	1600	91,3	50	4,58	4,597	0,36
1,009	1,855	2500	91,3	50	4,45	4,581	2,95
1,009	-0,640	700	91,3	100	0,49	0,495	1,05
1,012	0,260	1600	91,3	100	6,91	6,941	0,45
0,992	1,160	2500	91,3	100	13,36	13,278	-0,62
1,032	-1,565	700	81,9	0	0,915	0,904	-1,17
1,033	-0,918	1600	81,9	0	2,18	2,194	0,66
1,028	-0,270	2500	81,9	0	3,47	3,474	0,11
1,021	-1,118	700	81,9	50	0,74	0,755	2,08
1,017	-0,562	1600	81,9	50	4,67	4,870	4,28
1,013	-0,006	2500	81,9	50	4,59	4,472	-2,58
1,005	-1,190	700	81,9	100	0,51	0,512	0,41
1,001	-0,725	1600	81,9	100	7,08	7,334	3,59
0,997	-0,260	2500	81,9	100	13,82	13,327	-3,57

En la figura 3.92 se muestra la medición con gasolina súper, observándose que el consumo calculado relativo a 1600 rpm, con una carga del 50%, se tiene una disminución de 1.42%, (rojo), siendo la mayor disminución de los valores medidos.

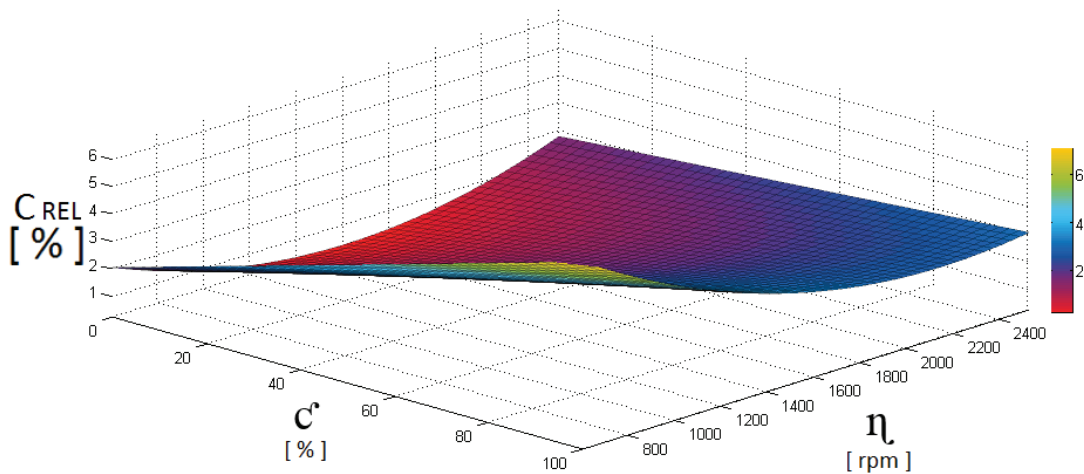


**Figura 3. 92 Consumo Relativo usando gasolina súper**



En el punto más alto que se observa de color amarillo, medido a 700 rpm y con carga del 100% se obtiene un aumento de 2.08 del consumo calculado relativo, siendo el valor de mayor incremento de los valores medidos.

En la figura 3.93 se muestra la medición con gasolina extra y considerando los puntos más relevantes, se observa que el Consumo calculado relativo a 700 rpm, con una carga de 0.0%, tiene un aumento de 0.54%, representado con color rojo, siendo el mayor aumento de los valores medidos.



**Figura 3. 93 Consumo Relativo usando gasolina extra**

En el punto más alto que se observa de color amarillo, medido a 700 rpm y con carga del 100% se obtiene un aumento de 6.25 del Consumo calculado relativo, siendo el valor de mayor incremento de los valores medidos.

### 3.5.10 CONSUMO ESPECÍFICO RELATIVO

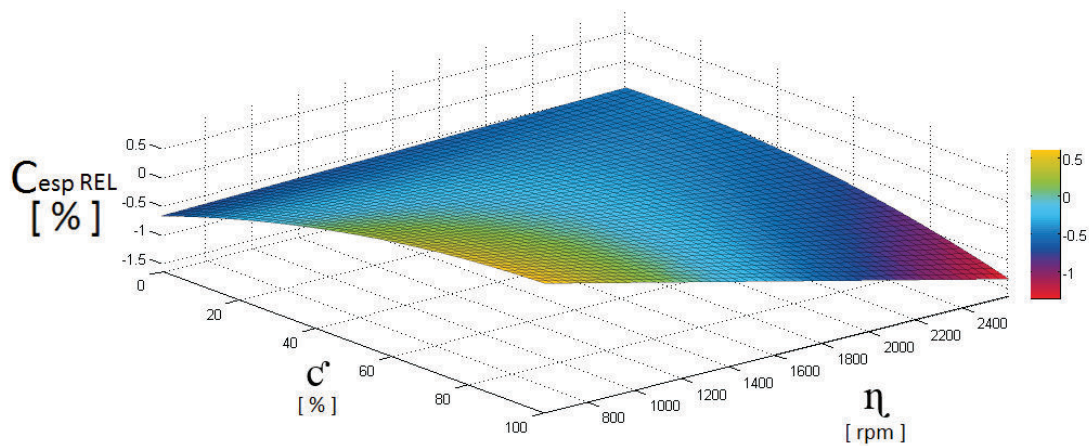
El Consumo Específico relativo hace referencia a la relación entre el consumo específico generado utilizando la configuración obtenida en el proceso de optimización y el consumo específico producido en las condiciones originales impuestas por el fabricante. En la tabla 3.18 se muestra los resultados de las mediciones del consumo

específico y los resultados del cálculo utilizando el modelo obtenido y el error generado.

**Tabla 3. 28 Consumo Específico Relativo**

$\lambda$	$\alpha$	$\eta$	R	$\zeta$	Cesp (med)	Cesp (cal)	Error (%)
1,025	0,750	700	91,3	0	5,867	5,816	-0,88
1,038	1,650	1600	91,3	0	5,482	5,696	3,90
1,026	2,550	2500	91,3	0	6,812	7,033	3,25
1,017	0,055	700	91,3	50	1,265	1,284	1,52
1,025	0,955	1600	91,3	50	0,439	0,437	-0,47
1,009	1,855	2500	91,3	50	0,261	0,261	0,05
1,009	-0,640	700	91,3	100	2,201	2,190	-0,48
1,012	0,260	1600	91,3	100	0,575	0,565	-1,85
0,992	1,160	2500	91,3	100	0,339	0,352	4,07
1,032	-1,565	700	81,9	0	5,976	6,021	0,75
1,033	-0,918	1600	81,9	0	5,623	5,691	1,22
1,028	-0,270	2500	81,9	0	6,895	6,626	-3,90
1,021	-1,118	700	81,9	50	1,295	1,314	1,44
1,017	-0,562	1600	81,9	50	0,452	0,448	-1,05
1,013	-0,006	2500	81,9	50	0,273	0,278	2,13
1,005	-1,190	700	81,9	100	2,291	2,361	3,03
1,001	-0,725	1600	81,9	100	0,593	0,600	1,25
0,997	-0,260	2500	81,9	100	0,356	0,362	1,71

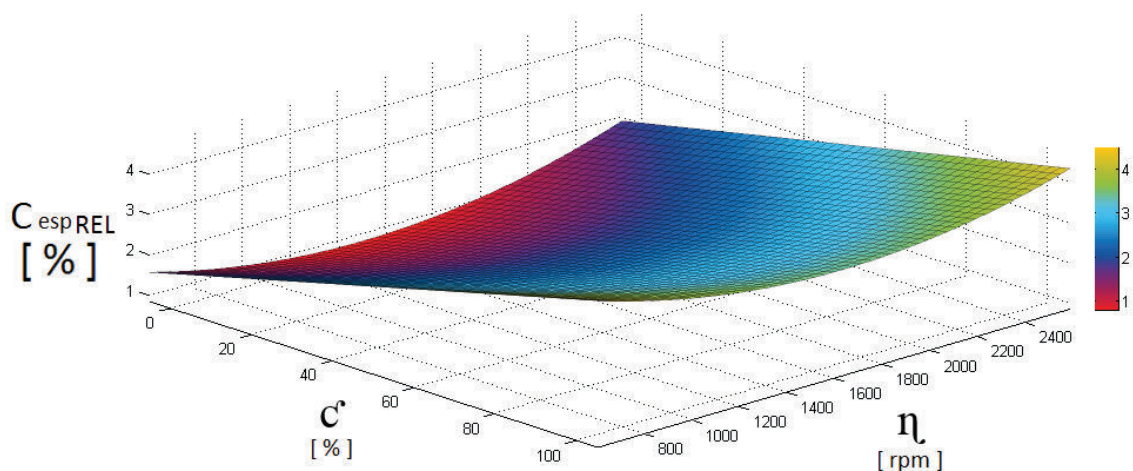
En la figura 3.94 se muestra la medición con gasolina súper y considerando los puntos más relevantes, se observa que el Consumo específico relativo a 2500 rpm, con una carga de 100%, se obtiene una disminución de 1.04%, representado de color rojo, siendo la mayor disminución de los valores medidos.



**Figura 3. 94 Consumo Específico Relativo usando gasolina súper**

En el punto más alto que se observa de color amarillo, medido a 700 rpm y con carga del 50% se obtiene un aumento de 0.76% del Consumo específico relativo, siendo el mayor aumento de los valores medidos.

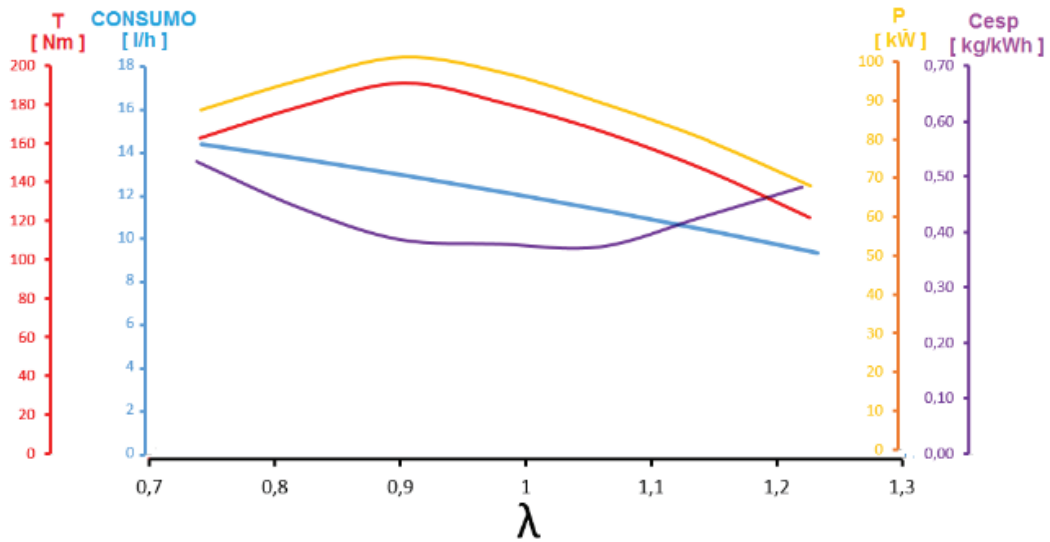
En la figura 3.95 se muestra la medición con gasolina extra y considerando los puntos más relevantes, se observa que el consumo específico relativo a 2500 rpm, con una carga de 0.0%, se tiene un aumento de 1.02%, representado de color rojo, siendo el menor incremento de los valores medidos.



**Figura 3. 95 Consumo Específico Relativo usando gasolina extra**

En el punto más alto que se observa de color amarillo, medido a 700 rpm y con carga del 100% se obtiene un aumento de 4.56% de consumo específico relativo, siendo el mayor incremento del consumo de los valores medidos.

A continuación se presenta en la figura 3.96 el comportamiento de las curvas de Torque, Potencia, Consumo y Consumo específico, en relación con el factor Lambda.



**Figura 3. 96** Curvas de comportamiento de torque, potencia y consumo en relación con *Lambda*.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS

#### 4.1 CONCLUSIONES

Según el comportamiento del motor al ser sometido a las distintas pruebas y considerando las variables planteadas en el diseño experimental, se obtuvo los resultados establecidos en las tablas de la optimización, de lo cual se concluye lo siguiente:

Para la gasolina súper en ralentí, las emisiones contaminantes disminuyen como es el caso del CO en un 68.18% y del CO<sub>2</sub> en 1.26%, el valor del NOx se mantiene inalterable, pero existe un incremento de los HC del 7.4%, debido a que la mezcla en ese punto está empobrecida. Con respecto al consumo específico existe una reducción del 0.64%, según se muestra en la gráfica respectiva, sin embargo esto influye directamente en la reducción de la potencia de un 0.45% y de igual forma de un 0.06% de la fuerza tractora, pero en este punto de funcionamiento el motor requiere una potencia mínima ya que únicamente la requiere para mantener su propio funcionamiento y el de sus sistemas auxiliares.

Para la gasolina súper con el motor operando a 1600 rpm y con media carga (50%), existe una disminución importante de los valores de CO en un 69.56%, del 10.29% de HC, del 2.92% de NOx y del 0.45% de CO<sub>2</sub>, además se observa que existe un aumento de la potencia y de la fuerza tractora en un 0.12% para ambos casos, con una disminución del 0.77% del consumo específico, debido a que se incrementó la potencia y aumento el consumo, ubicando todo este comportamiento como mejora del funcionamiento del motor.

Con el motor funcionando con gasolina súper a 2500 rpm con una carga del 100%, se nota un aumento de la potencia y de la fuerza tractora de 1.59%, para los dos casos, además existe una disminución de HC en un 8.0%, de NOx en un 5.87%, de CO<sub>2</sub> en 0.19% y de 1.04% del consumo específico, además se observa un incremento del 23.33% de CO, esto es atribuido a que es necesario un enriquecimiento de la mezcla en altas prestaciones para obtener la máxima potencia del motor, también es importante resaltar que no se ha superado el límite establecido por la norma local vigente para el caso de las emisiones contaminantes.

Utilizando gasolina extra a 700 rpm con carga 0.0%, se nota una disminución del CO en un 40.90% y de CO<sub>2</sub> en un 0.33%, el NOx permanece inalterable, la potencia y la fuerza tractora se reducen en 9.09% y 3.57% respectivamente; en estas condiciones se observa un aumento de 11.11% de HC y de 1.19% del consumo específico, sin que en estas condiciones represente dificultad para el funcionamiento del motor, porque a mínimas revoluciones se requiere una potencia baja únicamente para mantener funcionando del motor y no habrá desplazamiento del vehículo.

Con gasolina extra a 1600 rpm con el 50% de carga, se observa una reducción de la potencia y de la fuerza tractora en 0.25% y 0.48% respectivamente, logrando al mismo tiempo una reducción de las emisiones como el CO en 4.34%, NOx en 2.27% y CO<sub>2</sub> en 1.37%, pero existe un aumento de HC en 2.94%, con el incremento del consumo específico de combustible en 2.26%, acusado a una mezcla ligeramente rica para estas condiciones de funcionamiento.

Para el caso del motor funcionando con gasolina extra a 2500 rpm, con el 100% de carga, se observa un mayor consumo específico en 4.01%, al mismo tiempo aumenta el HC en 76%, pero se produce una reducción de CO en 15%, de NOx en 31,92%, de CO<sub>2</sub> en 0,39%, así mismo se reduce la potencia y la fuerza tractora en 0.13% y 0.20% respectivamente, este comportamiento se debe a que al enriquecer la mezcla para lograr mayor potencia y por lo tanto se produce un aumento en el consumo específico; las pérdidas de potencia y fuerza tractora no presentan mayor relevancia logrando una

ligera optimización en este punto, con un trabajo similar a la utilización de la gasolina súper en las condiciones originales de funcionamiento.

En conclusión se puede utilizar la gasolina extra y la gasolina súper, adecuando mezclas ligeramente pobres a bajas revoluciones del motor con niveles de carga externa baja; es necesario que la mezcla se vaya enriqueciendo conforme suban las revoluciones y la carga del motor.

Con respecto a la gasolina súper puede operar con cargas altas y régimen de giro con mezclas ligeramente ricas, además con un adelanto al encendido mayor al establecido por el fabricante; de manera contraria ocurre con la gasolina extra, con la cual no es posible trabajar con adelantos superiores a los ya establecidos por el fabricante, esto se debe a la pérdida de potencia y al aumento del HC con incremento del consumo de combustible.

## **4.2 RECOMENDACIONES**

Todas las pruebas realizadas en la presente investigación se enfocaron en un vehículo en particular, por lo que se recomienda realizar el experimento en diferentes vehículos para generalizar el conocimiento.

Entre los principales limitantes que se encontraron en la realización del experimento se encuentra el bajo nivel de régimen de giro establecido en la normativa local vigente, por lo que es recomendable incrementar el rango de análisis del factor régimen de giro.

Se recomienda analizar el impacto económico que generaría la implementación de los resultados obtenidos, con el objeto de dirigir de mejor manera los subsidios a los combustibles en función de las necesidades reales de los consumidores.

Los factores estudiados en la presente investigación infieren directamente sobre la eficiencia del convertidor catalítico, por lo que se recomienda repetir la corrida experimental para analizar la eficiencia del catalizador como variable de respuesta.

Se recomienda repetir el experimento en un motor con freno dinamométrico acoplado de forma directa, con el fin de eliminar las pérdidas mecánicas de la transmisión y de la rodadura.

### **4.3 FUTUROS TRABAJOS**

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR CICLO OTTO DE INYECCIÓN ELECTRÓNICA RESPECTO DEL MAPA DE CONTROL DEL SISTEMA VVTI PARA CIUDADES SOBRE LOS 2000 msnm.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR CICLO OTTO DE INYECCIÓN ELECTRÓNICA RESPECTO DEL MAPA DE CONTROL DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE PARA CIUDADES SOBRE LOS 2000 msnm.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, J. (2005). *Técnicas del automóvil: inyección de gasolina y dispositivos anticontaminación*. (4a. Reimpresión). Madrid: Thomson/Paraninfo.
- Alonso, J. (2014). *Sistemas auxiliares del motor: transporte y mantenimiento de vehículos*. Madrid: Paraninfo.
- Alonso, J. M. (2013). *Técnicas del automóvil Motores*. Madrid: Paraninfo.
- Álvarez, J., Callejón, A. (2010) *Máquinas térmicas motoras*. Barcelona: Universidad Politécnica Catalunya.
- Álvarez, J., Callejón, A. (2010) *Motores alternativos de combustión interna*. Barcelona: Universidad Politécnica Catalunya.
- Atkins, R. D. (2009) *An introduction to engine testing and development*. Warrendale, Pa: SAE International.
- Bosch, R. (2000). *Sistema de inyección de gasolina KE - Jetronic: control del motor para motores de gasolina*. Stuttgart: Reverte.
- Bosch, R. (2005). *Manual de la técnica del automóvil*. Barcelona: Reverte.
- De Castro, M. (1995). *Inyección de gasolina sistemas monopunto*. Barcelona: Ceac.
- De Castro, M. (2002). *Inyección de gasolina: sistemas monopunto*. Barcelona: Grupo Editorial CEAC.
- Gil, H. (2002). *Sistemas de inyección de gasolina*. Barcelona: Grupo Editorial CEAC.

- Guardiola, C. (2005). *Detección y compensación de irregularidades de inyección a través de la medida del régimen instantáneo del turbogrupo*. Barcelona: Reverté.
- Gutiérrez, H., De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mcgraw-Hill.
- Kalghatgi, G. (2014). *Fuel/engine interactions*. Warrendale, PA: SAE International.
- López, D. (2008). *Termodinámica*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Pardiñas, J. (2012). *Sistemas auxiliares del motor*. Madrid: Editex.
- Payri, F., Desantes, J. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Valencia: Reverte.
- Salinas, A. (2007). *Motores mantenimiento de vehículos autopropulsados*. Madrid: Thomson/Paraninfo.
- Sánchez, E. (2012). *Sistemas auxiliares del motor*. Madrid: MacMillan.
- Stone, R. (2012). *Introduction to internal combustion engines*. Warrendale, PA: SAE International.
- Zhao, F., Harrington, L. (2002). *Automotive gasoline direct-injection engines*. Warrendale, SAE International.

### **PAGINAS WEB:**

- [www.sisteminyecc.blogspot.com](http://www.sisteminyecc.blogspot.com) (Recuperado el 08/04/2015).

- [www.ref.pemex.com/octanaje/que.htm](http://www.ref.pemex.com/octanaje/que.htm) (Recuperado el 04/05/2015).
- [www.bglat.com/articles/octanaje.html](http://www.bglat.com/articles/octanaje.html) (Recuperado el 15/05/2015).
- [www.km77.com/glosario/c/carga.asp](http://www.km77.com/glosario/c/carga.asp) (Recuperado el 02/06/2105).

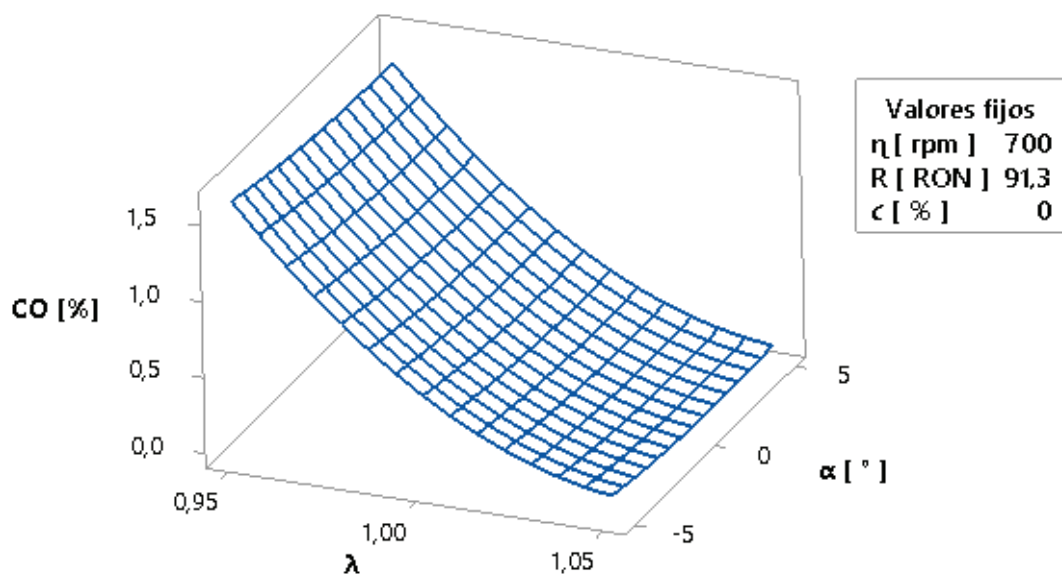
### **TEMAS AFINES (TESIS EPN):**

- Caiza, P., Portilla, A. (2010). *Determinación de la influencia de la altura en emisiones contaminantes de un vehículo con motor de ciclo Otto, de inyección electrónica de gasolina*. Tesis de Magister, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Torres, J. Urvina, V. (2008). *Determinación de los factores reales de emisión de los motores ciclo Otto en la ciudad de Quito*, Tesis de Magister, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Martínez, J. Robles, L. (2010). *Estudio del comportamiento de las variables de un motor de inyección electrónica respecto a la altura sobre el nivel del mar*, Tesis de Magister, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Ávila, D. Ayala, J. (2013), *Estudio del comportamiento de motores a gasolina respecto de la variación del octanaje*, Tesis de Magister, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2013. Ecuador

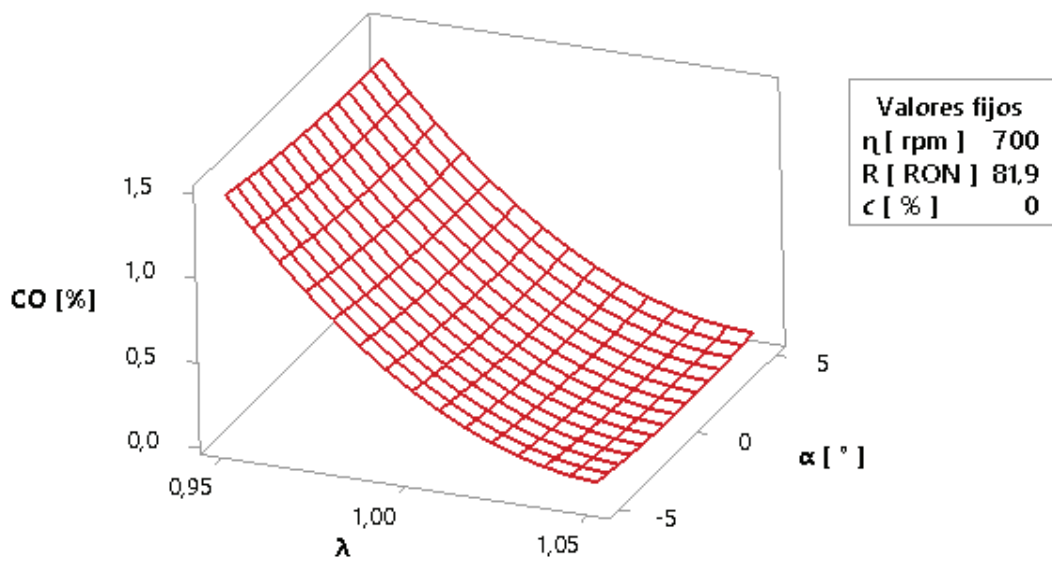
### **OTRAS PUBLICACIONES:**

- Zapata Carmen, Guía metodológica para la caracterización y evaluación de la calidad de combustibles sólidos líquidos y gaseosos, Colombia, Medellín, 2006.
- Cáceres Karol, Galezo Jennifer, Caracterización y Análisis de mezclas de gasolina con el 20% de etanol, Colombia, Bucaramanga, 2007.

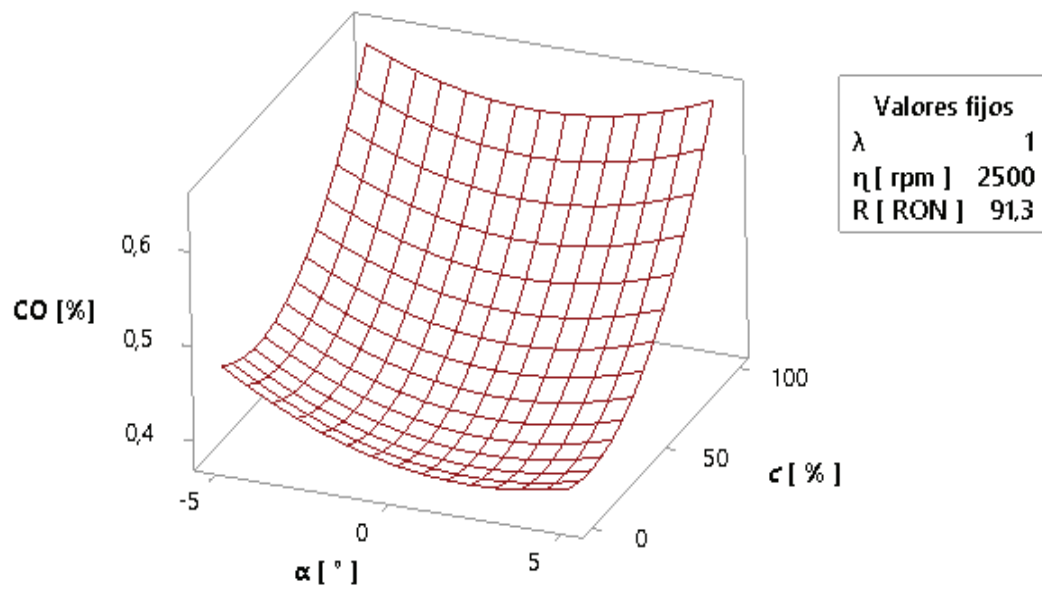
**ANEXOS A**  
**FIGURAS**



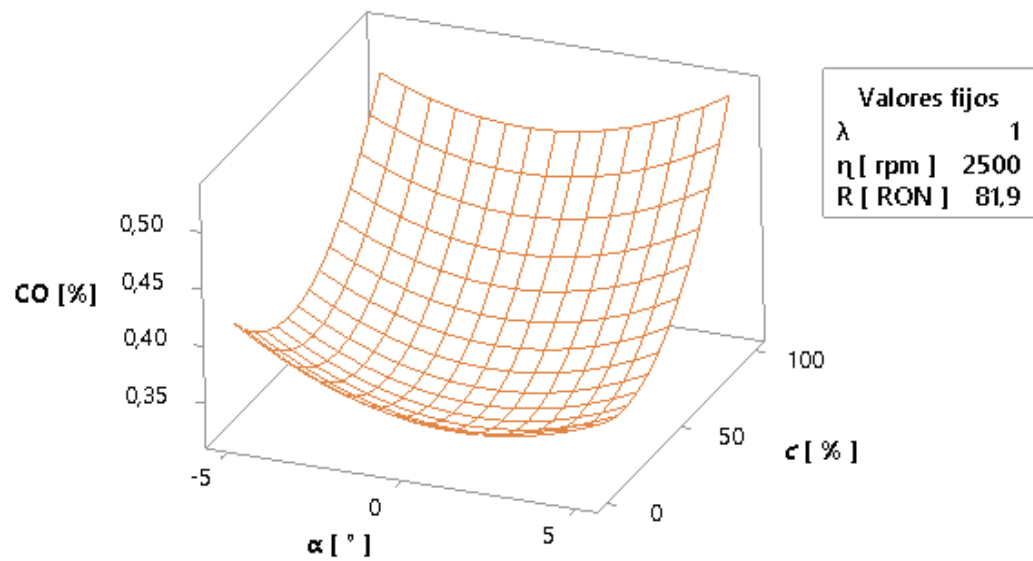
*Figura A-1 Emisión de CO vs  $\lambda$  y  $\alpha$  para gasolina súper*



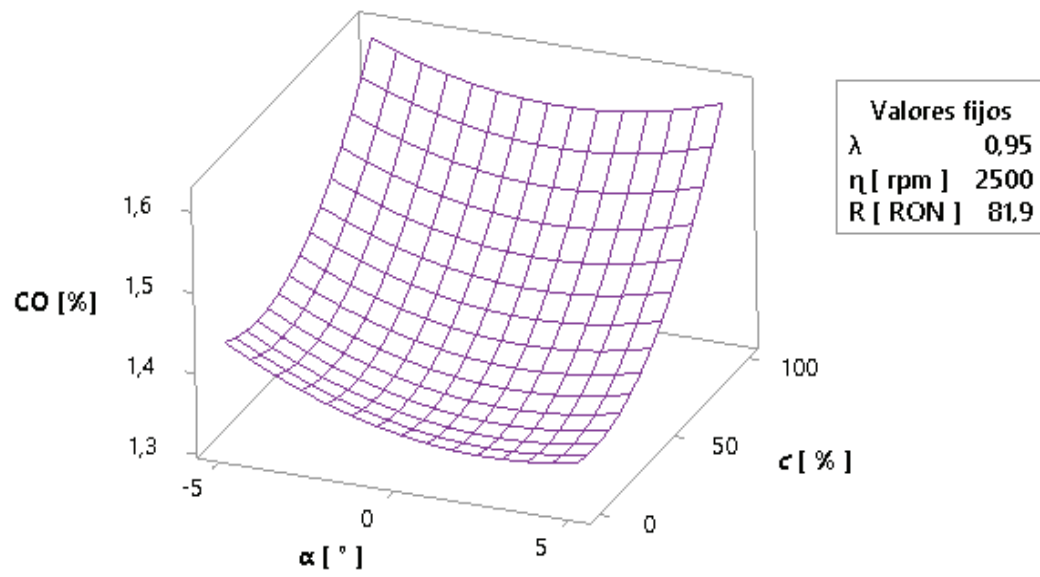
**Figura A-2 Emisión de CO vs  $\lambda$  y  $\alpha$  para gasolina extra**



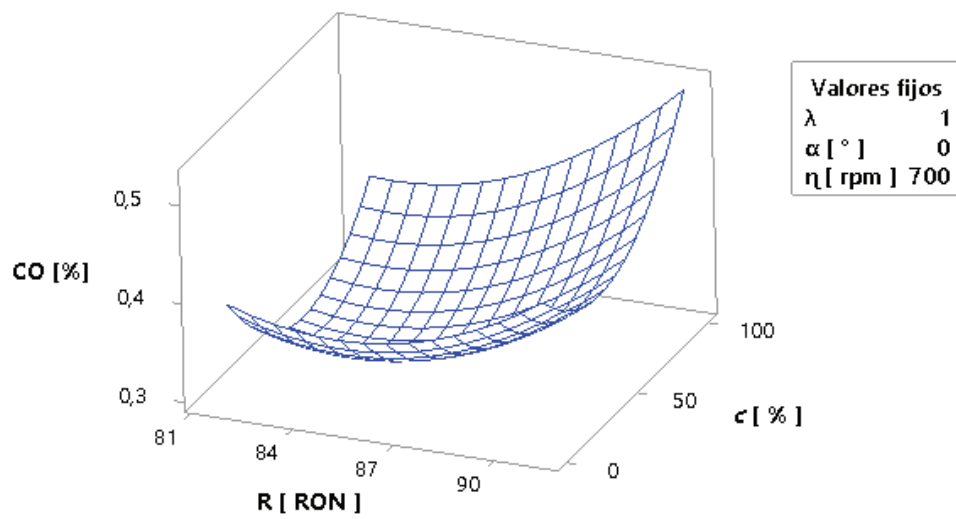
**Figura A-3 Emisión de CO vs  $\alpha$  y  $\phi$  para gasolina súper**



**Figura A-4 Emisión de CO vs  $\alpha$  y  $\phi$  para gasolina extra**



**Figura A-5 Emisión de CO vs  $\alpha$  y  $c$  para gasolina extra 2500 rpm**



**Figura A-6 Emisión de CO vs  $c$  y RON ralenti**

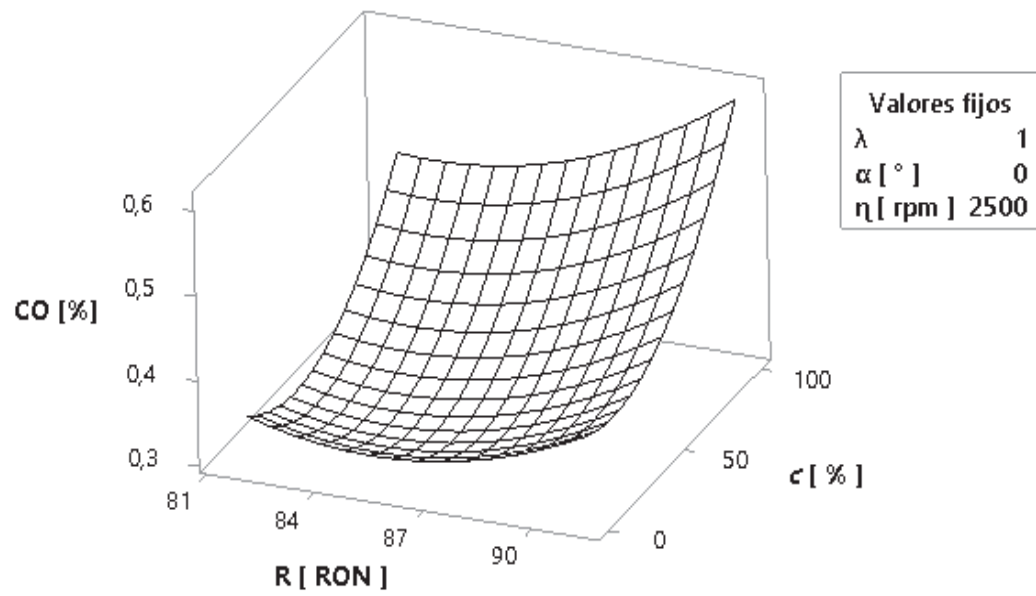


Figura A-7 Emisión de CO vs  $c$  y RON 2500 rpm

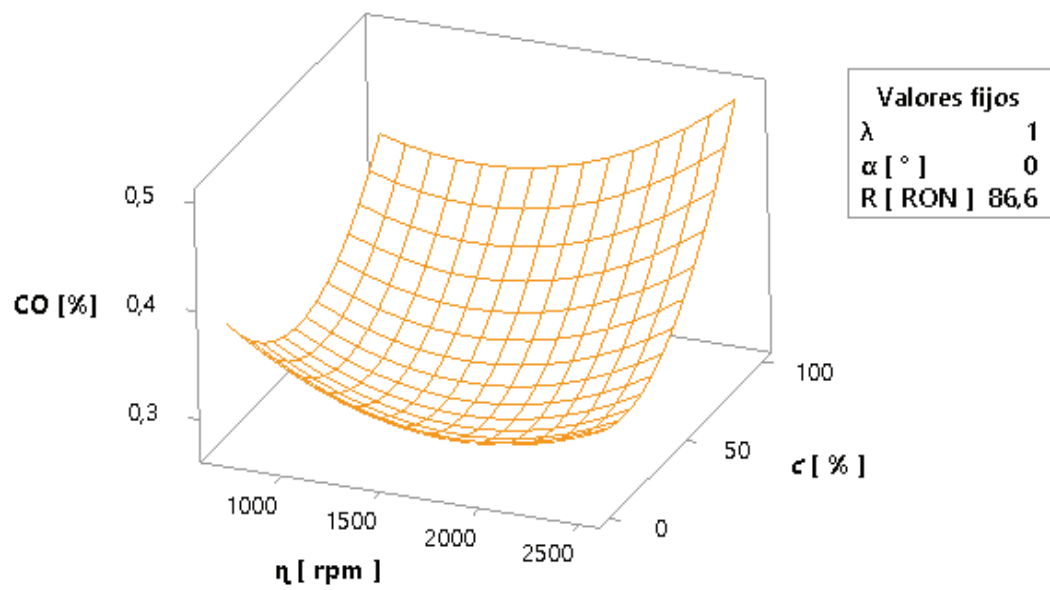


Figura A-8 Emisión de CO vs  $\eta$  y  $c$  para mezcla de combustibles



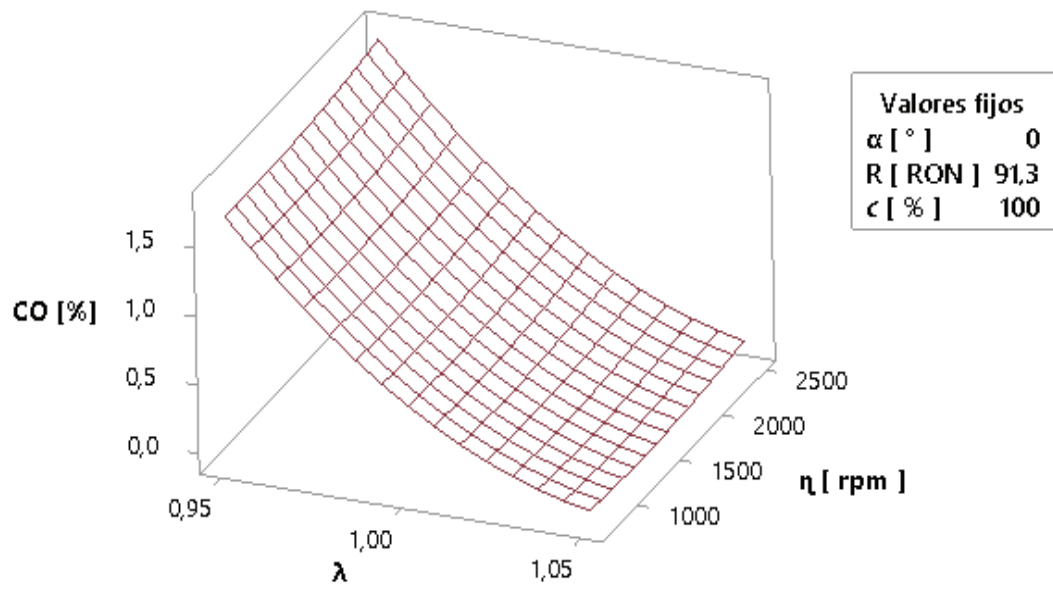


Figura A-9 Emisión de CO vs  $\lambda$  y  $\eta$  para gasolina súper

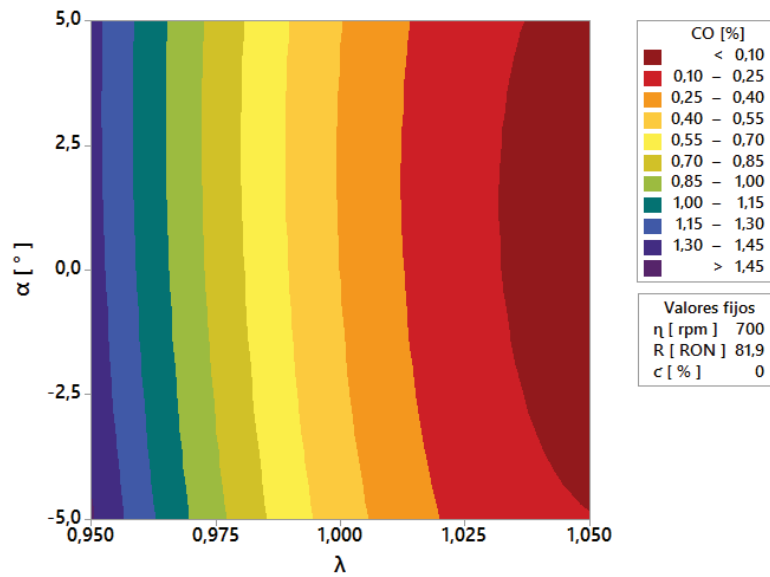


Figura A-10 Emisión de CO vs  $\lambda$  y  $\alpha$  para gasolina extra

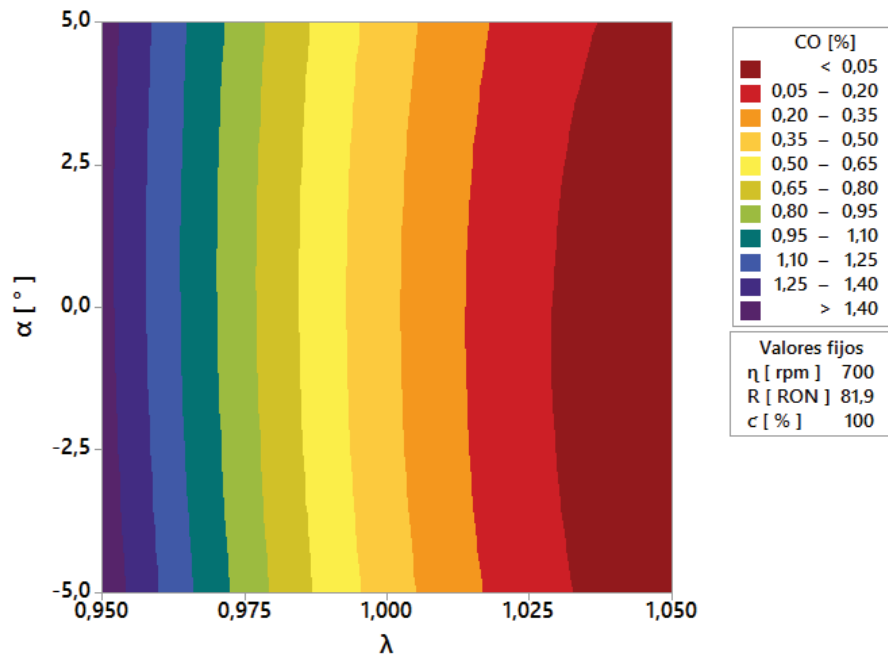


Figura A-11 Emisión de CO vs  $\lambda$  y  $\alpha$  para gasolina súper

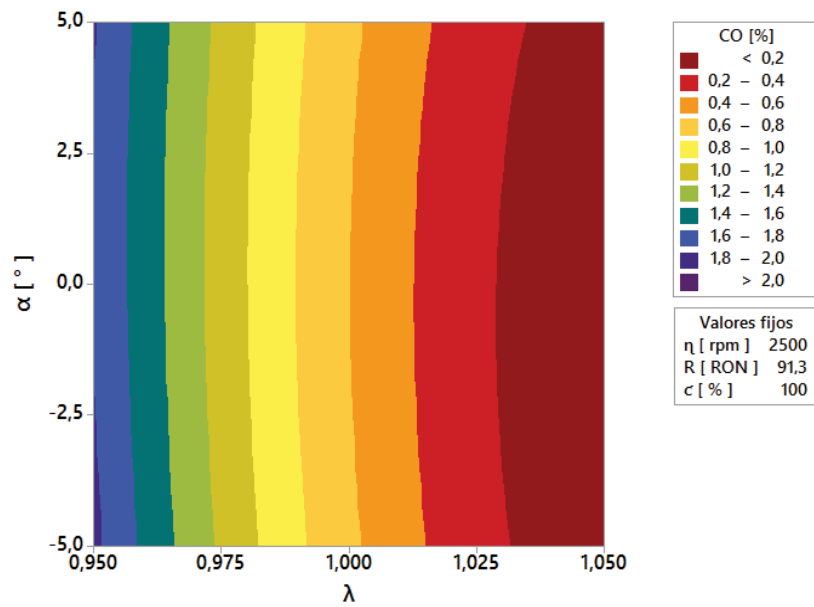
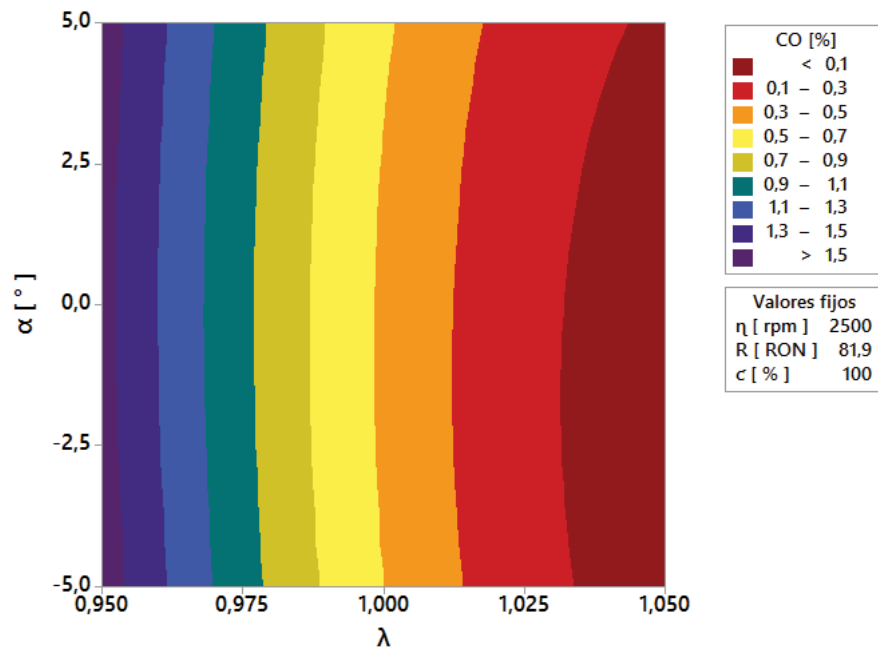
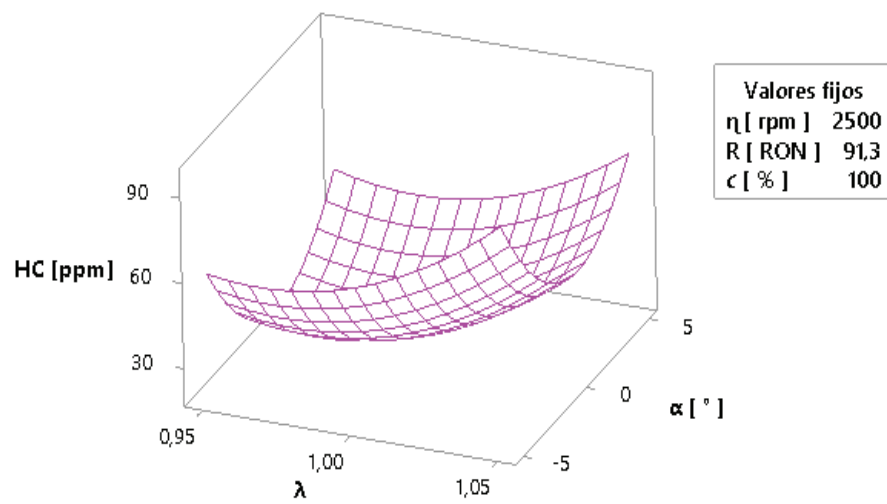


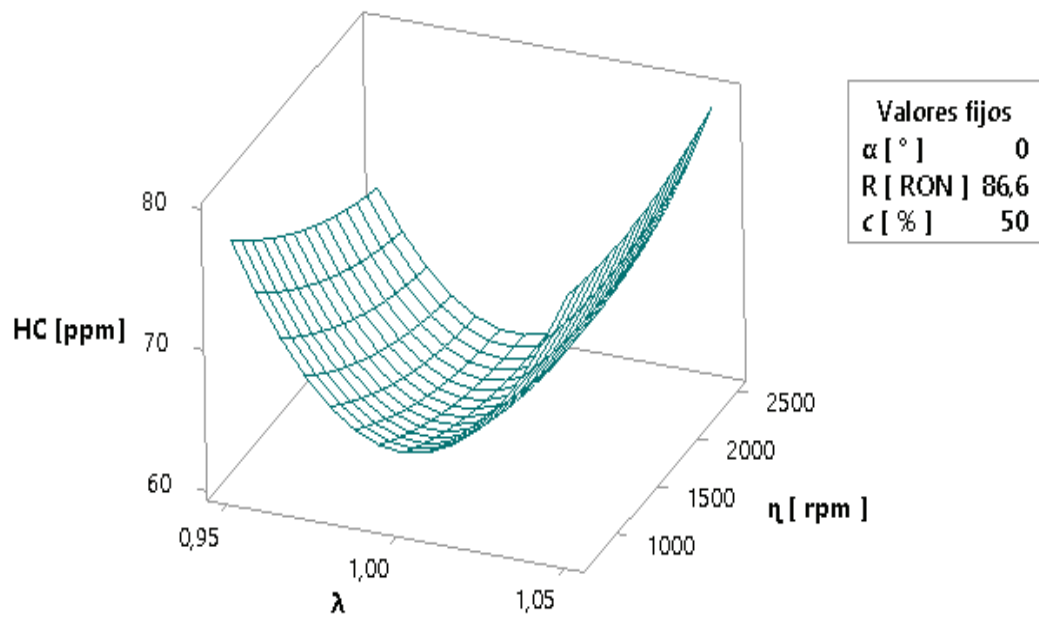
Figura A-12 Emisión de CO vs  $\lambda$  y  $\alpha$  para gasolina extra 2500 rpm



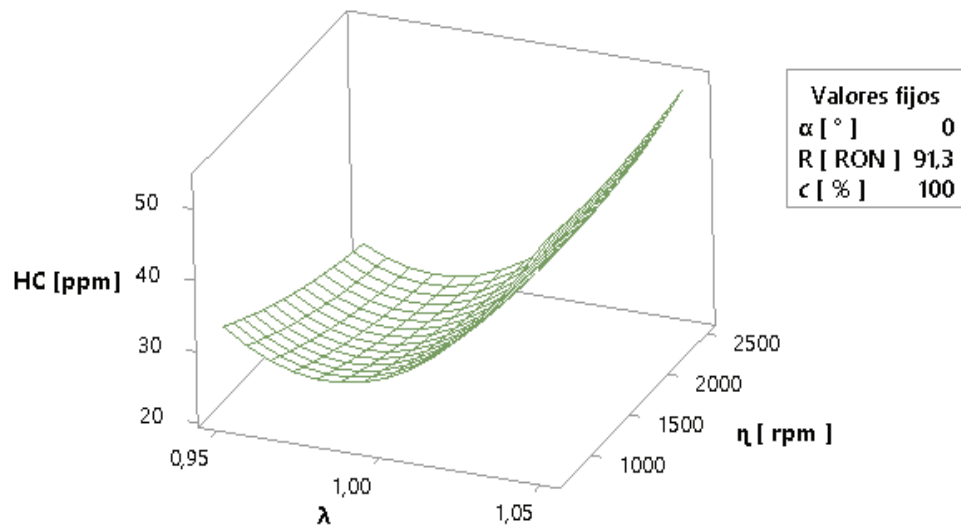
**Figura A-13 Emisión de CO vs  $\lambda$  y  $\alpha$  para gasolina súper 2500 rpm**



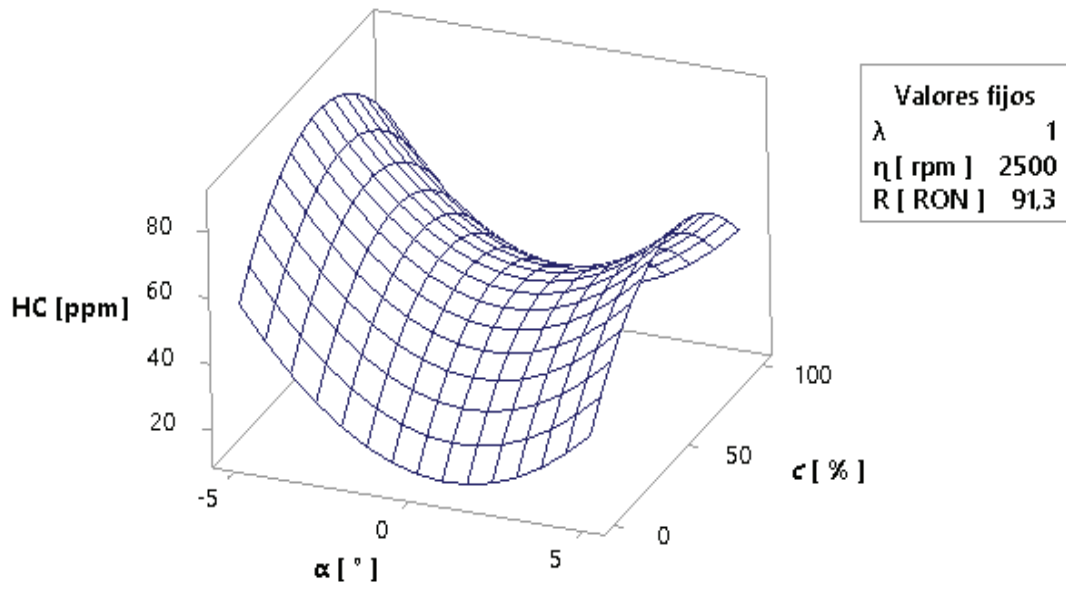
**Figura A-14 Emisión de HC vs  $\lambda$  y  $\alpha$  para gasolina súper**



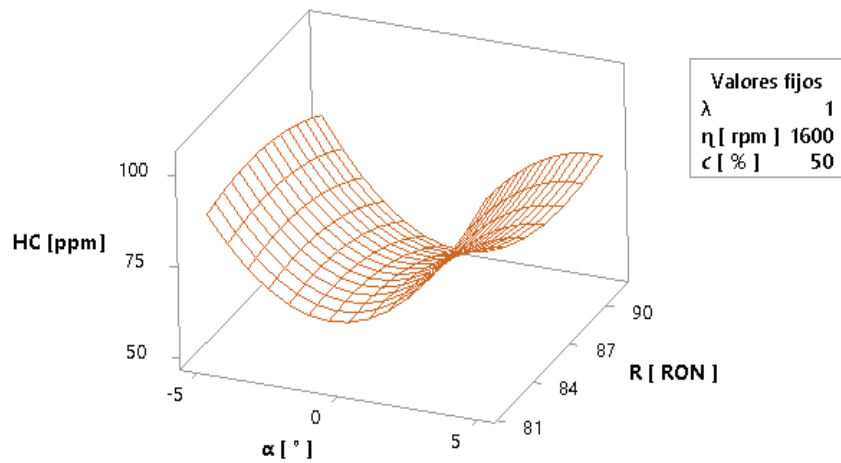
**Figura A-15 Emisión de HC vs  $\lambda$  y  $\alpha$  para mezcla de combustibles**



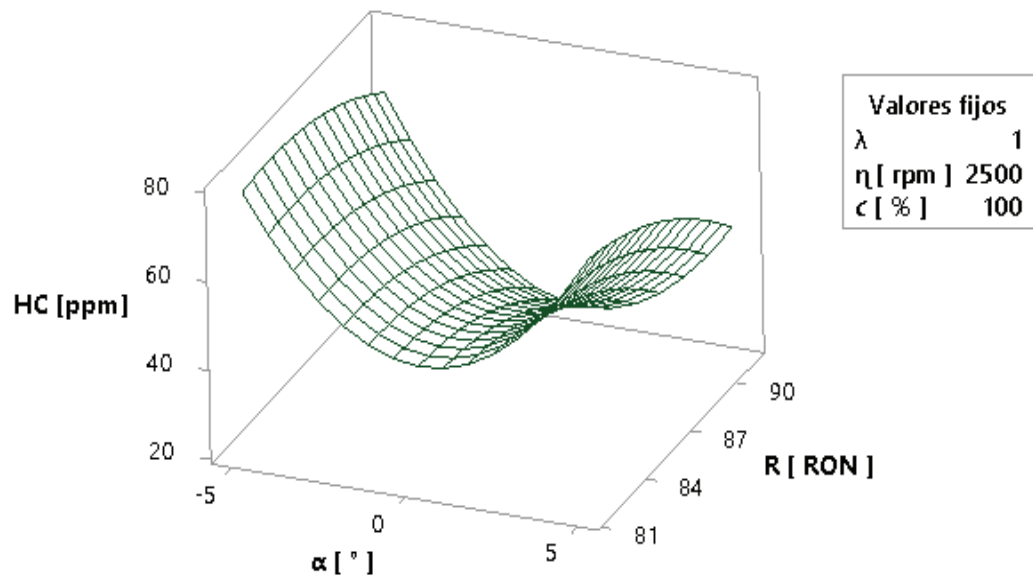
**Figura A-16 Emisión de HC vs  $\lambda$  y  $\eta$  para gasolina súper**



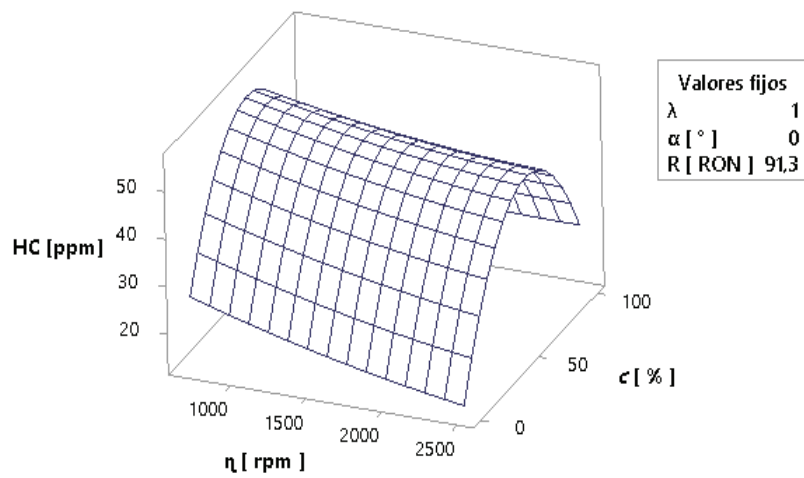
**Figura A-17 Emisión de HC vs  $\alpha$  y  $c$  para gasolina súper**



**Figura A-18 Emisión de HC vs  $\alpha$  y RON**



**Figura A-19 Emisión de HC vs  $\alpha$  y RON 2500 rpm**



**Figura A-20 Emisión de HC vs  $n$  y  $c$  para gasolina súper**

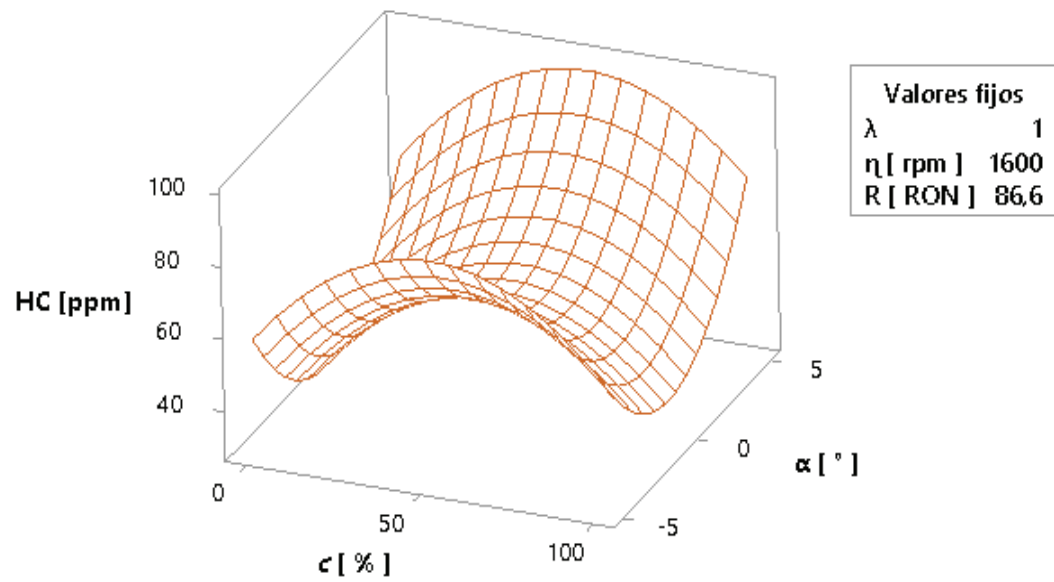


Figura A-21 Emisión de HC vs  $c$  y  $\alpha$  para mezclas de combustibles

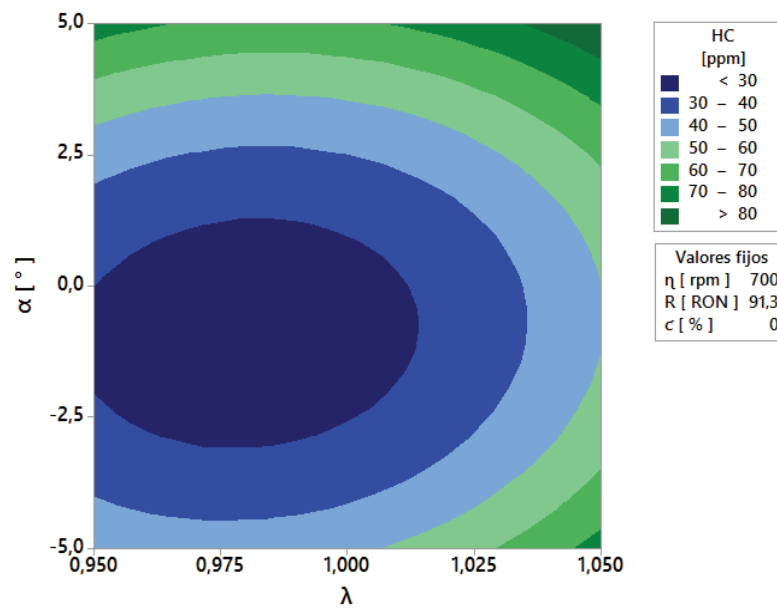


Figura A-22 Emisión de HC vs  $\lambda$  y  $\alpha$  para gasolina súper

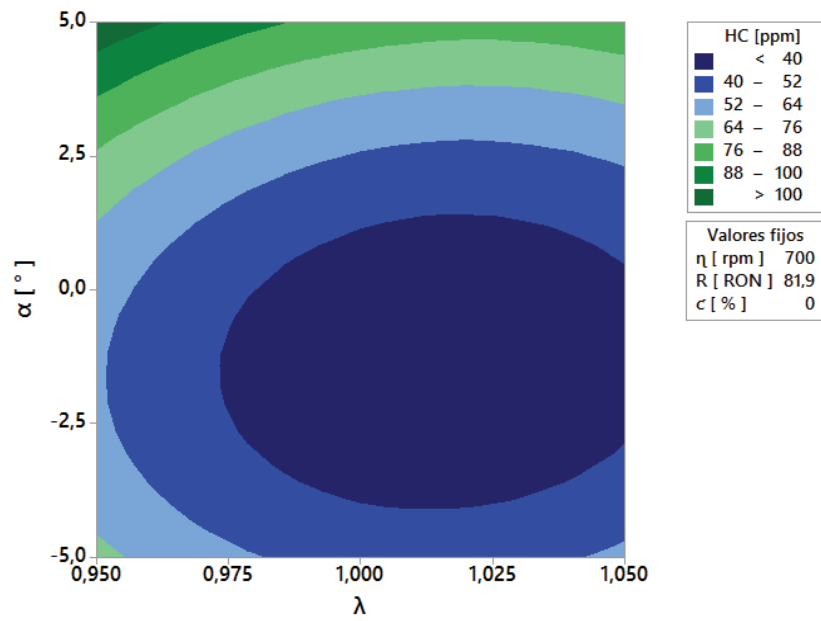


Figura A-23 Emisión de HC vs  $\lambda$  y  $\alpha$  para gasolina extra

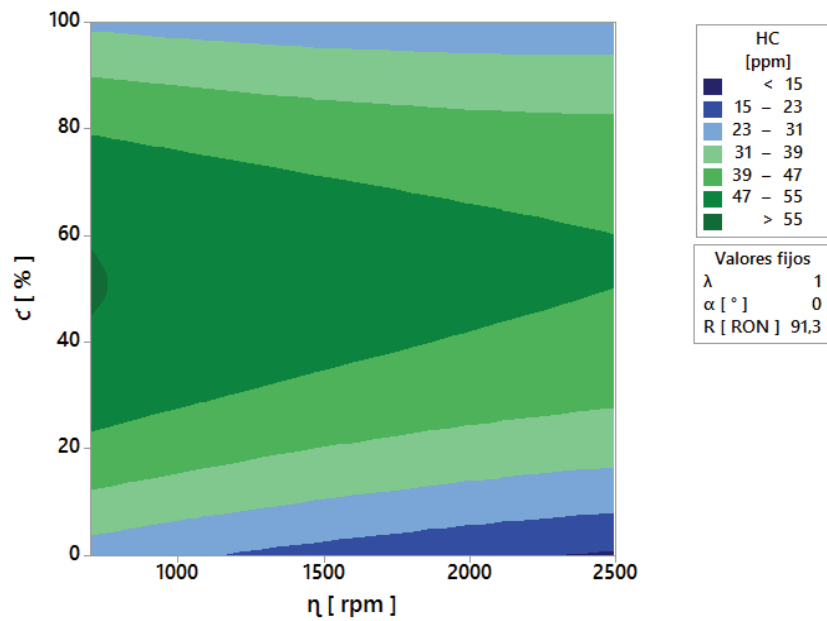
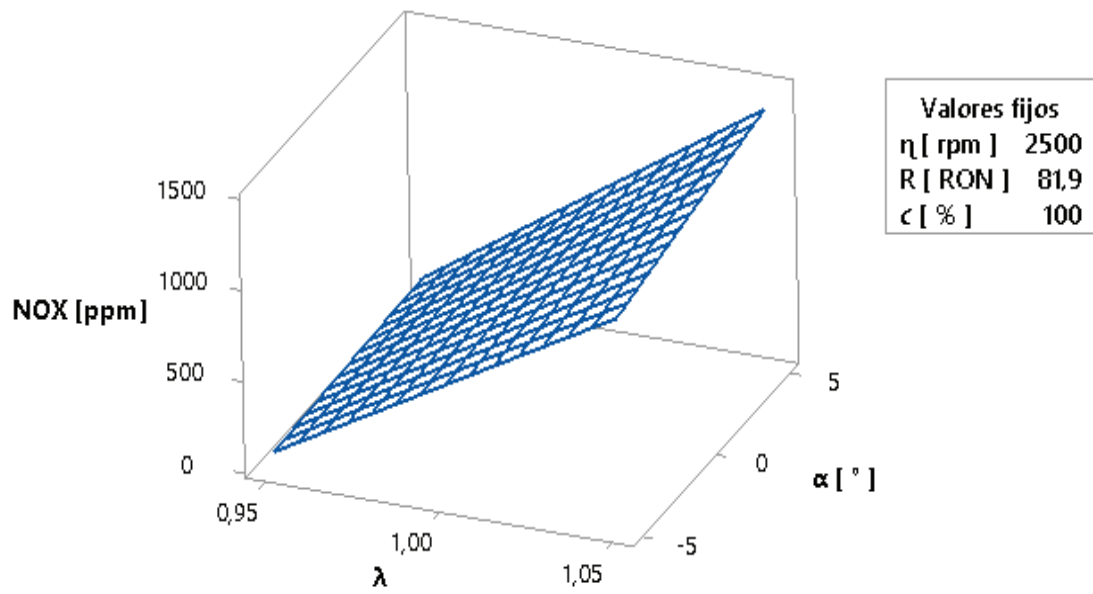
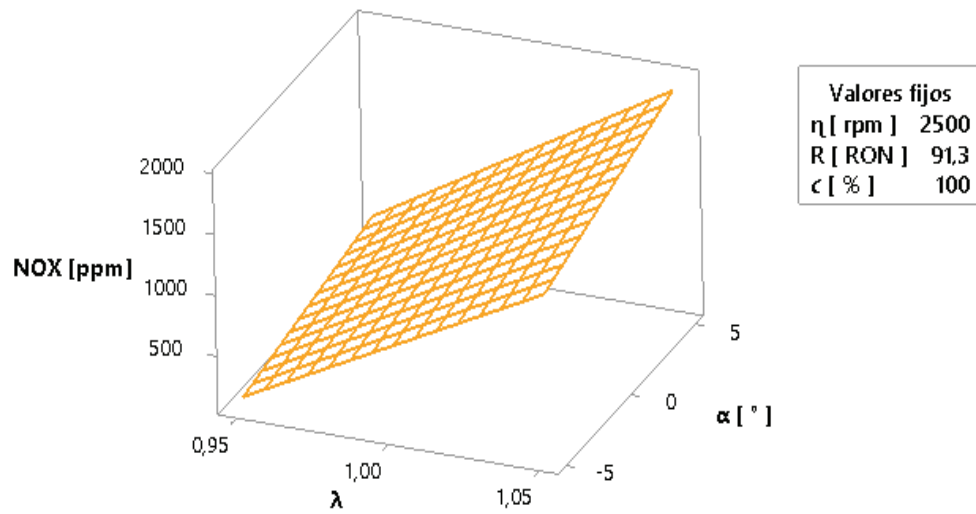


Figura A-24 Emisión de HC vs  $c$  y  $\eta$  para gasolina súper





**Figura A-25 Emisión de NOx vs  $\lambda$  y  $\alpha$  para gasolina extra**



**Figura A-26 Emisión de NOx vs  $\lambda$  y  $\alpha$  para gasolina súper**

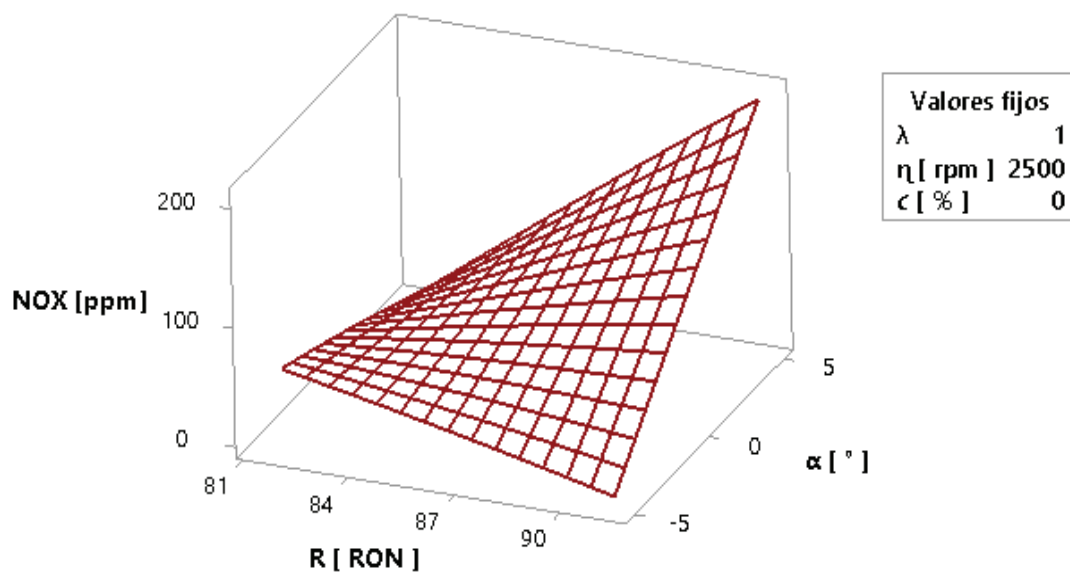


Figura A-27 Emisión de NOx vs RON y  $\alpha$

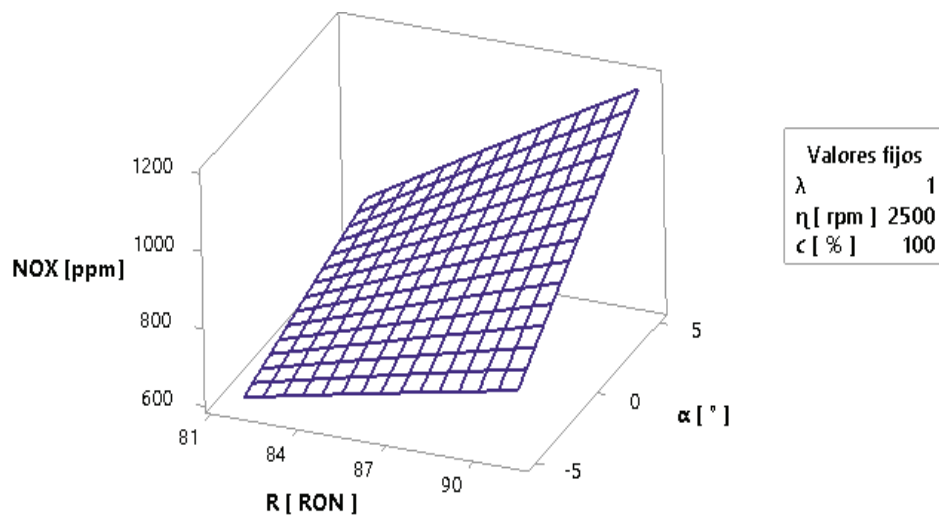


Figura A-28 Emisión de NOx vs RON y  $\alpha$

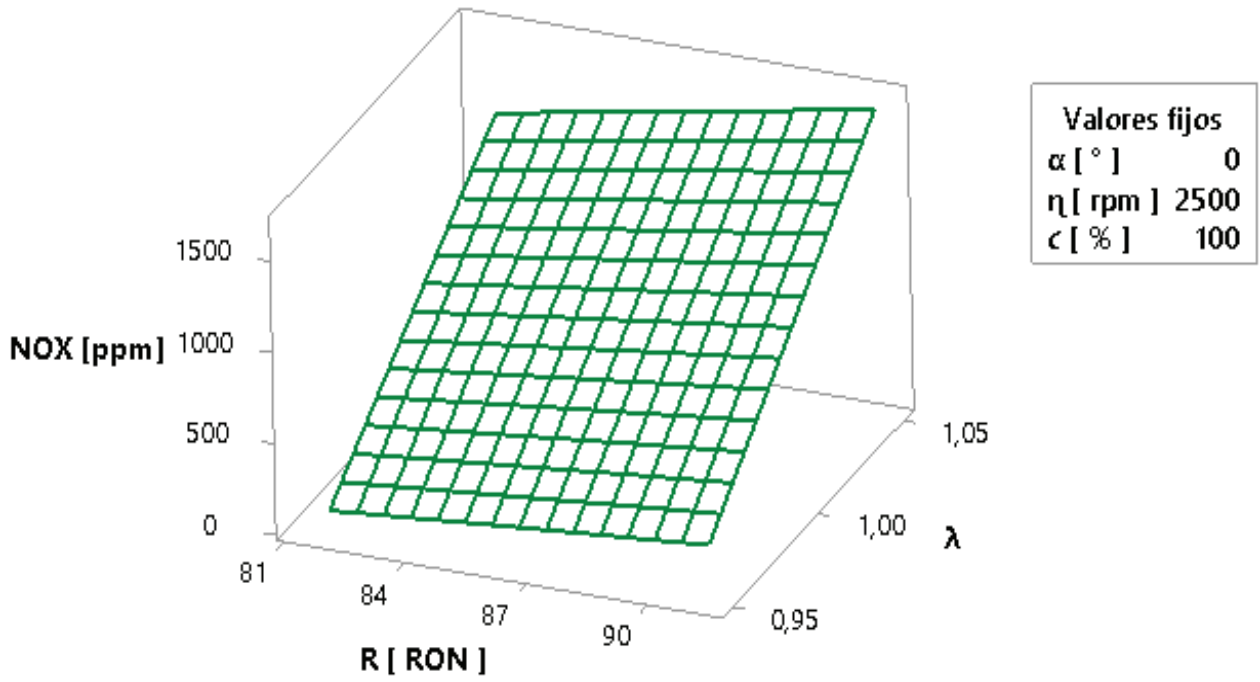


Figura A-29 Emisión de NOx vs RON y  $\lambda$  2500 rpm

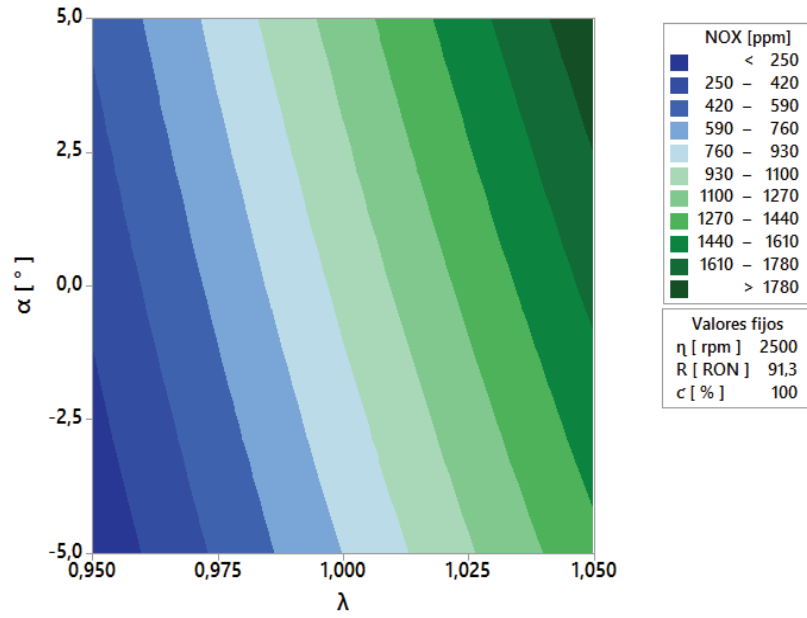


Figura A-30 Emisión de NOx vs  $\lambda$  y  $\alpha$  para gasolina súper

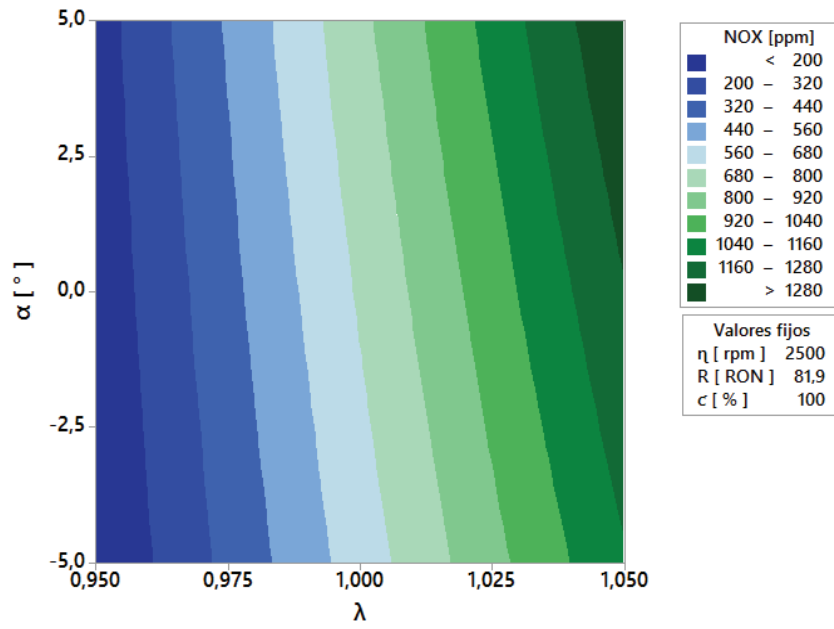


Figura A-31 Emisión de NOx vs  $\lambda$  y  $\alpha$  para gasolina extra

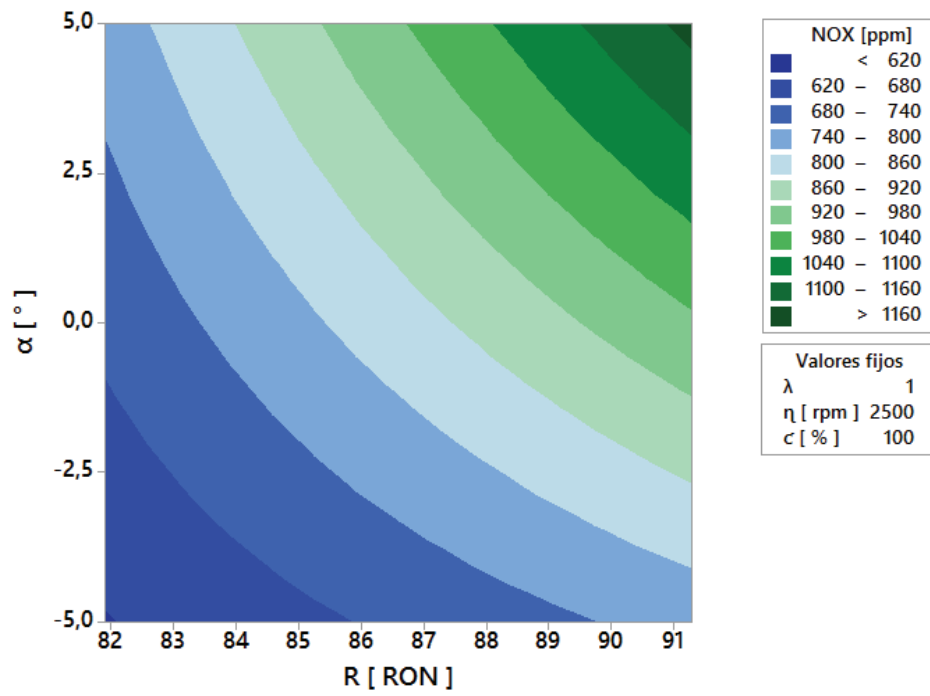


Figura A-32 Emisión de NOx vs  $\alpha$  y RON

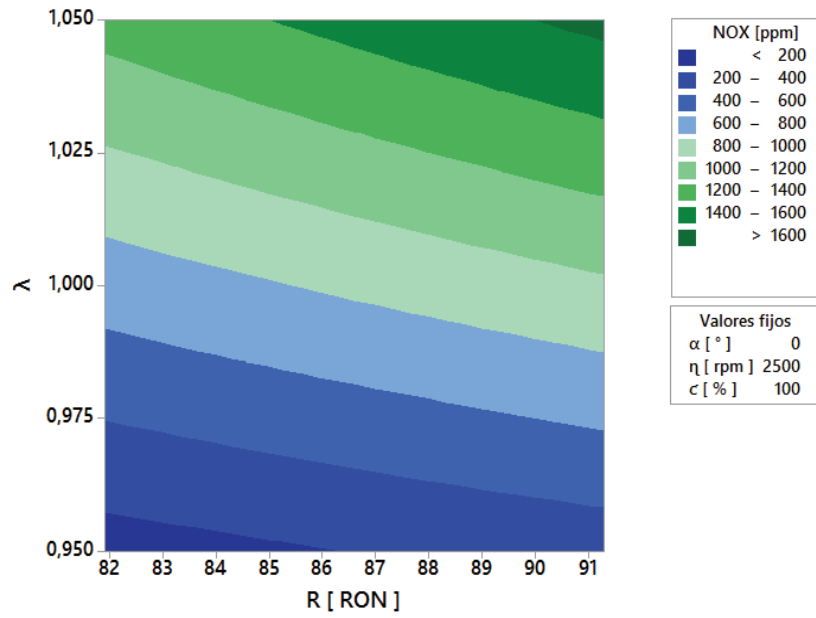


Figura A-33 Emisión de NOx vs  $\lambda$  y RON

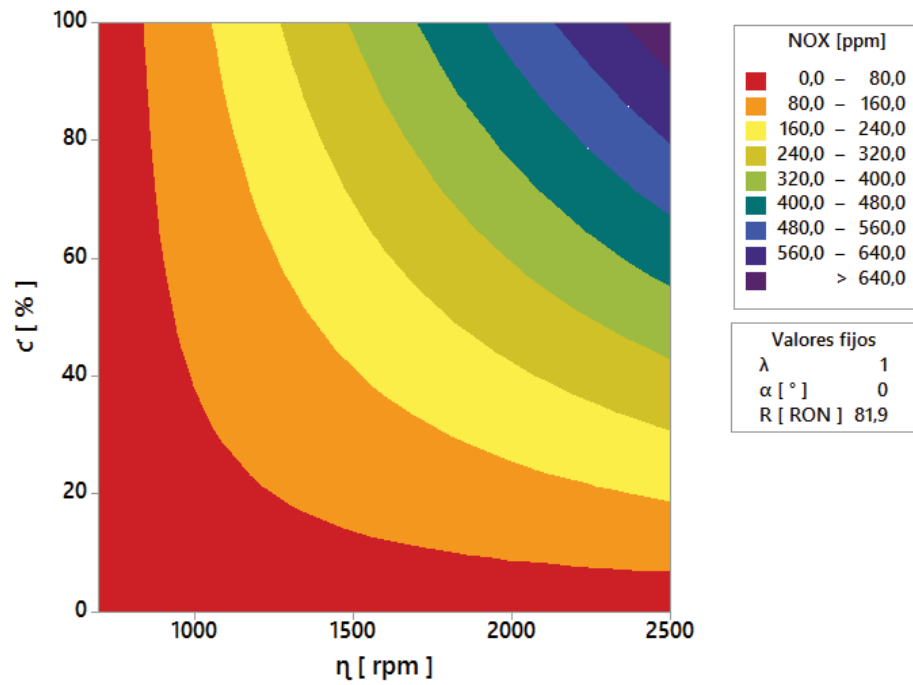


Figura A-34 Emisión de NOx vs  $\eta$  y  $c$  para gasolina extra

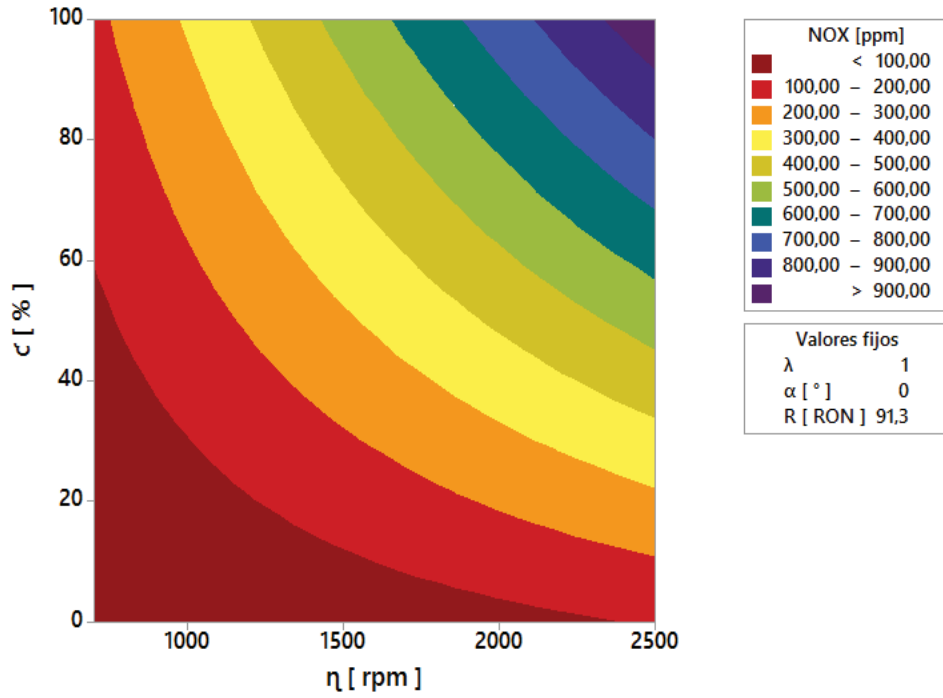


Figura A-35 Emisión de NOx vs  $\eta$  y  $c$  para gasolina súper

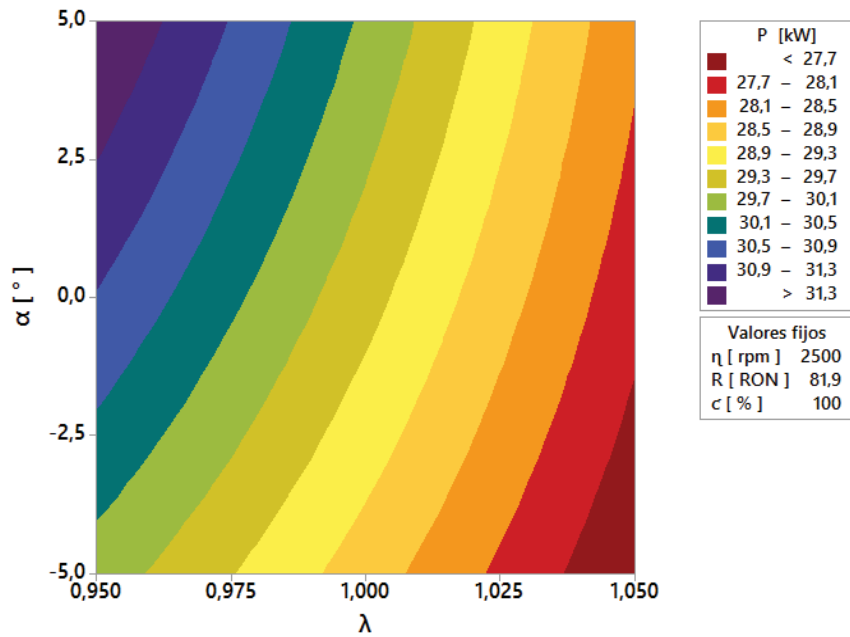


Figura A-36 Potencia vs  $\lambda$  y  $\alpha$  para gasolina extra

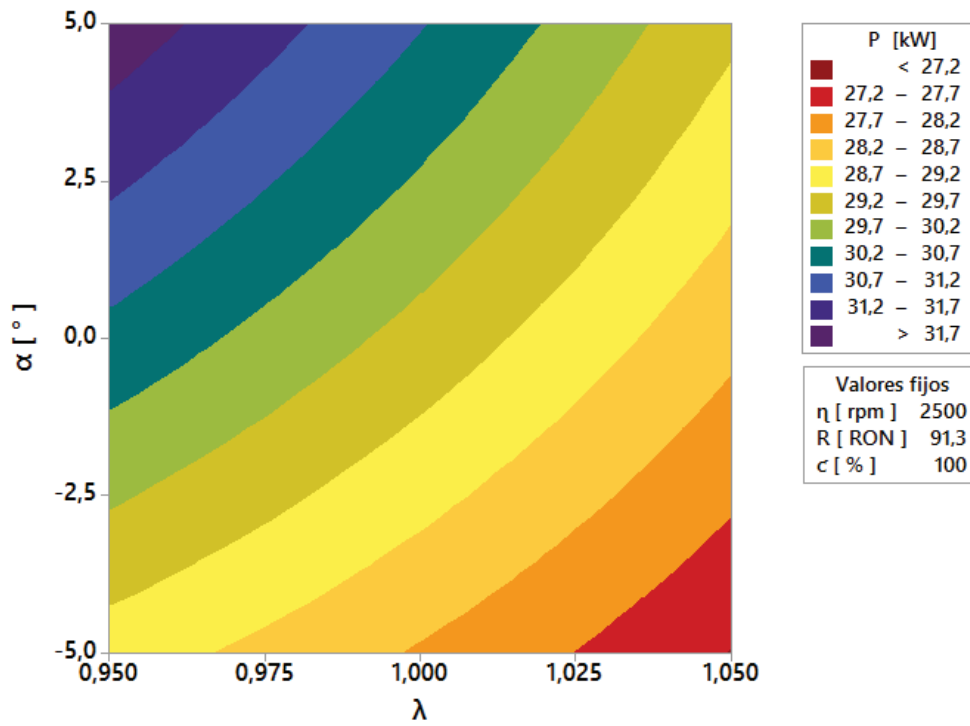


Figura A-37 Potencia vs  $\lambda$  y  $\alpha$  para gasolina súper

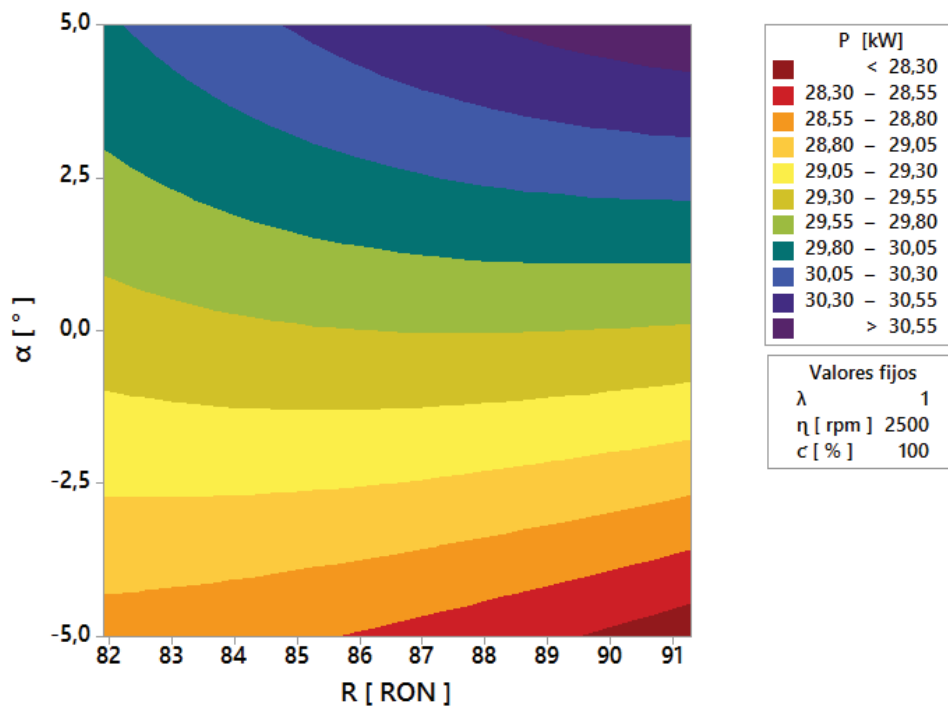


Figura A-38 Potencia vs  $\alpha$  y RON

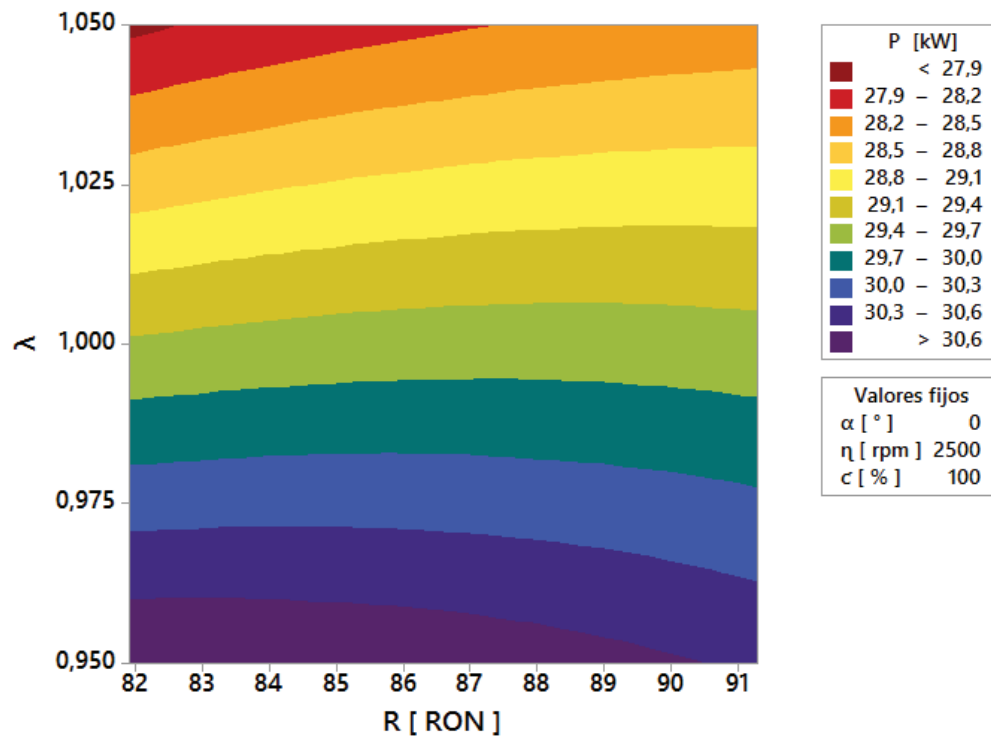


Figura A-39 Potencia vs  $\lambda$  y RON



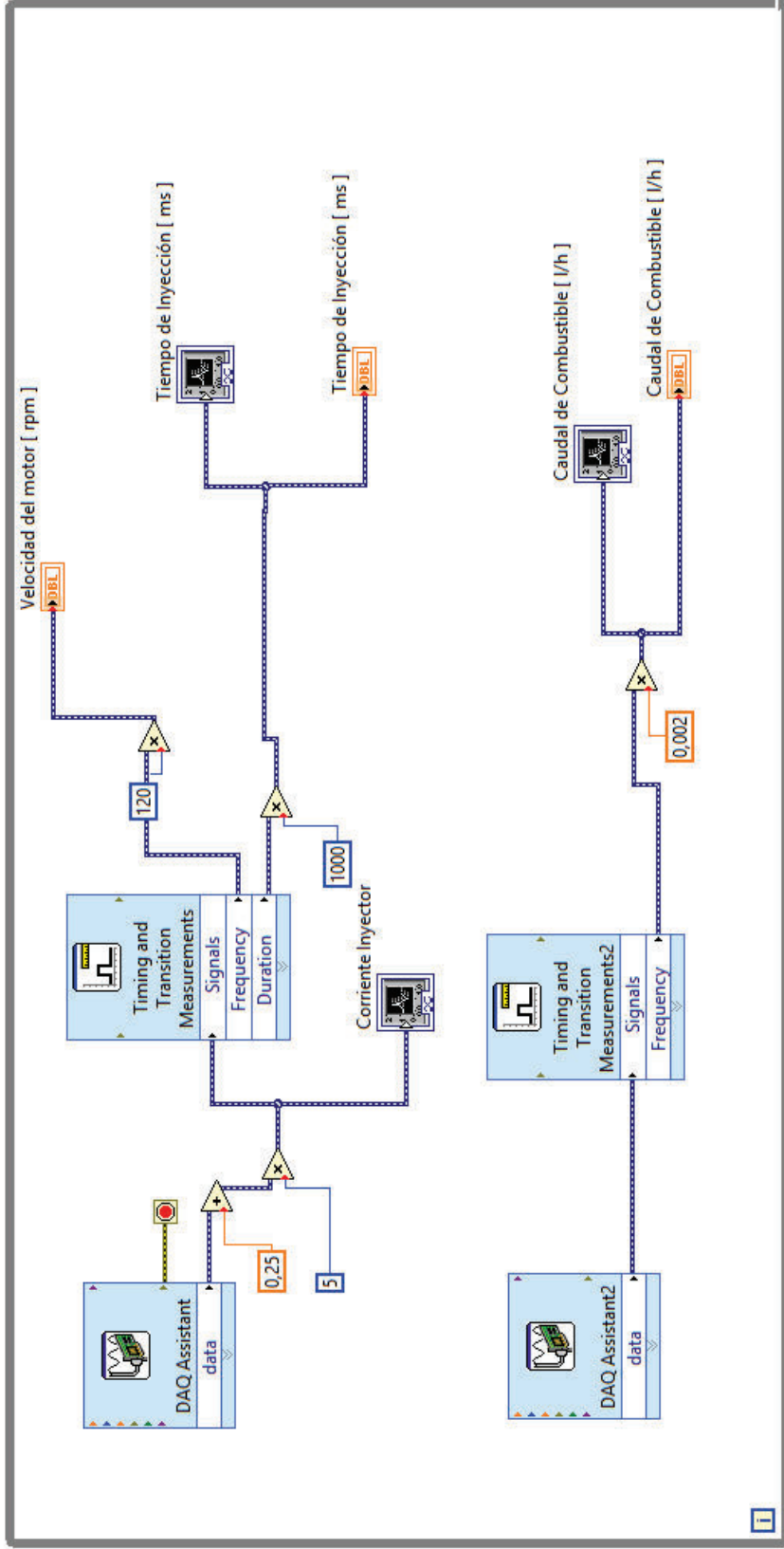


Figura A-40 Instrumento virtual para la medición del tiempo de inyección y flujo de combustible

**ANEXOS B**  
**TABLAS**

**Tabla B-1 Resultados relativos de optimización gasolina súper**

$n$ [ rpm ]	$c'$ [ rpm ]	P [ % ]	F [ % ]	CO [ % ]	HC [ % ]	Nox [ % ]	O <sub>2</sub> [ % ]	CO <sub>2</sub> [ % ]	Cesp [ % ]	c [ % ]	tiny [ % ]
700	0	-0,4545	-0,0700	-68,1818	7,4074	0,0000	11,6883	-1,2616	-0,6473	-1,0989	-3,7976
1600	0	0,0000	0,0000	-83,7838	10,0000	2,1739	5,4054	-1,1243	-0,9302	-0,9302	-2,7394
2500	0	0,0000	0,0000	-82,0513	28,5714	2,8302	4,8193	-0,8632	-0,1909	-1,1730	-4,8646
700	50	0,0000	0,0000	-60,0000	7,1429	-3,6585	2,9851	-0,4590	0,7647	-1,4286	-2,3114
1600	50	0,1263	0,1263	-69,5652	-10,2941	-2,9221	6,2500	-0,4593	-0,7760	-0,6508	-2,0340
2500	50	0,1980	0,1980	-22,2222	0,0000	-2,2364	3,1250	-0,5249	-0,5752	-1,7660	-0,8157
700	100	0,0000	0,0000	-26,9231	3,4483	0,5650	-1,4706	-2,0235	0,4390	2,0833	-0,5764
1600	100	0,7973	0,7973	-37,2549	14,8148	-5,7292	1,5385	-1,6415	-0,5031	0,2903	-0,9133
2500	100	1,5927	1,5927	23,3333	-8,0000	-5,8702	1,7857	-0,1999	-1,0493	0,5267	0,3491

**Tabla B-2 Resultados relativos de optimización gasolina extra**

$\eta$ [ rpm ]	$c'$ [ rpm ]	P [ % ]	F [ % ]	CO [ % ]	HC [ % ]	Nox [ % ]	O <sub>2</sub> [ % ]	CO <sub>2</sub> [ % ]	Cesp [ % ]	c [ % ]	tiny [ % ]
700	0	-9,0909	-3,5714	-40,909	11,1111	0	15,5842	-0,3320	1,190547	0,549451	-0,65596
1600	0	-2,0408	-2,8574	-2,702	20	-4,3478	-1,3513	-0,1984	1,625135	1,395349	-3,08197
2500	0	-1,6949	-3,0303	-2,5641	0	-7,5471	-1,20482	-0,3320	1,025637	1,759531	-2,59063
700	50	-4,8780	-1,9238	-2,5	3,57149	-2,4392	-4,47761	-0,7868	3,186235	5,714286	0,819517
1600	50	-0,2525	-0,4819	-4,3478	2,941176	-2,2727	-1,5625	-1,3779	2,260551	1,301518	1,736287
2500	50	-0,5280	-0,2439	-2,7777	14	-1,9169	1,5625	-0,7874	3,809379	1,324503	-3,22113
700	100	-2,3805	-1,5151	-1,9230	20,6896	-10,734	1,470588	-1,5668	4,56333	6,25	-0,3139
1600	100	-0,7973	-0,1288	-15,686	48,14815	-42,534	-1,53846	-0,9192	2,554347	2,75762	-0,27668
2500	100	-0,1355	-0,2031	-15	76	-31,925	5,357143	-0,3993	4,011453	3,987961	2,440098

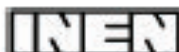
Tabla B-3 Resultados absolutos de la optimización

λ	FACTORES										VARIABLES DE SALIDA MEDIDAS										VARIABLES DE SALIDA CALCULADAS										ERROR %									
	α [°]	η [rpm]	R [RON]	ϕ [%]	P [kW]	F [N]	CO [%]	HC [ppm]	NOx [ppm]	O2 [%]	CO2 [%]	Cesp [kg/kwh]	c [l/h]	tiny [ms]	P [kW]	F [N]	CO [%]	HC [ppm]	NOx [ppm]	O2 [%]	CO2 [%]	Cesp [kg/kwh]	c [l/h]	tiny [ms]	F	CO	HC	NOx	O2	CO2	Cesp	ϕ								
MOTOR ORIGINAL	1	0	700	91,3	0	0,22	28	0,44	27	1	0,77	15,06	5,906	0,91	2,13	0,21	27	0,42	27	1	0,75	15,22	5,913	0,905	-2,81	-2,87	-3,71	0,62	0,76	-2,03	1,07	0,13	-0,52							
	1	0	1600	91,3	0	0,49	35	0,37	20	46	0,74	15,12	5,533	2,15	2,53	0,49	35	0,36	20	46	0,74	15,32	5,485	2,109	0,86	0,87	-1,60	-2,46	0,03	0,27	1,30	-0,87	-1,92							
	1	0	2500	91,3	0	0,59	33	0,39	14	106	0,83	15,06	6,825	3,41	2,72	0,60	34	0,39	14	109	0,83	14,85	6,750	3,350	1,79	1,83	0,21	-1,53	-2,53	-0,09	-1,39	-1,10	-1,75							
	1	0	700	91,3	50	0,41	52	0,4	56	82	0,67	15,25	1,255	0,7	2,57	0,41	52	0,39	57	80	0,68	15,42	1,234	0,714	0,70	0,71	-1,35	1,20	-2,53	2,12	1,13	-1,74	1,94							
	1	0	1600	91,3	50	7,92	415	0,46	68	308	0,64	15,24	0,442	4,61	4,28	7,93	416	0,45	68	305	0,66	15,11	0,451	4,649	0,13	0,13	-2,89	0,09	-1,07	3,48	-0,85	1,94	0,85							
	1	0	2500	91,3	50	15,15	410	0,36	50	313	0,64	15,24	0,263	4,53	5,76	15,17	411	0,37	50	321	0,67	15,35	0,273	4,700	0,14	0,14	1,58	-0,25	2,48	4,67	0,74	3,87	3,75							
MOTOR ORIGINAL	1	0	700	91,3	100	0,42	66	0,52	29	177	0,68	15,32	2,191	0,48	3,65	0,42	65	0,54	29	174	0,67	15,19	2,260	0,481	-1,08	-1,10	2,97	-0,75	-1,42	-2,02	-0,83	3,11	0,14							
	1	0	1600	91,3	100	15,05	776	0,51	27	576	0,65	15,23	0,578	6,89	6,66	15,03	775	0,50	27	581	0,65	14,87	0,582	6,687	-0,11	-0,11	-1,69	-1,23	0,84	-0,57	-2,38	0,59	-2,95							
	1	0	2500	91,3	100	29,51	1477	0,6	25	971	0,56	15,01	0,342	13,29	9,45	29,18	1460	0,61	25	983	0,56	15,29	0,342	13,130	-1,13	-1,16	1,41	-0,73	1,20	0,58	1,85	-0,21	-1,20							
OPTIMIZACIÓN	1,025	0,750	700	91,3	0	0,219	28	0,14	29	1	0,86	14,87	5,867	0,9	2,05	0,22	28	0,14	29	1	0,86	15,14	5,816	0,917	0,84	0,86	0,29	0,01	0,86	-0,14	1,81	-0,88	1,87							
	1,038	1,650	1600	91,3	0	0,49	35	0,06	22	47	0,78	14,95	5,482	2,13	2,36	0,49	35	0,06	22	48	0,77	14,80	5,696	2,116	-0,58	-0,60	3,00	1,08	1,55	-0,91	-0,99	3,90	-0,67							
	1,026	2,550	2500	91,3	0	0,59	33	0,07	18	109	0,87	14,93	6,812	3,37	2,58	0,59	33	0,07	18	110	0,90	15,13	7,033	3,276	-0,32	-0,32	0,53	-1,28	0,96	3,33	1,36	3,25	-2,78							
	1,017	0,955	700	91,3	50	0,41	52	0,16	60	79	0,69	15,18	1,265	0,69	2,51	0,42	53	0,16	58	75	0,69	15,18	1,284	0,664	2,24	2,29	-0,51	-3,76	-4,60	-0,36	0,00	1,52	-3,72							
	1,025	0,955	1600	91,3	50	7,93	416	0,14	61	299	0,68	15,17	0,439	4,58	4,19	7,95	417	0,14	62	293	0,71	15,23	0,437	4,597	0,24	0,24	-1,88	2,13	-2,09	3,84	0,39	-0,47	0,36							
	1,009	1,855	2500	91,3	50	15,18	411	0,28	50	306	0,66	15,16	0,261	4,45	5,71	15,56	421	0,29	50	309	0,64	15,12	0,261	4,581	2,49	2,54	3,69	0,12	1,09	-3,20	-0,24	0,05	2,95							
	1,012	0,260	1600	91,3	100	15,17	782	0,32	31	543	0,66	14,98	0,575	6,91	6,60	15,00	773	0,33	31	539	0,65	14,79	0,565	6,941	-1,12	-1,13	1,70	1,60	-0,66	-1,24	-1,85	0,45								
	0,992	1,160	2500	91,3	100	29,98	1501	0,74	23	914	0,57	14,98	0,339	13,36	9,48	29,84	1493	0,72	23	915	0,57	14,93	0,352	13,278	-0,48	-0,48	-2,08	1,28	0,11	-0,76	-0,32	4,07	-0,62							
OPTIMIZACIÓN	1,032	1,565	700	81,9	0	0,2	27	0,26	30	1	0,89	15,01	5,976	0,915	2,15	0,20	27	0,26	30	1	0,90	15,25	6,021	0,904	1,80	1,81	-0,26	-0,01	-0,76	0,88	1,58	0,75	-1,17							
	1,033	-0,918	1600	81,9	0	0,48	34	0,36	24	44	0,73	15,09	5,623	2,18	2,55	0,47	34	0,36	24	45	0,73	15,05	5,691	2,194	-1,40	-1,41	0,91	1,42	2,91	-0,15	-0,26	1,22	0,66							
	1,028	-0,270	2500	81,9	0	0,58	32	0,38	14	98	0,82	15,01	6,895	3,47	2,47	0,58	32	0,38	14	98	0,81	14,45	6,626	3,474	0,21	0,21	1,17	-3,13	-0,19	-1,57	-0,73	-3,90	0,11							
	1,021	-1,118	700	81,9	50	0,39	51	0,39	58	80	0,64	15,13	1,295	0,74	2,59	0,41	54	0,39	57	83	0,64	15,00	1,314	0,755	5,29	5,35	1,07	-1,62	3,72	0,35	-0,84	1,44	2,08							
	1,017	-0,562	1600	81,9	50	7,9	413	0,44	70	301	0,63	15,03	0,452	4,67	4,05	7,96	416	0,43	70	294	0,62	15,51	0,448	4,870	0,70	0,71	-1,75	-0,46	-2,21	-1,10	3,20	-1,05	4,28							
	1,013	-0,006	2500	81,9	50	15,07	409	0,35	57	307	0,65	15,12	0,273	4,59	5,27	14,73	400	0,36	56	305	0,67	14,86	0,278	4,472	-2,26	-2,29	2,60	-2,22	-0,81	2,38	-1,69	2,13	-2,58							
	1,005	-1,190	700	81,9	100	0,41	65	0,51	35	158	0,69	15,08	2,291	0,51	3,41	0,42	66	0,51	34	162	0,71	15,02	2,361	0,512	1,74	1,76	0,01	-2,48	2,22	3,03	-0,43	3,03	0,41							
	1,001	-0,725	1600	81,9	100	14,93	775	0,43	40	331	0,64	15,09	0,593	7,08	6,14	14,95	776	0,42	40	340	0,63	14,98	0,600	7,334	0,15	0,16	-1,29	-1,11	2,85	-1,43	-0,76	1,25	3,59							
	0,997	-0,260	2500	81,9	100	29,47	1474	0,51	44	661	0,59	14,95	0,356	13,82	8,68	28,96	1448	0,51	42	657	0,60	15,26	0,362	13,327	-1,72	-1,73	0,06	-3,76	-0,65	0,89	2,09	1,71	-3,57							

**ANEXOS C**  
**NORMA UTILIZADA**

# C-1 NORMA INEN 960 VEHÍCULOS AUTOMOTORES DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA NETA DEL MOTOR

CDU: 629-113.621.43.001-4



MC 04.01-301

Norma Técnica Ecuatoriana	VEHICULOS AUTOMOTORES. DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA NETA DEL MOTOR	INEN 960 1983-04
<p style="text-align: center;"><b>1. OBJETO</b></p> <p>1.1 Esta norma establece el método general de ensayo para motores de vehículos automotores, para evaluación de su rendimiento, con el propósito de la elaboración posterior de curvas de potencia y consumo específico de combustible a carga completa, como funciones de la velocidad de la máquina.</p> <p style="text-align: center;"><b>2. ALCANCE</b></p> <p>2.1 Esta norma se aplica a máquinas de combustión interna usadas en vehículos automotores (excluyendo motocicletas y tractores) que trafican usualmente las calles y/o carreteras, que estén incluidos dentro de las categorías siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- motores de combustión interna a pistón de movimiento alternativo (encendido por bujías o por inyección de combustible), excluyendo los de pistón libre;</li> <li>- motores de émbolo rotativo.</li> </ul> <p>Estos motores podrán estar provistos de un dispositivo de sobrecarga mecánica o de turboalimentadores.</p> <p style="text-align: center;"><b>3. DEFINICIONES</b></p> <p>3.1 <b>Potencia neta.</b> La potencia obtenida en el eje motor o en su equivalente, a la velocidad especificada por el fabricante, estando el motor equipado con los dispositivos auxiliares necesarios para su correcto funcionamiento en su aplicación particular.</p> <p>3.2 <b>Dispositivos auxiliares.</b> Los equipos y dispositivos enunciados en la Tabla 1.</p> <p>3.3 <b>Equipo standard de producción.</b> Cualquier equipo que es provisto normalmente por el fabricante, para aplicación particular del motor.</p> <p style="text-align: center;"><b>4. DISPOSICIONES GENERALES</b></p> <p><b>4.1 Exactitud de las mediciones</b></p> <p>4.1.1 <b>Momento.</b> El diámetro debe ser tal, que el primer cuadrante de la escala no se use. Debe tener una exactitud dentro de <math>\pm 0,05\%</math> del valor máximo de la escala.</p> <p>4.1.2 <b>Velocidad.</b> La velocidad del motor debe ser leída de preferencia con un cuenta - revoluciones y con un cronómetro sincronizado automáticamente. La exactitud de los valores medidos debe ser de <math>\pm 0,05\%</math>.</p> <p style="text-align: right;">(Continúa)</p>		

## C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 1)

NTE INEN 960

1993-04

TABLA 1. Dispositivos Auxiliares

	DISPOSITIVOS	NOTAS
1	Sistema de admisión Múltiple de admisión Filtro de aire Silenciador de admisión Sistema de control de emisiones Sistema de limitación de velocidad	
2	Sistema de calefacción del múltiple de admisión	Colocado en la posición más favorable posible
3	Sistema de escape: Purificador Múltiple de escape Toberas  Silenciador Tubo de escape Freno de escape	Si es posible armar el sistema de escape para el ensayo, se debe reemplazar por otro equivalente en restricciones con la aprobación del fabricante  Si existe un freno de escape, la válvula puede ser retrada o colocada en posición de abierta totalmente
4	Bomba de combustible	La presión de alimentación del combustible puede ser ajustada, en caso de necesidad, para producir circunstancias especiales de aplicación del motor.
5	Carburador	
6	Equipo de inspección (diesel) Primer filtro Segundo filtro Bomba Cafetera de alta presión Inyector  Válvula de admisión de aire Regulador	La válvula de admisión de aire es el control neumático de la bomba de inyección.
7	Equipo de enfriamiento del líquido refrigerante Tapa del motor Radiador	El radiador, el ventilador, la bomba de agua y el termostato, deben colocarse en el banco de pruebas en las mismas posiciones relativas que ocupan en el vehículo. La circulación de agua debe ser activada solamente por la bomba. El enfriamiento puede ser producido por el radiador o por circuito externo, siempre que la pérdida de la presión en este circuito permanezca sustratamente la misma que la del motor.

(Continúa)



## C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 2)

NTE INEN 960

1983-04

Continuación de la tabla 1

7	<p>Ventilador Tapa del ventilador</p> <p>Tapa del ventilador Bomba de agua Termostato</p>	<p>Si hay un ventilador desconectado, la potencia neta debe determinarse primeramente con el ventilador desconectado y luego conectado</p> <p>Cuando el ventilador no se puede instalar en el campo de pruebas, la potencia absorbida por el ventilador debe determinarse por las mismas velocidades utilizadas para las mediciones del motor. Esta potencia debe restarse de la potencia corregida, para obtener la potencia neta.</p>
8	<p>Equipo de enfriamiento de aire Tapa del ventilador Ventilador</p> <p>Ventilador auxiliar del banco de pruebas Dispositivo de regulación de temperatura</p>	<p>(Las notas del numero 7 aplicables al ventilador, se aplican también para enfriamiento por aire)</p> <p>Si fuese necesario:</p>
9	Equipo eléctrico	La potencia del generador debe limitarse a la necesaria para el funcionamiento de accesorios que son indispensables para el motor. No debe cargarse la batería durante el ensayo.
10	<p>Equipo de sobrealimentación. Compresor movido por motor, o por gases de escape</p> <p>Intercambiador del calor</p> <p>Bomba o ventilador de refrigeración Regulación del flujo de refrigerante Ventilador auxiliar del banco de pruebas</p>	<p>La temperatura de aire en el múltiple de admisión debe ser la especificada por el fabricante, en el caso de haberla.</p> <p>Si fuese necesario:</p>
11	Dispositivo anti- contaminantes	

(Continúa)

## C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 3)

NTE INEN 960

1983-04

4.1.3 Consumo de combustible. Exactitud de  $\pm 1\%$

4.1.4 Temperatura del aire de admisión. Exactitud de  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

4.1.5 Presión barométrica.  $\pm 70\text{ Pa}$  (0,70 mbar).

4.1.6 Presión en el ducto de escape.  $\pm 25\text{ Pa}$  (0,25 mbar).

### 4.2 Ensayos

#### 4.2.1 Dispositivos auxiliares

4.2.1.1 Durante el ensayo, los dispositivos auxiliares especificados en la Tabla 1 deben instalarse en lo posible en la misma posición que en la aplicación en el motor. Deberán retirarse los equipos auxiliares del vehículo que no son necesarios para el funcionamiento del motor, como por ejemplo:

- Compresor de aire para frenos,
- Compresor de suspensión
- Sistema de aire acondicionado

En los casos en que se deban retirar accesorios, la potencia absorbida por los mismos, deberá determinarse y añadirse a la potencia medida del motor.

#### 4.2.2 Dispositivos auxiliares para arranque de motores a diesel

4.2.2.1 Tratándose de motores a diesel, deben considerarse los dos casos siguientes:

- a) Arranque eléctrico. El generador está instalado y suministra, cuando sea necesario, la energía para los auxiliares indispensables para el funcionamiento del motor.
- b) Arranque no eléctrico. Si existe cualquier otro dispositivo auxiliar eléctricamente movido, indispensable para el funcionamiento del motor, se instalará el generador para suministrar la energía de estos accesorios. De lo contrario, deberán retirarse. En cualquier caso, el sistema para producir y acumular la energía necesaria para el arranque, debe estar instalado y funcionar cuando no se aplica al motor.

### 4.3 Condiciones de ajuste

4.3.1 Las condiciones de ajuste durante el ensayo, para la determinación de la potencia neta, se indican en la Tabla 2.

TABLA 2. Condiciones de ajuste

1	Ajuste al carburador	De acuerdo a las especificaciones del fabricante, utilizados sin ninguna alteración posterior para la aplicación particular
2	Ajuste al sistema de inyección a la bomba	
3	Inyección o regulador de la inyección	
4	Ajuste del regulador	

(Continúa)

**C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 4)**

NTE INEN 960

1983-04

**4.4 Condiciones de ensayo**

**4.4.1** El ensayo de potencia neta consistirá en marcha a plena admisión para motores de bujías, y a plena carga de la bomba de inyección para motores a diesel. El motor estará equipado según la Tabla 1.

**4.4.2** Los datos de rendimiento deben obtenerse bajo condiciones estables de funcionamiento, con un adecuado suministro de aire fresco. Los motores deberán arrancarse de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. Las cámaras de combustión de motores a bujías podrán contener depósitos, pero en cantidades limitadas. Las condiciones de ensayo, tales como la temperatura en la tobera de admisión, deberán seleccionarse lo más aproximadamente a las condiciones de referencia, para minimizar la magnitud del factor de corrección.

**4.4.3** La temperatura del aire de admisión al motor (aire ambiental) debe medirse dentro de 0,15 m máximo en la entrada al filtro de aire y, si esto no existe, dentro de 0,15 m de la tobera de admisión. El termómetro o la cupla - térmica debe protegerse de radiación del calor y debe localizarse directamente en el torrente de aire. Debe también protegerse de gotas de combustible. Una cantidad suficiente de medidas en sitios distintos, deberá ser un promedio representativo de la temperatura.

**4.4.4** No se deben tomar datos, a menos que el momento, velocidad y temperatura, hayan sido mantenidos constantes por lo menos durante un minuto.

**4.4.5** La velocidad del motor durante una prueba o lectura, no debe desviarse de la velocidad seleccionada, en más de  $\pm 1\%$  o en  $\pm 10$  rev/min.

**4.4.6** La fuerza de frenado observada, consumo de combustible y temperatura de aire de admisión, deben anotarse simultáneamente y, en cada caso, deben ser los promedios de dos valores estables que no varían más del 2% por la fuerza de frenado y consumo de combustible.

**4.4.7** Para la medición del consumo de combustible con un contador automático de tiempo, el tiempo mínimo de medición no debe ser inferior a 30 s; para medición manual, no menor a 60 s.

**4.4.8** La temperatura de salida del refrigerante en motores enfriados por líquidos, debe controlarse y mantenerse a  $80 \pm 5^\circ\text{C}$ , a menos que el fabricante especifique otra cosa. Para motores refrigerados por aire, la temperatura debe mantenerse con tolerancia de  $20^\circ\text{C}$  respecto al valor indicado por el fabricante.

**4.4.9** La temperatura del combustible en la entrada de la bomba o en el carburador, debe mantenerse dentro de los límites especificados por el fabricante.

**4.4.10** La temperatura del aceite lubricante medida en el (carburador) depósito de aceite o en la salida del sistema de enfriamiento de aceite, de existir, debe mantenerse dentro de los límites especificados por el fabricante.

**4.4.11** La temperatura del gas de escape debe medirse en un punto del tubo de escape adyacente al final del múltiple de escape. Esta temperatura debe mantenerse entre los límites establecidos por el fabricante.

(Continúa)

## C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 5)

NTE INEN 960

1983-04

**4.4.12** Para motores a diesel, el combustible utilizado no debe contener aditivos para la suspensión del humo. En caso de disputa, el ensayo deberá hacerse con combustible clasificado bajo la sigla CEC - RF - 03-T-69.

### 5. FACTORES DE CORRECCION

#### 5.1 Definición del factor $K_a$

**5.1.1** Es el factor por el cual debe multiplicarse la potencia observada, para determinar la potencia del motor bajo las condiciones atmosféricas de referencia.

#### 5.2 Condiciones atmosféricas de referencia

**5.2.1** Temperatura: 25°C (298 K).

**5.2.2** Presión total: 100 kPa (1 000 mbar). Siendo la humedad despreciable. (Ver nota 1).

#### 5.3 Limitaciones en el uso de la fórmula de corrección

**5.3.1** La fórmula de corrección es sólo aplicable donde el factor de corrección está entre 0,96 y 1,04. Si se exceden estos límites, debe darse el valor corregido, y las condiciones de ensayo (temperatura y presión) deben establecerse en forma precisa en el reporte de ensayo.

#### 5.4 Determinación de factores de corrección

**5.4.1** Motores de ignición por bujías (carburador o inyección) factor  $K_a$ . Dentro de los límites definidos en 7.3, el factor de corrección se obtiene aplicando la fórmula:

$$K_a = \left( \frac{100}{P} \right) \left( \frac{T}{298} \right) \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

T - Temperatura absoluta, en grados kelvín en la entrada de aire.

P - presión atmosférica total, en kilopascales

Esta fórmula es aplicada a la potencia de frenado observada, sin tomar en cuenta la eficiencia mecánica del motor.

#### 5.4.2 Motores a diesel - factor $K_c$

**5.4.2.1** Factor de corrección para motores a diesel de cuatro tiempos de aspiración natural y para motores a diesel de dos tiempos. El factor de corrección, que se aplica sólo a suministro constante de combustible, se calcula por medio de la fórmula:

NOTA 1. Dentro del intervalo 10 a 35°C, los efectos de la humedad en el factor de corrección pueden ser despreciados

(Continua)

## C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 6)

NTE INEN 960

1983-04

$$k_a = \left(\frac{100}{p}\right)^{0,65} \left(\frac{T}{298}\right)^{0,5} \dots\dots\dots (2)$$

La siguiente fórmula, que es aproximadamente equivalente, también puede utilizarse:

$$k_d = 1 + \frac{A}{100}$$

Donde:

$$A = 0,65 (100-p) + 0,17 (T-298)$$

Si el factor de corrección excede 1,04 o es menor que 0,96, o si el suministro de combustible, medido durante el funcionamiento del motor, es menor que 50 mm<sup>3</sup> por litro de volúmenes de barrido, o más que 75 mm<sup>3</sup>, la corrección puede hacerse aplicando el factor de corrección K<sub>d</sub>, por el valor de éste coeficiente; las condiciones de temperatura y presión durante el ensayo y el suministro específico de combustible en mm<sup>3</sup> por litro, deben hacerse constar en el reporte.

#### 5.4.2.2 Factor de corrección para motores a diesel cargados a presión

**5.4.2.2.1 Motor con sobre - alimentación por turbina de escape.** Un factor de corrección que es igual a 1 se aplicará cuando la densidad del aire ambiental no varíe más de ± 5% de la densidad bajo las condiciones de referencia. Cuando la densidad del aire esté fuera de estos límites, no se aplicará corrección alguna, pero se reportarán las condiciones de ensayo.

**5.4.2.3 Motores con sobrealimentación mecánica.** Para el factor de corrección de motores de sobrecarga mecánica, se aplicará la fórmula para motores de aspiración natural, previa comprobación de que la relación está entre los límites especificados para esos motores.

$$relación = \frac{\text{suministro de combustible}}{\text{Volumen de barrido} \left(\frac{p^2}{p^1}\right) \left(\frac{T1}{T2}\right)}$$

Donde:

p1 - Presión ambiental.

p2 - Presión en el múltiple de admisión.

T1 - Temperatura ambiental en K.

T2 - Temperatura en la entrada del múltiple de admisión.

## 6. MEDICION DEL VALOR DEL HUMO

**6.1** El valor de la emisión del humo deberá medirse y registrarse en cada lugar de ensayo. El opacímetro usado y su instalación deben estar diseñados de acuerdo con ISO 3173.

(Continua)

## C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 7)

NTE INEN 960

1983-04

7 Reporte de ensayo. (ver nota 2).

## 7.1 Datos del motor

## 7.1.1 Motores de movimiento alternativo

Fabricación: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 φ del cilindro: \_\_\_\_\_ Cámara: \_\_\_\_\_ Volumen de un cilindro: \_\_\_\_\_  
 Cilindrada total: \_\_\_\_\_ Ignición: bujías  Inyección:   
 orden de encendido: \_\_\_\_\_  
 Relación de compresión: \_\_\_\_\_ Ciclo  2 -  4 tiempos  
 Aditivos de sobrecarga: \_\_\_\_\_ Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_

## 7.1.2 Motores rotativos trocoidales

Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 Epitrocoidal:  Hipotrocoidal:   
 Envolvente: Interna:  Externa:   
 Número de cámaras herméticas entre el rotor y el estator, esto es, número de dispositivos de sello periférico por rotor y estator: \_\_\_\_\_  
 Excentricidad: \_\_\_\_\_ Radio generador: \_\_\_\_\_  
 Espesor de operación: \_\_\_\_\_ Volumen de barrido de una cámara: \_\_\_\_\_  
 Número de rotores: \_\_\_\_\_ Ignición:  bujías:  compresión: \_\_\_\_\_  
 Orden de encendido: \_\_\_\_\_  
 Relación de compresión: \_\_\_\_\_ Ciclos:  2 -  4   
 Dispositivo de sobrecarga: \_\_\_\_\_ Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_

## 7.2 Suministro de combustible

Bomba: \_\_\_\_\_ Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 Prefiltro:  sí  no Filtro:  sí  no

## 7.3 Carburador

Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 Número: \_\_\_\_\_ Especificaciones detalladas: \_\_\_\_\_

## 7.4 Bombas o dispositivos de inyección

Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 Pulsación estática: \_\_\_\_\_ Dispositivo de avance: \_\_\_\_\_  
 Código del fabricante: \_\_\_\_\_

NOTA 2. Escribir N/A cuando no corresponde.

(Continúa)



1982-132

## C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 8)

NTE INEN 960

1983-04

## 7.5 Boquillas de inyección y soportes de boquillas

Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 Presión: \_\_\_\_\_ Tubos de inyección de alta presión: \_\_\_\_\_ longitud diámetro interior: \_\_\_\_\_

## 7.6 Regulador

Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 Velocidad de accionamiento: \_\_\_\_\_ rev/mínimo  
 Velocidad máxima sin carga: \_\_\_\_\_ rev/mínimo

## 7.7 Distribuidor de encendido

Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 Pulsación estática: \_\_\_\_\_ Dispositivo de avance: \_\_\_\_\_  
 Reguladora: \_\_\_\_\_ rev/mínimo [según especificación del fabricante]  
 Rango máximo del dispositivo de avance: \_\_\_\_\_  
 Espacio entre platinos del distribuidor: \_\_\_\_\_

## 7.8 Bujías

Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 Cantidad por cilindro: \_\_\_\_\_ Espacio entre electrodos: \_\_\_\_\_

## 7.9 Bobina de encendido

Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 Cantidad: \_\_\_\_\_

## 7.10

Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 Cantidad: \_\_\_\_\_

## 7.11 Supresor de interferencia

Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_

## 7.12 Sistema de admisión

Múltiple de admisión: \_\_\_\_\_ Descripción: \_\_\_\_\_  
 Filtro de aire: Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 Silenciador de entrada: Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 Depresión máxima a flujo máximo en la admisión, recomendada por el fabricante: KPa

(Continúa)

## C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 9)

NTE INEN 960

1983-04

## 7.13 Transmisión de válvulas

Tipo: \_\_\_\_\_ Breve descripción: \_\_\_\_\_  
 Ajuste de válvulas: \_\_\_\_\_ Calibración: \_\_\_\_\_  
 Espacio libre: \_\_\_\_\_

## 7.14

Breve descripción: \_\_\_\_\_  
 Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_

## 7.15 Dispositivo de calentamiento por inducción

Tipo: \_\_\_\_\_ Breve descripción: \_\_\_\_\_

## 7.16 Sistema de escape

Tubos y otros componentes normalizados  sí  
 no

Descripción breve: \_\_\_\_\_  
 Tubo: Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 Silenciador: Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_

## 7.17 Sistema de refrigeración

## 7.17.1 Sistema de refrigeración por líquidos

Clase de líquido: \_\_\_\_\_  
 Bomba: Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_ Relación de transmisión: \_\_\_\_\_  
 Termostato: Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_ Ajuste: \_\_\_\_\_  
 Radiador: Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 Válvula de presión: Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 Ventilador: Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_  
 Transmisión del ventilador: \_\_\_\_\_ Relación de transmisión: \_\_\_\_\_  
 Protector de ventilador: sí  no

## 7.17.2 Sistema de refrigeración por aire

Ventilador: Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_ Rel. trans.: \_\_\_\_\_  
 Ductos de aire normalizados: sí  no   
 Ventilador auxiliar para banco de pruebas: sí  no   
 Sistema de regulación de temperatura: sí  no  Descripción: \_\_\_\_\_

(Continúa)



**C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 10)**

NTE INEN 960

1983-04

7.18 Refrigeración de aceite: sí  no 

Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_

**7.19 Equipo eléctrico**

Generador:

Alternador:

Fabricante: \_\_\_\_\_ Tipo: \_\_\_\_\_ No. de serie: \_\_\_\_\_

7.20 Equipo de anti-contaminación - Breve descripción: \_\_\_\_\_

7.21 Otros equipos: (enumerar, con descripción si es necesario).

**7.22 Condiciones específicas del ensayo**

Presión barométrica: \_\_\_\_\_ K Pa

(Continua)

**C-1 NORMA INEN 960 (CONTINUACIÓN 11)**

NTE INEN 960

1983-04

**APENDICE Z****Z.1 NORMAS A CONSULTAR**

Esta norma no necesita de otras para su aplicación.

**Z.2 BASES DE ESTUDIO**

ISO 1585. *Road vehicles. Engine test code. Net power.* International Organization for Standardization. Ginebra, 1974.

ISO 3173. *Road vehicles. Apparatus for measurement of the opacity of exhaust gas from diesel engines operating under steady state conditions.* International Organization for Standardization. Ginebra, 1974

**ANEXOS D**  
**DEFINICIÓN**

## **D-1 DEFINICIÓN DE LA ESTEQUIOMETRÍA**

La Estequiometría es la parte de la química que se refiere a la determinación de las masas de combinación de las sustancias en una reacción química, hace referencia al número relativo de átomos de varios elementos encontrados en una sustancia química y a menudo resulta útil en la calificación de una reacción química, en otras palabras se puede definir como la parte de la Química que trata sobre las relaciones cuantitativas entre los elementos y los compuestos en reacciones químicas, Principios elementales de los procesos químicos. (Richard Felder, Limusa Wiley, 2003 – 681).