

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero
Mecánico Automotriz.

**“OPTIMIZACIÓN DE LAS COTAS DE REGLAJE DE LA
DISTRIBUCIÓN DE UN MOTOR SUZUKI G13B TWIN CAM
MEDIANTE DISEÑO EXPERIMENTAL”**

AUTORES:

Juan Daniel Bustos González

Carlos Julio Calle Espinoza

DIRECTOR:

Ing. Néstor Diego Rivera Campoverde MSc.

Cuenca, Agosto 2016

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Juan Daniel Bustos González, con documento de identificación N° 0302768320 y Carlos Julio Calle Espinoza, con documento de identificación N° 0302197371, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de grado intitulado: “Optimización de las cotas de reglaje de la distribución de un motor Suzuki G13B Twin Cam mediante diseño experimental”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Juan Daniel Bustos González

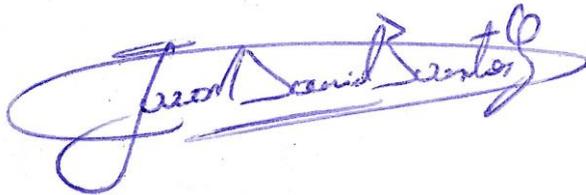


Carlos Julio Calle Espinoza

DECLARATORIA

Nosotros, Juan Daniel Bustos González y Carlos Julio Calle Espinoza, declaramos que la investigación aquí descrita es de nuestra autoría, la misma que ha sido basada en la metodología y adaptación tecnológica establecida en la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana, cuyas referencias bibliográficas que se han consultado están incluidas en este documento.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la Normativa Institucional Vigentes.



Juan Daniel Bustos González



Carlos Julio Calle Espinoza

CERTIFICADO

Que el presente proyecto técnico “*Optimización de las cotas de reglaje de la distribución de un motor Suzuki G13B Twin Cam mediante diseño experimental*” realizado por los estudiantes: Juan Daniel Bustos González y Carlos Julio Calle Espinoza, fue dirigido por mi persona.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Néstor Rivera', is written over a faint, illegible stamp or watermark.

Ing. Néstor Rivera MSc.

AGRADECIMIENTO

*A Dios, quien me ha concedido la vida y la sabiduría para cumplir las metas
propuestas.*

*A mis padres David y Mercy, quienes con su sacrificio y dedicación me supieron dar
el mejor de los regalos, la educación, me llenaron de amor y me enseñaron el
verdadero sentido de la vida.*

*A mis abuelitos Juan e Irene, mi tía Nancy y mi prima Priscila quienes son mi hogar
y han estado presentes en todos los momentos impulsándome con sus concejos y
enseñanzas hacia la consecución de esta meta.*

*A mi tío Diego con quien descubrí la afición por los fierros, lo cual es hoy una parte
y forma de vida.*

*A mi tía Raquel, quien con sus sabios concejos siempre me ha impulsado para
cumplir esta meta y ser un hombre de bien.*

A Denisse, por apoyarme todos estos años, entender y compartir la misma pasión.

*Al Ing. Néstor Rivera, quien más que un maestro ha sido un amigo y pilar
fundamental en mi formación académica y personal.*

*A toda mi familia, amigos y compañeros que siempre estuvieron presentes con sus
palabras de aliento impulsando hacia la culminación de mi carrera.*

Juan Daniel

AGRADECIMIENTO

A mis padres por haberme dado la vida, la oportunidad de tener una buena educación y brindarme todo su amor y apoyo incondicional en toda circunstancia.

A mi hermano Sebastián por que más que mi hermano ha sido mi amigo y confidente, gracias por estar ahí en los momentos buenos y también en los malos y por demostrarme su cariño siempre.

A mi abuelita Isabel por todo su amor y atenciones, por estar siempre pendiente de mí y por sus bendiciones permanentes.

A mi cuñada Karina y mi hermoso sobrino Rafael por su cariño y todo el amor recibido.

A toda mi familia que de una u otra manera estuvo apoyándome durante mi vida universitaria.

De manera especial al Ing. Néstor Rivera por su entera disposición y asesoramiento, fundamental para el desarrollo y culminación de la presente investigación.

Carlos.

DEDICATORIA

Después de un difícil y largo camino, dedico este trabajo de manera especial a mis padres David y Mercy, que nunca dudaron de mí y estuvieron entregando todo para ayudarme a la consecución de esta meta y realizarme como un hombre de bien.

Para Mamita Juana, que desde la eternidad, estoy seguro está feliz por este logro conseguido.

Para Majito, con todo mi amor y dedicación, que con su ternura de cada día me impulsa a seguir adelante.

Juan Daniel

DEDICATORIA

Luego de un largo camino recorrido y muchos obstáculos superados dedico este trabajo de investigación a toda mi familia, de manera muy especial a mis padres

Carlos Julio y Jenny quienes desde mi niñez han sabido guiar mis pasos fundamentados en valores y principios para convertirme en un hombre de bien y que gracias a ellos y a su apoyo durante todo el trayecto de mi vida universitaria hoy cumpla con una meta muy importante en mi vida.

Carlos.

RESUMEN

Esta investigación surge a partir del hecho que el motor del vehículo de experimentación ha recibido una serie de modificaciones en la parte mecánica, la gestión electrónica, el sistema de alimentación e inyección de combustible, el sistema de encendido, la admisión de aire, por lo cual se desconoce la configuración ideal de los parámetros que intervienen en el funcionamiento del motor al no disponer de una metodología definida que permita obtener los valores adecuados de los parámetros implicados para obtener el mejor rendimiento del motor con sus nuevas características.

En el presente trabajo se desarrolla en primera instancia un estudio teórico sobre los principales factores que intervienen en el funcionamiento del motor de combustión interna ciclo Otto, concretamente aquellos que tienen que ver con las cotas de reglaje de la distribución, ya que son aquellos sobre los que se va a trabajar para obtener los valores de estas cotas con los cuales se logre aumentar las prestaciones del motor.

Luego de esto, se plantea la metodología que será empleada para la realización del experimento, definiendo así el diseño experimental a ser empleado, sus variables y niveles, así como también se realiza la descripción de los diferentes elementos que forman parte de la unidad experimental y que se requieren para la obtención de datos.

Se realizan las corridas experimentales provenientes del diseño experimental, con lo cual se adquieren datos del comportamiento del motor sometido a diferentes configuraciones de los factores de estudio. Se efectúa el tratamiento de los datos adquiridos con la ayuda del software Minitab® para determinar su validez y así obtener los valores de optimización de los factores de estudio, que son aplicados al motor para obtener dichos resultados.

Se establecen las conclusiones luego del desarrollo de la experimentación en función de los resultados obtenidos y se realizan las recomendaciones a tener en cuenta sobre este trabajo.

ABSTRACT

This research comes from the fact that the engine of the experimentation's vehicle has received a number of changes in the mechanical part, electronic management, the fuel system and fuel injection, ignition system, intake air, so which the ideal configuration of the parameters involved in the operation of the engine in the absence of a defined methodology to obtain the appropriate values of the parameters involved for best engine performance with its new features is unknown.

In this paper we develop primarily a theoretical study of the main factors involved in the operation of the internal combustion engine Otto cycle, particularly those that have to do with the dimensions of adjustment of the distribution, as are those on that will work to obtain the values of these dimensions with which it is achieved to increase engine performance.

After this, it is proposed the methodology to be used for the experiment, thus defining the experimental design to be used, its variables and levels as well as the description of the different elements that are part of the experimental unit also performed and required for data collection.

Experimental runs from the experimental design are made, which data engine behavior submitted to different configurations of the study factors are acquired. Processing data acquired using the Minitab software to determine their validity and to obtain values to optimize study factors is performed, which are applied to the engine to obtain those results.

The conclusions after the development of experiment in terms of the results and recommendations are set and the recommendations to take account of this work are done.

ÍNDICE

1	PROBLEMA.....	1
2	OBJETIVOS.....	2
2.1	Objetivo General	2
2.2	Objetivos Específicos	2
3	FUNDAMENTOS Y MARCO TEÓRICO	3
3.1	FUNDAMENTOS.....	3
3.1.1	ANTECEDENTES	3
3.2	MARCO TEÓRICO	4
3.2.1	CRUCE DE VÁLVULAS	5
3.2.2	AVANCE A LA APERTURA DE LA ADMISIÓN.....	6
3.2.3	RETRASO AL CIERRE DEL ESCAPE.....	7
3.2.4	RELACIÓN AIRE COMBUSTIBLE (AFR)	7
3.2.5	ADELANTO AL ENCENDIDO	8
4	METODOLOGÍA PARA LA EXPERIMENTACIÓN	10
4.1	INTRODUCCIÓN.....	10
4.2	DEFINICIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	10
4.2.1	PLANEACIÓN DEL EXPERIMENTO	11
4.2.2	VARIABLES DE RESPUESTA	11
4.2.3	VARIABLES DE ESTUDIO	12
4.2.4	VARIABLES DE BLOQUEO	13
4.2.5	VARIABLES DE RUIDO	13
4.2.6	UNIDAD EXPERIMENTAL.....	13
4.2.6.1	Vehículo de pruebas	14
4.2.6.2	Sistema de distribución	16
4.2.6.3	Sistema de encendido	16
4.2.6.4	Sistema de inyección multipunto secuencial.....	17
4.2.6.5	Sensor de oxígeno de banda ancha - Wideband.....	18
4.2.6.6	Unidad de control reprogramable.....	20
4.2.6.7	Banco dinamométrico.....	22
4.2.6.8	Medidor de flujo de combustible.....	22
4.2.6.9	Analizador de gases.....	23
4.3	PRESENTACIÓN Y DESARROLLO DEL EXPERIMENTO.....	24
4.3.1	DEFINICIÓN DE LOS NIVELES	25

4.3.2	ADELANTO A LA APERTURA DE LA ADMISIÓN.....	26
4.3.3	RETRASO AL CIERRE DEL ESCAPE.....	26
4.3.4	AFR.....	27
4.3.4.1	Adaptación de la mezcla.....	28
4.3.5	INCREMENTO DEL ADELANTO AL ENCENDIDO.....	28
4.3.6	TRATAMIENTOS.....	28
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	31
5.1	TOMA DE DATOS.....	31
5.1.1	ALEATORIZACIÓN DE LAS PRUEBAS.....	31
5.1.2	PROTOCOLO DE MEDICIÓN.....	32
5.2	TRATAMIENTO DE DATOS.....	33
5.2.1	VALIDACIÓN DE DATOS.....	33
5.3	REPRESENTACIÓN GRÁFICA Y ANÁLISIS.....	36
5.3.1	POTENCIA.....	36
5.3.2	FUERZA TRACTORA.....	38
5.3.3	CONSUMO.....	39
5.3.4	MONÓXIDO DE CARBONO.....	41
5.3.5	DIÓXIDO DE CARBONO.....	42
5.3.6	OXÍGENO.....	44
5.3.7	HIDROCARBUROS NO COMBUSTIONADOS.....	45
5.3.8	VARIACIÓN RELATIVA DE POTENCIA.....	47
5.3.9	OPTIMIZACIÓN.....	48
5.3.9.1	Optimización del factor AFR.....	52
5.3.9.2	Optimización del factor Adelanto al Encendido.....	52
5.3.9.3	Optimización del factor AAA.....	52
5.3.9.4	Optimización del factor RCE.....	52
5.4	RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN.....	54
5.4.1	POTENCIA RELATIVA.....	54
5.4.2	FUERZA TRACTORA RELATIVA.....	55
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	57
6.1	CONCLUSIONES.....	57
6.2	RECOMENDACIONES.....	58
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
8	ANEXOS.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Motor Ciclo Otto	5
Figura 3.2 Fenómeno del traslado de los gases.....	6
Figura 3.3 Diagrama de distribución.....	7
Figura 3.4 Ventana Lambda.....	8
Figura 3.5 Ciclo de trabajo del motor Otto	9
Figura 4.1 Vehículo de pruebas	14
Figura 4.2 Poleas regulables	16
Figura 4.3 Módulo de posición del motor.....	17
Figura 4.4 Elementos del sistema de inyección	18
Figura 4.5 Sensor de oxígeno de banda ancha	19
Figura 4.6 Valores del sensor de oxígeno	19
Figura 4.7 Unidad de control reprogramable	20
Figura 4.8 Configuración de la cartografía para el tiempo de inyección.....	21
Figura 4.9 Conexión del módulo.....	21
Figura 4.10 Banco dinamométrico.....	22
Figura 4.11 Medidor de flujo de combustible.....	23
Figura 4.12 Analizador de gases	24
Figura 5.1 Laboratorio de Experimentación	31
Figura 5.2 Gráficas de Residuos del Analizador de Gases	34
Figura 5.3 Gráficas de Residuos del Banco Dinamométrico	34
Figura 5.4 Gráfica de Residuos del Contador de Combustible.....	35
Figura 5.5 Dispersión de la Variables de Bloqueo.....	35
Figura 5.6 Dispersión de las Variables de Ruido.....	36
Figura 5.7 Grafica de Efectos Principales para Potencia	36
Figura 5.8 Grafica de Interacciones para Potencia.....	37
Figura 5.9 Gráfica de Efectos Principales para Fuerza Tractora	38
Figura 5.10 Gráfica de Interacciones para Fuerza Tractora.....	39
Figura 5.11 Gráfica de Efectos Principales para Consumo.....	40
Figura 5.12 Gráfica de Interacciones para Consumo	40
Figura 5.13 Gráfica de Efectos Principales para CO	41
Figura 5.14 Gráfica de Interacciones para CO.....	42
Figura 5.15 Gráfica de Efectos Principales para CO2	43

Figura 5.16 Gráfica de Interacciones para CO ₂	43
Figura 5.17 Gráfica de Efectos Principales para O ₂	44
Figura 5.18 Gráfica de Interacciones para O ₂	45
Figura 5.19 Gráfica de Efectos Principales para HC.....	46
Figura 5.20 Gráfica de Interacciones para HC.....	46
Figura 5.21 Gráfica de Efectos principales para incremento de potencia.....	47
Figura 5.22 Gráfica de interacción para incremento de potencia.....	48
Figura 5.23 Metas de optimización para P y F.....	49
Figura 5.24 Metas de optimización para P y F.....	49
Figura 5.25 Zona de optimización para P y F.....	50
Figura 5.26 Optimización de P y F.....	51
Figura 5.27 Comparación entre la Potencia relativa inicial y la optimizada.....	54
Figura 5.28 Comparación entre la Fuerza relativa inicial y la optimizada.....	55
Figura 5.29 Comparación entre el Consumo inicial con el optimizado.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Variables de Respuesta	12
Tabla 4.2 Variables de Estudio	12
Tabla 4.3 Variables de Bloqueo	13
Tabla 4.4 Variables de Ruido.....	13
Tabla 4.5 Características Estándar del Vehículo de Pruebas	15
Tabla 4.6 Características del Vehículo de Pruebas Modificado	15
Tabla 4.7 Características de las Bobinas.....	17
Tabla 4.8 Características del Medidor de Flujo de Combustible.....	23
Tabla 4.9 Características del Analizador de Gases	24
Tabla 4.10 Niveles del Factor AAA.....	26
Tabla 4.11 Niveles del Factor RCE.....	27
Tabla 4.12 Niveles del Factor AFR.....	27
Tabla 4.13 Niveles del Factor Adelanto al Encendido.....	28
Tabla 4.14 Niveles Factoriales	29
Tabla 4.15 Matriz del Diseño Experimental Factorial	29
Tabla 4.16 (Continuación) Matriz del Diseño Experimental Factorial.....	30
Tabla 5.1 Valores de optimización de los factores de estudio	51
Tabla 5.2 Optimización con reducción de consumo y emisiones contaminantes	53
Tabla 5.3 Valores de optimización de los factores de estudio con reducción de consumo y emisiones contaminantes.	53

1 PROBLEMA

Los vehículos comerciales en condición estándar poseen las respectivas marcas para la puesta a punto del sistema de distribución, las cuales son determinadas por los fabricantes. No ocurre lo mismo en el caso de motores modificados, como es el caso del vehículo que se empleará para el desarrollo de la presente investigación, ya que las propiedades de este motor difieren de las originales de fábrica.

Considerando los métodos empleados y estudios previos sobre el proceso de optimización de las cotas de reglaje en la distribución de los vehículos a fin de obtener mejores prestaciones de los mismos, se determinó que este proceso no se realiza de manera óptima, ya que las calibraciones realizadas no se realizan con datos provenientes de un estudio si no por criterio o experiencia de quien realiza dicha labor, de esta manera existe una posibilidad de que estos valores tomados para realizar dichas calibraciones no sean los adecuados pues pueden ser erróneos, generando un rendimiento que no llega al máximo de las prestaciones que se pueden obtener del motor al cual se le aplica el proceso mencionado e incluso empeorando el rendimiento del mismo. El factor humano es el que afecta la calibración realizada, pues de él dependen tanto los valores que decide tomar interpretándolos según su conocimiento como la lectura de los reglajes al momento de efectuar el proceso.

En la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, se han desarrollado experimentos e investigaciones donde se busca optimizar el rendimiento de los motores de los vehículos considerando diferentes aspectos como son: aumento de prestaciones, disminución de emisiones contaminantes, optimización del consumo de combustible, mediante el uso del diseño experimental.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

- Optimizar las cotas de reglaje de la distribución de un motor Suzuki G13B Twin Cam con el uso de un diseño experimental para mejorar las prestaciones del vehículo.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar un estudio teórico del comportamiento del motor respecto de las cotas de reglaje del sistema de distribución.
- Plantear un diseño experimental para seleccionar las variables adecuadas de estudio.
- Realizar las corridas experimentales.
- Analizar y optimizar el sistema con los datos obtenidos.

3 FUNDAMENTOS Y MARCO TEÓRICO

3.1 FUNDAMENTOS

Todos los vehículos que utilizan motores de combustión interna requieren combustible para su funcionamiento, el mismo que necesariamente debe encontrarse en estado de gas de manera que pueda mezclarse con el aire para luego ser quemado en su totalidad dentro de la cámara de combustión.

Años atrás para que el combustible cambie de estado se utilizó un carburador el cual fue creado para dosificar la mezcla y se pueda quemar en las mejores condiciones hasta ese momento.

La utilización de un carburador facilitó en gran parte los problemas que tenían los motores en esa época, es decir se podía conseguir una mezcla óptima de aire-combustible la cual era bien aprovechada a diferentes revoluciones del motor. Sin embargo, las necesidades aumentaron a medida que pasaba los años, y aparecieron los inconvenientes sobre el consumo de combustible, la emisión de gases contaminantes y la necesidad de mejorar las prestaciones del motor. Los vehículos fueron los responsables de la contaminación del aire de esa época y las normativas ambientales fueron más estrictas por lo que fue un gran problema para la sociedad. Es entonces cuando el carburador necesitaba ser mejorado, sin embargo, dichas mejoras se convirtieron en fracasos debido a su complejidad en el ajuste y mantenimiento.

El sistema de inyección fue introducido en los motores debido al avance tecnológico y las necesidades de mejorar, y gracias a este sistema se pudo controlar de manera muy precisa la cantidad de combustible inyectado al cilindro en función de los estados de marcha y de carga del motor, logrando así ciertas ventajas respecto a la potencia, consumo y limitación de agentes contaminantes.

3.1.1 ANTECEDENTES

En 1885 se creó el primer vehículo impulsado por un motor de combustión interna, el mismo que fue patentado luego de varios intentos de diseños. Este vehículo se pensó para ser lo suficientemente útil para movilizarse, trabajar de manera más eficaz y de cierta manera satisfacía las necesidades de ese entonces. Se podría decir que mejoró la calidad de vida de las personas y ayudo a la sociedad a progresar.

A partir de la creación de este modelo de vehículo, comenzó la fabricación en serie de los mismos en todo el mundo, convirtiéndose así en una industria muy grande que seguiría creciendo hasta la actualidad. Comenzó la fascinación por las carreras y es en donde las exigencias de un mejor rendimiento obligaron a las compañías a mejorar las prestaciones de los vehículos, así como el consumo y la reducción de los agentes contaminantes en el escape. A pesar de que el carburador fue muy eficiente en su época, se vio necesaria la implementación de un sistema electrónico con el cual se logró corregir errores y aumentar considerablemente las prestaciones del motor.

3.2 MARCO TEÓRICO

El motor de combustión interna alternativo fue creado en el siglo XVIII como resultado de la evolución continua al haber existido varios experimentos anteriores como lo fue las máquinas de vapor, su creador el alemán Nicolaus Otto la patentó con el nombre de “Gasmotor” (Valdés & Molina, 2011, pág. 2).

El motor Otto de cuatro tiempos tiene un sistema de encendido eléctrico el cual genera una chispa en el interior de la cámara de combustión quemando así toda la mezcla que ha sido previamente introducida y comprimida en el interior del cilindro en donde se produce un proceso químico gracias al cual la energía térmica del combustible se transforma en energía mecánica la misma que será aprovechada para generar el movimiento del vehículo (Alvarez, 2005).

La regulación de la mezcla es indispensable para el correcto funcionamiento del motor por lo tanto lo esencial es una relación estequiometrica de 14,7 llamada AFR, es decir se necesita quemar 14,7 partes de aire para quemar una parte de combustible. Si el AFR es menor a 14,7 se considera mezcla rica mientras que si el valor es mayor es considerada mezcla pobre.

Para el funcionamiento del motor la mezcla es preparada en el sistema de inyección y posteriormente se dan las cuatro fases que son admisión, compresión, expansión y escape. El ingreso de la mezcla hacia el cilindro se da mediante el cierre y apertura de las válvulas de admisión y escape, en las cuales se da un adelanto en la apertura y un retraso en el cierre, esto es debido a que el movimiento del motor no es instantáneo y por lo tanto existe una pérdida de potencia del motor.

El sistema de encendido dispone de una bujía ubicada de manera estratégica para que la mezcla sea inflamada en su totalidad, con esto se busca aprovechar al máximo cada ciclo de trabajo del motor y disminuir los agentes contaminantes emitidos por el escape. La inflamación de la mezcla se da mediante el frente de llama provocado que va desde la bujía y separa en el cilindro los gases frescos de los gases quemados (Benajes & Navarro, 2011, pág. 27).

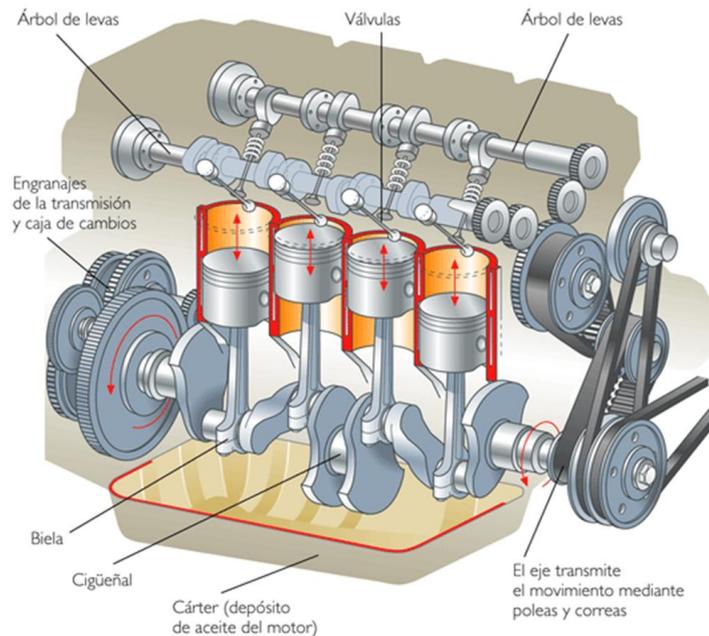


Figura 3.1 Motor Ciclo Otto

Fuente: ("ciclo otto | Diseño Formula 1", 2012)

3.2.1 CRUCE DE VÁLVULAS

Es el periodo en el cual las válvulas de admisión y escape se encuentran abiertas simultáneamente. El cruce de válvulas se calcula como la suma de los ángulos de avance a la apertura de la admisión y retraso de cierre del escape.

El cruce de válvulas se da cuando el pistón se encuentra en el punto muerto superior, es decir cuando la distancia entre el pistón y el cabezote es mínima, procurando que no se choquen las válvulas con la cabeza del pistón.

Existe un fenómeno del traslado de los gases durante el cruce de válvulas el cual se ve regido por las presiones existentes en el cilindro y en el conducto de admisión y escape

(Serrano & Galindo, 2011, pág. 216). Estas diferentes situaciones se observan en la figura 3.2.

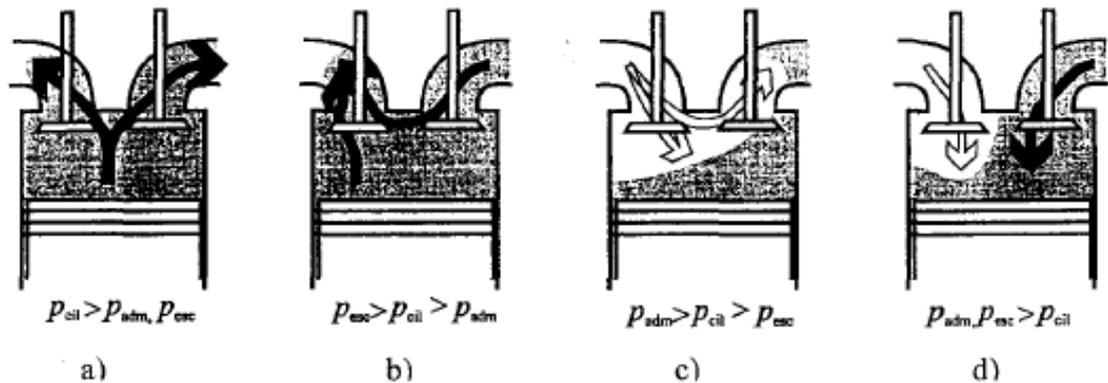


Figura 3.2 Fenómeno del traslado de los gases.

Fuente: (Serrano & Galindo, 2011, pág. 217)

El cruce de válvulas óptimo para un mejor rendimiento del motor depende de la relación de las presiones de admisión y escape durante el cruce de válvulas, lo que significa que si la presión en el conducto de escape es superior a la de admisión es necesario reducir el cruce de válvulas para evitar el reflujo de los gases. Mientras que si la presión es superior en el conducto de la admisión el cruce puede ser mayor para aprovechar el barrido de los gases quemados, sin embargo, también es importante un buen llenado del cilindro para lo que sería necesario un menor cruce de válvulas (Serrano & Galindo, 2011, pág. 216).

3.2.2 AVANCE A LA APERTURA DE LA ADMISIÓN

Teóricamente durante el normal funcionamiento del motor la mezcla ingresa al cilindro cuando comienza el ciclo de trabajo (Admisión, compresión, expansión y escape) es decir cuando el pistón se encuentra en el PMS y comienza su carrera descendente, sin embargo, en la práctica las válvulas se abren antes de que eso suceda de modo que se pueda aprovechar ese tiempo para un mejor llenado del cilindro.

3.2.3 RETRASO AL CIERRE DEL ESCAPE

Sucede lo mismo con las válvulas de escape, las cuales deben cerrarse al momento en que el pistón llega al PMS, pero en este caso las válvulas se cierran cuando el pistón se encuentra en su carrera descendente, logrando así un mejor vaciado de los gases quemados en la combustión.

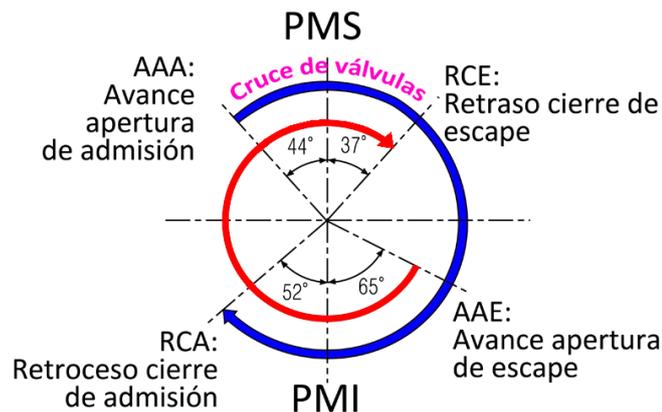


Figura 3.3 Diagrama de distribución

Fuente: (Cuadra, 2013)

3.2.4 RELACIÓN AIRE COMBUSTIBLE (AFR)

Para que se realice la combustión dentro del motor es necesario ingresar una mezcla de aire-combustible al interior del cilindro la misma que debe ser químicamente correcta, es decir cuando todo el oxígeno y todo el combustible reaccionan dando como resultado dióxido de carbono, agua y nitrógeno (Armas & Lecuona, 2011, pág. 54).

Para que esto ocurra es necesario quemar 14,7 partes de aire con 1 parte de combustible llamándola así la mezcla estequiometrica cuyo valor es 14,7. La variación de este valor a uno mayor indica al usuario que la mezcla es pobre, mientras que si el valor es menor a 14,7 es una indicación de que la mezcla es rica.

Lo ideal sería usar la mezcla estequiometrica en todo momento, sin embargo, el motor no funciona constantemente bajo las mismas condiciones por lo que también es necesario utilizar mezclas ricas y pobres. Una mezcla rica es utilizada en el arranque del motor, durante una aceleración o cuando se exige una mayor potencia, mientras

que una mezcla pobre se utiliza a velocidad constante, al desacelerar el vehículo y para disminuir el consumo de combustible (Pezantes & Zamora, 2015, pág. 8).

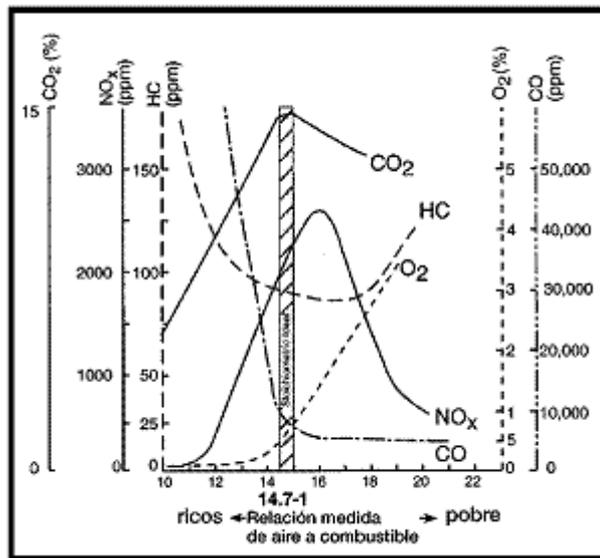


Figura 3.4 Ventana Lambda

Fuente: (Meza, 2012)

3.2.5 ADELANTO AL ENCENDIDO

Este factor es necesario en el funcionamiento del motor debido a que la combustión no se realiza al instante, es decir existe un pequeño tiempo entre el salto de la chispa en los electrodos de la bujía y el comienzo de la combustión. Lo esencial es lograr que la máxima presión generada se dé cuando el pistón se encuentre en el PMS y de esta manera aprovechar toda la energía producida por la combustión para luego convertirla en trabajo.

Si se adelanta demasiado, la chispa saltará antes de que el pistón llegue al PMS y la combustión producirá una fuerza en contra del movimiento del pistón es decir forzándolo a bajar antes de culminar su carrera ascendente lo que conlleva a una pérdida de energía producida durante la explosión. Mientras que si la chispa salta demasiado tarde la combustión en el cilindro se dará cuando el pistón se encuentre en su carrera descendente por lo que la energía generada será desaprovechada (Araujo & Pintado, 2015, pág. 9).

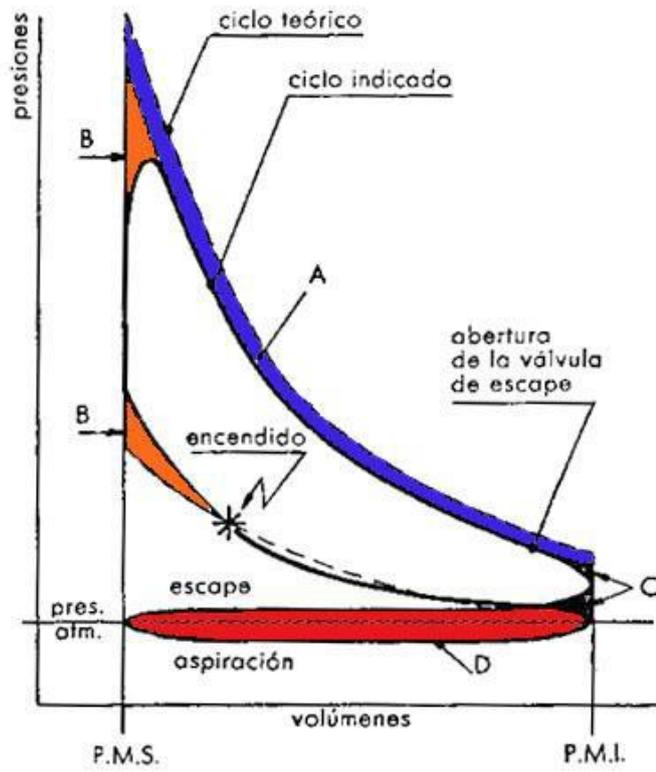


Figura 3.5 Ciclo de trabajo del motor Otto

Fuente: http://demotor.net/images/ciclos_reales/004.jpg

4 METODOLOGÍA PARA LA EXPERIMENTACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años en el campo automotriz se ha desarrollado nuevas tecnologías que permiten al motor funcionar de una mejor manera ya sea en el aspecto mecánico o ambiental. Estas tecnologías incluyen sistemas electrónicos que facilitan el desarrollo del desempeño del motor para el uso diario o bien sea para fines competitivos.

Las mejoras en el motor son desarrolladas a partir de una serie de pruebas, configuraciones y calibraciones, que se realizan en cada uno de los sistemas que conforma el motor.

En la presente investigación se pretende realizar un estudio para mejorar las prestaciones del motor a partir de una modificación de los factores AFR, Adelanto al Encendido, AAA y RCE, para esto se propone instalar una computadora reprogramable en lugar de la original con la cual se puede controlar el funcionamiento del motor. Además, se propone instalar poleas regulables con las cuales se maneja los grados de avance o retraso al cierre o apertura de las válvulas y de esta manera utilizar diferentes calibraciones. Para desarrollar el experimento se realiza un diseño experimental de superficie de respuesta para determinar el mejor arreglo de las configuraciones con la cual se presente un aumento del desempeño del motor.

4.2 DEFINICIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental es un método a través del cual se realiza una serie de pruebas experimentales en donde los datos obtenidos se analizan estadísticamente, de modo que se pueda constatar resultados válidos y objetivos para el mejor funcionamiento del motor (Humberto & Roman, 2012, pág. 10).

La hipótesis del experimento radica en que al manipular la configuración estándar del sistema de distribución se puede obtener un aumento en el rendimiento de la potencia y torque generado por el motor. Lo cual se logra mediante poleas regulables y la instalación de una computadora reprogramable para controlar las variables influyentes en el experimento.

El experimento establece la variación de los parámetros influyentes en el funcionamiento del motor con el objetivo de conocer el efecto que produce la variación de estos factores en el aumento de la potencia y torque. Se plantea una serie de pruebas con diferentes configuraciones de estos parámetros, las cuales serán analizadas estadísticamente de manera que se obtenga resultados reales para la optimización del proceso.

Antes de la etapa de experimentación es necesario establecer el problema que sea capaz de ser solucionado al momento de implementar el diseño experimental.

El problema reside en que el motor utilizado en la investigación se encuentra modificado, y por lo tanto no existe una configuración preestablecida de los parámetros lo cual permita al motor funcionar correctamente, por lo que es necesario atacar este problema para lograr una configuración óptima de funcionamiento del motor, alcanzando así mejores resultados. (Rivera & Chica, 2015, pág. 10)

4.2.1 PLANEACIÓN DEL EXPERIMENTO

Para iniciar con el experimento es necesario establecer el problema sobre el que va a incidir el diseño experimental, además de establecer las variables que van a influir directamente sobre el correcto funcionamiento del motor. La potencia y el torque generado por el motor son afectados por muchas entradas, sin embargo, estas pueden ser controladas fácilmente y obtener así diversas salidas que pueden ser analizadas estadísticamente.

Los parámetros que influyen en el comportamiento del motor se dividen en variables de bloqueo, variables de estudio, variables de ruido y variables de salida (Rivera & Chica, 2015, pág. 12).

4.2.2 VARIABLES DE RESPUESTA

Las variables de respuesta son las variables de salida del sistema cuyo valor se desea mejorar. El valor de estas variables permite obtener información sobre el funcionamiento del sistema. Mediante el uso del diseño experimental se puede determinar puntos de funcionamiento en los cuales el comportamiento de las variables

de respuesta sea mejor que el actual; para el caso del motor en estudio se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Variables de Respuesta

VARIABLE DE RESPUESTA	SÍMBOLO	UNIDAD
Potencia	P	[KW]
Fuerza tractora	F	[N]
Consumo	C	[l/h]
Hidrocarburos no combustionados	HC	[ppm]
Dióxido de carbono	CO ₂	[%]
Monóxido de carbono	CO	[%]
Oxígeno	O ₂	[%]

4.2.3 VARIABLES DE ESTUDIO

Las variables de estudio o factores de entrada son aquellas que van a ser investigadas puesto que influyen de manera directa sobre las variables de respuesta. Estas variables deben ser completamente independientes a fin de evitar problemas en la realización del experimento, es decir, la variación de una variable de estudio no debe influir en la variación de otra variable de estudio.

Se debe seleccionar las variables de estudio que, por conocimiento del funcionamiento del sistema en estudio tengan mayor incidencia sobre las variables de respuestas de dicho sistema y que a la vez resulten de fácil manipulación.

Para el control de las variables de estudio, el motor cuenta con poleas regulables en los árboles de levas y con una unidad de control de motor reprogramable.

En la tabla 4.2 se muestran las variables de estudio seleccionadas.

Tabla 4.2 Variables de Estudio

VARIABLE DE ESTUDIO	SÍMBOLO	UNIDAD
Adelanto a la apertura de admisión	AAA	[°]
Retraso al cierre de escape	RCE	[°]
Adelanto al encendido	α	[°]
Relación aire combustible	AFR	[Kg/Kg]

4.2.4 VARIABLES DE BLOQUEO

Las variables de bloqueo son variables de entrada cuya influencia sobre las variables de respuesta es nula o no se desea evaluar, para cual se pueden fijar en valores constantes o en un nivel de operación de baja variabilidad.

Las variables de bloqueo del caso en estudio se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Variables de Bloqueo

VARIABLES DE BLOQUEO	SÍMBOLO	UNIDAD
Temperatura de banda de rodadura	T_{rod}	[°C]
Temperatura del refrigerante	T_{ref}	[°C]
Régimen de giro	n	[RPM]
Octanaje de la gasolina	R	[RON]

4.2.5 VARIABLES DE RUIDO

Las variables de ruido son variables que no es posible controlar durante el funcionamiento normal del sistema, que pueden afectar el comportamiento de las variables de respuesta por lo que se busca eliminar su incidencia.

Ya que estas variables están ligadas a condiciones del ambiente, se precisa realizar las pruebas cuando estas condiciones sean las mismas. Las variables de ruido se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Variables de Ruido

VARIABLES DE RUIDO	SÍMBOLO	UNIDAD
Temperatura del aire	T_{aire}	[°C]
Temperatura del combustible	T_{comb}	[°C]
Humedad relativa del aire	H_{rel}	[%]
Presión atmosférica	P_{atm}	[KPa]

4.2.6 UNIDAD EXPERIMENTAL

La unidad experimental la componen todos los elementos a emplear en el desarrollo del experimento para la generación y obtención de datos

4.2.6.1 Vehículo de pruebas

El vehículo utilizado para la realización de las pruebas es un vehículo marca Chevrolet modelo Corsa 1.3GI mostrado en la figura 4.1. El vehículo fue modificado previo a la realización de este experimento, con el objetivo de aumentar la potencia y fuerza tractora.



Figura 4.1 Vehículo de pruebas

Entre las modificaciones que se realizaron se tiene que ahora el vehículo cuenta con un cabezote con doble árbol de levas, poleas regulables de los árboles de levas, un sistema de inyección multipunto secuencial, sistema de encendido con bobinas independientes, una unidad de control reprogramable, sensor de oxígeno de banda ancha.

Las características del vehículo de pruebas antes y después de ser modificado se muestran en las tablas 4.5 y 4.6 respectivamente.

Tabla 4.5 Características Estándar del Vehículo de Pruebas

Marca	Chevrolet
Modelo	Forsa 1.3 Gl
Tipo	Coupe
Número de cilindros	4
Motor	G13B
Potencia máxima	50.1KW @ 5335RPM
Torque	91.2Km @ 4740RPM
Cilindrada	1298cm ³
Relación de compresión	9.5
Sistema de combustible	Monopunto -
Distribución	SOHC
Válvulas por cilindro	2
Neumáticos	215/50 R13

Tabla 4.6 Características del Vehículo de Pruebas Modificado

Marca	Chevrolet
Modelo	Forsa 1.3 Gl
Tipo	Coupe
Número de cilindros	4
Motor	G13B
Potencia máxima	79.4KW @ 6690RPM
Torque	110.3Nm @ 6525RPM
Cilindrada	1370cm ³
Relación de compresión	10.5
Sistema de combustible	EFI – secuencial
Distribución	Twin Cam (DOHC)
Válvulas por cilindro	4
Neumáticos	215/50 R13

4.2.6.2 Sistema de distribución

El vehículo posee un sistema de distribución con doble árbol de levas (Twin Cam), taqués hidráulicos y con un sistema de transmisión por correa dentada.

Las poleas originales de los árboles de levas fueron reemplazadas por unas regulables mostradas en la figura 4.2 para poder realizar los ajustes requeridos de avance o retroceso de los ángulos según las condiciones establecidas para cada corrida experimental en el proceso de adquisición de datos. Para poder realizar los ajustes las poleas tienen marcas con líneas grabadas en el contorno de la parte móvil de la polea, cada una de las cuales indica un movimiento de 2° del cigüeñal respecto a una señal fija en la rueda dentada que permanece fija.



Figura 4.2 Poleas regulables

Fuente: ("Aluminum Adjustable Cam Gear Set of 2 [SUZ-ADA-6134] - \$289.90: Zen Cart!, The Art of E-commerce", 2011)

Los árboles de levas al igual que los demás elementos que comprenden este sistema son los originales con los que viene equipado el motor G13B.

4.2.6.3 Sistema de encendido

El sistema original ha sido reemplazo por un sistema de bobinas independientes para cada cilindro, el cual es necesario para poder tener un sistema secuencial y una chispa

de mejor calidad. Las bobinas empleadas presentan características mostradas en la tabla 4.7.

Tabla 4.7 Características de las Bobinas

Energía de la chispa	103mJ
Primario	40000V
Corriente máxima	19A
Tiempo típico Dwell	3ms
Máximo tiempo Dwell	9ms
Máximo trabajo Dwell	40%

Para la sincronización del encendido y la inyección de combustible se emplea un módulo de posición de motor (EPM) el cual va montado en el cabezote en reemplazo del distribuidor con el que originalmente viene equipado el motor.



Figura 4.3 Módulo de posición del motor

Fuente: ("Engine Position Module (EPM)", 2007)

Mediante este sensor se obtiene la información de la posición del cigüeñal y la fase de los árboles de levas.

4.2.6.4 Sistema de inyección multipunto secuencial.

Al igual que los sistemas descritos anteriormente, el sistema de inyección de combustible original ha sido reemplazado por un sistema de inyección multipunto, es decir, un inyector para cada cilindro, lo cual es posible debido a que el cabezote empleado originalmente posee este tipo de sistema. Este sistema complementa al de

encendido para poder obtener el sistema secuencial con el que se ha concebido el vehículo.

El sistema de inyección de combustible está conformado también por un regulador de presión para poder controlar y modificar la presión en el riel de inyectores, y una bomba de alimentación de mayor capacidad que proporciona un mayor caudal que la original. Estos cambios son necesarios, ya que se requiere mayor cantidad de combustible por el sistema multipunto y por las características de alto desempeño del motor, del que se pretende obtener la máxima potencia posible. Los diferentes componentes del sistema de inyección se muestran en la figura 4.4.



Figura 4.4 Elementos del sistema de inyección

Fuente: ("320lph High Flow In-Tank Fuel Pump (Offset Inlet) | AEM", 2012)

4.2.6.5 Sensor de oxígeno de banda ancha - Wideband

El sensor de oxígeno empleado es uno de banda ancha, mostrado en la figura 4.5, ya que tiene la capacidad 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. El sensor de oxígeno se halla conectado a su respectivo módulo Wideband el cual capta la señal analógica generada por el sensor de oxígeno y genera una señal de voltaje variable que indica cuan rica o cuan pobre se encuentra la mezcla.



Figura 4.5 Sensor de oxígeno de banda ancha

Fuente: ("Digital Wideband UEGO AFR Gauge | AEM", 2014)

Esto es importante al momento de configurar el vehículo ya que nos permite tener una lectura en tiempo real sobre la condición de la mezcla en las distintas zonas de trabajo del vehículo y así poder establecer los valores correctos de mezcla para cada zona según las exigencias o las condiciones del experimento.

La respuesta del sensor medida en voltios respecto del factor lambda, se comporta como una recta de pendiente 1. Así, en el punto de mezcla ideal, es decir, lambda igual a 1 la señal de voltaje toma un valor de 2,375V, valores de voltaje superiores a 2,375V denotan mezclas pobres, mientras que valores de voltaje inferiores a 2,375V denotan mezclas ricas.

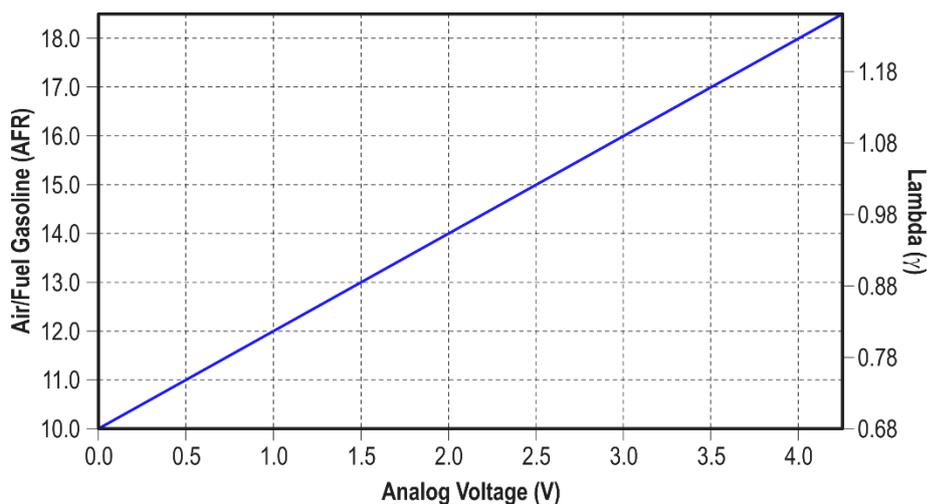


Figura 4.6 Valores del sensor de oxígeno

Fuente: (Installation Instructions for 30-4110 Gauge-Type UEGO Controller, 2014)

4.2.6.6 Unidad de control reprogramable

Originalmente el sistema de inyección es controlado por la unidad de control del motor (ECU), que recibe las señales de los diferentes sensores, procesa dicha información y controla los actuadores en función de los datos obtenidos, para lo cual tiene información preestablecida.

Debido a los múltiples cambios que se han realizado en los distintos sistemas del vehículo se requiere establecer parámetros de funcionamiento completamente diferentes a los originales, lo cual es posible mediante una unidad de control reprogramable. La unidad de control reprogramable permite gestionar la información y modificar en tiempo real factores de funcionamiento del motor como el tiempo de inyección, adelanto al encendido, objetivo de mezcla, entre otros mediante la manipulación de la cartografía de control. En la figura 4.7 se muestra la unidad de control reprogramable utilizada.



Figura 4.7 Unidad de control reprogramable

Fuente: ("EMS-4 Universal Standalone Engine Management System", 2012)

La unidad de control reprogramable AEM EMS-4 mediante su software AEM Tuner permite la configuración y modificación en tiempo real de diversos parámetros de funcionamiento del sistema de gestión electrónica del motor. A más de permitir establecer los parámetros de funcionamiento del motor, permite establecer cartografías de corrección o retroalimentación de acuerdo a los diversos estados de funcionamiento del motor, obteniendo información de varios sensores. La configuración de la cartografía para el tiempo de inyección se muestra en la figura 4.8.

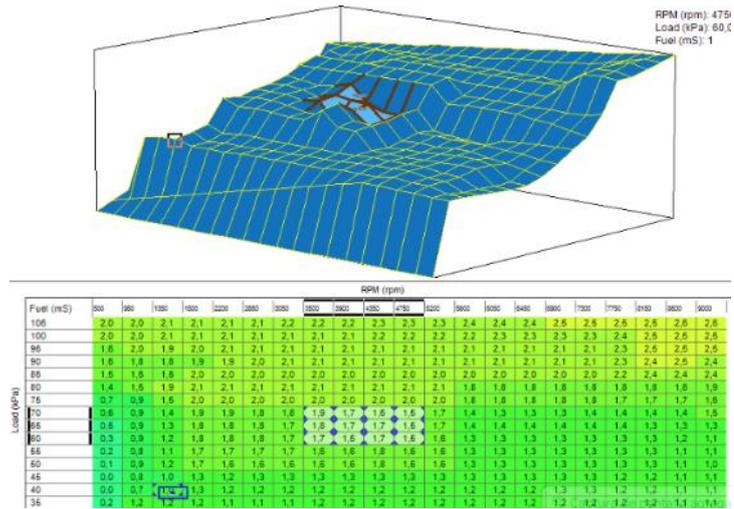


Figura 4.8 Configuración de la cartografía para el tiempo de inyección

Para que la unidad de control reprogramable pueda controlar el sistema de inyección y encendido es necesario conectar el módulo a los diferentes sensores y actuadores y así poder configurar según las exigencias de funcionamiento o según las condiciones del experimento en desarrollo. La conexión del módulo se encuentra ilustrado en la figura 4.9.

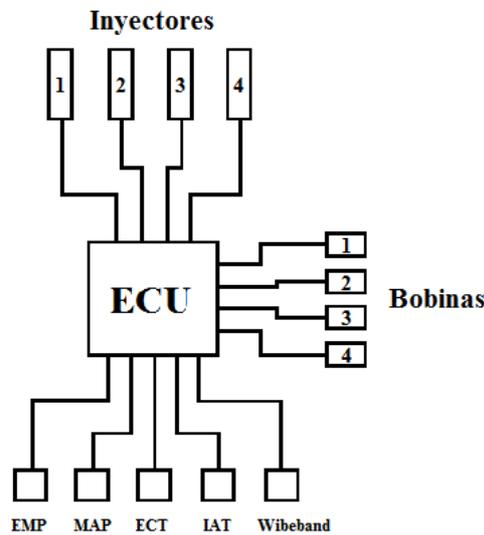


Figura 4.9 Conexión del módulo

4.2.6.7 Banco dinamométrico

Para el desarrollo del experimento, se utilizó el banco dinamométrico MAHA LPS 3000 el cual se muestra en la figura 4.10, tanto para la generación de carga como para la toma de datos. El banco cuenta con un freno dinamométrico de corrientes parásitas que permite generar carga a más de medir la fuerza tractora y potencia de forma simultánea. Se puede determinar potencia según algunas normativas internacionales. Para nuestro caso se determina la potencia neta según NTE INEN 0960 1984, Vehículos Automotores, determinación de Potencia neta del motor.



Figura 4.10 Banco dinamométrico

El banco consta de dos juegos de rodillos conectados a los frenos que captan la velocidad y 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 velocidad de giro del motor (Rivera & Chica, 2015, pág. 22).

4.2.6.8 Medidor de flujo de combustible

Se puede conectar al banco dinamométrico el contador de combustible AIC FUEL Flow Master 5004 mostrado en la figura 4.11. De este se obtiene los datos sobre el

flujo instantáneo de combustible, flujo promedio y cantidad de combustible consumido.



Figura 4.11 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. Sus características se presentan en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Características del Medidor de Flujo de Combustible

Rango	0 a 120 l/h
Error máximo	1%
Repetitividad	0,2%
Presión máxima	5bar

4.2.6.9 Analizador de gases

Para el análisis de la concentración de emisiones contaminantes en los gases de escape se utilizó el analizador de gases QROTECH QGA/NGA6000, mostrado en la figura 4.12.



Figura 4.12 Analizador de gases

El analizador realiza la medición de monóxido de carbono, hidrocarburos no combustionados y dióxido de carbono mediante el método NDIR (método no dispersivo de absorción de infrarrojos), mientras que la medición de oxígeno y óxidos nitrosos se da por célula electroquímica. Las características se muestran en la tabla 4.9.

Tabla 4.9 Características del Analizador de Gases

CARACTERÍSTICA	RANGO	SENSIBILIDAD	UNIDAD
Monóxido de Carbono	0.00 - 9.99	0.01	%
Dióxido de Carbono	0.0 - 20.0	0.1	%
Oxígeno	0.00 – 25.00	0.01	%
Hidrocarburos no combustionados	0 – 9999	1	ppm
Óxidos Nitrosos	0 - 5000	1	ppm
Lambda	0 -2.000	0.001	-
Relación aire/combustible	0.0 – 99.0	0.1	-

4.3 PRESENTACIÓN Y DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

Para el desarrollo del experimento se ha seleccionado un diseño de superficie de respuesta con dos niveles, el mismo que trabaja con un nivel intermedio resultado del promedio de estos antes mencionados.

El objetivo de escoger este diseño es su refinamiento de los modelos una vez determinado los factores más importantes para el experimento. Además, asegura cubrir

todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores garantizando la mejor combinación para obtener un mejor resultado.

4.3.1 DEFINICIÓN DE LOS NIVELES

Para poder determinar los efectos que producen cada uno de los factores de estudio es necesario establecer los niveles dentro de los cuales se van a generar las corridas experimentales. Estos niveles deben ser lo suficientemente lejanos para que se produzcan cambios significativos en la salida, sin embargo, se debe tener en cuenta que no se generen problemas durante el funcionamiento del motor.

Para obtener los niveles de los factores involucrados en el desarrollo del experimento se debe realizar corridas preliminares, estudiando el cambio producido al variar significativamente cada uno de ellos, y de esta manera establecer dichos niveles.

Antes de iniciar con la definición de los niveles de los factores de estudio involucrados en el experimento, es necesario establecer algunos factores de bloqueo importantes para el desarrollo del experimento.

El régimen de giro es un factor influyente en las prestaciones del motor, como lo es al tratar de conseguir un mayor par. El motor antes de ser modificado mantiene su régimen de giro en ralentí a 900 RPM, el mismo que se mantendrá durante todo el desarrollo del experimento. Para establecer el régimen de giro máximo del motor se toma en cuenta que el aumento de la potencia del motor debe notarse en el uso cotidiano, por lo tanto, como el vehículo circula a diario a 4000 RPM aproximadamente se define este límite como máximo para el giro del motor.

Otro factor importante es el octanaje del combustible y debido a que el motor utilizado en el presente experimento fue anteriormente modificado, es recomendable utilizar combustible de alto octanaje, por lo tanto, se utiliza combustible Súper durante toda la corrida experimental, el mismo que es de mayor calidad circulando en nuestro medio con un octanaje de 92.

4.3.2 ADELANTO A LA APERTURA DE LA ADMISIÓN

La variación del AAA (adelanto a la apertura de la admisión) en cierta forma puede aumentar o disminuir las prestaciones del motor al igual que los agentes contaminantes producidos en la combustión.

Lo óptimo para un mejor funcionamiento del motor es conseguir el llenado completo del cilindro, lo cual se logra al adelantar la apertura de las válvulas de admisión ya que las válvulas se encuentran más tiempo abiertas y hay un mayor intercambio de gases. Al conseguir esta mejora se pretende quemar una mayor cantidad de mezcla presente en la cámara lo que produce el aumento de las prestaciones del motor.

Para establecer los niveles de trabajo de este factor se considera los grados de variación que permiten las poleas regulables de la distribución, las mismas que presentan 9° de adelanto y 9° de retraso en el árbol de levas, lo que significa 18° de adelanto y 18° de retraso en el cigüeñal.

Tabla 4.10 Niveles del Factor AAA

FACTOR	NIVEL MÍNIMO	NIVEL INTERMEDIO	NIVEL MÁXIMO
Adelanto a la Apertura de la Admisión	14°	20°	26°

4.3.3 RETRASO AL CIERRE DEL ESCAPE

Para conseguir un aumento de las prestaciones del motor lo que se busca es el mejor vaciado de los gases combustionados, lo cual se logra a través del retraso del cierre de las válvulas de escape. Esto es necesario ya que al momento que se da el cruce de válvulas los gases deben intercambiarse inmediatamente para comenzar nuevamente el ciclo de trabajo. Con una excelente calidad de mezcla aire-combustible, combinada con un mayor tiempo de apertura de las válvulas de admisión y escape, se produce un aumento del régimen de giro del motor, sin embargo, este aumento se produce cuando el motor trabaja a altas revoluciones, siendo el caso contrario en bajas revoluciones.

Para determinar los niveles de trabajo de este factor de estudio se utiliza la polea regulable de escape de la distribución la cual da 9° de adelanto y retraso en el árbol de levas, por consiguiente 18° grados de adelanto y retraso en el cigüeñal.

Tabla 4.11 Niveles del Factor RCE

FACTOR	NIVEL MÍNIMO	NIVEL INTERMEDIO	NIVEL MÁXIMO
Retraso al Cierre del Escape	23°	27,5°	32°

4.3.4 AFR

La relación aire-combustible es denominada AFR y cuya proporción ideal es de 14,7kg de aire por cada 1kg de combustible. Esta relación se conoce como mezcla estequiometrica, la misma que influye en el comportamiento del motor, tanto en su potencia, par, consumo de combustible y emisión de gases contaminantes. Hay que tener en cuenta que, al manipular este factor para aumentar las prestaciones del motor, no se debe descuidar el aumento de las emisiones de gases contaminantes.

Para escoger el rango de valores del AFR se establece una corrida experimental mediante la cual se logra determinar los valores topes de AFR dentro de los cuales el motor presenta un aumento de las prestaciones y disminución de su consumo.

Esta corrida es realizada mediante un módulo de control reprogramable en el cual se puede modificar la cartografía precargada, dando como resultado una variación del factor AFR.

Tabla 4.12 Niveles del Factor AFR

FACTOR	NIVEL MÍNIMO	NIVEL INTERMEDIO	NIVEL MÁXIMO
Relación Aire-Combustible	11,1	11,8	12,5

4.3.4.1 Adaptación de la mezcla

Para establecer los valores de AFR es necesario instalar un sensor de oxígeno de banda ancha el cual tiene la función de generar una señal analógica en función de la relación aire-combustible mediante la medición de la cantidad de oxígeno presente en la concentración de gases de escape. El sensor de oxígeno se conecta al módulo wideband dando a conocer así el estado de la mezcla durante el funcionamiento en tiempo real, de esta manera se puede controlar este factor mediante el manejo del mapa establecido en el módulo reprogramable.

4.3.5 INCREMENTO DEL ADELANTO AL ENCENDIDO

La variación de este factor tiene mucha influencia sobre el comportamiento del motor, ya que si se adelanta demasiado puede provocar detonación lo que conlleva al aumento de gases contaminantes por lo tanto es necesario utilizar combustible de mayor octanaje para evitar dichos problemas. Sin embargo, si se retrasa demasiado se tiene como consecuencia la disminución de la potencia y aumento excesivo en el consumo de combustible.

La determinación de los niveles del adelanto al encendido se realiza mediante una corrida preliminar en la cual se utiliza un módulo de control reprogramable con la facilidad de manipular este factor durante el funcionamiento del motor. Se varía el avance al encendido hasta encontrar los límites dentro de los cuales el motor presenta un aumento de las prestaciones sin presentar cascabeleo durante su funcionamiento.

Tabla 4.13 Niveles del Factor Adelanto al Encendido

FACTOR	NIVEL MÍNIMO	NIVEL INTERMEDIO	NIVEL MÁXIMO
Adelanto al Encendido	23°	28°	33°

4.3.6 TRATAMIENTOS

Una vez definidos los niveles de trabajo para cada uno de los factores de estudio presentados en la siguiente tabla, se procede a definir las corridas experimentales.

Tabla 4.14 Niveles Factoriales

FACTOR	UNIDAD	NIVEL MÍNIMO	NIVEL INTERMEDIO	NIVEL MÁXIMO
Relación Aire-Combustible	-	11,1	11,8	12,5
Adelanto al Encendido	°	23°	28°	33°
Adelanto a la Apertura de la Admisión	°	14°	20°	26°
Retraso al Cierre del Escape	°	23°	27,5°	32°

Para generar las corridas experimentales se maneja el software estadístico Minitab en el cual para el diseño de experimentos de superficie de respuesta con 4 factores de estudio y 2 niveles generan 27 tratamientos en una repetición. Para un mejor resultado de desarrolla en total 3 repeticiones generando así 81 tratamientos.

A continuación, se presenta la matriz del experimento de la primera réplica.

Tabla 4.15 Matriz del Diseño Experimental Factorial

TRATAMIENTO	AAA(°)	RCE(°)	AFR	α(°)
1	14	23	11,8	28
2	26	23	11,8	28
3	14	32	11,8	28
4	26	32	11,8	28
5	20	27,5	11,1	23
6	20	27,5	12,5	23
7	20	27,5	11,1	33
8	20	27,5	12,5	33
9	14	27,5	11,8	23
10	26	27,5	11,8	23
11	14	27,5	11,8	33
12	26	27,5	11,8	33

Tabla 4.16 (Continuación) Matriz del Diseño Experimental Factorial

TRATAMIENTO	AAA(°)	RCE(°)	AFR	α(°)
13	20	23	11,1	28
14	20	32	11,1	28
15	20	23	12,5	28
16	20	32	12,5	28
17	14	27,5	11,1	28
18	26	27,5	11,1	28
19	14	27,5	12,5	28
20	26	27,5	12,5	28
21	20	23	11,8	23
22	20	32	11,8	23
23	20	23	11,8	33
24	20	32	11,8	33
25	20	27,5	11,8	28
26	20	27,5	11,8	28
27	20	27,5	11,8	28

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 TOMA DE DATOS

Las pruebas correspondientes a las corridas experimentales se desarrollaron en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.

Para la realización de estas pruebas el vehículo debe estar correctamente ubicado y asegurado en el banco dinamométrico, así como los equipos de adquisición de datos debidamente conectados y disponer las herramientas necesarias para efectuar los cambios entre corridas como se muestra en la figura 5.1.



Figura 5.1 Laboratorio de Experimentación

5.1.1 ALEATORIZACIÓN DE LAS PRUEBAS

Para asegurar que las mediciones realizadas puedan ser validadas, se aplica la aleatorización de las pruebas una vez obtenida la matriz del diseño experimental para eliminar efectos no deseados que se generan por factores ambientales y de ruido difíciles de controlar.

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 (Rivera & Chica, 2015, pág. 55).

5.1.2 PROTOCOLO DE MEDICIÓN

Para garantizar la reproducibilidad y repetibilidad del experimento las muestras fueron tomadas siguiendo el protocolo que se describe a continuación.

- Preparar instrumentos de medición y adquisición de datos.
- Encender 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 85°C.
- Seleccionar la prueba a realizar según el orden de aleatorización.
- Adquirir datos de las condiciones ambientales.
- Apagar el motor.
- Regular el valor del AAA y RCE.
- Encender el motor.
- Establecer el régimen de giro del motor en el banco dinamométrico igual a 4000RPM.
- Comprobar el valor de la presión en el colector de admisión.
- Regular el valor del Adelanto al Encendido.
- Regular el valor de AFR.
- Mantener el motor funcionando al régimen de giro establecido hasta que se estabilice en cuarta marcha.
- 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 de Encendido a su valor inicial.
- Regular el factor lambda a su valor inicial.
- Mantener el motor funcionando por dos minutos.
- Apagar el motor.

Los datos obtenidos del banco dinamométrico, analizador de gases, contador de combustible, software de la unidad de control reprogramable y medidor de temperatura son almacenados en un ordenador con un formato que permita corresponder los datos de las mediciones con su tratamiento y que es compatible con el software de análisis estadístico Minitab® en el cual se realiza el tratamiento de los datos.

5.2 TRATAMIENTO DE DATOS

Para evitar la introducción de errores debido a las imprecisiones que se pueden tener en los resultados de las mediciones realizadas, los datos obtenidos antes de ser utilizados deben ser validados. Los modelos estadísticos que se van a desarrollar dependen entonces de las limitaciones de precisión y exactitud.

5.2.1 VALIDACIÓN DE DATOS

Se grafican los residuos de cada salida frente al orden de toma de la muestra para verificar los resultados de la aleatorización en el desarrollo de las corridas experimentales. Las gráficas de residuos para las salidas medidas por el analizador de gases se muestran en la figura 5.2, donde se puede apreciar que no existe dependencia de cada una de las muestras respecto a la anterior ni tampoco patrones definidos.

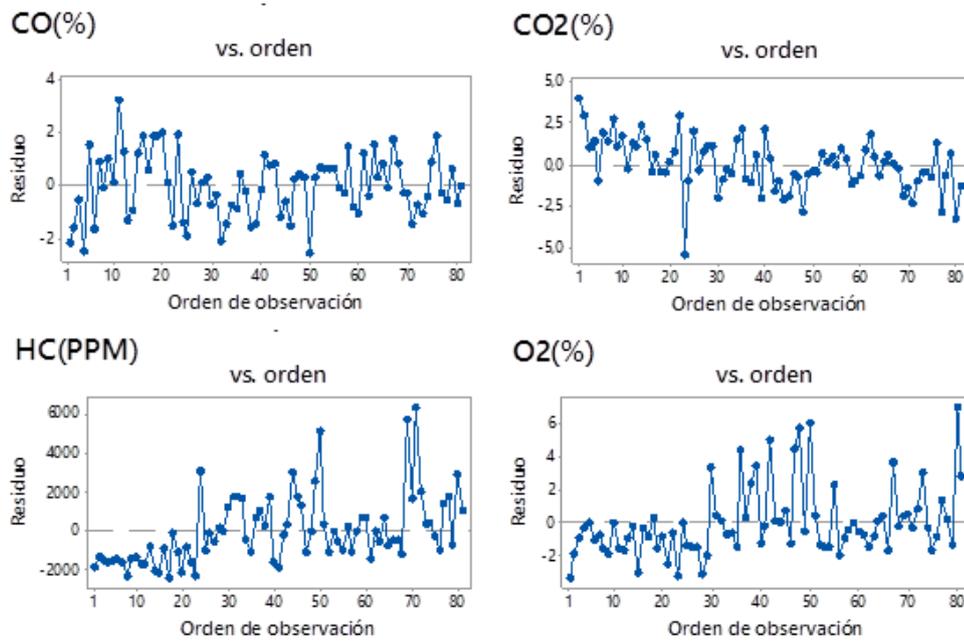


Figura 5.2 Gráficas de Residuos del Analizador de Gases

Las respuestas que se obtienen mediante el banco dinamométrico presentadas en la figura 5.3, muestran un comportamiento regular, similar a los anteriores y también entre sí, ya que, por el principio de funcionamiento del banco empleado, la fuerza tractora es la que se mide directamente y mediante un cálculo se obtiene la potencia.

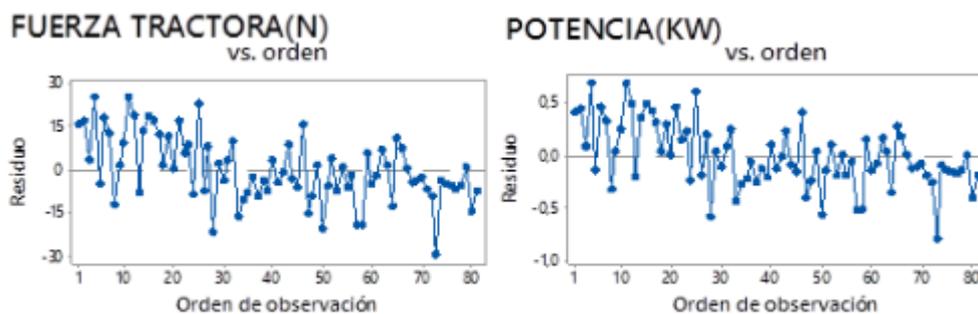


Figura 5.3 Gráficas de Residuos del Banco Dinamométrico

Los datos obtenidos mediante el contador de combustible, el cual se halla conectado al banco dinamométrico se muestran en la figura 5.4, con lo que se puede confirmar que se tiene un comportamiento que garantiza la independencia de errores.

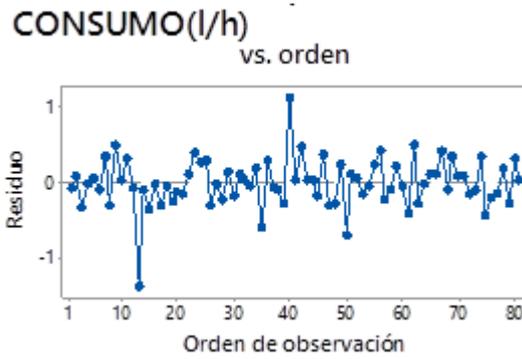


Figura 5.4 Gráfica de Residuos del Contador de Combustible

Para garantizar que las variables de bloqueo no generen influencia en las salidas se verifica que se encuentren dentro de los valores establecidos al momento de realizar las corridas experimentales. Esto se puede comprobar con las gráficas de dispersión en la figura 5.5.

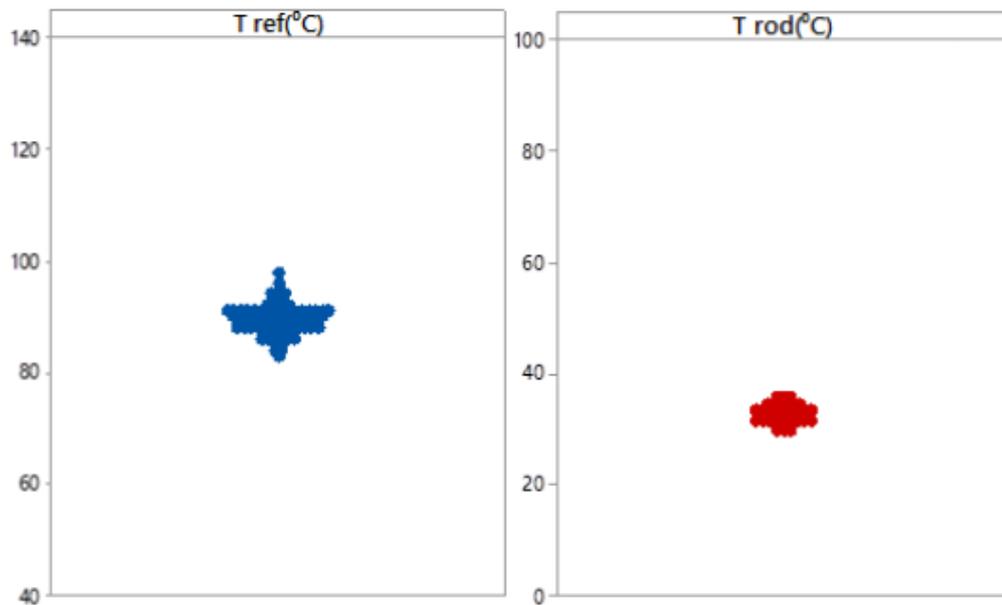


Figura 5.5 Dispersión de la Variables de Bloqueo

Los valores correspondientes a las variables de ruido durante la realización del experimento se muestran en la figura 5.6.

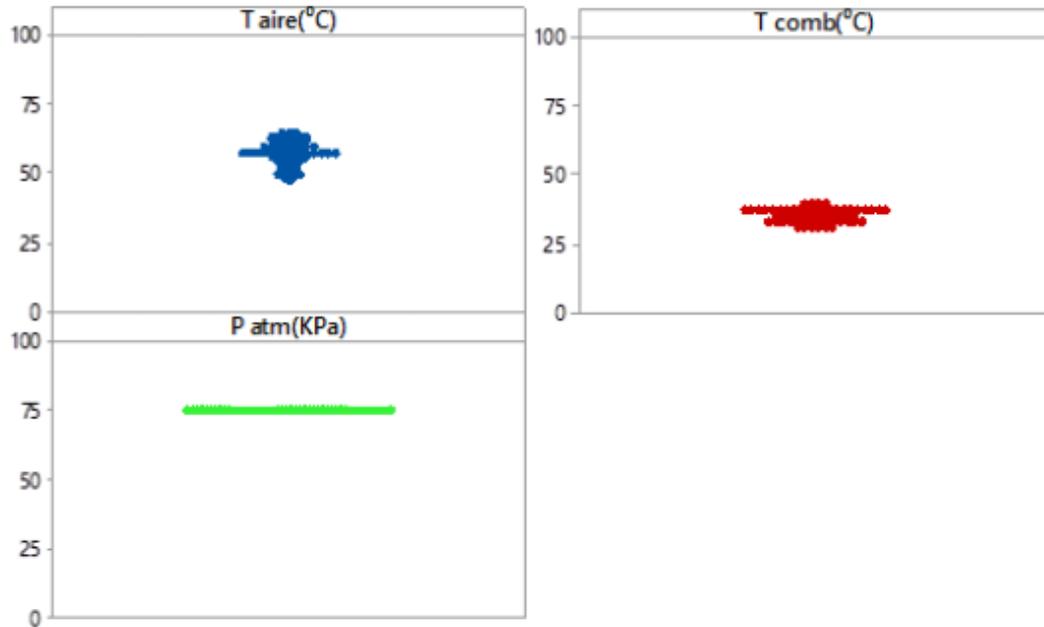


Figura 5.6 Dispersión de las Variables de Ruido

5.3 REPRESENTACIÓN GRÁFICA Y ANÁLISIS

5.3.1 POTENCIA

En la gráfica de efectos principales que se muestra en la figura 5.7 se puede observar que los efectos que generan mayor influencia son el AAA y RCE, ya que al aumentar su valor se genera un incremento de potencia. La potencia decrece al tener un aumento elevado del Adelanto al Encendido. Respecto a la condición de la mezcla se puede apreciar que para valores de mezcla rica la potencia aumenta.

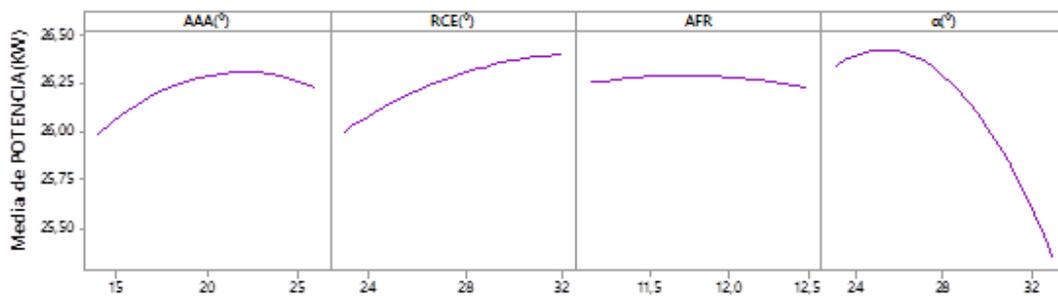


Figura 5.7 Grafica de Efectos Principales para Potencia

En la gráfica de interacciones que muestra en la figura 5.8 se puede observar que las interacciones más fuertes se dan entre el factor Adelanto al Encendido con los factores AAA y AFR, siendo los más influyentes en el cambio de potencia del motor.

Interacciones más débiles se dan entre los factores AFR y AAA, AFR y RCE y entre los factores AAA y RCE.

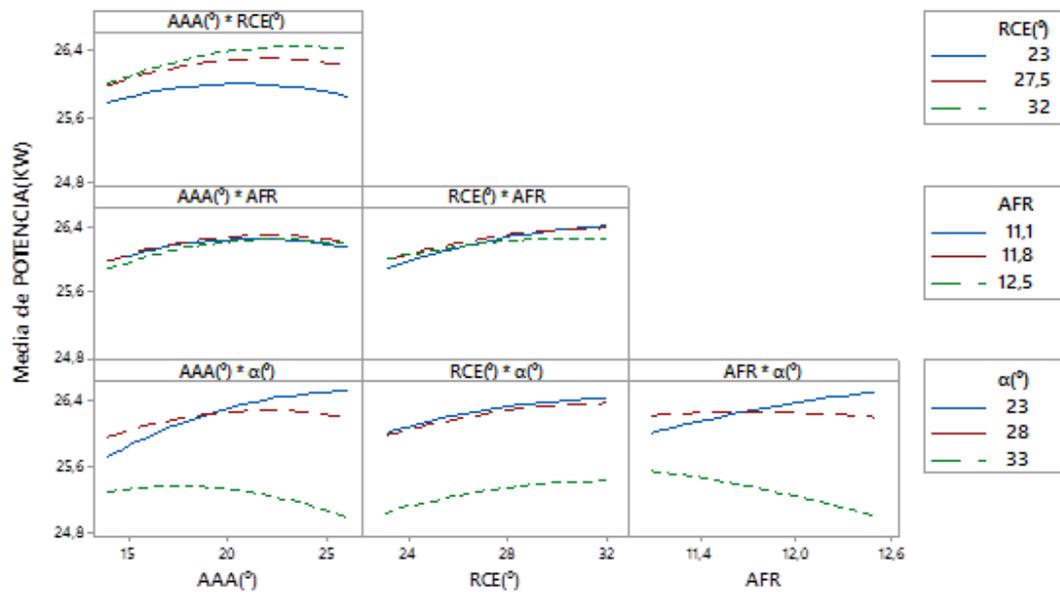


Figura 5.8 Grafica de Interacciones para Potencia

La ecuación que describe el comportamiento de la potencia se muestra en (5.1).

$$\begin{aligned}
 P(KW) = & -39.2 + 0.302 AAA + 0.491 RCE + 4.88 AFR + 1.973 \alpha - \\
 & 0.00509 AAA * AAA - 0.00453 RCE * RCE - 0.102 AFR * \\
 & AFR - 0.01800 \alpha * \alpha + 0.00309 AAA * RCE + 0.0079 AAA * \\
 & AFR - 0.00917 AAA * \alpha - 0.0212 RCE * AFR - \\
 & 0.00037 RCE * \alpha - 0.0738 AFR * \alpha
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

El coeficiente de determinación es:

$$R_D^2 = 93,76\%$$

5.3.2 FUERZA TRACTORA

En la gráfica de efectos principales mostrado en la figura 5.9 se puede observar que la fuerza tractora incrementa cuando se tiene un aumento del valor del AAA y RCE. Un aumento del Adelanto al Encendido muy pronunciado genera pérdida en la fuerza tractora, ya que esta acción genera incremento de la misma solo hasta cierto valor, luego de lo cual el efecto es negativo. Se observa también que se tiene un incremento de la fuerza tractora con valores de mezcla rica.

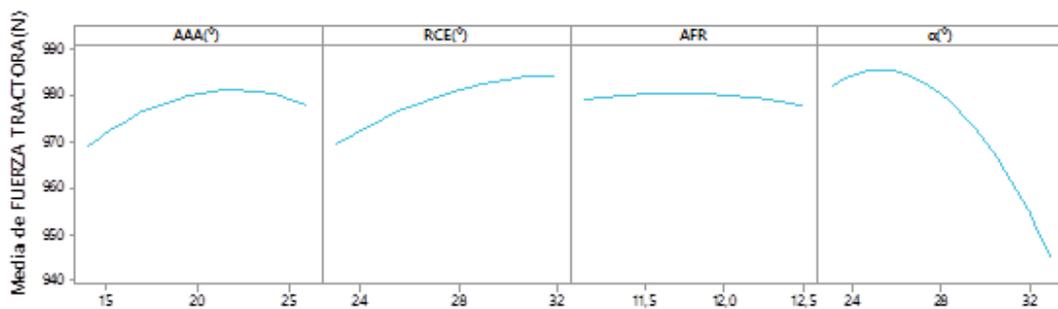


Figura 5.9 Gráfica de Efectos Principales para Fuerza Tractora

En la gráfica de interacciones que muestra en la figura 5.10 se puede corroborar que el comportamiento de la potencia y la fuerza tractora se encuentran ligados entre sí, dándose cruces entre la mayoría de los factores, siendo los más pronunciados los producidos por el factor Adelanto al Encendido generando las interacciones más fuertes con los factores AAA y AFR. Otras interacciones un poco menos fuertes pero considerables son las que se dan entre los factores AFR y AAA, AFR y RCE y entre los factores AAA y RCE en menor medida.

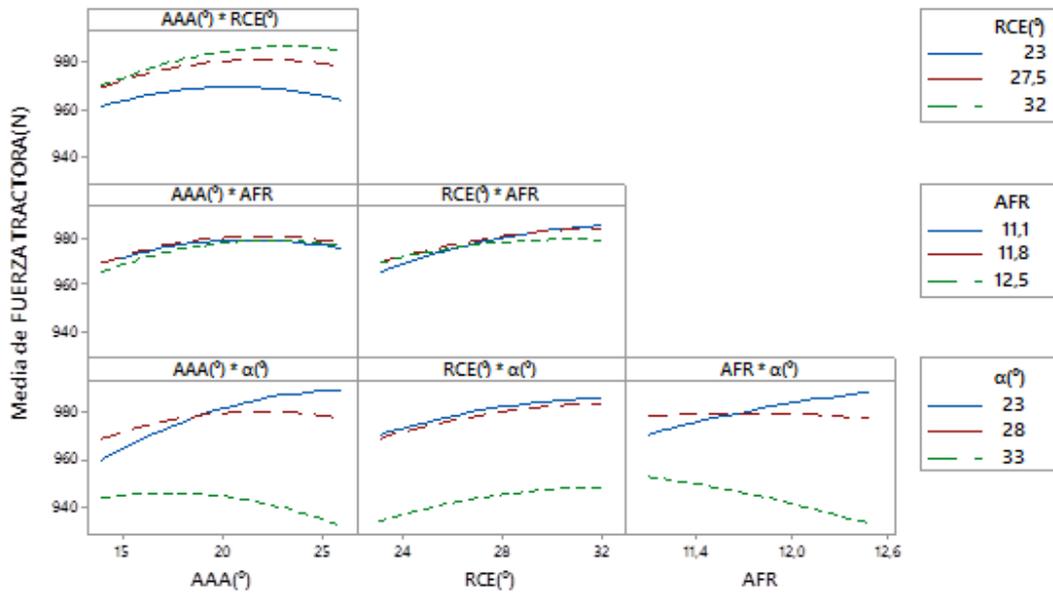


Figura 5.10 Gráfica de Interacciones para Fuerza Tractora

La ecuación que describe el comportamiento de la fuerza tractora se muestra en (5.2).

$$\begin{aligned}
 F(N) = & -1440 + 11.2 AAA + 18.4 RCE + 179 AFR + \\
 & 73.1 \alpha - 0.1875 AAA * AAA - 0.169 RCE * RCE - \\
 & 3.74 AFR * AFR - 0.670 \alpha * \alpha + 0.114 AAA * \\
 & RCE + 0.298 AAA * AFR - 0.342 AAA * \alpha - \\
 & 0.79 RCE * AFR - 0.015 RCE * \alpha - 2.71 AFR * \alpha
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

El coeficiente de determinación es:

$$R_D^2 = 93,68\%$$

5.3.3 CONSUMO

En la gráfica de efectos principales que se muestra en la figura 5.11 se observa que el consumo de combustible aumenta de manera considerable para condiciones de mezcla rica. El consumo de combustible disminuye ligeramente cuando se tiene valores bajos de AAA y RCE. En cuanto al Adelanto al Encendido se puede determinar que, para valores altos de este, el consumo disminuye.

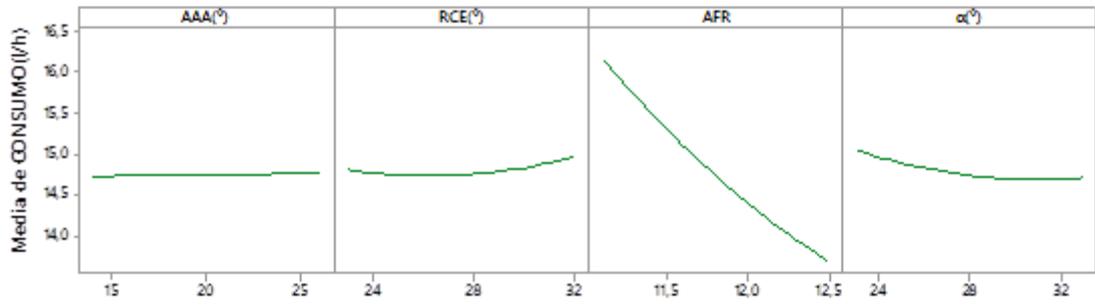


Figura 5.11 Gráfica de Efectos Principales para Consumo

En la gráfica de interacciones que se muestra en la figura 5.12 se puede observar que las interacciones más fuertes se dan entre los factores RCE y Adelanto al Encendido y entre los factores AAA y RCE.

Los cruces que se dan entre los factores AAA y Adelanto al Encendido y entre los factores AFR y Adelanto al Encendido son un poco menos fuertes, pero su interacción también genera cambios en el consumo de combustible del motor.

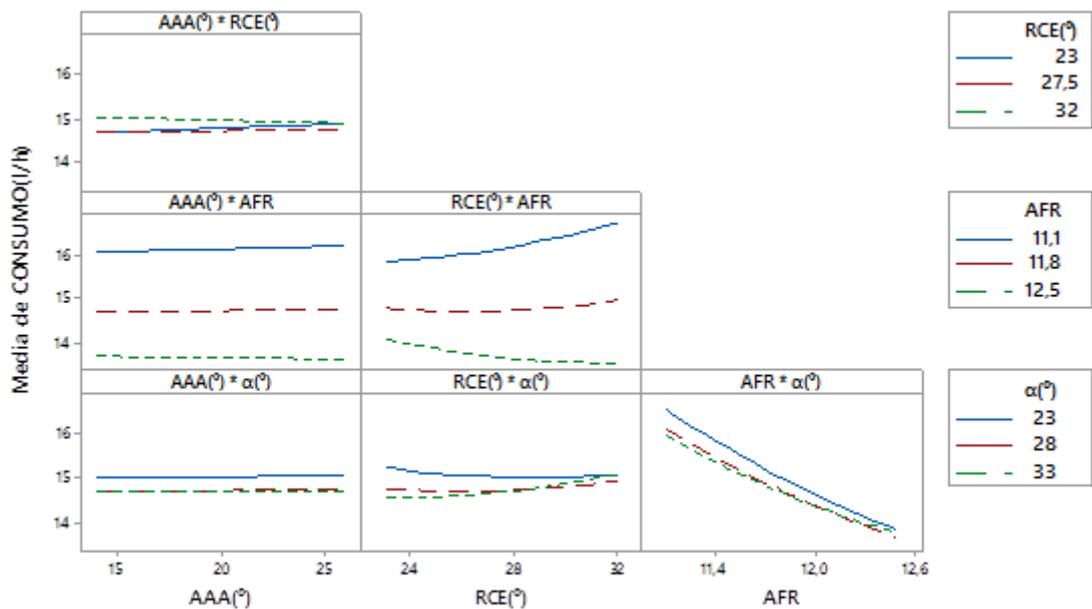


Figura 5.12 Gráfica de Interacciones para Consumo

La ecuación que describe el comportamiento del consumo de combustible se muestra en (5.3).

$$\begin{aligned}
C\left(\frac{1}{h}\right) = & 74.9 + 0.243 AAA + 0.778 RCE - 8.29 AFR - 0.986 \alpha + \\
& 0.00006 AAA * AAA + 0.00727 RCE * RCE + 0.372 AFR * \\
& AFR + 0.00549 \alpha * \alpha - 0.00318 AAA * RCE - 0.0121 AAA * \\
& AFR - 0.00044 AAA * \alpha - 0.1111 RCE * AFR + \\
& 0.00774 RCE * \alpha + 0.0374 AFR * \alpha
\end{aligned} \tag{5.3}$$

El coeficiente de determinación es:

$$R_D^2 = 92,05\%$$

5.3.4 MONÓXIDO DE CARBONO

En la gráfica de efectos principales mostrado en la figura 3.13 se puede apreciar el comportamiento de la concentración de monóxido de carbono. Se tiene así que el máximo valor de emisión de monóxido de carbono se da para valores de mezcla muy rica. Se tiene un incremento en la emisión de monóxido de carbono para valores elevados de Adelanto al Encendido.

Respecto al AAA y RCE se tiene que la emisión de monóxido de carbono es menor para valores altos de estos factores, pero se presenta un máximo de concentración cuando se tiene valores intermedios de estos factores respecto a los intervalos establecidos para la realización del experimento.

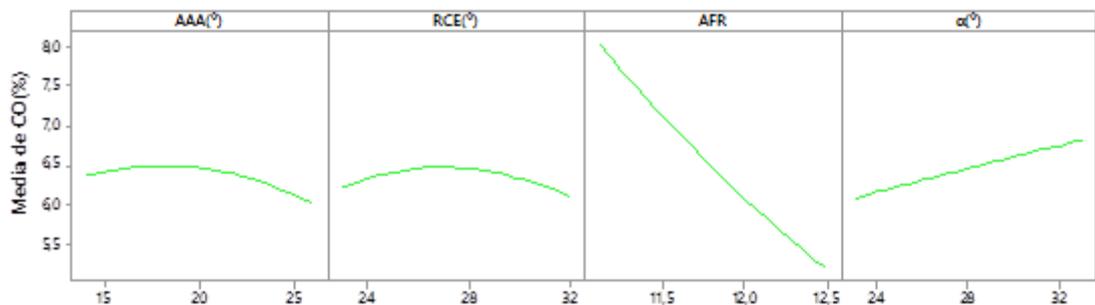


Figura 5.13 Gráfica de Efectos Principales para CO

La gráfica de interacciones mostrada en la figura 5.14 muestra que la interacción mas fuerte se da entre los factores AAA y RCE, siendo la que mayor influencia ejerce en

la concentración de CO. Otras interacciones considerables se dan entre los factores RCE y Adelanto al Encendido y entre los factores AFR y Adelanto al Encendido.

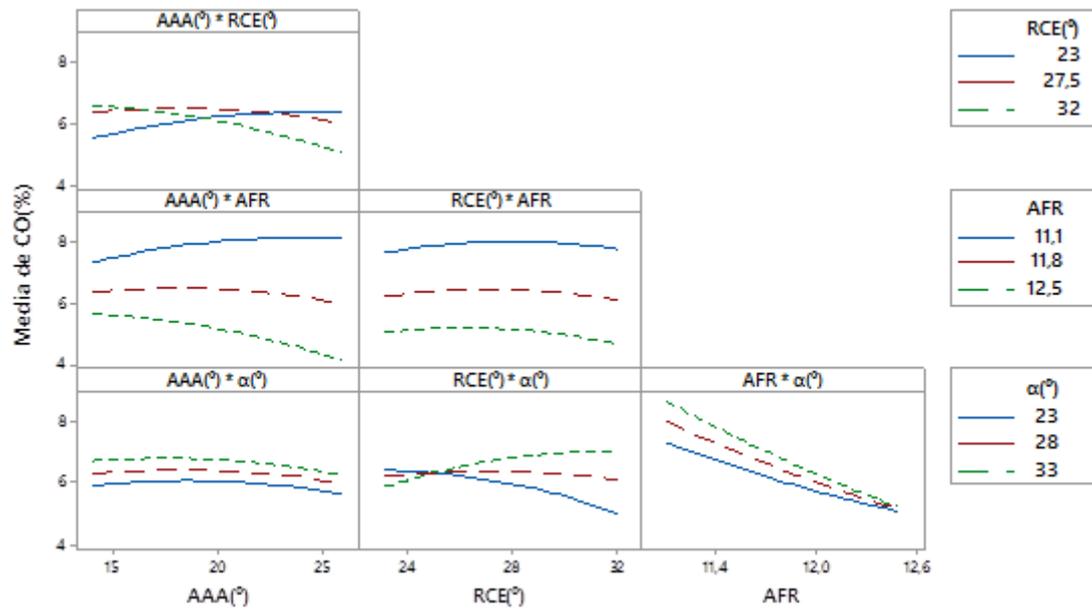


Figura 5.14 Gráfica de Interacciones para CO

La ecuación que describe el comportamiento del CO se muestra en (5.4).

$$\begin{aligned}
 CO(\%) = & -9 + 2.57 AAA + 0.94 RCE - 2.9 AFR + 0.41 \alpha - 0.00778 AAA * AAA \\
 & - 0.0152 RCE * RCE + 0.307 AFR * AFR - 0.0006 \alpha * \alpha \\
 & - 0.0223 AAA * RCE - 0.1377 AAA * AFR - 0.0018 AAA * \alpha \\
 & - 0.041 RCE * AFR + 0.0289 RCE * \alpha - 0.090 AFR * \alpha \quad (5.4)
 \end{aligned}$$

El coeficiente de determinación es:

$$R_D^2 = 89,73\%$$

5.3.5 DIÓXIDO DE CARBONO

En la gráfica de efectos principales que se muestra en la figura 5.15 se observa que se genera un notable incremento en la emisión de dióxido de carbono cuando se tiene valores elevados del AAA y RCE.

Respecto a la condición de la mezcla se puede apreciar que la máxima concentración de emisión de dióxido de carbono se da cuando se tiene mezcla ligeramente rica.

Un valor de Adelanto al Encendido bajo, próximo al nivel mínimo escogido para este factor genera un elevado nivel de emisión de dióxido de carbono.

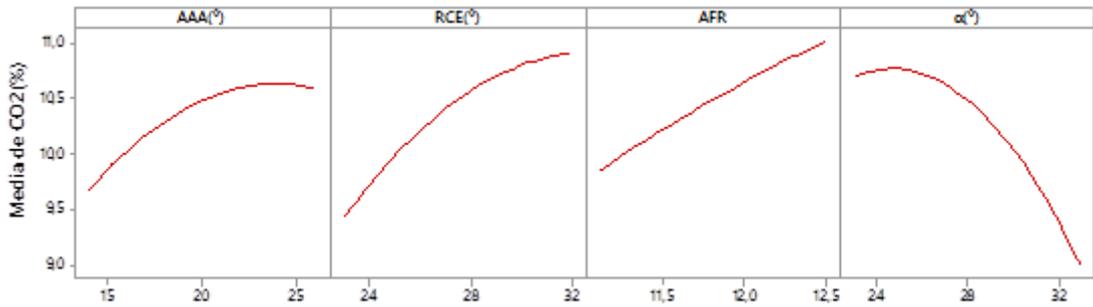


Figura 5.15 Gráfica de Efectos Principales para CO2

En la gráfica de interacciones mostrada en la figura 5.16 se observa que la interacción más fuerte es la producida entre los factores RCE y Adelanto al Encendido y en menor medida se tiene un cruce entre los factores AAA y Adelanto al Encendido.

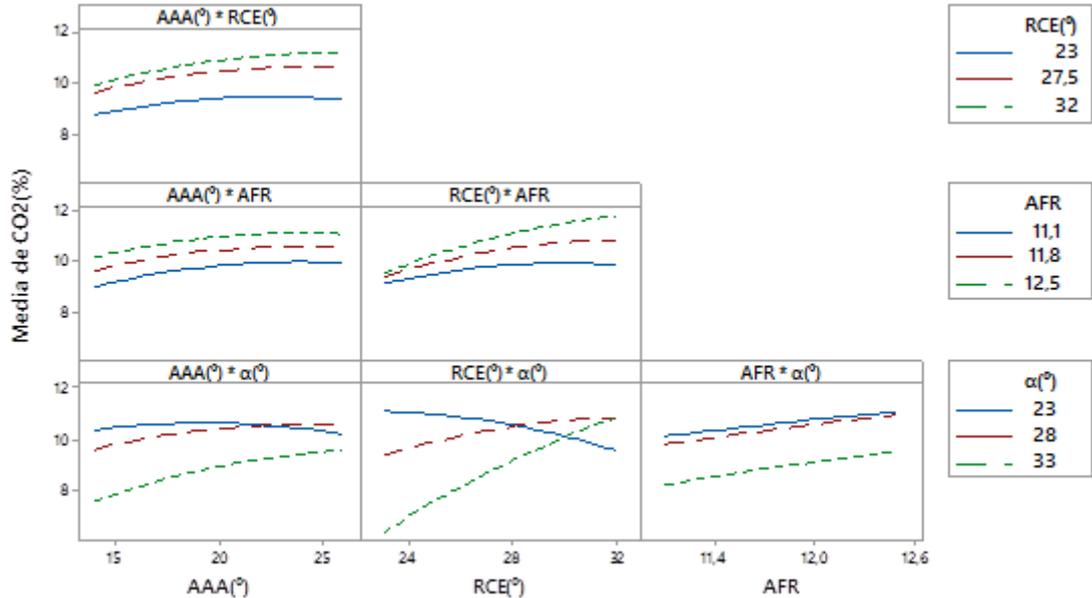


Figura 5.16 Gráfica de Interacciones para CO2

La ecuación que describe el comportamiento del CO2 se muestra en (5.5).

$$\begin{aligned}
CO_2(\%) = & 65 - 0.23 AAA - 2.44 RCE - 1.1 AFR - 1.28 \alpha - 0.0097 AAA * AAA \\
& - 0.0155 RCE * RCE - 0.100 AFR * AFR - 0.0256 \alpha * \alpha \\
& + 0.0059 AAA * RCE + 0.002 AAA * AFR + 0.0183 AAA * \alpha \\
& + 0.124 RCE * AFR + 0.0669 RCE * \alpha + 0.029 AFR * \alpha \quad (5.5)
\end{aligned}$$

El coeficiente de determinación es:

$$R_D^2 = 88,96\%$$

5.3.6 OXÍGENO

La gráfica de efectos principales mostrado en la figura 5.17 se puede apreciar que la concentración de oxígeno en las emisiones es menor cuando los valores de AAA y RCE son los máximos dentro de los niveles elegidos para la realización del experimento.

El incremento en el Adelanto al Encendido genera un aumento en la concentración de oxígeno presente en los gases de escape.

La concentración de oxígeno en los gases de escape presenta un máximo para valores de mezcla ligeramente rica cercanos al nivel intermedio, pero disminuye de manera considerable para valores de mezcla rica.

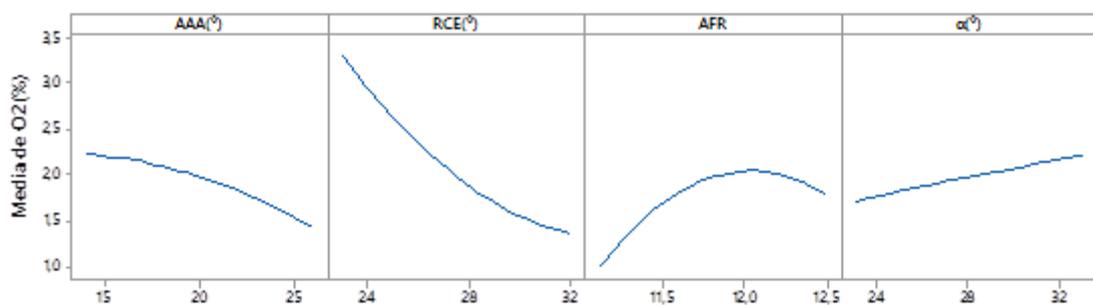


Figura 5.17 Gráfica de Efectos Principales para O₂

En la gráfica de interacciones que se muestra en la figura 5.18 se puede notar claramente que la interacción más fuerte se produce por el cruce generado entre los factores AAA y Adelanto al Encendido. Una interacción más débil se da entre los

factores RCE y AFR, sin dejar de ejercer influencia en los cambios de concentración de O₂ en los gases de escape.

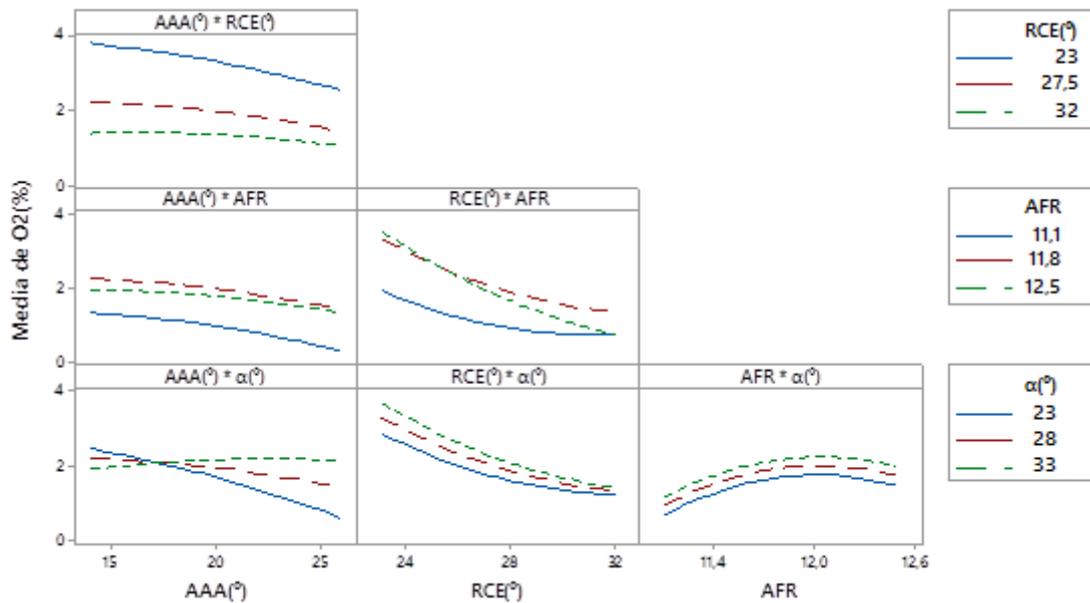


Figura 5.18 Gráfica de Interacciones para O₂

La ecuación que describe el comportamiento del oxígeno se muestra en (5.6).

$$\begin{aligned}
 O_2(\%) = & -183 - 0.91 AAA + 0.35 RCE + 32.3 AFR - 0.15 \alpha - 0.0041 AAA \\
 & * AAA + 0.0179 RCE * RCE - 1.22 AFR * AFR - 0.0007 \alpha * \alpha \\
 & + 0.0085 AAA * RCE + 0.024 AAA * AFR + 0.0176 AAA * \alpha \\
 & - 0.129 RCE * AFR - 0.0071 RCE * \alpha + 0.007 AFR * \alpha \quad (5.6)
 \end{aligned}$$

El coeficiente de determinación es:

$$R_D^2 = 89,37\%$$

5.3.7 HIDROCARBUROS NO COMBUSTIONADOS

En la gráfica de efectos principales que se presenta en la figura 5.19 se puede observar que los factores que ejercen mayor influencia sobre la concentración de hidrocarburos no combustionados en los gases de escape son: el RCE, la condición de la mezcla y el Adelanto al Encendido, presentando un máximo nivel de concentración en un punto

cercano al intermedio de los niveles escogidos para estos factores; valores superiores e inferiores al descrito para estos factores generan una disminución en la concentración de hidrocarburos no combustionados.

Un valor bajo del AAA genera un nivel de concentración de hidrocarburos no combustionados elevado.

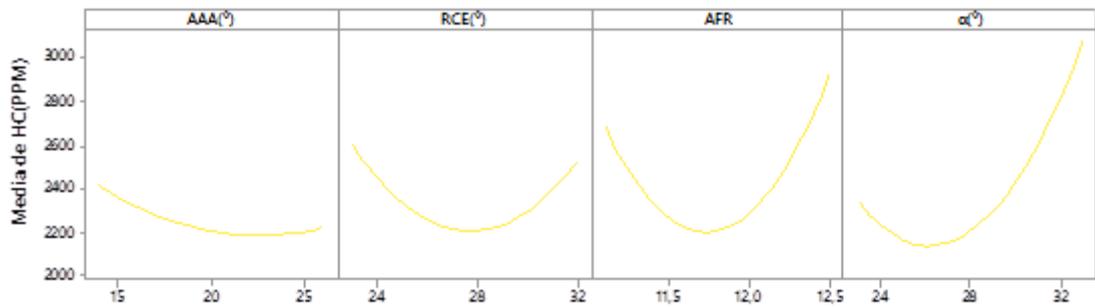


Figura 5.19 Gráfica de Efectos Principales para HC

En la gráfica de interacciones mostrada en la figura 5.20 se puede observar que los cruces más pronunciados son los que provoca el factor AFR para generar las interacciones más fuertes con los factores AAA y RCE. Otra interacción fuerte se da entre los factores RCE y Adelanto al Encendido; una interacción de menor peso se da entre los factores AAA y RCE.

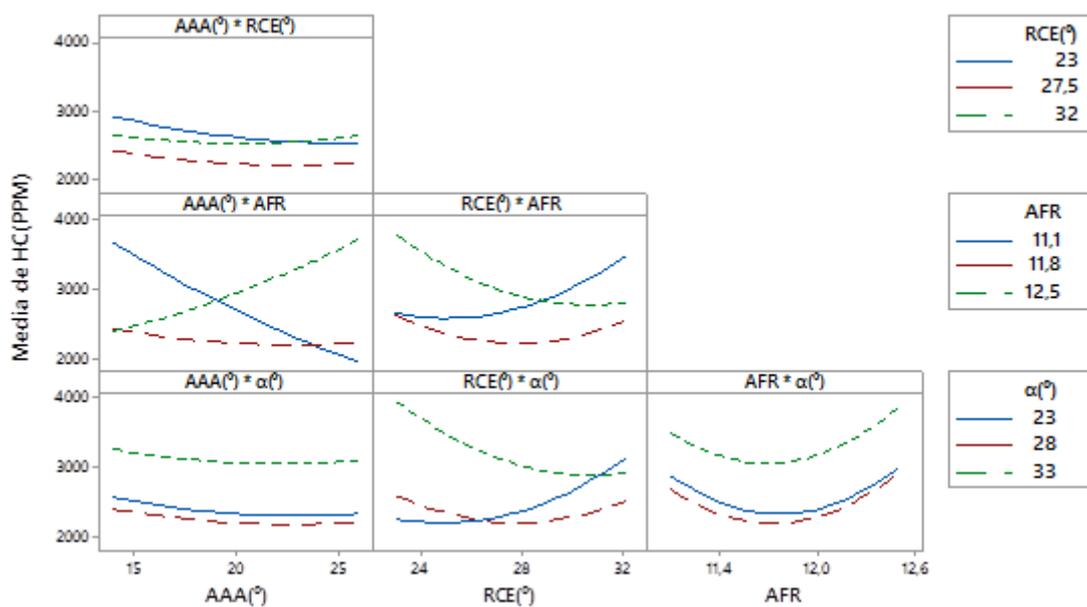


Figura 5.20 Gráfica de Interacciones para HC

La ecuación que describe el comportamiento de los hidrocarburos no combustionados se muestra en (5.7).

$$\begin{aligned}
 HC(ppm) = & 187775 - 2401 AAA + 1230 RCE - 28857 AFR - 714 \alpha \\
 & + 3.1 AAA * AAA + 17.6 RCE * RCE + 1221 AFR * AFR + 20.1 \alpha \\
 & * \alpha + 3.2 AAA * RCE + 183 AAA * AFR + 0.6 AAA * \alpha - 143 RCE \\
 & * AFR - 20.7 RCE * \alpha + 19 AFR * \alpha
 \end{aligned}
 \tag{5.7}$$

El coeficiente de determinación es:

$$R_D^2 = 90,66\%$$

5.3.8 VARIACIÓN RELATIVA DE POTENCIA

En la gráfica de efectos principales que se presenta en la figura 5.21 se puede apreciar que el mayor incremento de potencia, respecto del valor obtenido con la configuración inicial se da cuando se tiene un incremento en el AAA y RCE. Un incremento demasiado elevado en el Adelanto al Encendido genera disminución de la potencia. Con respecto al valor de AFR se puede observar que se alcanza un máximo de potencia cuando este valor se encuentra en un punto cercano al intermedio de los niveles elegidos para el mismo.

Se considera importante el análisis de este factor, ya que permite apreciar de mejor manera, en porcentaje cuanto se incrementado la potencia al realizar las pruebas con respecto al valor obtenido con la configuración inicial, el cual se considera como 0. La fuerza tractora tiene el mismo comportamiento.

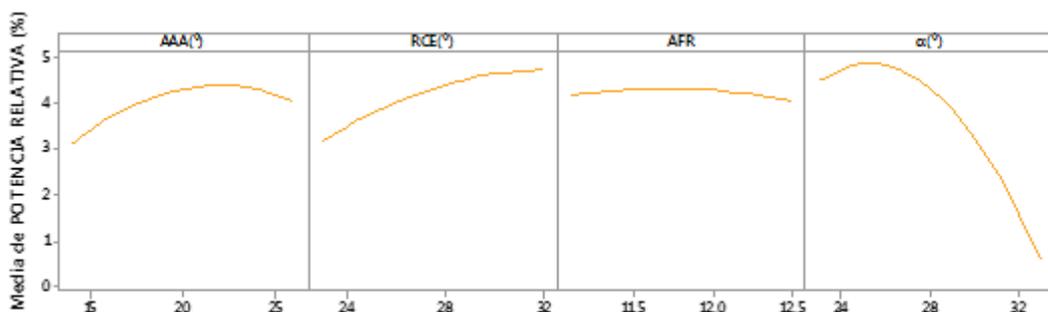


Figura 5.21 Gráfica de Efectos principales para incremento de potencia

En la gráfica de interacciones que se muestra en la figura 5.22 se puede observar que las interacciones más fuertes son las generadas entre los factores AAA y Adelanto al Encendido, y los factores AFR y Adelanto al Encendido. Interacciones con cruces menos pronunciados son los que genera el factor AFR con los factores AAA y RCE.

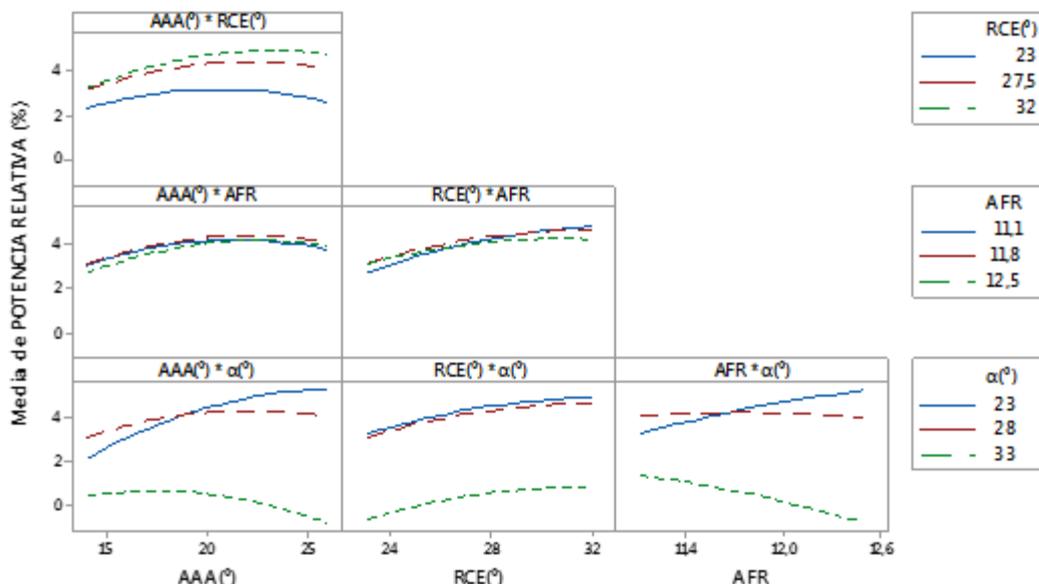


Figura 5.22 Gráfica de interacción para incremento de potencia

El coeficiente de determinación es:

$$R_D^2 = 93,76\%$$

5.3.9 OPTIMIZACIÓN

En el funcionamiento del motor de combustión interna ciclo Otto, mediante la implementación del diseño experimental se tiene como principal objetivo el aumento de las prestaciones del motor. También se tienen variables de respuesta que se analizan con la meta de reducir el consumo y el nivel de emisiones contaminantes, sin que esto comprometa el aumento de las prestaciones del motor, pues es el objetivo principal de estudio. Con cada diferente configuración de las variables de estudio se generan puntos de funcionamiento en cada uno de los cuales se pretende aumentar las prestaciones del motor, por lo que las metas de optimización son maximizar tanto la potencia como la

fuerza tractora en cada uno de estos puntos, lo cual se puede apreciar en los diagramas de cubos mostrados en las figuras 5.23 y 5.24.

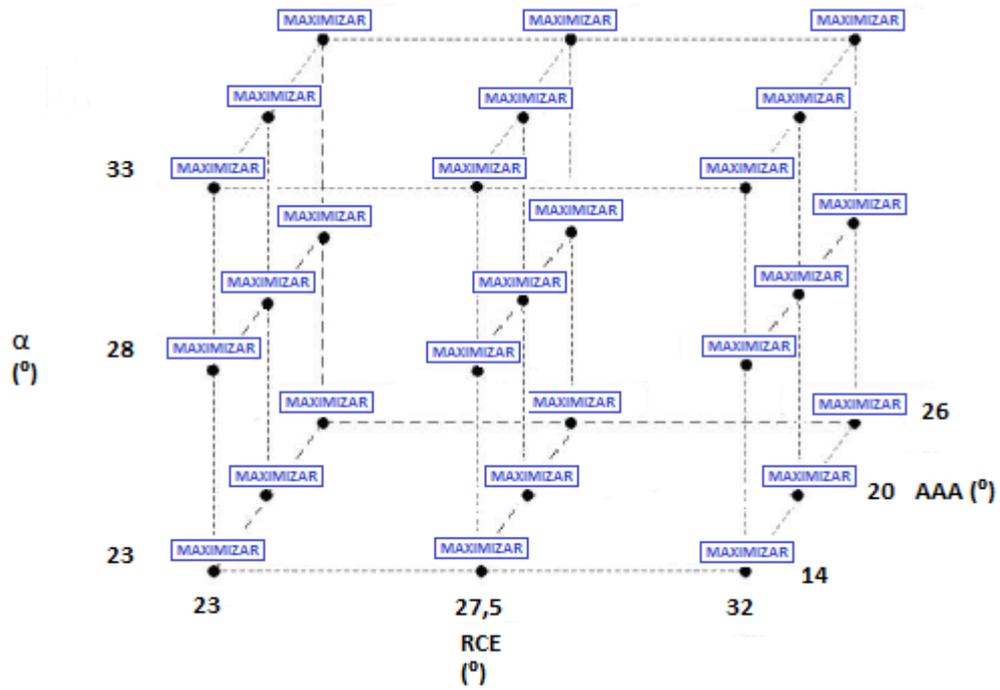


Figura 5.23 Metas de optimización para P y F

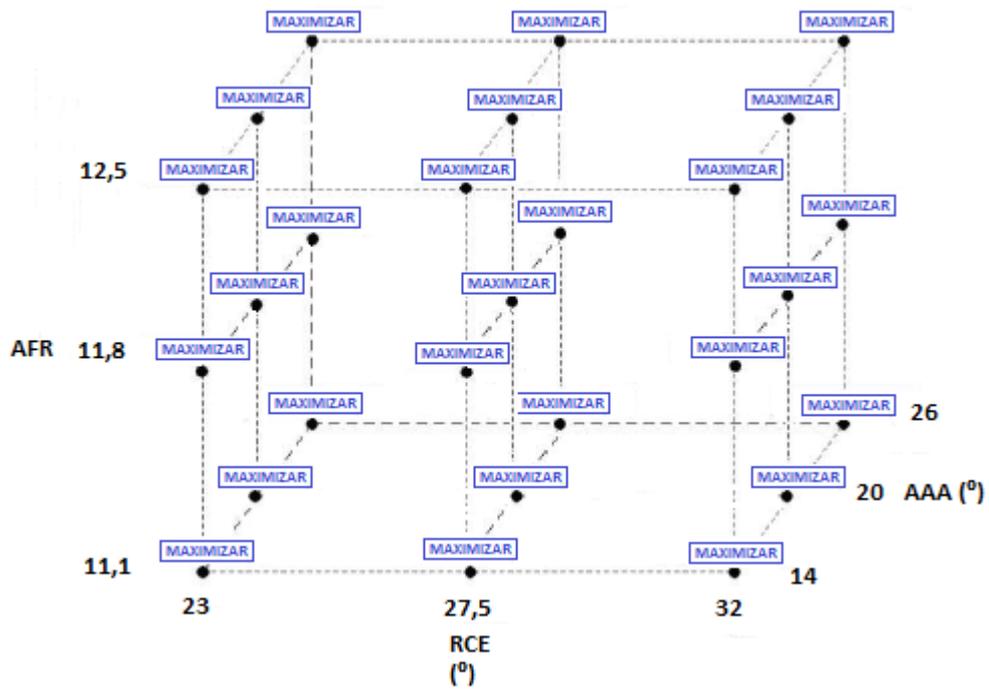


Figura 5.24 Metas de optimización para P y F

Se aplica contornos de las superficies de respuesta de las variables de respuesta para los puntos que se generan con las diferentes configuraciones de las variables de estudio para establecer una zona de trabajo en donde las prestaciones del motor aumentan.

Se puede apreciar en la figura 5.25 los contornos generados con valores de AAA = 26 y RCE = 32. Se establece los límites para zonas en las que la potencia y fuerza tractora se incrementan, para lo cual se considera su incremento porcentual, siendo estas zonas las que se pueden observar de blanco en la figura 5.25. Dentro de estas zonas de trabajo se analizará también configuraciones que permitan reducir el consumo y emisiones contaminantes, sin que esto comprometa una reducción notable en el incremento de potencia y fuerza tractora.

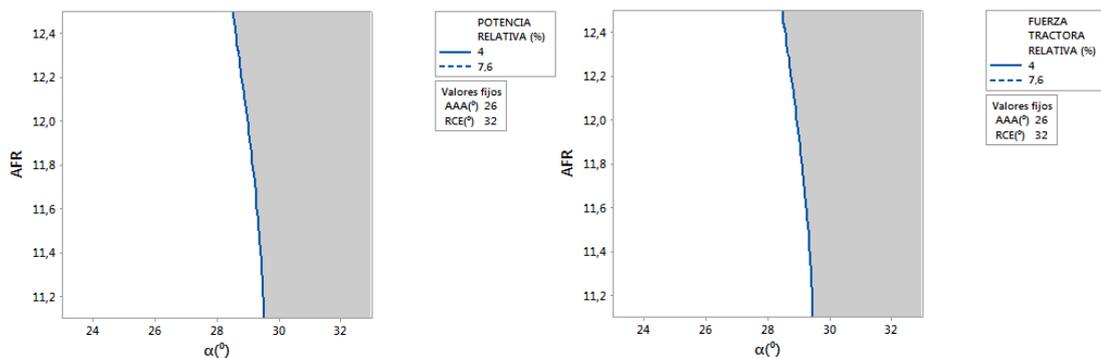


Figura 5.25 Zona de optimización para P y F

La optimización tiene como objetivo principal encontrar un punto de funcionamiento distinto de la inicial, en el cual el valor de las variables de salida alcance un punto de mayor deseabilidad, para este caso es aumentar las prestaciones del motor.

Se realiza también una optimización en la que se considera una reducción del consumo de combustible y reducción de emisiones contaminantes, pero sin que esto afecte el incremento de las prestaciones del motor como ya se ha mencionado anteriormente.

Como resultado de la optimización tendremos una configuración que combina los valores de: AFR, Adelanto al Encendido, AAA y RCE, donde se obtiene un valor de incremento de las prestaciones del motor muy cercano al máximo ya que no es posible llegar a ese punto porque cada una de las variables de estudio influyen de forma diferente. Entonces, la configuración resultante, permite obtener una zona donde se da

la máxima pendiente de ascenso o descenso al punto máximo de las prestaciones del motor.

El método que se emplea es el de la pendiente máxima, con el cual se genera puntos de funcionamiento que se encuentran muy cercanos al óptimo.

En la gráfica 5.26 se puede apreciar la configuración de los factores de estudio que permite alcanzar los valores de prestaciones más próximos a los óptimos. El comportamiento de los factores para alcanzar las prestaciones óptimas presenta una deseabilidad del 92%.

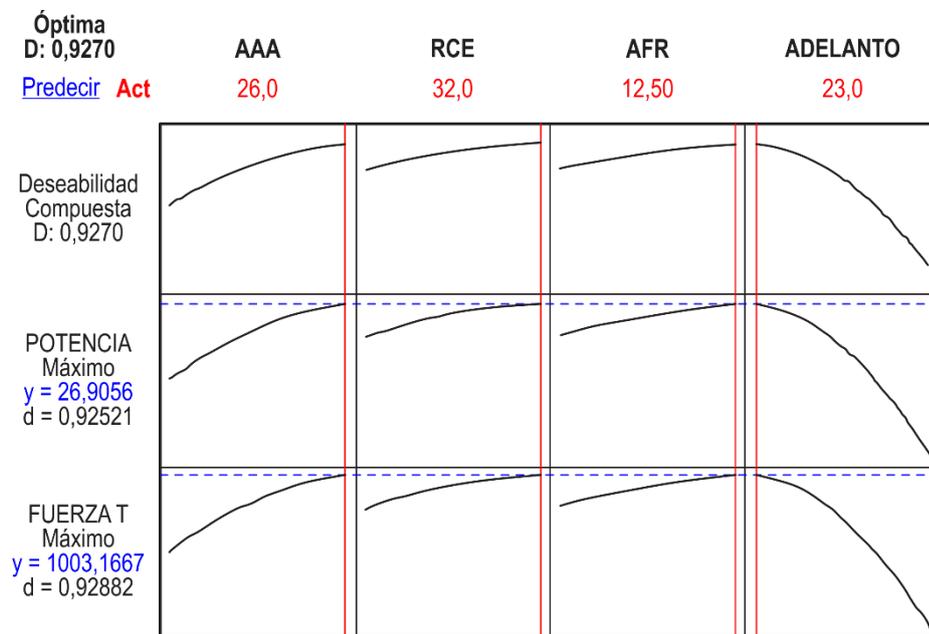


Figura 5.26 Optimización de P y F

En la tabla 5.1 se muestra los valores que debe tomar cada una de las variables de estudio que conforman la combinación que permita obtener el valor de prestaciones más próximo al óptimo.

Tabla 5.1 Valores de optimización de los factores de estudio

AFR	$\alpha(^{\circ})$	AAA($^{\circ}$)	RCE($^{\circ}$)
12,50	23	26	32

5.3.9.1 Optimización del factor AFR

Para la zona de trabajo elegida, se ha determinado que el valor del factor AFR con el cual se logra obtener las mejores prestaciones del motor es 12,50, que corresponde al nivel mínimo establecido para este factor. El valor determinado indica que, a diferencia de la configuración inicial en la cual el valor de AFR corresponde a un valor de 11,1, resulta conveniente utilizar una mezcla ligeramente empobrecida respecto de los niveles elegidos para este factor, para obtener mejores resultados en las prestaciones del motor. La pérdida de potencia al tener una mezcla demasiado rica se genera debido a que la mezcla no puede inflamarse correctamente por el exceso de combustible.

5.3.9.2 Optimización del factor Adelanto al Encendido

Al realizar la optimización, los resultados obtenidos indican que el valor del factor Adelanto al Encendido con el que se obtienen las mejores prestaciones del motor es 23° que corresponde al nivel mínimo establecido para este factor, ya que a medida que se aumenta el valor de este factor las prestaciones del motor disminuyen. Esto se produce debido a la calidad del combustible, ya que por el índice de octanaje que posee, al adelantar demasiado el tiempo de encendido, aumenta el valor de la presión a la que se encuentra sometida la mezcla y se produce detonación.

5.3.9.3 Optimización del factor AAA

Se ha determinado que, para la zona de trabajo elegida, el valor del factor AAA con el que se obtiene las mejores prestaciones es 26°, el cual corresponde al nivel máximo establecido para el mismo. En la figura 5.26 Correspondiente a la optimización se puede apreciar que a medida que aumenta el valor de AAA las prestaciones del vehículo también aumentan.

5.3.9.4 Optimización del factor RCE

Con la optimización realizada se logra determinar que, para obtener las mejores prestaciones del motor, el valor del factor RCE corresponde al nivel máximo

establecido para el mismo, con un valor de 32°. Se comporta de forma similar al AAA, es decir, a medida que aumenta el valor de este factor, las prestaciones del vehículo también experimentan un incremento.

Para la optimización de cada factor que se ha descrito, al mencionar en forma general prestaciones del motor se hace referencia a la potencia y la fuerza tractora, ya que ambas presentan el mismo comportamiento.

Por las características que presenta la zona de trabajo elegida para el experimento, es posible realizar una optimización en la que se reduce emisiones contaminantes y consumo de combustible, sin que se vea afectada de forma significativa el incremento de las prestaciones del motor.

En la tabla 5.2 se detalla la acción de optimización para cada factor.

Tabla 5.2 Optimización con reducción de consumo y emisiones contaminantes

FACTOR	META
Potencia	Maximizar
Fuerza tractora	Maximizar
Consumo	Minimizar
HC	Minimizar
CO	Minimizar
CO ₂	Maximizar
O ₂	Minimizar

El valor que debe tomar cada factor que conforma la combinación con la cual se logra maximizar las prestaciones, reduciendo consumo y emisiones contaminantes se muestra en la tabla 5.3.

Tabla 5.3 Valores de optimización de los factores de estudio con reducción de consumo y emisiones contaminantes.

AFR	$\alpha(^{\circ})$	AAA(^{\circ})	RCE(^{\circ})
12,50	24,31	25,88	32

Con esta configuración se obtiene una disminución mínima de las prestaciones, para lo cual se requiere una ligera disminución en la AAA y un leve incremento de Adelanto

al Encendido, respecto de los valores de estos factores que se requieren para obtener solamente aumento de prestaciones. El valor de los factores RCE y AFR no presenta cambios.

5.4 RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN

Luego de haber realizado el proceso de optimización, las configuraciones obtenidas son implementadas y probadas en el motor, siguiendo el protocolo de toma de datos establecido.

5.4.1 POTENCIA RELATIVA

Con el termino Potencia Relativa se hace referencia a la relación entre la potencia del motor que se obtiene con la configuración resultante del proceso de optimización y la potencia obtenida con las condiciones iniciales del motor.

Se logra obtener un incremento del 6,76 % en la Potencia al aplicar la configuración obtenida con el proceso de optimización. En la figura 5.27 se puede apreciar la diferencia entre la Potencia relativa inicial y la optimizada, donde el mayor incremento de potencia se genera cuando el valor de Adelanto al Encendido se reduce mientras que el de AFR aumenta.

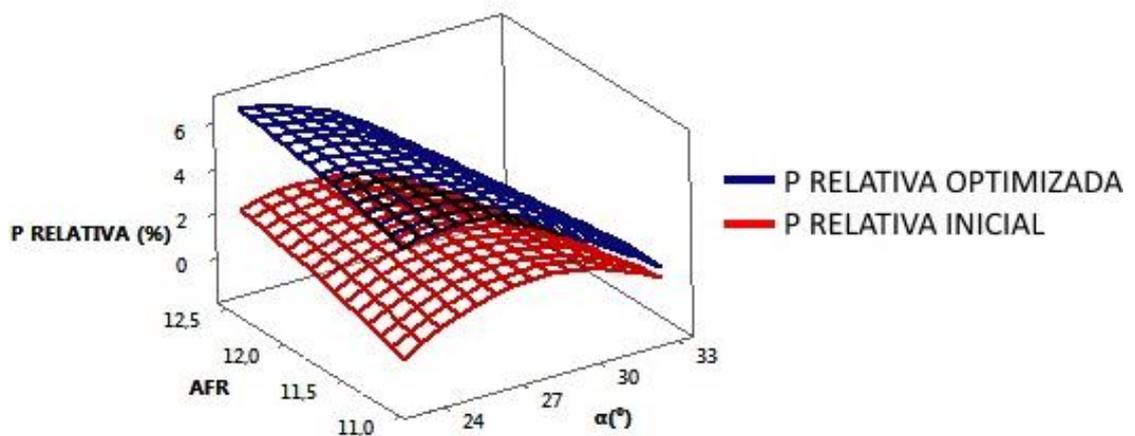


Figura 5.27 Comparación entre la Potencia relativa inicial y la optimizada

Al emplear la configuración de optimización que permite reducir consumo y bajar el nivel de emisiones contaminantes, se logra obtener un incremento del 6,5%.

5.4.2 FUERZA TRACTORA RELATIVA

Con el término Fuerza tractora relativa se hace referencia a la relación entre la Fuerza tractora del motor que se obtiene con la configuración resultante del proceso de optimización y la fuerza tractora obtenida con las condiciones iniciales del motor.

Se logra obtener un incremento del 6,72% en la fuerza tractora al aplicar la configuración obtenida con el proceso de optimización.

En la figura 5.28 se puede apreciar la diferencia entre la Fuerza tractora relativa inicial y la optimizada, donde el mayor incremento de la fuerza se genera cuando el valor de Adelanto al Encendido se reduce mientras que el de AFR aumenta.

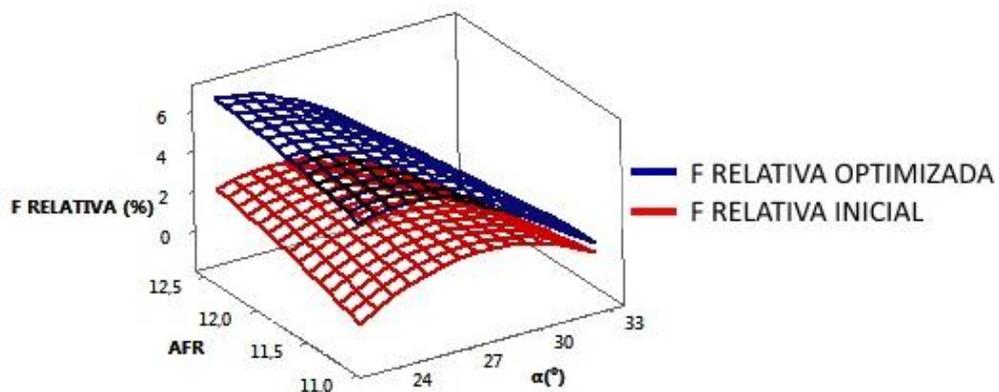


Figura 5.28 Comparación entre la Fuerza relativa inicial y la optimizada

Al emplear la configuración de optimización que permite reducir consumo y bajar el nivel de emisiones contaminantes, se logra obtener un incremento del 6,45%.

En la figura 5.29 se puede apreciar la diferencia en el comportamiento del consumo en las condiciones iniciales y al emplear la configuración optimizada. Se observa que se obtiene un menor consumo donde se da el incremento de prestaciones que corresponde a la zona en la que el valor del Adelanto al encendido disminuye y AFR aumenta.

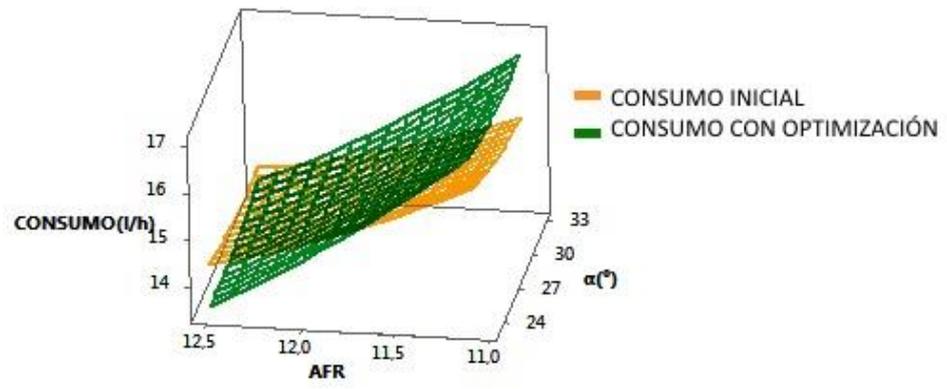


Figura 5.29 Comparación entre el Consumo inicial con el optimizado

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Luego de conocer el comportamiento del motor, al someterlo a diversas pruebas obtenidas mediante el diseño experimental y considerando las variables planteadas en el mismo, se logra establecer los resultados de la optimización, de donde se puede dar las conclusiones siguientes:

- Tanto la potencia como la fuerza tractora experimentan un incremento, del 6,76% y 6,72% respectivamente, que resulta ser un valor alto en cuanto a la mejora de las prestaciones del motor y con lo cual se manifiesta la importancia de determinar las cotas de reglaje de la distribución óptimas para un motor que ha sido modificado y del cual no se tienen los datos para su puesta a punto.
- Los valores de AAA y RCE con los cuales se logra obtener el mejor rendimiento del motor son los máximos posibles que se establecen en el experimento debido a las limitaciones mecánicas, concluyendo así que por las nuevas características del motor, el mismo tiene un mejor desempeño con un mayor ángulo de cruce de válvulas que el original. Es decir, el motor presenta una presión de admisión mayor que la de escape, permitiendo así tener un mejor llenado de los cilindros a la vez que se tiene también un mejor barrido de los gases quemados.
- El valor de AFR con el cual se obtiene las mejores prestaciones del motor corresponde al nivel mínimo establecido en el diseño experimental para este factor. Si bien este valor corresponde a un valor de mezcla rica, el cual se establece debido a que lo que se busca es la mejora del rendimiento, se logra determinar que no resulta conveniente exagerar en la dosificación del combustible, ya que, al enriquecer demasiado la mezcla, se tiene una pérdida en el rendimiento al no ser posible una buena combustión de la mezcla por falta de aire para su correcta inflamación.
- El valor de Adelanto al Encendido requerido para obtener el máximo aumento en las prestaciones del motor, corresponde al valor mínimo establecido en el experimento para este factor, ya que al aumentar el mismo las prestaciones disminuyen. Se determina así que esto se genera debido a que, al adelantar demasiado el tiempo del salto de la chispa, la presión en el interior del cilindro aumenta considerablemente generándose el efecto de pistoneo ya que el

combustible empleado detona debido a que por su índice de octanaje no es posible que pueda resistir presiones más elevadas. Esto se ve afectado también por el valor del ángulo de cruce de válvulas más grande, ya que, al tener mejor llenado de los cilindros, la presión en los mismos se incrementa.

- Es posible obtener un nivel de prestaciones prácticamente igual al máximo posible, a la vez que se economiza combustible y se reducen los niveles de emisiones contaminantes, ya que al aplicar la optimización en la que se consideran estas metas se obtiene una reducción del 0,26% y 0,27% para la potencia y fuerza tractora respectivamente, que resulta insignificante si se tiene presente que es posible obtener resultados muy cercanos a los óptimos siendo en cierta forma amigables con el ambiente. Los resultados de los niveles de reducción de consumo y emisiones contaminantes no se analizan, ya que no es el objetivo del proyecto.
- Se puede obtener una mejora considerable de las prestaciones de los motores de combustión interna al determinar una correcta configuración de las cotas de reglaje de la distribución, sin realizar cambios en los elementos mecánicos.
- Los valores para las cotas de reglaje de la distribución de los motores impuestos por los fabricantes, no permiten obtener las prestaciones máximas para las cuales están diseñados los motores, ya que estas se determinan considerando como aspectos primordiales el ahorro de combustible y la reducción de emisiones contaminantes, contrario al objetivo del proyecto donde lo que se busca es el rendimiento máximo del motor en términos de potencia y fuerza tractora.

6.2 RECOMENDACIONES

- Las pruebas realizadas en el desarrollo de la presente investigación se aplicaron a un motor en particular el cual ha sido modificado, por lo tanto los valores de optimización de los factores de estudio corresponden solo para este caso específico, y por lo cual se recomienda realizar la experimentación en diferentes motores para ampliar el conocimiento y determinar si existen tendencias en cuanto a las configuraciones que se pueden realizar para mejorar las prestaciones de los motores de combustión interna ciclo Otto, con el fin de tratar de generalizar este procedimiento.
- La experimentación se lleva a cabo en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca a

2450msnm, dando valores de optimización que corresponden a esta altura y razón por la cual se recomienda que la experimentación se realice a diferentes alturas respecto del nivel del mar.

- Se tienen limitantes mecánicas en cuanto al máximo ángulo de cruce de válvulas que se puede aplicar, por lo que se recomienda realizar una experimentación en la que se determine hasta qué punto resulta conveniente el incremento del valor de este factor.
- Se recomienda la utilización de una unidad de control reprogramable, ya que, para vehículos a inyección, mediante esta se permite la manipulación de diversas variables a voluntad del investigador.
- Se recomienda realizar la experimentación empleando combustibles con índices de octanaje más altos, ya que el combustible que fue empleado en el desarrollo del experimento, al superar las presiones con las que puede trabajar afecta el comportamiento ciertas variables del motor, viéndose limitado el incremento que se puede obtener en las prestaciones del motor.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, J. (2005). Motores Alternativos de Combustión Interna. Catalunya: Politex.
- Armas, O., & Lecuona, A. (2011). Ciclos de trabajo. En F. Payri, & J. M. Desantes, *Motores de Combustion Interna Alternativos* (pág. 54). Valencia: Universitat Politecnica de Valencia.
- Benajes, J., & Navarro, E. (2011). Clasificacion de los MCIA. En F. Payri, & J. M. Desantes, *Motores de combustion interna alternativos* (pág. 27). Valencia: Universitat Politecnica de Valencia.
- Humberto, G., & Roman, D. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. Mexico D.F.: McGraw-Hill.
- Serrano, J. R., & Galindo, J. (2011). Renovacion de la carga en motores 4T. En F. Payri, & J. M. Desantes, *Motores de Combustion Interna Alternativos* (págs. 216-217). Valencia: Universitat Politecnica de Valencia.
- Valdés, M., & Molina, S. (2011). Introduccion histórica. En F. Payri, & J. M. Desantes, *Motores de combustión interna alternativos* (pág. 2). Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- Araujo, V. & Pintado, W. (2015). *Caracterización del tipo de gasolina en función de la estequiometria de la mezcla y del adelanto al encendido en un motor ciclo Otto para una altitud de 2500 msnm mediante termografía* (Ingeniería). Universidad Politécnica Salesiana.
- Pezantes, R. & Zamora, P. (2015). *Caracterización del tipo de gasolina en función de la estequiometria de la mezcla y el adelanto del encendido mediante análisis de ruido de un motor ciclo Otto para una altitud de 2500 msnm* (Ingeniería). Universidad Politécnica Salesiana.
- Rivera, N. & Chica, J. (2015). *Estudio del comportamiento de un motor ciclo Otto de inyección electrónica respecto de la estequiometria de la mezcla y del adelanto al encendido para la ciudad de cuenca* (Maestría). Escuela Politécnica Nacional.

- ciclo otto | Diseño Formula 1. (2012). JASF1961.wordpress.com. Recuperado el 22 marzo de 2016, disponible en: <https://jasf1961.wordpress.com/tag/ciclo-otto/>
- Cuadra, A. (2013). Técnica Moto125.cc - La distribución - Moto 125 cc. Moto125.cc. Recuperado el 26 marzo de 2016, disponible en: <http://www.moto125.cc/f125cc/reportajes/tenica/item/746-tecnica-distribucion?pop=1&tmpl=component&print=1>
- Installation Instructions for 30-4110 Gauge-Type UEGO Controller. (2014) (1st ed., p. 12). Hawthorne, CA. Disponible en: <http://www.aemelectronics.com/files/instructions/30-4110%20Digital%20Wideband%20UEGO%20Gauge.pdf>
- Meza, A. (2012). El sistema de inyección electrónica en un Motor de Combustión Interna - Monografias.com. Monografias.com. Recuperado el 4 abril de 2016, disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos93/sistema-inyeccion-electronica-motor-combustion-interna/sistema-inyeccion-electronica-motor-combustion-interna.shtml>
- Ciclos. Recuperado el 19 de abril de 2016, disponible en: http://demotor.net/images/ciclos_reales/004.jpg
- Engine Position Module (EPM). (2007). Aemelectronics.com. Recuperado el 9 de mayo de 2016, disponible en: <http://www.aemelectronics.com/?q=products/ignition-components/engine-position-module-epm>
- Digital Wideband UEGO AFR Gauge | AEM. (2014). Aemelectronics.com. Recuperado el 20 de junio de 2016, disponible en: <http://www.aemelectronics.com/products/wideband-uego-air-fuel-controllers/digital-wideband-uego-afr-gauge>
- Aluminum Adjustable Cam Gear Set of 2 [SUZ-ADA-6134] - \$289.90: Zen Cart!, The Art of E-commerce. (2011). Pt2w.com. Recuperado el 20 mayo de 2016, disponible en: http://www.pt2w.com/srd/index.php?main_page=product_info&cPath=7&products_id=43
- 320lph High Flow In-Tank Fuel Pump (Offset Inlet) | AEM. (2012). Aemelectronics.com. Recuperado el 20 junio de 2016, disponible en:

<http://aemelectronics.com/?q=products/fuel-delivery/high-flow-fuel-pumps/320lph-high-flow-in-tank-fuel-pump-offset-inlet>

- EMS-4 Universal Standalone Engine Management System. (2012). Aemelectronics.com. Recuperado el 21 junio de 2016, disponible en: <http://www.aemelectronics.com/products/programmable-engine-management-systems/universal-programmable-ems-4/universal-programmable-ems-4>



Figura 8.2 Adquisición de datos



Figura 8.3 Adquisición de datos



Figura 8.5 Adquisición de datos



Figura 8.6 Adquisición de datos



Figura 8.7 Adquisición de datos



Figura 8.8 Adquisición de datos



Figura 8.9 Adquisición de datos



Figura 8.10 Adquisición de datos

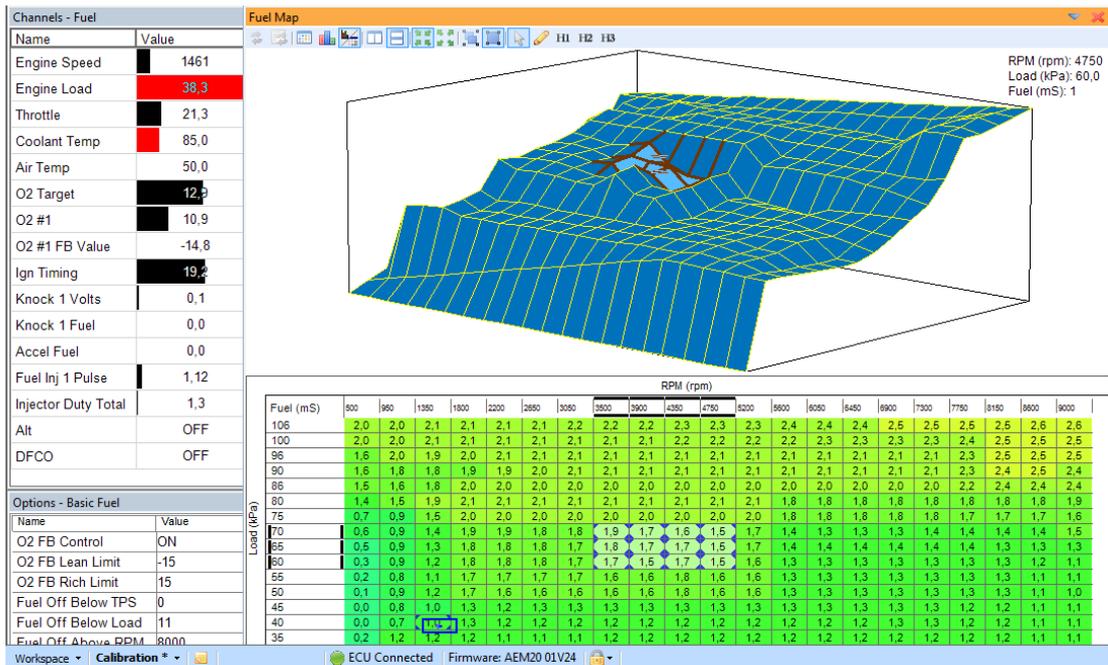


Figura 8.11 Manipulación de la cartografía

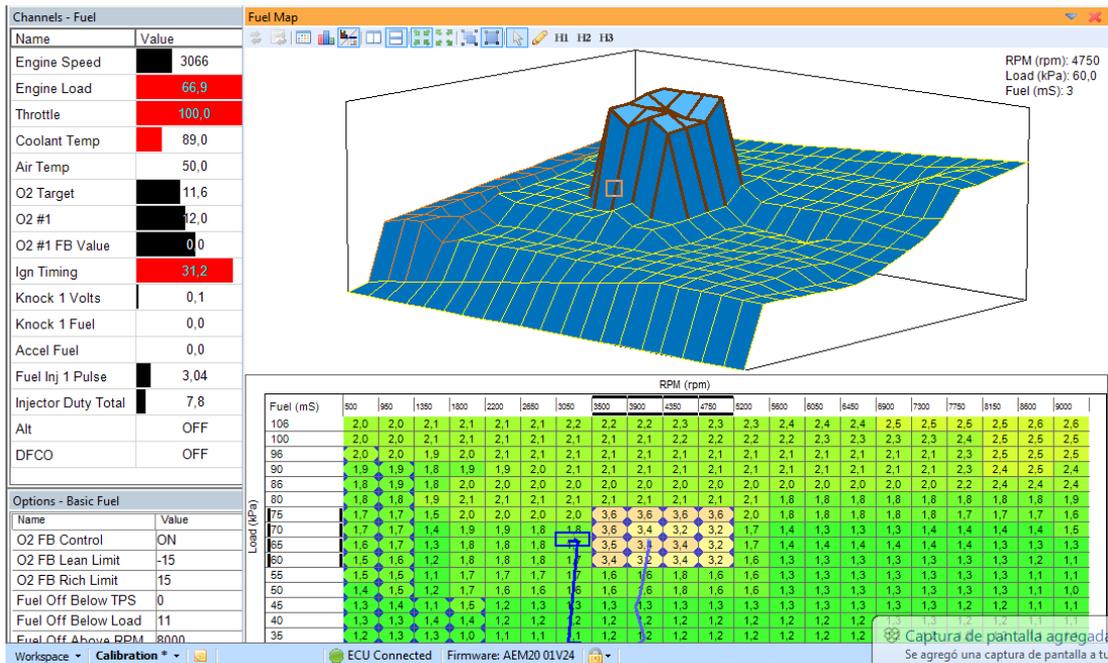


Figura 8.12 Manipulación de la cartografía

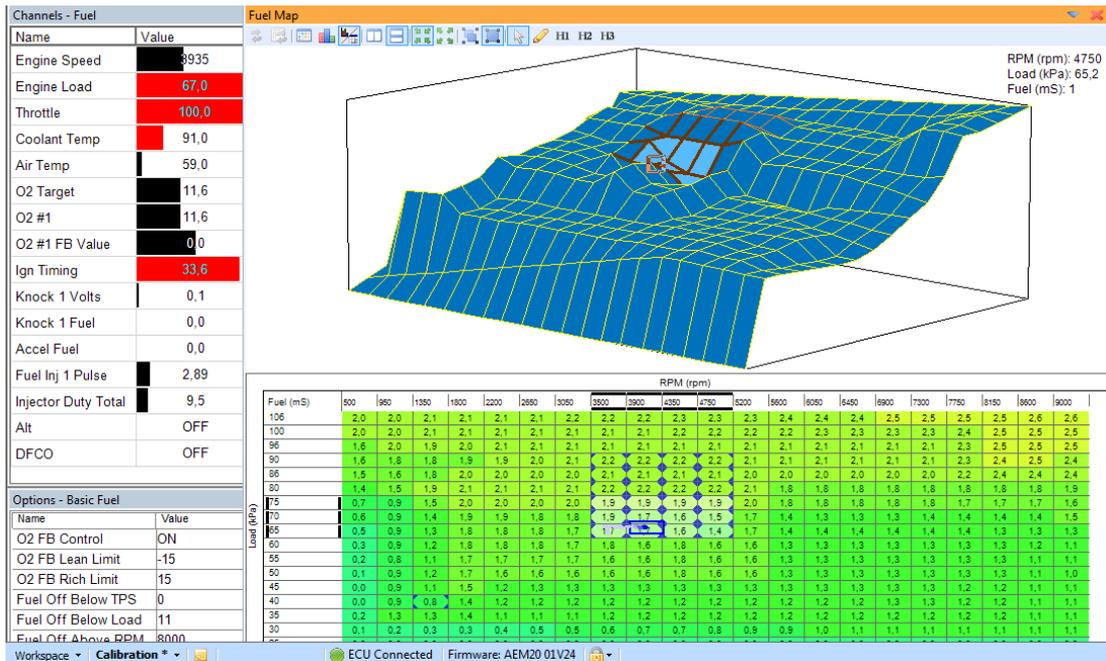


Figura 8.13 Manipulación de la cartografía

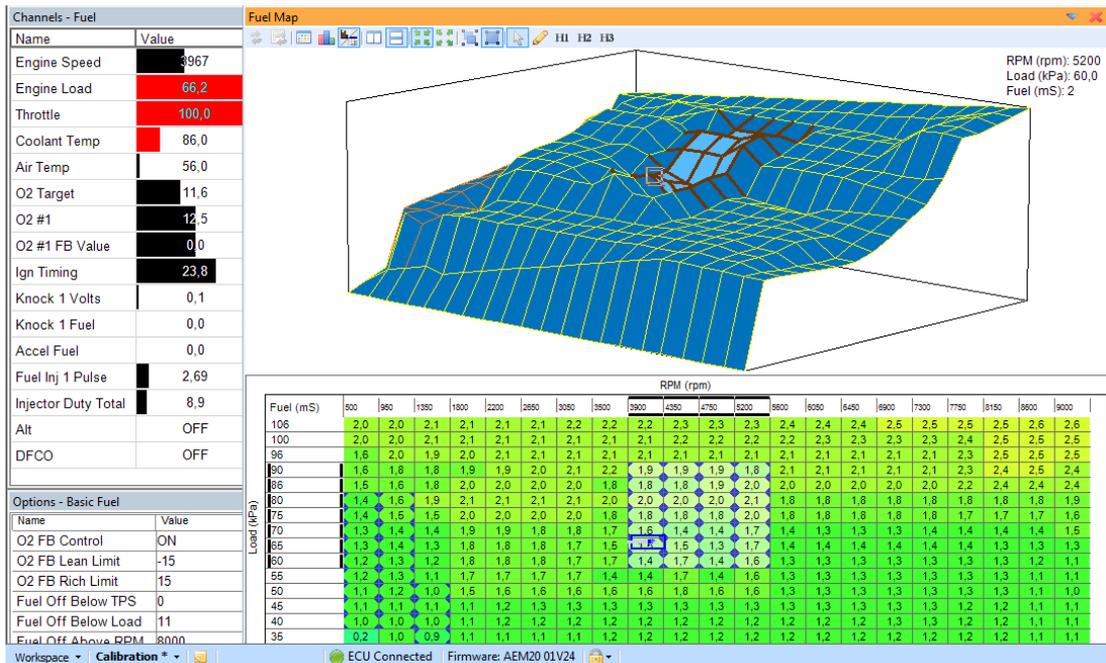


Figura 8.14 Manipulación de la cartografía