

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

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

PROYECTO TÉCNICO:

**ANÁLISIS DE LA VISCOSIDAD DEL LUBRICANTE SOBRE
LAS EMISIONES CONTAMINANTES Y CONSUMO DE
COMBUSTIBLE DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA
A GASOLINA**

AUTORES:

OSCAR ISAAC CABRERA OJEDA
FREDY ANDRÉS CRESPO MONTAÑO

TUTOR:

ING. MILTON OSWALDO GARCÍA TOBAR, MGT.

CUENCA - ECUADOR

2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Oscar Isaac Cabrera Ojeda con documento de identificación N° 1104132988 y Fredy Andrés Crespo Montaña con documento de identificación N° 1104206790, 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 titulación: **“ANÁLISIS DE LA VISCOSIDAD DEL LUBRICANTE SOBRE LAS EMISIONES CONTAMINANTES Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA A GASOLINA”**, mismo que ha sido desarrollado para optar el título de: *Ingeniero Mecánico Automotriz*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Cuenca, marzo del 2021



Oscar Isaac Cabrera Ojeda

C.I. 1104132988



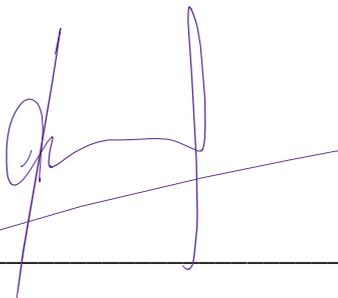
Fredy Andrés Crespo Montaña

C.I. 1104206790

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“ANÁLISIS DE LA VISCOSIDAD DEL LUBRICANTE SOBRE LAS EMISIONES CONTAMINANTES Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA A GASOLINA”**, realizado por Oscar Isaac Cabrera Ojeda y Fredy Andrés Crespo Montaña, obteniendo el *Proyecto Técnico* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, marzo del 2021



Ing. Milton Oswaldo García Tobar, MSc.

C.I. 0104282181

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Oscar Isaac Cabrera Ojeda con documento de identificación N° 1104132988 y Fredy Andrés Crespo Montaña con documento de identificación N° 1104206790, autores del trabajo de titulación: **“ANÁLISIS DE LA VISCOSIDAD DEL LUBRICANTE SOBRE LAS EMISIONES CONTAMINANTES Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA A GASOLINA”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, marzo del 2021



Oscar Isaac Cabrera Ojeda
C.I. 1104132988



Fredy Andrés Crespo Montaña
C.I. 1104206790

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mis padres Oscar y Lorena, por haberme brindado la oportunidad de estudiar la carrera que me apasiona, por ser el motor de mi vida, por haberme apoyado y guiado en todo momento, quienes que a pesar de la distancia nunca me dejaron de alentar y han estado presentes en cada paso que he dado.

A mis abuelitos que me han aconsejado y apoyado en cada decisión.

A mis hermanas Jenniffer, Yosselyn y Nathalie, que me dieron el aliento para seguir adelante y nunca rendirme, me han aconsejado en todo momento.

A mis sobrinos Cami y Joaquín que han sido mi motor para lograr cumplir con mis objetivos.

A mis tíos y mis primos que han estado conmigo en cada momento ayudándome y aconsejándome para ser mejor persona.

Oscar Isaac Cabrera Ojeda

Dedico este trabajo a mis padres Luz y Fredy, por apoyarme y guiado en todo momento sabiamente, forjándome como persona que soy en la actualidad, quienes estuvieron en todo momento presentes en cada paso que he dado.

A mis abuelos Rita y Naún, pilares y motores de mi familia.

Dedico de manera especial a Silvia Campoverde por ser un modelo a seguir y por su ayuda en el transcurso de mi carrera universitaria.

A mis hermanos y mi familia en general por la ayuda que siempre me brindaron día a día en el transcurso de cada año de mi carrera Universitaria.

A mis tíos Moraima y Ronal siendo fuentes de inspiración para poder alcanzar mis éxitos.

Fredy Andrés Crespo Montaña

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a la Virgen por haberme cuidado en el transcurso de mi carrera, a mis padres por haberme apoyado día a día ya que gracias a su esfuerzo y dedicación me guiaron en mi carrera universitaria anhelada, a toda mi familia por estar presentes en el transcurso de mi vida universitaria.

Agradezco también a mi asesor de tesis el Ing. Milton García por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimientos, a la Universidad Politécnica Salesiana por haberme aceptado ser parte de ella y abierto las puertas de su seno científico para poder estudiar mi carrera, así también a los diferentes docentes que nos brindaron sus conocimientos y apoyo para seguir adelante día a día.

Finalmente, también agradezco a todos mis compañeros de clase ya que gracias al compañerismo y amistad aportaron en un alto porcentaje en mis estudios.

Oscar Isaac Cabrera Ojeda

En primera instancia, agradezco a Dios y a la Virgen por bendecirme día a día.
A mis padres por brindarme cada día su apoyo y motivación, por darme la fuerza de perseguir mi sueño y no rendirme.

A mi abuela Rita y mi abuelo Naún por todo su amor y cariño que me han dado desde mi niñez hasta la actualidad.

A toda mi familia ayudarme a levantarme en el transcurso de mi vida.

Agradezco a todos mis compañeros por su fraternidad y al trabajo en equipo, por lo cual alcanzamos grandes éxitos.

Finalmente agradezco a mi tutor de tesis el Ing. Milton García por compartir su capacidad y conocimientos, por habernos brindado de su tiempo extra clase y por su apoyo moral en el desarrollo de este proyecto.

Fredy Andrés Crespo Montaña



RESUMEN

En este proyecto investigativo, establece un modelo matemático basado en la superficie de respuesta para la reducción de emisiones contaminantes y el consumo de combustible de los motores de combustión interna de gasolina. Para ello, a partir de las variables de entrada (viscosidad del lubricante, velocidad y carga) y de salida (HC, CO, CO₂, NO_x y consumo de combustible), se utiliza el método de superficie de respuesta (MSR). Los resultados obtenidos muestran cómo los cambios en las emisiones contaminantes dependen directamente de los cambios en las variables de entrada. Se concluye que existe una menor emisión de gases contaminantes con la utilización del lubricante SAE 10W30 en la ciudad de Cuenca-Azuay, tanto en la variación de revoluciones, como de carga de dicho vehículo, por la cual existe una menor contaminación al medio ambiente con respecto a los lubricantes analizados. De la misma manera, se establece que existe un menor consumo de combustible con la utilización del lubricante SAE 10W30 en la ciudad de Cuenca-Azuay tanto en la variación de rpm como de carga del vehículo, A consecuencia de esto existe un ahorro de combustible con respecto a los lubricantes analizados.

Palabras Clave: Consumo de combustible, superficie de respuesta, viscosidad, emisiones contaminantes.



SUMMARY

In this work, a mathematical model based on the response surface was established to reduce polluting emissions and fuel consumption of gasoline internal combustion engines. To do this, from the input variables (lubricant viscosity, speed and load) and output (HC, CO, CO₂, NO_x and fuel consumption), the response surface method (MSR) was used to design the experiments. The results obtained show how the changes in pollutant emissions depend directly on the changes in the input variables. It is concluded that there is a lower emission of polluting gases with the use of the lubricant SAE 10W30 in the city of Cuenca-Azuay both in the variation of revolutions, as well as the load of said vehicle, for which there is less pollution to the environment with respect to to the lubricants analyzed, in the same way, it was established that there is lower fuel consumption with the use of the lubricant SAE 10W30 in the city of Cuenca-Azuay both in the variation of rpm and vehicle load, for which there is a fuel savings compared to analyzed lubricants.

Keywords: Fuel consumption, response surface, viscosity, polluting emissions.



INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	16
PROBLEMA:.....	17
Delimitación.....	17
OBJETIVOS	18
OBJETIVO GENERAL:.....	18
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	18
Capítulo 1.....	19
Revisión del Estado del Arte.....	19
1.1. Motores de combustión interna a gasolina.....	19
1.2. Proceso de Combustión Teórica y Real	20
1.3. Efectos de la combustión de un MCIA	21
1.4. Sistema de lubricación	23
1.4.1. Elementos del sistema de lubricación a presión.....	23
1.4.2. Tipos de bombas	25
1.5. Tribología de un MCIA.....	26
1.6. Propiedades de los aceites lubricantes	27
1.6.1. Viscosidad.....	27
1.6.2. Refrigeración.....	27
1.6.3. Detergente	28
1.6.4. Reducción del frotamiento.....	28
1.6.5. Propiedad contra la oxidación.....	28
1.6.6. Sellante.....	29
1.7. Tipos de aceites lubricantes	29
1.7.1. Aceite Mono-grado	29
1.7.2. Aceite Multigrado	30
1.8. Clasificación SAE.....	30
1.9. Diseño de Box-Behnken	32
1.10. Superficie de la respuesta.....	33
Capítulo 2.....	37
Marco Metodológico.....	37
2.1. Diseño Experimental.....	37
2.2. Variables de respuesta.....	38
2.3. Factores de Inferencia	39



2.4 Variables de entrada.....	40
2.5. Corridas Preliminares.....	40
2.5.1. Régimen de Giro	40
2.5.2 Carga.....	41
2.5.3. Viscosidad.....	41
2.5.4. Temperatura del lubricante.	42
2.6. Corridas experimentales.....	42
2.7. Adquisición de Datos	43
2.7.1. Descripción del vehículo.....	43
2.7.2. Analizador de gases	44
2.7.3. Analizador Brain Bee ags-688	44
2.7.4. Banco dinamométrico	46
2.7.5. Unidad Experimental	47
2.7.6. Procedimiento para la adquisición de datos	48
Capítulo 3.....	49
Análisis de Resultados	49
3.1. Prototipo que representa los Hidrocarburos no Combustionados (HC).....	49
3.2. Modelo para Monóxido de Carbono (CO).....	56
3.3. Modelo para Dióxido de Carbono (CO ₂)	62
3.4. Modelo para Óxidos de nitrógeno (NO _x)	68
3.5. Modelo para Consumo de combustible.....	74
Capítulo 4.....	80
Conclusiones y Recomendaciones	80
4.1. Resultados	80
4.1.1. Modelo obtenido para HC.....	80
4.1.2. Modelo obtenido para CO.....	80
4.1.3. Modelo obtenido para CO ₂	80
4.1.4. Modelo obtenido para NO _x	81
4.1.5. Modelo obtenido para Consumo de combustible.....	81
4.2. Conclusiones	81
4.3. Recomendaciones	82
4.4. Trabajos Futuros	83
Bibliografía	84
Anexos	91



INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Motor de Combustión Interna a Gasolina.....	20
Figura 2 Proceso de combustión completa.....	20
Figura 3 Proceso de combustión teórica	21
Figura 4: Emisiones Contaminantes.....	23
Figura 5: Diagrama de la distribución típica de energía de un MCIA.	26
Figura 6: Viscosidad de lubricantes	27
Figura 7: Aceite Mono grado	29
Figura 8: Aceite Multigrado.....	30
Figura 9: Clasificación SAE.....	31
Figura 10: Representación del diseño para Box Behnken	33
Figura 11: Esquema de la adquisición y procesamiento de datos del experimento ...	38
Figura 12: Esquema para la obtención del par motor	41
Figura 13: Equipo Brain BEE AGS-688.....	45
Figura 14: Banco Dinamométrico.....	46
Figura 15: Esquema banco dinamométrico.....	47
Figura 16: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para HC	49
Figura 17: Esquema de residuos para HC	50
Figura 18: Superficie de respuesta para HC (Viscosidad vs RPM)	54
Figura 19: Superficie de contorno para HC (Viscosidad vs RPM).....	54
Figura 20: Superficie de respuesta para HC (Viscosidad vs Carga)	55
Figura 21: Superficie de contorno para HC (Viscosidad vs Carga).....	55
Figura 22: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para CO	56
Figura 23: Esquema de residuos para CO	57
Figura 24: Superficie de respuesta para CO (Viscosidad vs RPM)	60
Figura 25: Superficie de contorno para CO (Viscosidad vs RPM).....	61
Figura 26: Superficie de respuesta para CO (Viscosidad vs Carga)	61
Figura 27: Superficie de contorno para CO (Viscosidad vs Carga).....	62
Figura 28: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para CO ₂	62
Figura 29: Esquema de residuos para CO ₂	63
Figura 30: Superficie de respuesta para CO ₂ (Viscosidad vs RPM).....	66
Figura 31: Superficie de contorno para CO ₂ (Viscosidad vs RPM).....	67



Figura 32: Superficie de respuesta para CO₂ (Viscosidad vs Carga)..... 67

Figura 33: Superficie de contorno para CO₂ (Viscosidad vs Carga) 68

Figura 34: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para NO_x 68

Figura 35: Esquema de residuos para NO_x..... 69

Figura 36: Superficie de respuesta para NO_x (Viscosidad vs RPM)..... 72

Figura 37: Superficie de contorno para NO_x (Viscosidad vs RPM)..... 73

Figura 38: Superficie de respuesta para NO_x (Viscosidad vs Carga)..... 73

Figura 39: Superficie de contorno para NO_x (Viscosidad vs Carga)..... 74

Figura 40: Esquema de consumo de combustible 74

Figura 41: Superficie de respuesta para Consumo de Combustible (Viscosidad vs RPM)..... 78

Figura 42: Superficie de contorno para Consumo de Combustible (Viscosidad vs RPM)..... 78

Figura 43: Superficie de respuesta para Consumo de Combustible (Viscosidad vs Carga)..... 79

Figura 44: Superficie de contorno para Consumo de Combustible (Viscosidad vs Carga)..... 79

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos técnicos de los aceites lubricantes 31

Tabla 2: Datos técnicos de los aceites lubricantes 32

Tabla 3: Variables de respuesta..... 39

Tabla 4 Factores de inferencia 40

Tabla 5: Variables de entrada..... 40

Tabla 6: Corridas experimentales..... 42

Tabla 7: Especificaciones técnicas del vehículo 44

Tabla 8: Rango de mediciones del equipo Brain BEE AGS-688..... 45

Tabla 9: Características del banco dinamométrico 47

Tabla 10: Análisis de varianza para HC..... 50

Tabla 11: Modelo secuencial suma de cuadrados para HC..... 51

Tabla 12: ANOVA para el cuadrático para HC 51



Tabla 13: Ajuste estadístico para el modelo HC	52
Tabla 14: Factores en términos de Factores Codificados para HC	52
Tabla 15: Análisis de varianza para CO.....	57
Tabla 16: Modelo secuencial suma de cuadrados para CO.....	58
Tabla 17: ANOVA para el cuadrático para CO	58
Tabla 18: Ajuste estadístico para el modelo CO	59
Tabla 19: Factores en términos de Factores Codificados para CO	59
Tabla 20: Análisis de varianza para CO ₂	63
Tabla 21: Modelo secuencial suma de cuadrados para CO ₂	64
Tabla 22: ANOVA para el cuadrático para CO ₂	64
Tabla 23: Ajuste estadístico para el modelo CO ₂	65
Tabla 24: Factores en términos de Factores Codificados para CO ₂	65
Tabla 25: Análisis de varianza para NO _x	69
Tabla 26: Modelo secuencial suma de cuadrados para NO _x	69
Tabla 27: ANOVA para el cuadrático para NO _x	70
Tabla 28: Ajuste estadístico para el modelo NO _x	70
Tabla 29: Factores en términos de Factores Codificados para NO _x	71
Tabla 30: Análisis de varianza para Consumo de Combustible.....	75
Tabla 31: Modelo secuencial suma de cuadrados para Consumo de Combustible....	75
Tabla 32: ANOVA para el cuadrático para Consumo de Combustible	75
Tabla 33: Ajuste estadístico para el modelo Consumo de Combustible.....	76
Tabla 34: Factores en términos de Factores Codificados para Consumo de Combustible	76



INTRODUCCIÓN

En 1876, el alemán Nikolaus Otto construyó el primer motor de combustión interna, que fue el primer motor de combustión interna en adoptar un ciclo de cuatro tiempos. El combustible se inyecta en polvo y se mezcla con aire y luego ingresa al cilindro. Una vez que la mezcla se comprime en el cilindro, y alcanza el punto máximo de compresión, la bujía disparará la chispa. El gas bloqueado en el cilindro se expande y empuja el pistón deslizándose en el cilindro. La energía liberada en la explosión se convierte en movimiento lineal del pistón, que se convierte en movimiento de rotación a través de la biela y el cigüeñal. (Payri & Desantes, 2011).

La comprensión del comportamiento tribológico de los componentes del motor en movimiento es una forma de determinar cómo el desgaste de los componentes afecta el rendimiento del motor. (Priest & Taylor, 2000). El aceite lubricante de alguna manera ayuda a reducir el desgaste causado por el uso de aditivos específicos. (C. M. Taylor, 1993).

En los motores de combustión interna, la energía generada por la fricción proviene de tres fuentes principales. El conjunto del cilindro del pistón representa el 50%, el mecanismo de la válvula el 25% y los accesorios el 15%. (Jia et al., 2018). Las válvulas del motor permiten que el fluido (mezcla de aire y combustible) entre o salga del cilindro. Debido al movimiento frecuente de estos componentes, esto los hace susceptibles a fallas inesperadas, que pueden atribuirse especialmente a una lubricación inadecuada. (Sim et al., 2020). El espacio en la válvula provocará una fuga en la compresión de la mezcla, y la fuga puede representar del 1% al 2% de la masa total del fluido. Debido a este fenómeno, algunos investigadores realizan investigaciones midiendo el desgaste de las ruedas guía y los componentes de la válvula del motor como: temperatura (Kourti, 2005), (Loukopoulos et al., 2019), presión y volumen (Pichler et al., 2016), presión dinámica y velocidad angular instantánea (Elhaj et al., 2008), (Elhaj et al., 2010).



PROBLEMA:

Dada la creciente demanda vehicular en la ciudad de Cuenca-Ecuador, que supone la accesibilidad de las personas hacia un medio de transporte, ocasiona que a la vez enfrenten inquietudes ligadas al correcto uso del lubricante por la diversa oferta comercial en cuanto a la viscosidad del mismo.

Los lubricantes de alta viscosidad producen en los motores un mayor consumo de combustible. (Macian, Tormos, Ruiz, & Miro, 2015). Mientras que, una baja viscosidad reducirá el consumo del mismo y por ende habrá menor emisión de gases contaminantes en motores a gasolina con bajo kilometraje. Debido al fenómeno del calentamiento global, la industria automotriz de Cuenca está más preocupada por la reducción de las emisiones de dióxido de carbono y el consumo de combustible en el transporte. Todo el proceso ha dado lugar a diversas soluciones técnicas en términos de costos de implementación y mejoras relativas, que tienen diferentes complejidades. Una de las soluciones para reducir las emisiones de gases contaminantes es utilizar lubricantes de baja viscosidad debido a la relación costo-beneficio. (Bernardo, Guillermo, Tomas, & Javier, 2016).

Delimitación

El presente proyecto investigativo se realizó en el transcurso de los años 2020-2021, en el parque automotor para la ciudad de Cuenca-Ecuador, con la finalidad de determinar el lubricante más óptimo para reducir las emisiones de gases contaminantes y consumo de combustible en un vehículo.



OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Analizar el comportamiento de diferentes tipos de viscosidades de lubricantes sobre las emisiones contaminantes y el consumo de combustible de un motor de combustión interna a gasolina

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar el estado del arte del presente proyecto investigativo con la finalidad de determinar las metodologías necesarias para su desarrollo.
- Plantear un diseño experimental basado en cuatro tipos de viscosidades para la adquisición de datos.
- Seleccionar y extraer las características más significativas de las muestras de emisiones contaminantes y consumo de combustible.
- Evaluar el comportamiento de diferentes viscosidades de lubricantes y su incidencia en el consumo de combustible y emisión de gases contaminantes.



Capítulo 1

Revisión del Estado del Arte

1.1. Motores de combustión interna a gasolina

El motor de combustión interna convierte la energía térmica contenida en el poder calorífico del combustible en energía mecánica mediante la combustión de la mezcla aire-combustible (Payri & Desantes, 2011). Esta transformación se logra mediante un proceso de rotación, que se realiza en 4 tiempos con el cigüeñal girando dos revoluciones. (Mulvaney et al., 2012).

En un motor de combustión interna, la energía generada por fricción proviene principalmente de tres aspectos. El conjunto del cilindro del pistón representa el 50%, el mecanismo de la válvula el 25% y los accesorios el 15%. (Jia et al., 2018). Debido al movimiento frecuente de estos componentes, esto los hace vulnerables a fallas inesperadas, que pueden atribuirse a una lubricación inadecuada, etc. (Sim et al., 2020).

El propósito de un motor de combustión interna es producir trabajo mecánico a partir de la energía química contenida en el combustible. En un motor de combustión interna, la energía se libera a través de la combustión u oxidación del combustible dentro del motor. (Hernandez & Mercedes, 2014).

En 1876, el alemán Nikolaus Otto construyó el primer motor de combustión interna, que fue el primer motor de combustión interna en adoptar un ciclo de cuatro tiempos. El combustible se inyecta y se mezcla con aire en el cilindro. Una vez que la mezcla de aire y combustible ingresa al cilindro, se comprimirá. Cuando la mezcla de aire y combustible alcance el punto máximo de compresión, la bujía se activará y la bujía generará chispas que harán que el combustible explote. El gas bloqueado en el cilindro se expande y empuja el pistón deslizándose en el cilindro. La energía liberada



en la explosión se convierte en movimiento lineal del pistón, que se convierte en movimiento de rotación a través de la biela y el cigüeñal.(Feijoo & Garcia, 2016),

Sin embargo, uno de los mayores desafíos de esta tecnología es la emisión de partículas y óxidos de nitrógeno. Debido a que es difícil reducir las emisiones, es necesario utilizar estrategias de gestión y sistemas complejos de control de emisiones, debido a los efectos nocivos para la salud humana y el medio ambiente.

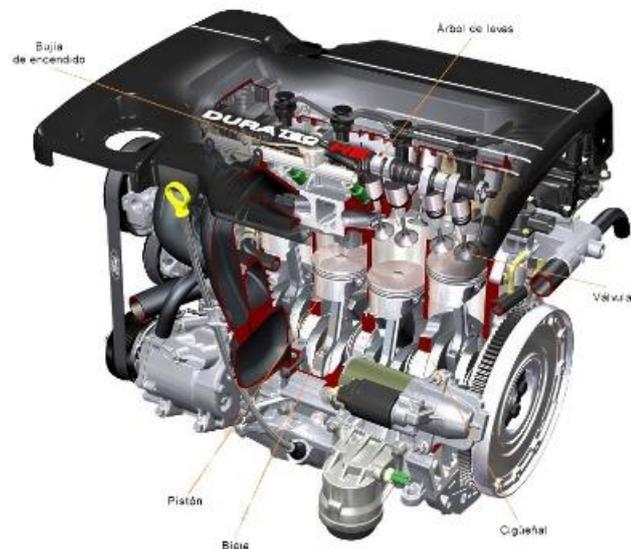


Figura 1: Motor de Combustión Interna a Gasolina

Fuente: RODES, 2018

1.2. Proceso de Combustión Teórica y Real

Cuando todo el carbono del combustible se convierte en CO_2 , todo el hidrógeno se convierte en H_2O y todo el azufre se convierte en S_2O , el proceso de combustión se completa. proceso de quema. (Ingenier et al., 2013).

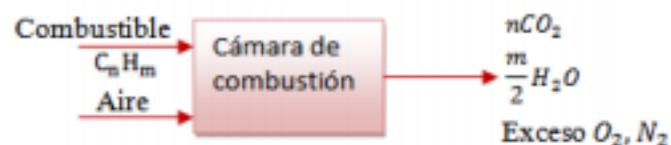


Figura 2 Proceso de combustión completa



Fuente: (Mendoza Zélis, 2020)

Si los productos de combustión contienen algún combustible o componentes no quemados como (C, H, CO u OH), el proceso de combustión está incompleto. La insuficiencia de oxígeno provocará una combustión incompleta. (Ingenier et al., 2013).

La cantidad mínima de aire requerida para que se produzca la combustión completa del combustible se denomina aire estequiométrico o aire teórico, por lo tanto, cuando el combustible se quema completamente junto con el aire teórico. (Ingenier et al., 2013).

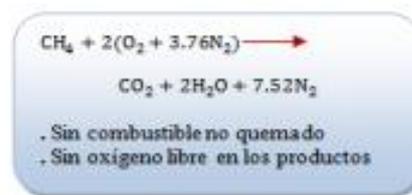


Figura 3 Proceso de combustión teórica

Fuente: (Mendoza Zélis, 2020)

En el proceso de combustión real, generalmente se usa más que la cantidad estequiométrica de aire para obtener una combustión completa o para controlar la temperatura de la cámara de combustión. La cantidad de aire que excede la cantidad estequiométrica se denomina porcentaje de aire en exceso o porcentaje de aire teórico. (Ingenier et al., 2013).

1.3.Efectos de la combustión de un MCI

A medida que aumentan las preocupaciones de la gente sobre el calentamiento global, la contaminación ambiental grave y el uso masivo de combustibles fósiles, los investigadores se concentran en proponer tecnologías de combustión avanzadas e introducir nuevas alternativas de combustible para mejorar la eficiencia termodinámica y reducir las emisiones dañadas del motor. (Kang et al., 2019), (Nayak & Mishra, 2019). El gas natural se considera uno de los combustibles alternativos más prometedores para reducir las emisiones de gases tóxicos, como el monóxido de carbono (CO), el dióxido de carbono (CO₂) y los óxidos de nitrógeno (NOX), así como la formación de hollín. (Burshaid & Hamdan, 2013).



Numerosos estudios han realizado estudios en profundidad sobre combustibles alcohólicos, entre los que el metanol, el etanol y el butanol son los más estudiados. (Yusri et al., 2017), (Li et al., 2019).

Las emisiones contaminantes producidas en los cilindros MCI se pueden dividir en dos categorías: la primera: emisiones regulares, que incluyen CO, HC, dióxido de carbono (CO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x), (Guardiola et al., 2017) y material particulado MP (Überall et al., 2015). El segundo grupo clasifica las emisiones regulares que incluyen al formaldehído (Liu et al., 2017), acetaldehído y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (Wang et al., 2016).

Sin embargo, la proporción de monóxido de carbono, hidrocarburos no combustionados, óxido nitroso y material particulado variará con los parámetros de funcionamiento del motor (velocidad y carga), el tiempo de encendido y el tipo de combustible utilizado. (Kim et al., 2015).

Las emisiones de los motores son una mezcla compleja compuesta por miles de sustancias orgánicas e inorgánicas, en forma de gases y partículas finas (compuestas de materiales sólidos y líquidos), cuya composición varía con el tipo de motor, las condiciones de operación, el combustible y los lubricantes. sistema de control de emisiones. (Martinez, 2018).

De acuerdo a (Yépez, 2018) indica que, las emisiones de gases de efecto invernadero (NO_x, CO₂, CO, HC) son la causa del calentamiento global, la degradación ambiental y la salud humana.

Un punto muy importante es que cuando se utilizan combustibles fósiles, su potencial para generar emisiones contaminantes es el dióxido de carbono, que es el principal gas que provoca el efecto invernadero; el dióxido de carbono es el principal gas que provoca el efecto invernadero. El monóxido de carbono tiene un efecto fatal en los seres humanos; NO_x, HC, el principal agente fotoquímico formador de smog en presencia de luz; emisiones que contienen azufre, causan lluvia ácida, producen sulfato y partículas, y causan enfermedades respiratorias y cáncer. (Alonso, 2013).

Por lo tanto, la comunidad científica está realizando incansables esfuerzos para encontrar nuevas fuentes de energía limpia y renovable, que puedan ayudar a reducir



las emisiones a la atmósfera, reduciendo así las enfermedades inducidas por el hombre. (Alonso, 2013).



Figura 4: Emisiones Contaminantes

Fuente: BARDAHL, 2000

1.4.Sistema de lubricación

Con el tiempo, los fabricantes han creado diferentes métodos para lubricar los componentes internos del motor. Actualmente, la mayoría de los vehículos utilizan sistemas de lubricación a presión. El funcionamiento básico es el siguiente: la bomba extrae el líquido lubricante del tanque de aceite, lo hace circular por todas las tuberías de lubricación del motor y luego pasa por el filtro, que extrae las impurezas contenidas en el líquido. El sistema lubrica los componentes de difícil acceso, como las bielas y los cojinetes del cigüeñal, los balancines y los elevadores de válvulas de una manera más eficaz. La pared del cilindro también se lubrica mejor. (Ingeniería et al., 2016).

1.4.1. Elementos del sistema de lubricación a presión

1.4.1.1.Depósito o Cárter

Este elemento sirve como depósito de líquido lubricante. Debido a que está ubicado en la parte inferior del motor y está en contacto directo con el medio ambiente, también puede enfriar el aceite en cierta medida, por lo que está fabricado con materiales que son fáciles de disipar el calor, como chapa de acero o también en fundición de aluminio. (Ingeniería et al., 2016).



Debido al movimiento del vehículo, el interior del cárter está separado por un tabique, que evita la formación de espuma en el aceite. Además, su parte inferior incluye un perno para extraer fluido lubricante cuando sea necesario reemplazarlo. (Ingeniería et al., 2016).

1.4.1.2.Filtro

Debido a las propiedades detergentes del aceite de motor, cuando circula en el motor, se transportan partículas en el aceite del motor, que pueden dañar los componentes. De acuerdo con la recomendación del fabricante del vehículo, se debe reemplazar el filtro. Para evitar estos daños, se utiliza un filtro con papel de resina en su interior para mantener estas partículas nocivas en el motor. (Ingeniería et al., 2016).

1.4.1.3.Lubricante

(Ingeniería et al., 2016) hace referencia a que, el aceite utilizado en el automóvil lo especifica el fabricante del automóvil. Tiene múltiples funciones para el correcto funcionamiento del motor, tales como:

- Se forma una fina película entre los objetos en movimiento para evitar un desgaste excesivo.
- Absorbe el calor generado por los componentes internos del motor y regresa al cárter para su refrigeración.
- Se utiliza como sello entre el anillo del pistón y el cilindro.
- Se puede utilizar como agente de limpieza cuando circula en el motor.

Los lubricantes son sustancias que reducen la fricción entre partes móviles o dos superficies metálicas. En el sentido más amplio, los lubricantes son sustancias que suelen entrar entre dos superficies móviles para reducir la fricción entre ellas. (Ingeniería et al., 2016)

Un aceite lubricante desempeña las siguientes funciones:

- No permite tocar directamente la superficie, para no reducir la fricción, el sobrecalentamiento, el ruido, el impacto, la abrasión, etc.
- Mantener el mecanismo en buenas condiciones.



- Prevenir la corrosión.
- Evitar la formación de lodos, residuos grumosos.
- Dispersar el calor.

1.4.1.4. Bomba

Este elemento tiene la función de distribuir el refrigerante a todo el sistema bajo presión constante. Para realizar esta tarea, el elemento es impulsado por el movimiento de un motor eléctrico. (Ingeniería et al., 2016).

Está compuesto por un filtro para evitar que la bomba se quede sin líquido. El elemento tiene una rejilla en el interior, por lo que se evita el paso de objetos o partículas extrañas. (Ingeniería et al., 2016).

1.4.2. Tipos de bombas

1.4.2.1. Bomba de engranajes

Este tipo de bomba consta de un par de engranajes, uno de los cuales conduce la electricidad debido al movimiento de un motor, mientras que el otro es accionado. Con estos movimientos, el aceite será absorbido a través del tubo de admisión, pasará entre los dientes del engranaje y fluirá al circuito de lubricación bajo presión. (Ingeniería et al., 2016).

1.4.2.2. Bomba de paletas

Este tipo de bomba consta de un rotor que consta de álabes móviles longitudinalmente. El rotor está dispuesto excéntricamente dentro de la carcasa, y cuando su movimiento se produce debido a la rotación del motor, se genera presión debido al cambio de volumen que genera la pala. (Ingeniería et al., 2016).

1.4.2.3. Bomba de rotor excéntrico

En este caso, el engranaje impulsor se encuentra dentro del engranaje impulsado. El conducto se mueve excéntricamente en la carcasa, generando la presión requerida por el circuito en el conducto de salida de la bomba. (Ingeniería et al., 2016).



1.5. Tribología de un MCIA

Generalmente, para un vehículo en condiciones normales de funcionamiento, el porcentaje de energía transferida desde el combustible a las ruedas es solo del 15% al 20%, (Holmberg & Erdemir, 2017), como se muestra en la Figura 5:

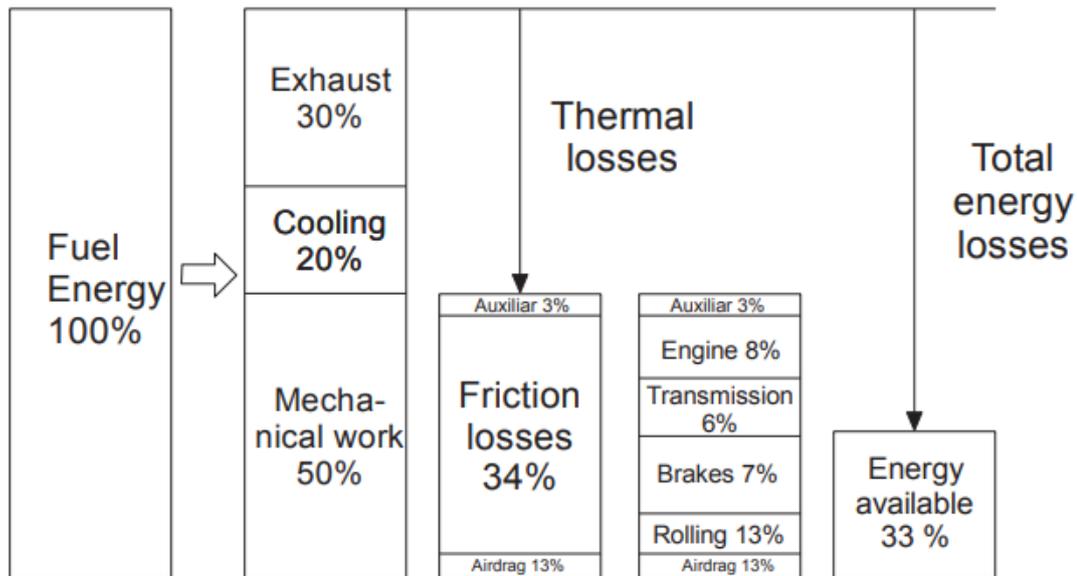


Figura 5: Diagrama de la distribución típica de energía de un MCIA.

Fuente: Adaptado de Holmberg, 2014.

Con el fin de reducir las pérdidas mecánicas en MCIA, se han desarrollado varias estrategias, como diseñar y fabricar piezas de automóvil más ligeras, (Posmyk, 2003), mejoras en recubrimientos superficiales, (Etsion & Sher, 2009), reducción del tamaño del motor (Silva et al., 2009) y el uso de aceites de baja viscosidad (Fontaras et al., 2009), (Macián et al., 2014).

El uso de aceites de baja viscosidad data desde hace 40 años (R. I. Taylor & Coy, 2000) se utiliza para reducir la pérdida por fricción. Dependiendo de diferentes factores, como el funcionamiento del motor, la formulación del aceite, la temperatura del lubricante, etc., el rango medio de reducción del consumo de combustible está entre el 1% y el 4%. (Manni et al., 1995), (Hawley et al., 2010). La reducción del consumo se debe al hecho de que el espesor de la película lubricante en el motor está controlado por la viscosidad del aceite. Cualquier cambio significativo en la viscosidad del aceite que no se detecte puede causar fatiga y desgaste innecesarios, acortando así la vida útil del motor, (Brouwer et al., 2012) por lo que resulta imprescindible su medición.



1.6. Propiedades de los aceites lubricantes

Las propiedades físicas con las que cuentan los lubricantes son el motivo por el cual se usan en los vehículos, los componentes que constituyen los aceites lubricantes son:

- Viscosidad
- Refrigeración
- Detergente
- Reducción del frotamiento
- Protección contra la oxidación
- Sellante

1.6.1. Viscosidad

La viscosidad se define como la resistencia al movimiento que proporciona el fluido lubricante, expresada en grados SAE, que varía con la temperatura y depende del tipo de aceite. La viscosidad adecuada puede mantener una película de aceite suficiente para separar la superficie y evitar la fricción.



Figura 6: Viscosidad de lubricantes

Fuente: TOYOTA, 2014

1.6.2. Refrigeración

La función del lubricante es reducir el rozamiento entre las piezas en movimiento, un fenómeno que perjudica al motor. Además, que los componentes friccionen entre sí provoca que la energía del movimiento se convierta en calor. Si es excesivo, se pueden producir averías. Esto se debe a un fenómeno que se llama dilatación térmica. Concretamente, la dilatación térmica consiste en el aumento de



tamaño proporcional de un objeto respecto a su temperatura. Normalmente se trata de cambios pequeños, lo que ocurre es que, en un motor moderno donde las tolerancias son tan ajustadas, una pequeña dilatación puede provocar que las piezas entren en contacto y se desgasten. Como por la dilatación térmica, además, las moléculas se distancian más entre sí a altas temperaturas, la pieza puede debilitarse, ablandarse y acabar deformándose. Con el riesgo de averías que esto conlleva. Por eso es necesario evitar en lo posible el rozamiento de las piezas y mantener a raya la temperatura dentro del motor.

1.6.3. Detergente

La detergencia del aceite lubricante depende de las características del aceite base, especialmente del uso de aditivos detergentes. Un aceite menos viscoso y un residuo menos carbonoso son mejores limpiadores. Por otro lado, los aditivos detergentes son compuestos metálicos, a saber: sales metálicas de calcio, bario, magnesio y jabón orgánico, que reducen la tensión entre el aceite y los contaminantes, de modo que los contaminantes pueden eliminarse de la superficie del metal.

Los aditivos con propiedades detergentes deben poder transportar hollín, carbonilla y otros subproductos de la cámara de combustión. Al mismo tiempo, deben prestar atención a los productos de la descomposición del aceite durante la combustión. Esto evita la acumulación de depósitos que puedan interferir con el funcionamiento del motor.

1.6.4. Reducción del frotamiento

Su función es prevenir la fricción manteniendo una película de lubricante entre las superficies que se mueven una contra la otra, evitando que entren en contacto y dañen la superficie.

1.6.5. Propiedad contra la oxidación

La corrosión es el resultado de la corrosión química en la superficie del metal. Este tipo de aceite de motor evita que se forme óxido en la pared metálica interna del motor y evita la condensación del vapor de agua.

Los aditivos retrasan el envejecimiento prematuro del lubricante porque tiende a reaccionar con el oxígeno para formar barniz, lodo, resina y ácido, aumentando así



la viscosidad. La reducción de la fluidez hace que el aceite pierda su capacidad de circulación y capacidad de refrigerante, lo que provoca el desgaste del motor. Los aditivos ralentizan la degradación del aceite, principalmente aminas, fenoles, nitrofosfatos y sulfuros.

1.6.6. Sellante

Los aditivos espesantes son agentes de curado que proveen una red tridimensional, semejante a la estructura de una esponja, manteniendo el lubricante entre sus poros. La labor del espesante es proceder como depósito de aceite de forma permeable.

1.7. Tipos de aceites lubricantes

1.7.1. Aceite Mono-grado

Son los que tienen una sola viscosidad, y se pueden utilizar en invierno o verano, indicando el rango de temperatura en el que funciona el aceite. Se utilizan para los cambios de temperatura más bajos durante todo el año.

Los lubricantes de un solo grado cumplen con un solo grado de viscosidad SAE. Aunque la calidad de la viscosidad y la temperatura de un aceite de motor de un solo grado de viscosidad suele ser suficiente para cumplir con los requisitos del motor de una estación o clima específico, puede ser insuficiente en diferentes entornos, por lo que debe cambiarse a un grado más adecuado para el motor. Los cambios de estado climáticos se pueden eliminar mediante el uso de aceite de motor multigrado, que puede cumplir con los requisitos de varios grados en la clasificación de viscosidad del aceite del cárter SAE.



Figura 7: Aceite Mono grado



Fuente: KEYS LUB, 2015

1.7.2. Aceite Multigrado

Pueden mantener estable la viscosidad del aceite en caso de cambios bruscos de temperatura, e incluso en condiciones de frío, pueden llegar con mayor facilidad a las piezas para lubricarlas. El motor en frío arranca más rápido y puede evitar el desgaste, todo lo cual puede prolongar la vida útil del motor. Este aceite es más delgado que el aceite de un solo grado y ayuda a ahorrar combustible.

Los aceites de motor multigrado tienen aditivos a base de polímeros que tienen la función de mejorar el índice de viscosidad (haciéndolo multigrado). Este polímero tiene características especiales que le permiten trabajar a temperaturas de motor más altas, especialmente en condiciones de arranque y parada.



Figura 8: Aceite Multigrado

Fuente: AUTOZONE, 2001

1.8. Clasificación SAE

La clasificación SAE establece una escala digital de la viscosidad del aceite de motor de 10 grados a partir de SAE 0 como se muestra en la Figura 9, que indica la viscosidad mínima del aceite del motor o su máxima fluidez. A medida que aumenta el número de grados, la viscosidad aumenta y el aceite se espesa. (Guerreo, 2016).

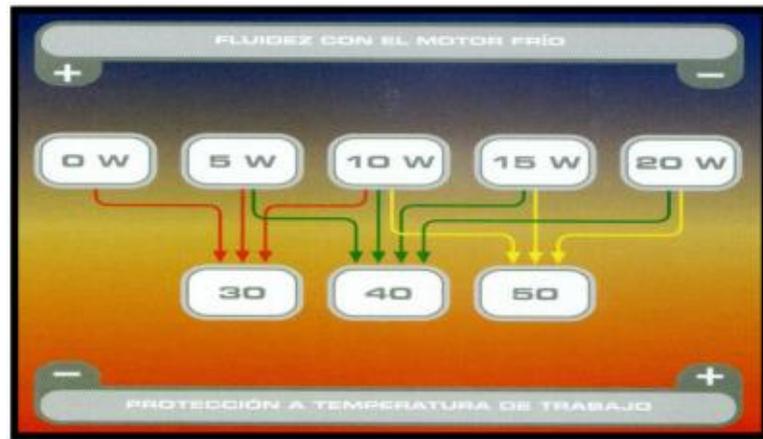


Figura 9: Clasificación SAE

Fuente: TURBOS MALAGA, 2013

- En el primer grupo, la viscosidad se mide a una temperatura de -18°C , lo que brinda a las personas una comprensión de la viscosidad en condiciones de arranque en frío y se divide en los siguientes seis grados: SAE 0W, SAE 5W, SAE 10W, SAE 15W, SAE 20W y SAE 25W. La letra W es un aceite especial que se usa en invierno, del inglés (invierno).

- En el segundo grupo, la viscosidad se mide a una temperatura de 100°C , lo que da una idea de la fluidez del aceite cuando el motor está caliente. Se han establecido cuatro niveles de SAE en este grupo: SAE 20, SAE 30, SAE 40 y SAE 50.

El uso de aceites de baja viscosidad comenzó hace más de 40 años para reducir las pérdidas por fricción, y desde entonces, se han realizado varios estudios tanto en motores de encendido por chispa (SIE) como en motores de encendido por compresión (CIE). (Guerreo, 2016), existen varios tipos de aceites con diferentes viscosidades como se muestra en la Tabla 1 y 2.

Tabla 1: Datos técnicos de los aceites lubricantes

Grado de viscosidad	0w-10	0w-20	0w-30
Densidad a 20°C (68°F)	0.847	0.841	0.843
Viscosidad a 40°C (104°F)	27.1 mm ² /s	44.8 mm ² /s	68.6 mm ² /s



Viscosidad a 100°C (212°F)	5.5 mm ² /s	8.7 mm ² /s	12.0 mm ² /s
Viscosidad HTHS a -35°C	2.813mPa.s	2.7mPa.s	3.57mPa.s
Índice de viscosidad	144	173	173
Punto de inflamación	395°F	224°F	236°F

Fuente: Autores

Tabla 2: Datos técnicos de los aceites lubricantes

Grado de viscosidad	5w-20	5w-30	10w-30	20w-50
Densidad a 20°C (68°F)	0.847	0.856	0.873	0.884
Viscosidad a 40°C (104°F)	41.9 mm ² /s	50.37 mm ² /s	70.47 mm ² /s	161 mm ² /s
Viscosidad a 100°C (212°F)	7.8 mm ² /s	9.66 mm ² /s	11.0 mm ² /s	18.5 mm ² /s
Viscosidad HTHS a 150°C 302°F)	2.6mPa.s	2.92mPa.s	2.92mPa.s	3.7mPa.s
Índice de viscosidad	161	169	146	129
Punto de escurrimiento	-36°C/-32.8°F	-36°C	-33°C	-39°C
Punto de inflamación	228°C/442.4°F	220°C	224°C	215°C

Fuente: Autores

1.9. Diseño de Box-Behnken

Cuando hay tres o más factores, se aplicará este diseño y, en cuanto al número de corridas, suelen ser efectivos. Es un diseño giratorio o casi giratorio, que se diferencia porque no incluye los vértices del área experimental como tratamiento. La representación geométrica se muestra en la Figura 10. Tenga en cuenta que el punto de este diseño se encuentra en el medio del borde del cubo centrado en el origen y, como se muestra en la figura, no incluye procesamiento de vértices, como (1, 1, 1) y



(- 1, -1, -1)) Bajo ciertas condiciones experimentales, es extremo y no se puede ejecutar. Esto hace que el procesamiento no sea tan extremo como el procesamiento factorial 32 completo. En cualquier tratamiento diseñado por Box-Behnken, al menos un factor se establece en el medio de su rango de prueba. Para más factores, la situación anterior también ocurrirá en este diseño. (Guti, 2015)

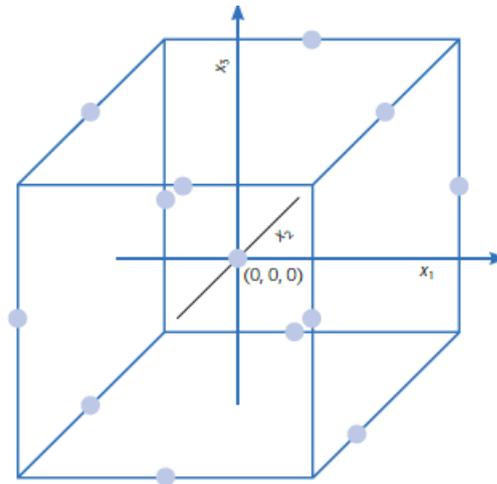


Figura 10: Representación del diseño para Box Behnken

Fuente: (Guti, 2015)

1.10. Superficie de la respuesta

Las superficies de respuesta existen en varios métodos matemáticos y estadísticos, que se utilizan para establecer una relación funcional ideal entre la variable de respuesta objetivo (y) y algunas variables de control (entrada) (representadas respectivamente por $x_1, 2 \dots$), x_k . Por lo general, se desconoce la relación anterior, pero puede aproximarse mediante un modelo polinomial de bajo orden como la expresada en la Ecuación 1: (Najafi et al., 2015)

$$y = f'(X)\beta + \varepsilon \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)'$, $f(x)$ representa la función vectorial de x elementos, estos elementos se componen del producto cruzado de potencias, y_1, x_2, \dots, x_k hasta que alcanza cierto nivel representado por $> (> 1)$, β es un vector de p coeficientes, estos coeficientes son constantes y desconocidos, y se les asignan nombres de parámetros, que son errores experimentales aleatorios, asumiendo que la media es



cero. (Najafi et al., 2015)

Esto está determinado por la siguiente idea: El modelo de la Ecuación 1 proporciona una representación suficiente de la respuesta. En este caso, el número $f'(X)$ β representa la respuesta promedio, es decir, el valor esperado de y , y está representado por $\mu(x)$. Generalmente, los métodos de superficie de respuesta utilizan dos modelos importantes. Estos son los casos especiales del modelo propuesto en la ecuación 1. La ecuación 2. Cuando se propone el modelo polinomial de primer orden ($d = 1$): (Najafi et al., 2015).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \varepsilon$$

Ecuación 2

La Ecuación 3, plantea el modelo de segundo grado ($d = 2$):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j \geq 1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{j=1}^k X_i^2 + \varepsilon$$

Ecuación 3

Donde k es el número de variables, x_i , x_j y x_i^2 representan estas variables. β_0 es el término constante, β_i es el coeficiente del término lineal, β_{ij} es el coeficiente del término cuadrático x_i^2 y β_{ij} es el coeficiente de interacción del término $x_i x_j$. ε son los residuos relevantes para el experimento. (Najafi et al., 2015)

Son tres los propósitos que llevan a considerar el modelo de la Ecuación 3:

1. Para establecer una relación, aunque existe una relación aproximada entre y y $x_1, 2, \dots, x_k$ se puede utilizar para predecir el valor de respuesta de diferentes configuraciones de variables de entrada o de control.
2. A través de la prueba de hipótesis, determinar la importancia de los factores cuyos niveles están representados por, 1, representado2, ... respectivamente. , x_k .
3. Determinar la mejor configuración para determine1, 2, ... , Resultando en la respuesta más pequeña (o más grande) en un área de interés determinada.

La MSR generalmente se aplica a áreas donde la variable de entrada cambia relativamente poco. El método de mínimos cuadrados se usa generalmente para



ajustar estos coeficientes del modelo polinomial, de modo que la superficie de respuesta ajustada representa una estimación de la superficie de salida real. (Montgomery, 2020) (Addelman, 1979).

(Awad et al., 2017) Utiliza la metodología de superficie de respuesta (RMS) para determinar la relación de mezcla óptima de aceite de fusel-gasolina antes y después de la extracción de agua (FBWE10, FBWE20, FAWE10 y FAWE20) con respecto al rendimiento y las emisiones del motor de encendido por chispa. La optimización multiobjetivo se aplica para maximizar la potencia de frenado, la eficiencia térmica del freno y minimizar el consumo de combustible específico del freno (BSFC), la emisión de NO_x, la emisión de HC y la emisión de CO.

(Simsek & Uslu, 2020a) menciona que, el objetivo principal de su estudio, es determinar los parámetros de funcionamiento óptimos del motor con respecto al rendimiento y las emisiones del motor diesel utilizando la metodología de superficie de respuesta (RSM). La optimización se utiliza para maximizar la eficiencia térmica del freno (BTE) y minimizar la temperatura de los gases de escape (EGT), la emisión de humo, la emisión de óxido de nitrógeno (NO_x) y de dióxido de carbono (CO₂) emisión. Se investigaron experimentalmente los efectos de las diferentes tasas de mezclas de biodiésel / combustible diésel sobre el rendimiento del motor y las emisiones de escape en un motor diésel de inyección directa de cuatro tiempos, mono cilíndrico, refrigerado por aire.

(Simsek & Uslu, 2020b), usa el aceite de fusel, producto de desecho que se obtiene como subproducto de los procesos de producción de etanol de las fábricas de azúcar, como fuente de energía alternativa a la gasolina en un motor de encendido por chispa (SI). El propósito secundario de esta investigación es definir los parámetros operativos óptimos, como la relación de compresión (CR), la carga y el porcentaje de aceite de fusible en relación con el rendimiento y las emisiones del motor SI mediante la metodología de superficie de respuesta (RSM).

Conforme a (Sakthivel et al., 2019), un análisis experimental-estadístico con el objetivo de determinar las condiciones óptimas de funcionamiento del motor (con respecto a la relación de compresión, carga y mezcla de combustible) para mejorar las características de funcionamiento del motor (rendimiento y emisiones) de un motor



diésel . Modelos de regresión múltiple diseñados mediante el uso de la metodología de superficie de respuesta (RSM) para las variables de respuesta de salida como el consumo de combustible específico del freno (BSFC), la eficiencia térmica del freno (BTE), los óxidos de carbono (CO & CO_2), los hidrocarburos (HC), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y la opacidad del humo resultaron ser estadísticamente significativos mediante el análisis de varianza.



Capítulo 2

Marco Metodológico

2.1. Diseño Experimental

El diseño de métodos experimentales se basa en experimentos. Como todos sabemos, si se repite el experimento, los resultados mostrarán un cierto grado de variabilidad en condiciones indistinguibles. Si el experimento se realiza en un laboratorio donde la mayoría de las causas de variabilidad están altamente controladas, el error experimental será pequeño y los resultados experimentales difícilmente cambiarán. (Monzón & Monzón Paiva, 1992)

Para este estudio se estableció un protocolo de recolección de datos mediante diseño experimental a través del método de superficie de respuesta, que permitirá el análisis visual de los resultados promedio de un área específica de factores de entrada o niveles variables, como se muestra en la Figura 11. El modelo a través de la metodología de superficie de respuesta (MSR) evalúa los cambios que ocurren en una determinada variable de entrada y cómo otros factores o variables ajenas al modelo interfieren con su variabilidad, evaluando así el comportamiento de la variable de salida. Por eso se definen diferentes tipos de variables de investigación.

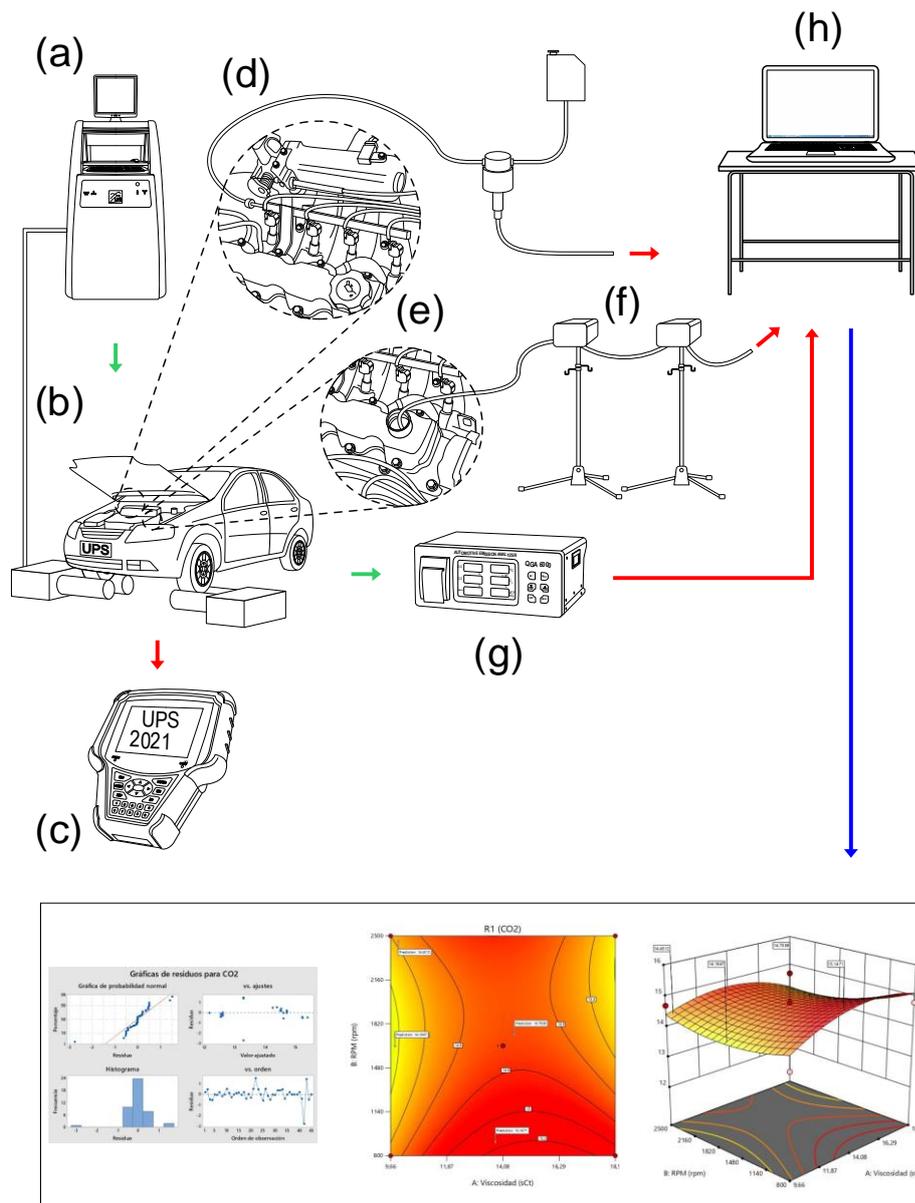


Figura 11: Esquema de la adquisición y procesamiento de datos del experimento

Fuente: Autores

2.2. Variables de respuesta

La variable de respuesta es la salida del sistema cuyo valor desea aumentar. Fueron escogidas acorde a investigaciones sobre el tema y normativa local como se ve en (Kyriakides et al., 2013), (NTE INEN 2203, 2000). Estas variables se recogen en la Tabla 3.



Tabla 3: Variables de respuesta

Variable de respuesta	Símbolo	Unidad
Potencia	P	[KW]
Fuerza Tractora	F	[N]
Monóxido de Carbono	CO	[%]
Dióxido de Carbono	CO2	[%]
Hidrocarburos no combustionados	HC	[ppm]
Oxígeno	O2	[%]
Óxidos Nitrosos	NOx	[ppm]
Consumo específico de combustible	Cesp	[g/kWh]

Fuente: Autores

2.3. Factores de Inferencia

En la Tabla 4 se muestra los factores de inferencia que pueden provocar cambios en las variables de salida se pueden controlar, interferir o estudiar. Los factores controlables se pueden establecer en un punto o en un nivel operativo, y no es necesario evaluar su impacto en las variables de salida. Los factores de ruido son difíciles de controlar, pueden modificar el comportamiento de las variables de respuesta y buscar eliminar sus efectos. Los factores de investigación son factores que intentan medir su influencia en la variable respuesta motora, que muestra factores inferidos.(Guti, 2015).



Tabla 4 Factores de inferencia

	Factores	Símbolo	Unidad
Controlables	Temperatura del refrigerante	T ref	[°C]
	Temperatura de la rodadura	T rod	[°C]
	Temperatura del lubricante	T lub	[°C]
Estudio	Régimen de giro	η	[RPM]
	Carga	C^N	[%]

Fuente: Autores

2.4 Variables de entrada

Una vez que se ha seleccionado el nivel de cada factor que se muestra en la Tabla 5, se puede determinar el método de tratamiento para la corrida experimental.

Tabla 5: Variables de entrada

Variable	Unidad	Nivel Inferior	Nivel Medio	Nivel Superior
Viscosidad	[sCt]	9,66	14,08	18,5
RPM	rpm	800	1650	2500
CARGA	%	0	50	100

Fuente: Autores

2.5. Corridas Preliminares

Para determinar la influencia de cada factor en la salida del sistema, se requieren dos niveles, incluido un nivel intermedio, para determinar si el comportamiento de la salida en el dominio de análisis es lineal o curvatura. Para determinar los niveles de los factores, se utiliza una ejecución preliminar en la que los factores individuales se cambian a la vez para determinar el rango de trabajo de cada factor. (Guti, 2015)

2.5.1. Régimen de Giro

La combustión de la mezcla de aire y combustible aumenta la presión y la temperatura en el cilindro del motor mediante la acción de chispas eléctricas. Esta



presión interna genera un empuje en el pistón que hace que el pistón se mueva, creando así el mecanismo clásico del cigüeñal de biela de un motor de combustión interna alternativo, en el que el movimiento lineal del pistón en el cilindro se convierte en un cigüeñal giratorio en movimiento., Figura 12. (Castillo et al., 2017)

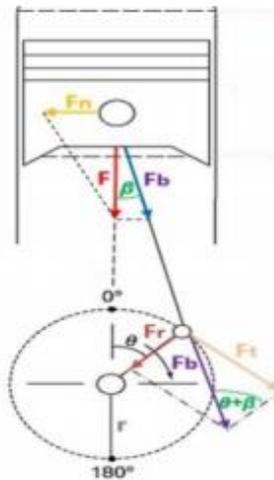


Figura 12: Esquema para la obtención del par motor

Fuente: (Castillo et al., 2017)

La velocidad del motor es el factor principal que afecta el rendimiento y las emisiones contaminantes. El nivel de este factor se basa en (NTE INEN 2203, 2000), (INEN & 176, 2006).

2.5.2 Carga

Los niveles de carga externa del motor se basan en el principio de funcionamiento del mismo y en la normativa ya citada (NTE INEN 2203, 2000). El nivel mínimo corresponde a ninguna carga externa, es decir, 0%, y el nivel máximo corresponde al 100% de la carga externa. Este es el par máximo inverso que el motor puede soportar cuando el acelerador está completamente activado y la velocidad no es reducido. El nivel intermedio equivalente al 50% de la carga externa es el par de retroceso máximo que puede producir el motor sin reducir la velocidad antes de que se active el acelerador en diferentes posiciones hasta que la presión en el colector de admisión sea de un mínimo del 4% entre el valor medio. Carga 42%.

2.5.3. Viscosidad

La viscosidad adecuada puede mantener una película de aceite suficiente para



separar la superficie y evitar la fricción. Los aceites lubricantes a usar van a ser el 20W50 teniendo un índice de 129, el 10W30 cuyo índice de viscosidad es 146 y del tercer aceite lubricante 5W30 del cual su índice de viscosidad es de 169.

2.5.4. Temperatura del lubricante.

La temperatura del aceite del vehículo es un factor importante porque depende de si el rendimiento y la viscosidad son adecuados. El aceite del vehículo es un elemento importante para garantizar el funcionamiento normal del motor. De él depende que sus órganos internos estén bien lubricados, por lo que responden mejor, reduciendo el desgaste y evitando la corrosión por fricción. (Nestor Rivera, Juan Chica, Ivan Sambrano, 2017).

2.6. Corridas experimentales

Una vez determinadas las variables y sus diferentes niveles, el modelo de superficie de Box-Behnken se puede utilizar para establecer un diseño experimental. Este método permitirá la adquisición de secuencias y combinaciones de variables para obtener muestras de emisiones contaminantes y consumo de combustible. El diseño contiene 45 operaciones básicas, la información detallada se muestra en la Tabla 6. El diseño ha sido generado en Software DesignExpert.

Tabla 6: Corridas experimentales

OrdenEst	Orden Corrida	TipoPt	Bloques	Viscosidad	RPM	Carga
19	1	2	1	18,5	2500	50
33	2	2	1	9,66	2500	50
40	3	2	1	14,08	2500	0
2	4	2	1	18,5	800	50
13	5	0	1	14,08	1650	50
8	6	2	1	18,5	1650	100
4	7	2	1	18,5	2500	50
12	8	2	1	14,08	2500	100
43	9	0	1	14,08	1650	50
11	10	2	1	14,08	800	100
30	11	0	1	14,08	1650	50
42	12	2	1	14,08	2500	100
14	13	0	1	14,08	1650	50
9	14	2	1	14,08	800	0
21	15	2	1	18,5	1650	0
23	16	2	1	18,5	1650	100
24	17	2	1	14,08	800	0



17	18	2	1	18,5	800	50
27	19	2	1	14,08	2500	100
22	20	2	1	9,66	1650	100
26	21	2	1	14,08	800	100
20	22	2	1	9,66	1650	0
3	23	2	1	9,66	2500	50
44	24	0	1	14,08	1650	50
1	25	2	1	9,66	800	50
41	26	2	1	14,08	800	100
7	27	2	1	9,66	1650	100
10	28	2	1	14,08	2500	0
15	29	0	1	14,08	1650	50
38	30	2	1	18,5	1650	100
6	31	2	1	18,5	1650	0
36	32	2	1	18,5	1650	0
18	33	2	1	9,66	2500	50
37	34	2	1	9,66	1650	100
31	35	2	1	9,66	800	50
39	36	2	1	14,08	800	0
29	37	0	1	14,08	1650	50
28	38	0	1	14,08	1650	50
45	39	0	1	14,08	1650	50
34	40	2	1	18,5	2500	50
32	41	2	1	18,5	800	50
5	42	2	1	9,66	1650	0
35	43	2	1	9,66	1650	0
25	44	2	1	14,08	2500	0
16	45	2	1	9,66	800	50

Fuente: Autores

2.7. Adquisición de Datos

2.7.1. Descripción del vehículo

Las principales características del vehículo se detallan en la Tabla 7 a continuación:



Tabla 7: Especificaciones técnicas del vehículo

Especificaciones técnicas	
Motor	1,5 Lt
Válvulas	8
Numero de cilindros	4
Potencia (hp@rpm)	83@5600
Torque (Nm@rpm)	128@3000
Relación de compresión	9,5
Relación final	3,944
Peso bruto vehicular	1365
Capacidad de carga	325

Fuente: Autores

2.7.2. Analizador de gases

El analizador de gases analiza la composición química del gas producido por la combustión de la mezcla aire-combustible, y se espera que la mezcla se quemé completamente, de modo que el combustible y el aire (que contienen aproximadamente 80% de nitrógeno y 20% de oxígeno) se queman completamente para producir dióxido de carbono y agua. (Monitorizar Instalaciones, n.d.)

El analizador de gases está equipado con una bomba de vacío que arrastra los gases de escape al interior del analizador a través de una manguera conectada a una sonda de metal insertada en el tubo de escape del automóvil y dentro de la muestra. Para medir la concentración del gas presente en la mezcla, la luz infrarroja pasa a través de la batería que contiene el gas, por lo que la energía absorbida por cada gas es detectada por un detector apropiado. Estos detectores contienen un filtro formado por una lente que permite pasar solo la longitud de onda del espectro infrarrojo correspondiente al gas cuya concentración se quiere medir. Después de este filtro, la luz es detectada por un sensor electroóptico (fotodiodo o fototransistor). (Monitorizar Instalaciones, n.d.).

2.7.3. Analizador Brain Bee ags-688

Como se muestra en la Figura 13, el equipo Brain Bee ags-688 es un analizador de gases fabricado en Italia según las normas de calidad de la Comunidad Europea (UNE 8251: 2004) y la Norma de Calidad Alemana TUV (ISO 9001). Como



se muestra en la Tabla 8, tiene la capacidad de medir HC, CO, CO₂, O₂ y NO_x. Conéctese a la computadora a través del módulo USB o Bluetooth BT-1, puede guardar los datos adquiridos en tiempo real. (Ingeniería & Automotriz, 2020).

El analizador de gases Brain Bee AGS-688 se utiliza para determinar las diferentes concentraciones de gas emitidas en el escape de vehículos con dispositivos auxiliares de encendido; al usar la sonda correspondiente para medir el gas en el tubo de escape, el equipo puede funcionar en estático o dinámico. (VALENCIA AGUIRRE, 2017)



Figura 13: Equipo Brain BEE AGS-688

Fuente: Autores

Tabla 8: Rango de mediciones del equipo Brain BEE AGS-688

Parámetros	Rango	Unidad	Resolución
CO	0 – 9.99	% vol.	0.01
CO ₂	0 – 19.9	% vol.	0.1
HC HEXANO	0 – 9999	PPM	1
O ₂	0 – 25	%	0.01
NO _x	0 – 5000	PPM	1
Lambda	0.5 – 5.0	-	0.001
Revoluciones Inductancia/ capacitancia	300 – 9990	rpm	10
Temperatura del aceite	20 – 150	°C	1

Fuente: (Ingeniería & Automotriz, 2020)



2.7.4. Banco dinamométrico

El banco dinamométrico, como se muestra en la Figura 14, es un equipo utilizado para realizar una variedad de mediciones en los motores de los vehículos, con el fin de valorar su óptimo funcionamiento bajo cualquier parámetro. (Shinchi Shinchi, 2017)



Figura 14: Banco Dinamométrico

Fuente: Autores

El par y la potencia se miden transmitiendo la rotación de las ruedas motrices a los rodillos montados en la plataforma donde está instalado el vehículo. (Shinchi Shinchi, 2017)

Los sensores de medición están ubicados en la parte inferior de la plataforma, sobre un freno dinamométrico que recibe el giro desde los rodillos mediante una transmisión. (Shinchi Shinchi, 2017)

Para analizar la concentración de emisiones contaminantes y el consumo de combustible en los gases de escape, se utilizan respectivamente el analizador de gases MGT 5 y el medidor de combustible AIC. Según los datos del fabricante, la incertidumbre de medición es del 0,6%. Las características se muestran en la Tabla 9. (Nestor Rivera, Juan Chica, Ivan Sambrano, 2017).



Tabla 9: Características del banco dinamométrico

Características	Rango	Sensibilidad	Unidad
Potencia	0-520	0,1	KW
Fuerza Tractora	0-12000	0	N
Monóxido de Carbono	0-10	0,01	%
Dióxido de Carbono	0-16	0,1	%
Oxígeno	0-21	0,01	%
Hidrocarburos no Combustionados	0-5000	1	Ppm
Óxidos Nitrosos	0-5000	1	Ppm
Consumo de Combustible	0-120	0,01	l/h

Fuente: Autores

2.7.5. Unidad Experimental

Como se muestra en la Figura 15, para el desarrollo experimental se utiliza el dinamómetro MAHA LPS 3000, que está compuesto por frenos de dinamómetro de corrientes parásitas, que además de medir la tracción y la potencia al mismo tiempo, también puede generar cargas. Según (ISO, 2010). (Nestor Rivera, Juan Chica, Ivan Sambrano, 2017).

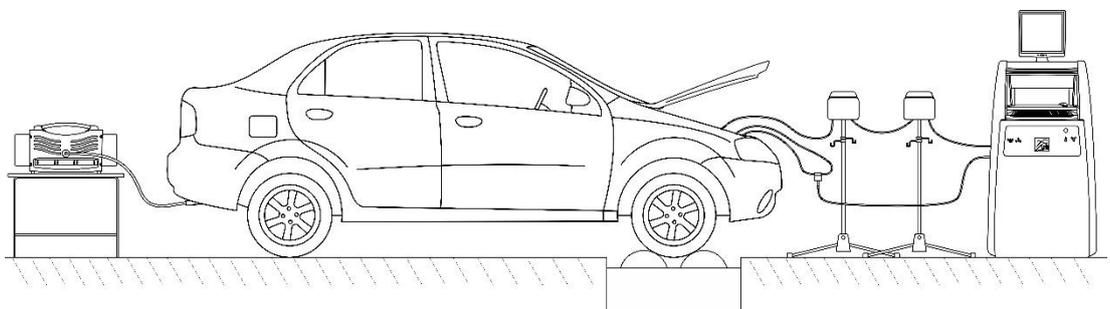


Figura 15: Esquema banco dinamométrico

Fuente: Autores



2.7.6. Procedimiento para la adquisición de datos

- Utilizar el equipo de protección personal (EPP): gafas, guantes, calzado de seguridad y ropa de trabajo.
- Ubicar el vehículo en los rodillos del dinamómetro y verificar que el eje de ruedas se encuentre paralelo a los rodillos, en caso de no serlo, no iniciar la prueba y volver a ubicar el auto para evitar que se salga bruscamente.
- Poner el freno de mano y anclar el vehículo con fajas de seguridad.
- Colocar los instrumentos de medición: caudalímetro, pirómetro, sonda para medición de gases.



Capítulo 3

Análisis de Resultados

3.1. Prototipo que representa los Hidrocarburos no Combustionados (HC).

La interpretación adecuada de las consecuencias del modelo de hidrocarburos no combustionados (HC) es esencial para analizar el diseño de la superficie de respuesta. Como primer paso, se identifica el factor que tiene el mayor impacto en la variabilidad de la respuesta. Para ello, se utilizó un diagrama de Pareto de los efectos principales (Figura 16), con una línea de referencia de 2.03 y un nivel de significancia de 0.05, mostrando qué efectos son significativos. En los resultados obtenidos se puede apreciar que el parámetro más importante es la carga. Por otro lado, la interacción entre viscosidad y RPM es el factor de difusión más pequeño y más pequeño.

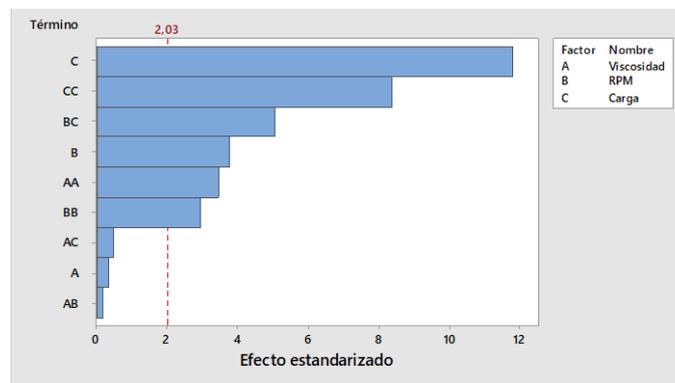


Figura 16: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para HC

Fuente: Autores

Al mismo tiempo, se analizó el gráfico de residuos (Figura 17). La gráfica de probabilidad normal muestra cómo los residuales se ajustan a una línea, lo que satisface el supuesto de normalidad de los datos. El gráfico muestra simetría y sin valores atípicos. En los gráficos de curvas de ajuste y residuos, se puede ver que los residuos están distribuidos aleatoriamente y por lo tanto tienen una varianza constante.



El diagrama de secuencia de residuos muestra los residuos en el orden de recopilación de datos y la fluctuación entre 0 a 50. Con todo, esto demuestra que la recolección de los datos es aceptable, asegurando así la aleatoriedad obtenida en el diseño experimental.

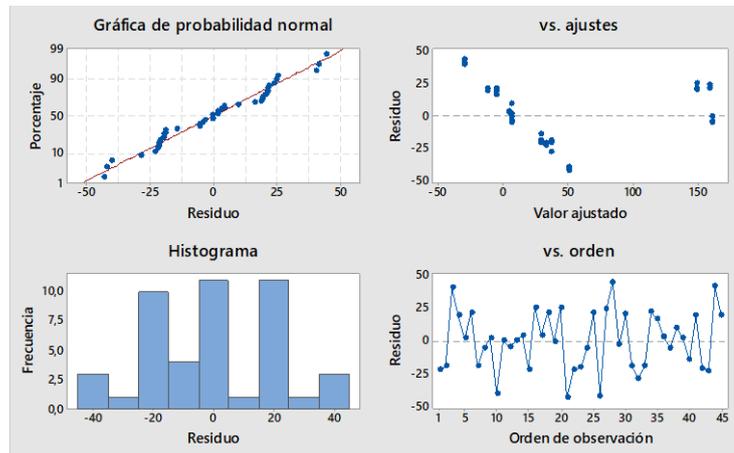


Figura 17: Esquema de residuos para HC

Fuente: Autores

Una vez que se ha validado el diseño de experimentos y el proceso de adquisición de datos, se plantea el modelo matemático para estimar las emisiones de (HC). Comienza con la compilación de los valores estadísticos más importantes y se utiliza para seleccionar el punto de partida correcto para el modelo final. La Tabla 10 resume estas estadísticas.

Tabla 10: Análisis de varianza para HC

Fuente	Valor p secuencial	Falta de ajuste valor p	R ² Ajustado	R ² Previsto
Lineal	0,0327	<0,0001	0,3575	-0,0145
2FI	0,6302	<0,0001	0,2923	-0,9496
Cuadrática	0,0155	<0,0001	0,7509	-0,7362
Cúbica	<0,0001		0,9979	

Fuente: Autores

La Tabla 11 muestra la suma de cuadrados del modelo secuencial. Al verificar la validez del término adicional, se comprueba que se selecciona un polinomio de orden superior (cuadrático), por lo que el modelo no tiene alias. Los modelos con alias



aparecen en modelos con que no incluye datos para todas las combinaciones de niveles de factores, se suele utilizar un diseño factorial fraccionado.

Tabla 11: Modelo secuencial suma de cuadrados para HC

	Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F-valor	p-valor
Media vs Total	24018,88	1	24018,88		
Lineal vs Media	30199,00	3	10066,33	3,97	0,0327
2FI vs Lineal	5017,00	3	1673,33	0,5988	0,6302
Cuadrática vs 2FI	21048,32	3	7016,11	7,14	0,0155
Cúbica vs Cuadrática	6849,00	3	2283,00	278,41	<0,0001
Residual	32,80	4	8,20		
Total	87165,00	17	5127,35		

Fuente: Autores

En la Tabla 12 se muestra el análisis de interacción de hidrocarburos no combustionados (HC), en el cual se demuestra la interacción del factor de carga * rpm, y esto ha sido verificado por el análisis validado de varianza del análisis cuadrático de varianza. Se utiliza para cuantificar la significación del factor y debe ser menor que el valor de significación ($\alpha = 0,05$).

Tabla 12: ANOVA para el cuadrático para HC

Fuente	Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	Valor F	Valor p	
Modelo	56264,32	9	6251,59	6,36	0,0117	significativo
A-Viscosidad	12,5	1	12,5	0,0127	0,9134	
B-RPM	3042	1	3042	3,09	0,122	
C-Carga	27144,5	1	27144,5	27,61	0,0012	
AB	36	1	36	0,0366	0,8537	
AC	81	1	81	0,0824	0,7824	
BC	4900	1	4900	4,98	0,0604	
A^2	3035,46	1	3035,46	3,09	0,1223	
B^2	1883,46	1	1883,46	1,92	0,2088	
C^2	16107,04	1	16107,04	16,38	0,0049	
Residual	6881,8	7	983,11			
Falta de ajuste	6849	3	2283	278,41	<0,0001	significativo
Error puro	32,8	4	8,2			

Fuente: Autores



El valor F de este modelo es 6.36, lo que indica que este modelo es muy importante. La probabilidad de que un valor F tan grande se deba al ruido es solo del 1,17%.

Un valor de p menor que 0.05 indica que el término del modelo es válido. En este caso, C y C² son elementos importantes del modelo. Los valores superiores a 0,1 indican que el término del modelo no es importante. Si hay muchos términos irrelevantes en el modelo (los términos necesarios para respaldar la jerarquía no se cuentan).

Un valor F inapropiado de 278,41 indica que la falta de ajuste es muy importante. Debido al ruido, para un desajuste tan grande, solo hay una probabilidad del 0.01% de un valor F. Una falta grave de ajuste es mala: queremos que el modelo se ajuste.

Tabla 13: Ajuste estadístico para el modelo HC

Desv. Estándar	31,35	R²	0,8910
Media	37,59	R²Ajustado	0,7509
Coef. Var. %	83,42	R² Previsto	-0,7362

Fuente: Autores

Si el valor previsto de R² es negativo, significa que el promedio general puede reflejar su reacción mejor que el modelo actual, Tabla 13. En algunos casos, los modelos de orden superior también pueden predecir mejor. El indicador estadístico de ajuste mide la relación señal-ruido. Una relación superior a 4 es ideal y una relación de 7,755 indica señal suficiente. El modelo se puede utilizar para navegar por el espacio de diseño.

Tabla 14: Factores en términos de Factores Codificados para HC

Factor	Estimación del Coeficiente	df	Error estándar	VIF
Intercepción	5,80	1	14,02	
A-Viscosidad	-1,25	1	11,09	1,0000
B-RPM	19,50	1	11,09	1,0000
C-Carga	58,25	1	15,68	1,0000
AB	3,00	1	15,68	1,0000



<i>AC</i>	-4,50	1	15,68	1,0000
<i>BC</i>	35,00	1	15,68	1,0000
<i>A²</i>	26,85	1	15,28	1,01
<i>B²</i>	-21,15	1	15,28	1,01
<i>C²</i>	61,85	1	15,28	1,01

Fuente: Autores

Cuando todos los demás factores permanecen constantes, el valor estimado del coeficiente representa el cambio de respuesta esperado por cambio unitario en el valor del factor. El punto de intersección en el diseño ortogonal es la respuesta promedio general de todas las corridas. El coeficiente se ajusta alrededor del promedio de acuerdo con la configuración del factor. Como se muestra en la Tabla 14.

Cuando los factores son ortogonales, VIF es 1; de lo contrario, es 0. FIV mayor que 1 indica multicolinealidad. Cuanto mayor sea la FIV, más fuerte será la correlación de los factores. Generalmente, la FIV de menos de 10 es tolerable.

De acuerdo con los coeficientes y factores de codificación determinados, se propone un modelo matemático de la ecuación 4, que modela las emisiones de hidrocarburos no combustionados (HC), medidas en partes por millón [ppm]. Esta ecuación matemática se puede utilizar para modelar la respuesta de cada factor. en un nivel específico, que se puede utilizar para medir la influencia relativa de los factores al comparar los coeficientes de cada factor.

A = Viscosidad

B = RPM

C = Carga

$$\text{HC} = 223,2 - 37,3 A + 0,0757 B - 2,484 C + 1,318 A^2 - 0,000031 B^2 + 0,02497 C^2 + 0,00035 A * B - 0,0158 A * C + 0,000851 B * C$$

Ecuación 4

La optimización de la variable de respuesta (HC) se establece mediante el uso de gráficos de contorno y gráficos de superficie de respuesta. El objetivo es determinar la viscosidad ideal del lubricante para minimizar las emisiones de hidrocarburos no quemados. Las figuras (18, 19) muestran el comportamiento de los HC con la viscosidad y rpm.



Se aprecia que el valor de emisiones mínimas de Hidrocarburos no combustionados en el vehículo según la variación de la viscosidad vs rpm, ocurre cuando se utiliza un lubricante SAE 10W30 con un valor de revoluciones de 1650, nos da un valor estimado en HC de 5.908ppm.

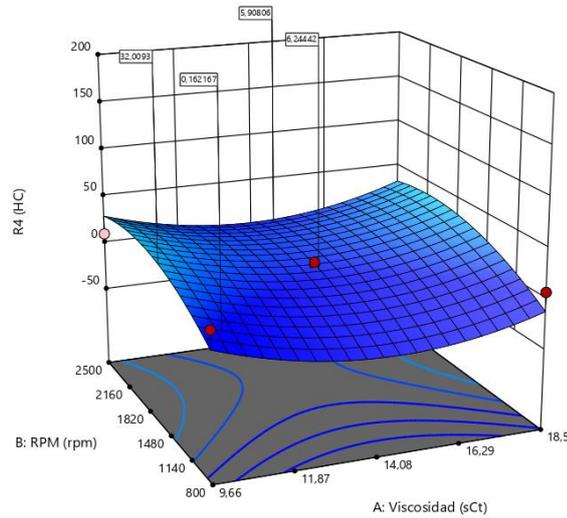


Figura 18: Superficie de respuesta para HC (Viscosidad vs RPM)

Fuente: Autores

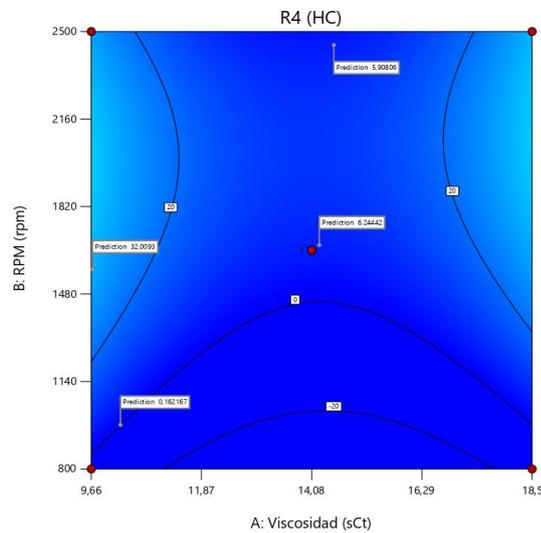


Figura 19: Superficie de contorno para HC (Viscosidad vs RPM)

Fuente: Autores

Por otra parte, las Figura (20, 21) sitúa a los HC en relación a la viscosidad vs carga. La carga se sitúa en un punto medio (50%) con el índice de viscosidad (14.08), y para este estado, obtiene una menor emisión en HC 7.2550ppm, por la cual con el uso del lubricante SAE 10W30 obtiene una menor emisión de HC.

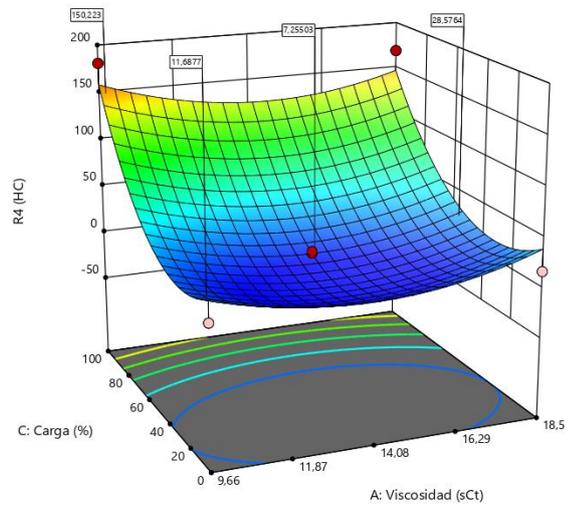


Figura 20: Superficie de respuesta para HC (Viscosidad vs Carga)

Fuente: Autores

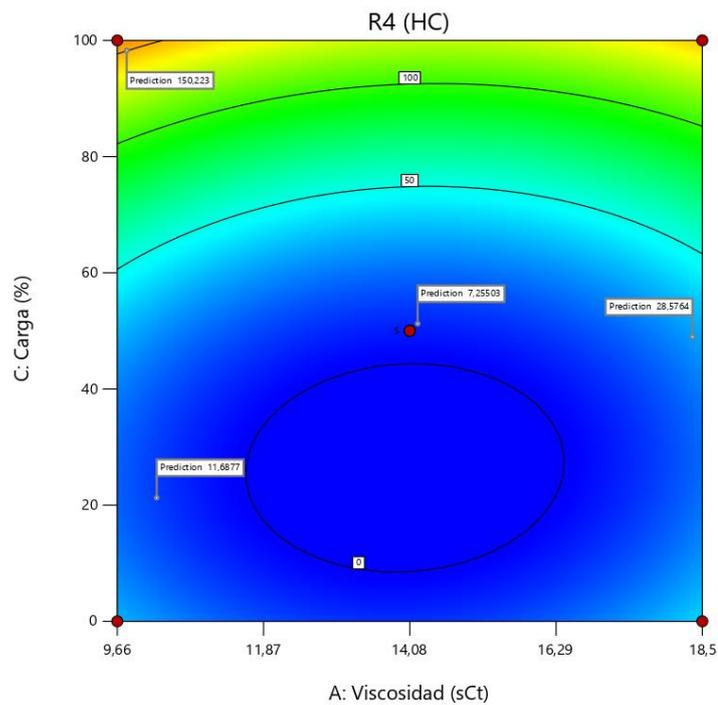


Figura 21: Superficie de contorno para HC (Viscosidad vs Carga)

Fuente: Autores

Se puede determinar que la carga es el factor con la cual se obtiene una mayor emisión de hidrocarburos no combustionados (HC) en comparación con las rpm.



3.2. Modelo para Monóxido de Carbono (CO)

Un valor de p menor que 0.0500 indica que el término del modelo es válido. En este caso, C, BC y C^2 , Figura 22, son términos importantes en el modelo. Los valores superiores a 0,1000 indican que el término del modelo no es importante.

La Figura 22 muestra la gráfica de probabilidad normal muestra cómo los residuos se ajustan a una línea para satisfacer el supuesto de normalidad de los datos. El gráfico muestra simetría y sin valores atípicos. En la curva ajustada y el gráfico de residuos como se observa en la Figura 23, se puede ver que los residuos están distribuidos aleatoriamente y por lo tanto tienen una varianza constante.

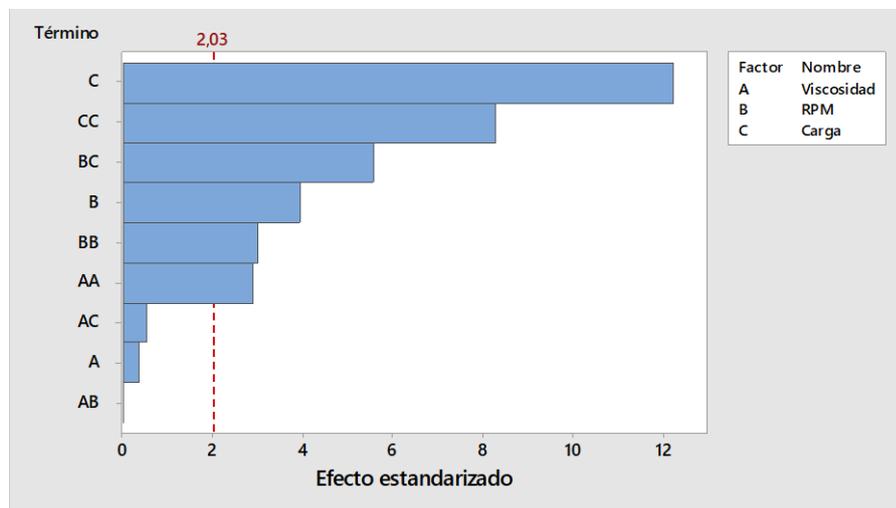


Figura 22: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para CO

Fuente: Autores

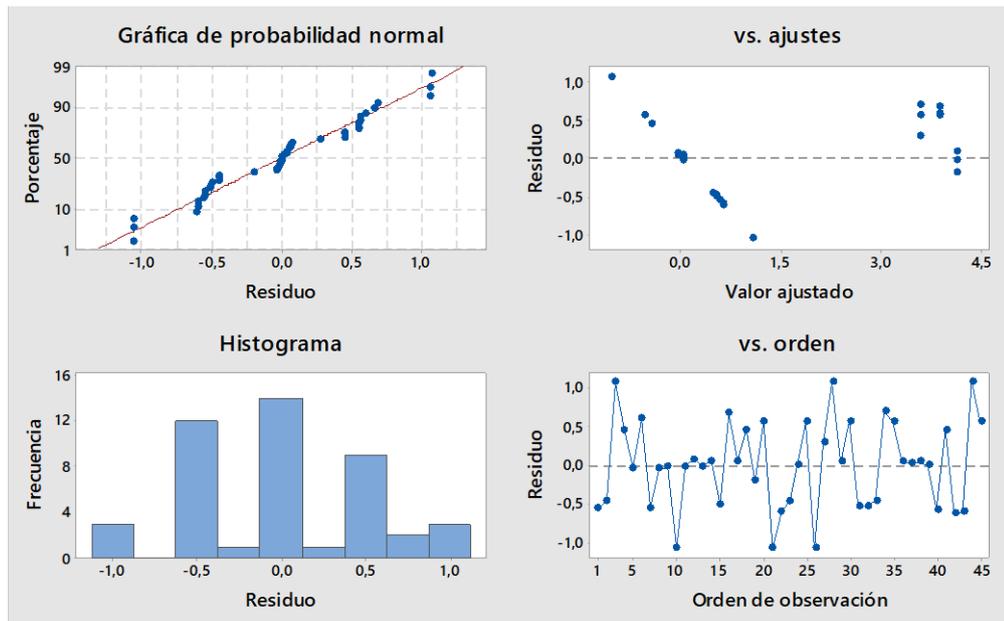


Figura 23: Esquema de residuos para CO

Fuente: Autores

La Tabla 15 resume el análisis de varianza del monóxido de carbono. El coeficiente de determinación R^2 tiene una fuerte correlación con (cerca de 1) el modelo cuadrático.

Tabla 15: Análisis de varianza para CO

Fuente	Valor p secuencial	Falta de ajuste valor p	R^2 Ajustado	R^2 Previsto
Lineal	0,0247	<0,0001	0,3868	0,0177
2FI	0,5435	<0,0001	0,3503	-0,8342
Cuadrática	0,0188	<0,0001	0,7579	-0,6943
Cubica	<0,0001		1	

Fuente: Autores

La Tabla 16 recoge el modelo secuencial Suma de cuadrados. Se selecciona el polinomio de orden superior donde los términos adicionales son significativos y el modelo no tiene alias.



Tabla 16: Modelo secuencial suma de cuadrados para CO

	Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F-valor	p-valor
Media vs Total	9,94	1	9,94		
Lineal vs Media	22,36	3	7,45	4,36	0,0247
2FI vs Lineal	4,11	3	1,37	0,7566	0,5435
Cuadrática vs 2FI	13,38	3	4,46	6,61	0,0188
Cúbica vs Cuadrática	4,72	3	1,57	12100,58	<0,0001
Residual	0,0005	4	0,0001		
Total	54,51	17	3,21		

Fuente: Autores

En la Tabla 17, el *p – valor*, del análisis de la varianza ANOVA para el modelo cuadrático.

El valor F de este modelo es 6.57, lo que indica que el modelo es efectivo. La probabilidad de que un valor F tan grande se deba al ruido es solo del 1,07%.

Si hay muchos términos irrelevantes en el modelo (los términos necesarios para respaldar la jerarquía no se cuentan), reducir el modelo puede mejorarlo. La falta de ajuste del valor F de 12,100.58 significa que la falta de ajuste es muy importante.

Debido al ruido, solo hay un 0.01% de probabilidad de un valor F de desajuste tan grande. Una falta grave de ajuste es mala: queremos que el modelo se ajuste.

Tabla 17: ANOVA para el cuadrático para CO

Fuente	Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	Valor F	Valor p	
Modelo	39,85	9	4,43	6,57	0,0107	significativo
A-Viscosidad	0,0021	1	0,0021	0,0031	0,9569	
B-RPM	2,07	1	2,07	3,07	0,1232	
C-Carga	20,29	1	20,29	30,09	0,0009	
AB	0	1	0	0	1	
AC	0,0072	1	0,0072	0,0107	92,05	
BC	4,1	1	4,1	6,08	0,0431	
A^2	1,39	1	1,39	2,06	0,1952	
B^2	1,39	1	1,39	2,07	0,1936	
C^2	10,67	1	10,67	15,83	0,0053	
Residual	4,72	7	0,6742			



Falta de ajuste	4,72	3	1,57	12100,58	<0,0001	significativo
Error puro	0,0005	4	0,0001			

Fuente: Autores

La Tabla 18 muestra un valor previsto de R^2 negativo indica que el promedio general puede reflejar mejor su reacción en comparación con el modelo actual. En algunos casos, los modelos de orden superior también pueden predecir mejor. El indicador estadístico de ajuste mide la relación señal-ruido. Una relación superior a 4 es ideal y una relación de 8,273 significa que la señal es suficiente. Este modelo se puede utilizar para navegar por el espacio de diseño.

Tabla 18: Ajuste estadístico para el modelo CO

Desv. Estándar	0,8211	R^2	0,8941
Media	0,7647	R^2 Ajustado	0,7579
Coef. Var. %	107,38	R^2 Previsto	-0,6943

Fuente: Autores

La Tabla 19 resume los valores estimados de los coeficientes que representan la variabilidad de las variables de entrada o variables y los cambios esperados en las variables de respuesta. Se observa que el valor de VIF es mayor que 1.

Tabla 19: Factores en términos de Factores Codificados para CO

Factor	Estimación del Coeficiente	df	Error estándar	VIF
Intercepción	0,0160	1	0,3672	
A-Viscosidad	0,0163	1	0,2903	1,0000
B-RPM	0,5087	1	0,2903	1,0000
C-Carga	1,59	1	0,2903	1,0000
AB	0,0000	1	0,4106	1,0000
AC	0,0425	1	0,4106	1,0000
BC	1,01	1	0,4106	1,0000
A ²	0,5745	1	0,4002	1,01
B ²	-0,5755	1	0,4002	1,01
C ²	1,59	1	0,4002	1,01

Fuente: Autores



En la ecuación 5 se propone el modelo matemático, con respecto a la emisión de monóxido de carbono (CO) se expresa como porcentaje de la concentración [%], y se utiliza como unidad el factor de codificación.

A = Viscosidad

B = RPM

C = Carga

$$\text{CO} = 4,63 - 0,806 A + 0,00199 B - 0,0765 C + 0,02820 A^2 - 0,000001 B^2 + 0,000626 C^2 + 0,000001 A * B + 0,000434 A * C + 0,000024 B * C$$

Ecuación 5

Se establece la optimización de la variable de respuesta (CO) mediante el uso de gráficos de contorno y gráficos de superficie de respuesta. Se determina la viscosidad ideal del lubricante para minimizar las emisiones el porcentaje de monóxidos de carbono. Las Figuras (24, 25) muestran el comportamiento de los CO en función de la viscosidad y las rpm.

Con un lubricante SAE 10W30 por un valor de revoluciones de 1650, el valor obtenido de CO es 0.031%, el valor porcentaje de CO producido en el vehículo cambia a medida que la viscosidad cambia con las revoluciones.

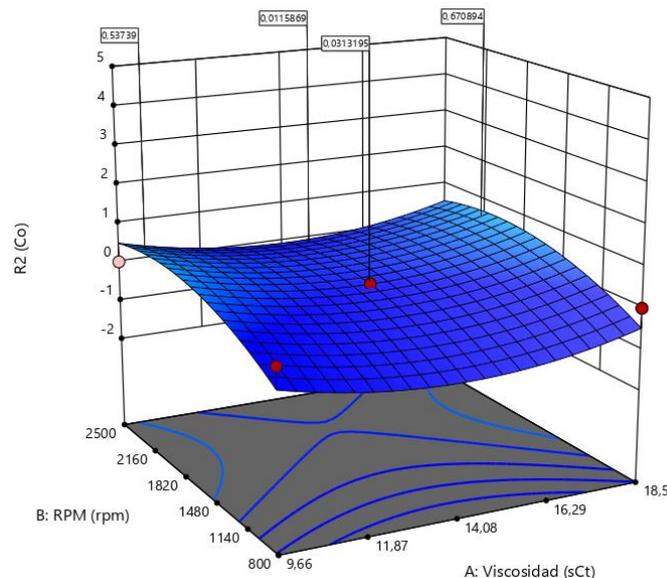


Figura 24: Superficie de respuesta para CO (Viscosidad vs RPM)

Fuente: Autores

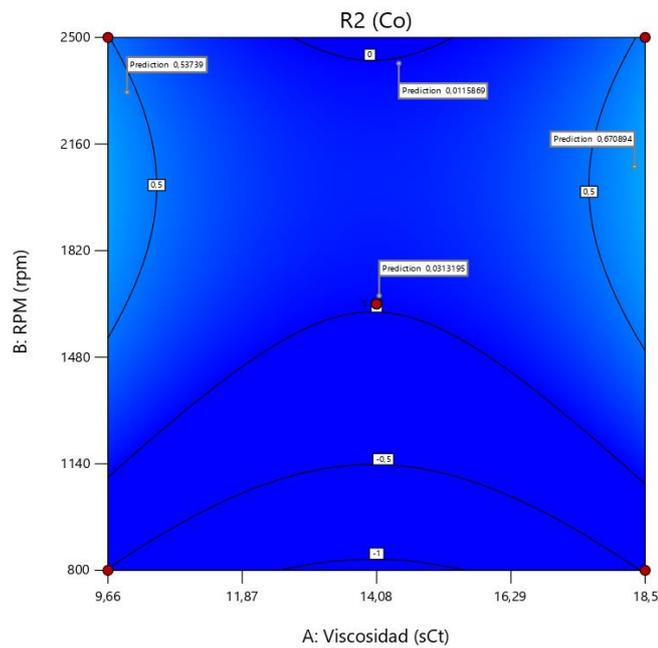


Figura 25: Superficie de contorno para CO (Viscosidad vs RPM)

Fuente: Autores

Por otro lado, las Figuras (26, 27) ilustran la interacción del CO, entre la viscosidad y carga. La carga se encuentra en el punto medio (50%) del índice de viscosidad (14,08), el porcentaje de CO es bajo, 0,041%. Por lo cual el uso de un lubricante SAE 10W30, el porcentaje de emisiones de monóxido de carbono (CO) es menor.

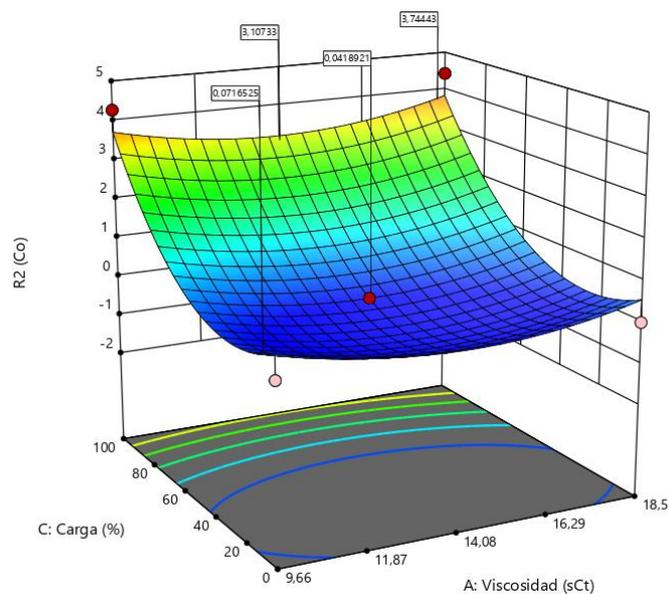


Figura 26: Superficie de respuesta para CO (Viscosidad vs Carga)



Fuente: Autores

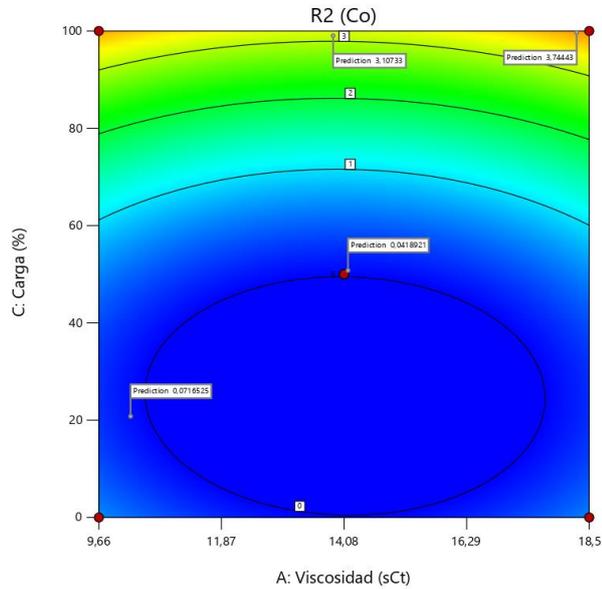


Figura 27: Superficie de contorno para CO (Viscosidad vs Carga)

Fuente: Autores

Se puede determinar que la carga es el factor con la cual se obtiene una mayor emisión de monóxido de carbono (CO) en comparación con las rpm.

3.3. Modelo para Dióxido de Carbono (CO₂)

Un valor de p menor que 0.0500 indica que el término del modelo es válido. En este caso, C y C² son elementos importantes del modelo. Los valores superiores a 0,1000 indican que el término del modelo no es importante. Si hay muchos términos irrelevantes en el modelo (los términos necesarios para respaldar la jerarquía no se cuentan), reducir el modelo puede mejorarlo. Se observa en la Figura 28.

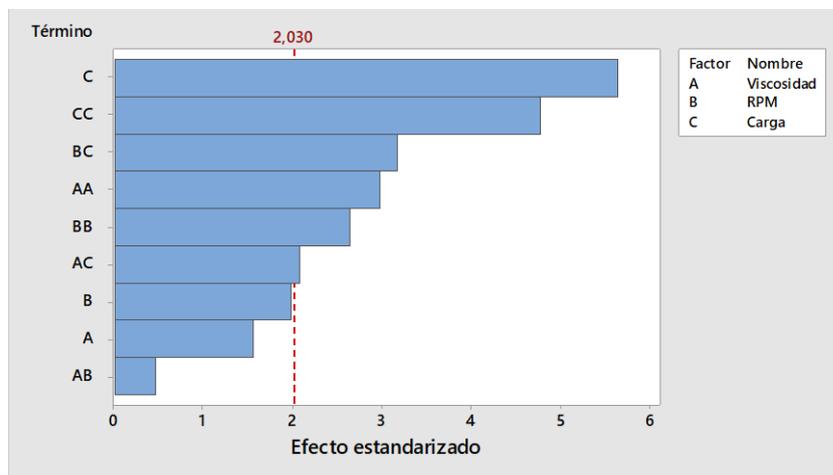


Figura 28: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para CO₂



Fuente: Autores

En la Figura 29 se muestra la gráfica de probabilidad normal muestra cómo los residuos se ajustan a una línea para satisfacer el supuesto de normalidad de los datos. El gráfico muestra simetría y sin valores atípicos. En la curva ajustada y el gráfico de residuos, se puede ver que los residuos están distribuidos aleatoriamente y por lo tanto tienen una varianza constante.

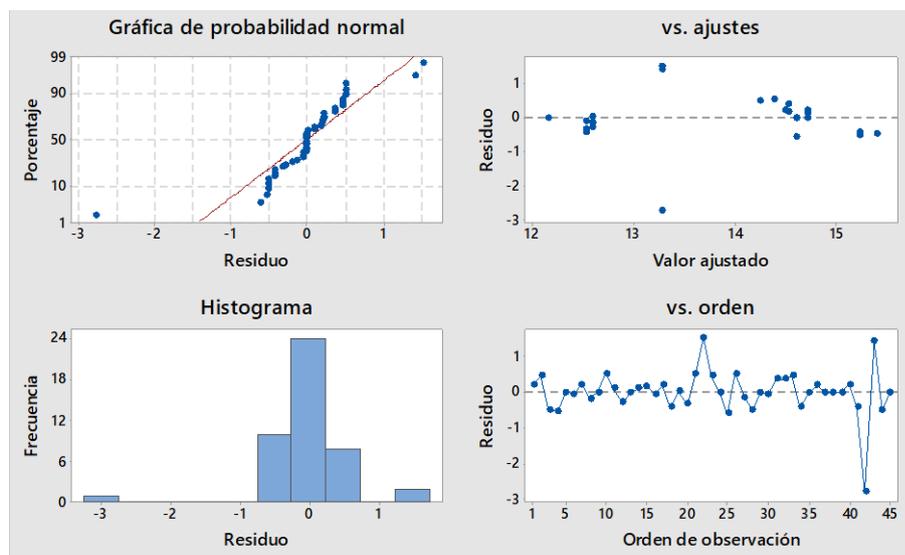


Figura 29: Esquema de residuos para CO₂

Fuente: Autores

La Tabla 20, muestra las estadísticas ANOVA de CO₂ (dióxido de carbono). El valor del coeficiente de determinación R² está estrechamente relacionado con su valor, y el valor del modelo cuadrático es cercano a 1.

Tabla 20: Análisis de varianza para CO₂

Fuente	Valor p secuencial	Falta de ajuste valor p	R ² Ajustado	R ² Previsto
Lineal	0,0203	<0,0001	0,04062	0,0465
2FI	0,4658	<0,0001	0,3951	-0,7081
Cuadrática	0,068	<0,0001	0,6687	-1,3124
Cubica	<0,0001		0,9981	

Fuente: Autores

La Tabla 21 muestra el modelo secuencial de suma de cuadrados. El polinomio tiene un orden superior y elementos adicionales importantes para el modelo.



Tabla 21: Modelo secuencial suma de cuadrados para CO2

	Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F-valor	p-valor
Media vs Total	3467,76	1	3467,76		
Lineal vs Media	8,55	3	2,85	4,65	0,0203
2FI vs Lineal	1,72	3	0,575	0,9204	0,4658
Cuadrática vs 2FI	3,85	3	1,28	3,75	0,0680
Cúbica vs Cuadrática	2,39	3	0,7958	397,92	<0,0001
Residual	0,008	4	0,0020		
Total	3484,28	17	204,96		

Fuente: Autores

El valor F de este modelo es 4.59, lo que indica que este modelo es muy importante. La probabilidad de que un valor F tan grande se deba al ruido es solo del 2,85%.

Un valor de F de 3.9792 indica que no es adecuado para muy importantes. Debido al ruido, para un desajuste tan grande, solo hay una probabilidad del 0.01% de un valor F. Una falta grave de ajuste es mala: queremos que el modelo se ajuste, se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22: ANOVA para el cuadrático para CO₂

Fuente	Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	Valor F	Valor p	
Modelo	14,13	9	1,57	4,59	0,0285	significativo
A-Viscosidad	0,1013	1	0,1013	0,2959	0,6034	
B-RPM	0,4513	1	0,4513	1,32	0,2886	
C-Carga	8	1	8	23,38	0,0019	
AB	0,16	1	0,16	0,4575	0,5161	
AC	0,0025	1	0,0025	0,0073	0,9343	
BC	1,56	1	1,56	4,57	0,07	
A ²	0,9904	1	0,9904	2,89	0,1327	
B ²	0,4178	1	0,4178	1,22	0,3057	
C ²	2,43	1	2,43	7,11	0,0322	
Residual	2,4	7	0,3422			
Falta de ajuste	2,39	3	0,7358	397,92	<0,0001	significativo
Error puro	0,008	4	0,002			

Fuente: Autores



En la Tabla 23, el valor previsto de R^2 es negativo, significa que el promedio general puede reflejar su reacción mejor que el modelo actual. En algunos casos, los modelos de orden superior también pueden predecir mejor. El indicador estadístico de ajuste mide la relación señal-ruido.

Es deseable una relación superior a 4, y una relación de 7.299 significa que la señal es suficiente. Este modelo se puede utilizar para navegar por el espacio de diseño.

Tabla 23: Ajuste estadístico para el modelo CO₂

Desv. Estándar	0,5850	R^2	0,8550
Media	14,28	R^2 Ajustado	0,6687
Coef. Var. %	4,10	R^2 Previsto	-1,3124

Fuente: Autores

La Tabla 24 resume la estimación de los coeficientes que representan comportamiento de la variable de respuesta cuando se varían los factores de entrada, mientras que los demás términos permanecen constantes. Se observa que los valores VIF son superiores a 1.

Tabla 24: Factores en términos de Factores Codificados para CO₂

Factor	Estimación del Coeficiente	df	Error estándar	VIF
Intercepción	14,72	1	0,2616	
A-Viscosidad	0,1125	1	0,2068	1,0000
B-RPM	-0,2375	1	0,2068	1,0000
C-Carga	-1,00	1	0,2068	1,0000
AB	-0,2000	1	0,2925	1,0000
AC	-0,0250	1	0,2925	1,0000
BC	-0,6250	1	0,2925	1,0000
A ²	-0,4850	1	0,2851	1,01
B ²	0,3150	1	0,2851	1,01
C ²	-0,7600	1	0,2851	1,01

Fuente: Autores

Se propone un modelo matemático de emisiones de monóxido de carbono (CO₂), que se expresa como porcentaje de concentración [%], y se utiliza un factor de codificación como unidad. Ecuación 6



A = Viscosidad

B = RPM

C = Carga

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 = & 7,13 + 1,061 A - 0,00171 B + 0,0737 C - 0,0312 A^2 + 0,000001 B^2 \\ & - 0,000391 C^2 - 0,000024 A * B - 0,001848 A * C - 0,000015 B \\ & * C \end{aligned}$$

Ecuación 6

Se Establece la optimización de la variable de respuesta (CO_2) mediante el uso de gráficos de superficie de respuesta y gráficos de contorno. Determina la viscosidad ideal del lubricante para minimizar las emisiones de dióxido de carbono. Las Figuras (30, 31) muestran el comportamiento de los CO_2 en función de la viscosidad y las revoluciones.

Con un lubricante SAE 5W30 por un valor de revoluciones de 1650, el valor obtenido de CO_2 es 14.16%, el valor de CO_2 producido en el vehículo aparece a medida el vehículo cambia con las revoluciones.

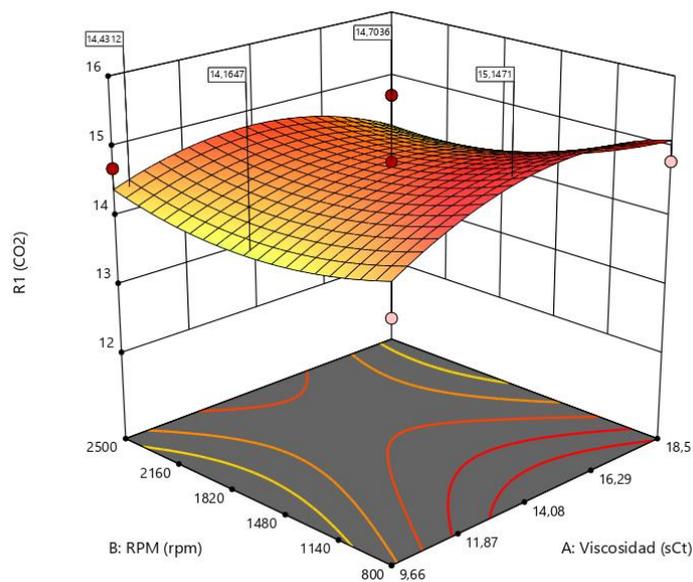


Figura 30: Superficie de respuesta para CO_2 (Viscosidad vs RPM)

Fuente: Autores

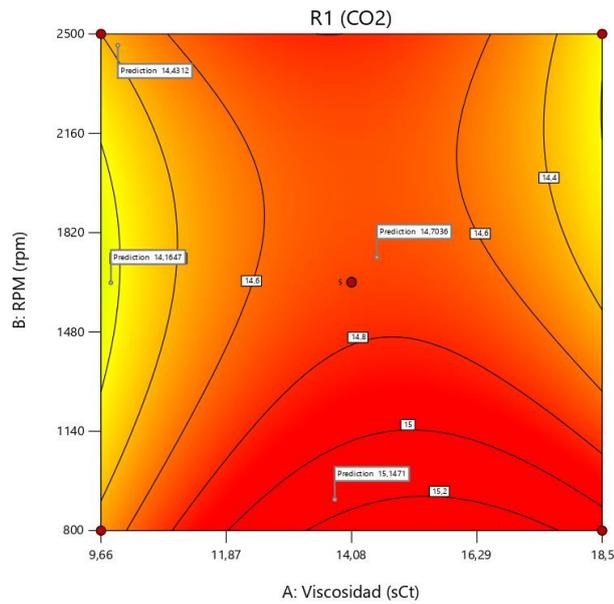


Figura 31: Superficie de contorno para CO₂ (Viscosidad vs RPM)

Fuente: Autores

Por otro lado, las Figuras (32, 33) ilustran la interacción del CO₂, entre la viscosidad y carga. La carga se encuentra en el punto máximo (100%) del índice de viscosidad (14,08), el porcentaje de CO₂ es bajo, 13,12%. Por lo tanto, cuando se utiliza un lubricante SAE 10W30, el porcentaje de CO₂ es bajo.

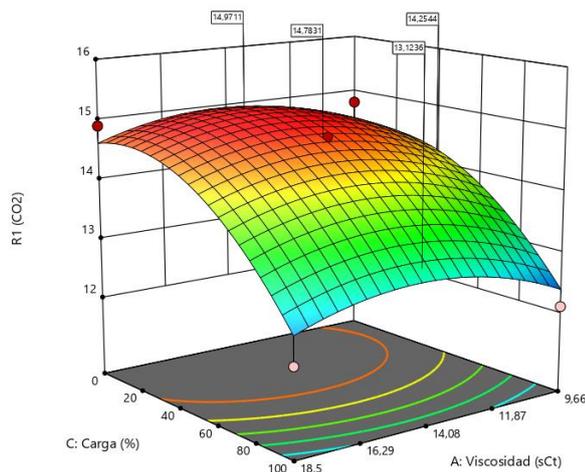


Figura 32: Superficie de respuesta para CO₂ (Viscosidad vs Carga)

Fuente: Autores

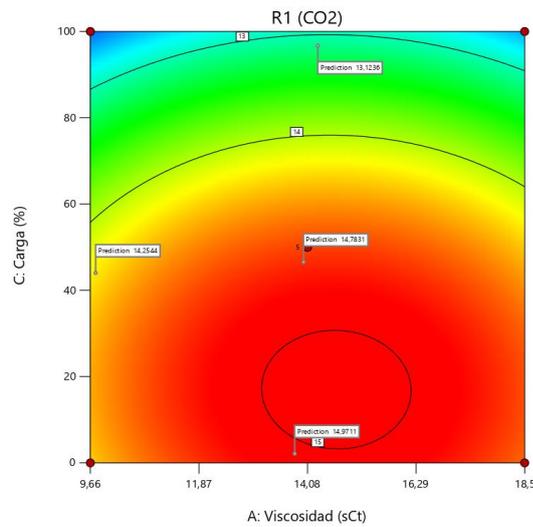


Figura 33: Superficie de contorno para CO₂ (Viscosidad vs Carga)

Fuente: Autores

3.4. Modelo para Óxidos de nitrógeno (NO_x)

El valor F de este modelo es 12,96, lo que demuestra que este modelo es muy importante. La probabilidad de que un valor F tan grande se deba al ruido es solo del 0,14%. Un valor de p menor que 0.0500 indica que el término del modelo es válido. En este caso, B, C, BC, A², B² son elementos importantes del modelo. La gráfica de probabilidad normal muestra cómo los residuos se ajustan a una línea para satisfacer el supuesto de normalidad de los datos. El gráfico muestra simetría y sin valores atípicos. La cual se muestra en las Figuras (34, 35)

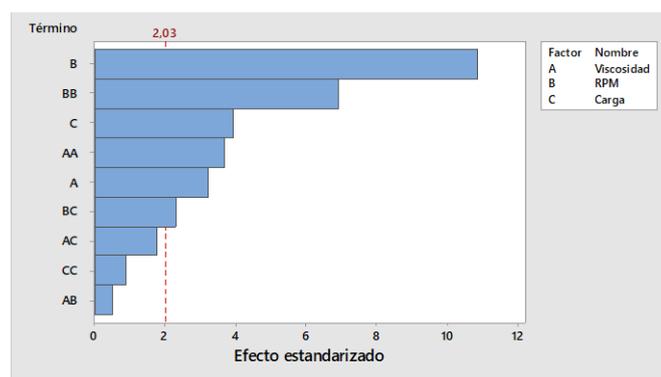


Figura 34: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para NO_x

Fuente: Autores

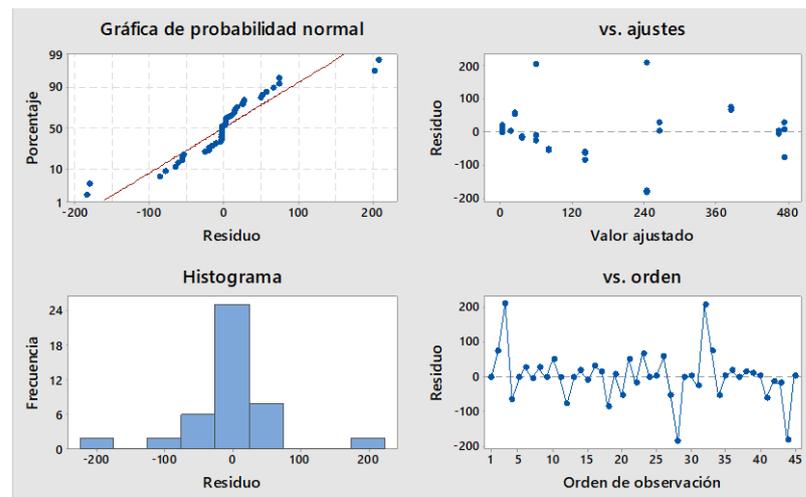


Figura 35: Esquema de residuos para NOx

Fuente: Autores

La Tabla 25 muestra las estadísticas ANOVA de CO2 (dióxido de carbono). El valor del coeficiente de determinación R^2 está estrechamente relacionado con su valor, y el valor del modelo cuadrático es cercano a 1.

Tabla 25: Análisis de varianza para NOx

Fuente	Valor p secuencial	Falta de ajuste	valor p	R^2 Ajustado	R^2 Previsto
Lineal	0,0135			0,4445	0,1849
2FI	0,4876			0,4276	-0,2993
Cuadrática	0,0034			0,8706	0,0941
Cubica				1	

Fuente: Autores

La Tabla 26 muestra el modelo secuencial de suma de cuadrados. El polinomio tiene un orden superior y es muy importante para el modelo.

Tabla 26: Modelo secuencial suma de cuadrados para NOx

	Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F-valor	p-valor
Media vs Total	2,395E+05	1	2,395E+05		
Lineal vs Media	2,876E+05	3	95883,25	5,27	0,0135
2FI vs Lineal	49057,50	3	16352,50	0,8719	0,4876
Cuadrática vs 2FI	1,579E+05	3	52624,68	12,41	0,0034
Cúbica vs Cuadrática	29684,25	3	9894,75		
Residual	0,0000	4	0,0000		



Total	7,638E+05	17	44930,24
-------	-----------	----	----------

Fuente: Autores

La Tabla 27 indican los valores superiores a 0,1 indican que el término del modelo no es importante. Si hay muchos términos irrelevantes en el modelo (los términos necesarios para respaldar la jerarquía no se cuentan), reducir el modelo puede mejorarlo.

Tabla 27: ANOVA para el cuadrático para NOx

Fuente	Suma de cuadrados	df	Media cuadratica	Valor F	Valor p	
Modelo	4,95E+05	9	5,50E+04	12,96	0,0014	significativo
A-Viscosidad	13203,13	1	13203,13	3,11	0,121	
B-RPM	2,05E+05	1	2,05E+05	48,45	0,0002	
C-Carga	69006,13	1	69006,13	16,27	0,005	
AB	756,25	1	756,25	0,1783	0,6855	
AC	12769	1	12769	3,01	0,1263	
BC	35532,25	1	35532,25	8,38	0,0232	
A^2	32606,32	1	32606,32	7,69	0,0276	
B^2	1,18E+05	1	1,18E+05	27,77	0,0012	
C^2	37,89	1	37,89	0,0089	0,9273	
Residual	29684,25	7	4240,61			
Falta de ajuste	29684,25	3	9897,75	6,21%		
Error puro	0	4	0			

Fuente: Autores

El R^2 esperado es 0,0941, que no está tan cerca del R^2 ajustado 0,8706 como se esperaba generalmente, es decir, la diferencia es mayor que 0,2. Esto puede indicar una falla grave o un problema con el modelo y / o los datos. Los aspectos que deben tenerse en cuenta son la simplificación del modelo, la conversión de respuestas, valores atípicos, etc. La cual se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28: Ajuste estadístico para el modelo NOx

Desv. Estándar	65,12	R^2	0,9434
Media	118,71	R^2 Ajustado	0,8706
Coef. Var. %	54,86	R^2 Previsto	0,0941

Fuente: Autores

En la Tabla 29 se muestra todos los modelos empíricos deben probarse enviándolos y ejecutándolos. El indicador estadístico de ajuste mide la relación señal-



ruido. Es deseable una relación superior a 4, y una relación de 10,719 indica que la señal es suficiente. Este modelo se puede utilizar para navegar por el espacio de diseño.

Tabla 29: Factores en términos de Factores Codificados para NOx

Factor	Estimación del Coeficiente	df	Error estándar	VIF
Intercepción	0,0000	1	29,12	
A-Viscosidad	40,63	1	23,02	1,0000
B-RPM	160,25	1	23,02	1,0000
C-Carga	92,88	1	23,02	1,0000
AB	-13,75	1	32,56	1,0000
AC	56,50	1	32,56	1,0000
BC	94,25	1	32,56	1,0000
A ²	88,00	1	31,74	1,01
B ²	167,25	1	31,74	1,01
C ²	-3,00	1	31,74	1,01

Fuente: Autores

Cuando todos los demás factores no han cambiado, el valor estimado del coeficiente representa el cambio de respuesta esperado por cambio unitario en el valor del factor. La intersección en el diseño ortogonal es la respuesta promedio general de todos los clics. Según la configuración del coeficiente, ajuste el coeficiente al valor promedio. Cuando los factores son ortogonales, VIF es 1; de lo contrario, es 0. De lo contrario, es 0. De lo contrario, es 0. FIV mayor que 1 indica multicolinealidad. Cuanto mayor sea la FIV, más fuerte será la correlación de los factores. Generalmente, la FIV de menos de 10 es tolerable.

Una vez obtenido el coeficiente determinado, la ecuación 7 se expresa como factor de codificación de carbono (NO_x), expresado como concentración porcentual [%].

A = Viscosidad

B = RPM

C = Carga

$$NO_x = 1102 - 116,1 A - 0,555 B - 4,16 C + 4,39 A^2 + 0,000224 B^2 + 0,00831 C^2 - 0,00306 A * B + 0,183 A * C + 0,001216 B * C$$



Ecuación 7

Se establece la optimización de la variable de respuesta (NO_x) mediante el uso de gráficos de superficie de respuesta y gráficos de contorno. Determina la viscosidad ideal del lubricante para minimizar las emisiones de óxidos de nitrógeno. Las Figuras (36, 37) muestran el comportamiento de los NO_x en función de la viscosidad y las revoluciones.

Con un lubricante SAE 5W30 por un valor de revoluciones de 1650, el valor de NO_x es 52.52%, el valor de NO_x producido en el vehículo aparece a medida que la viscosidad cambia con las revoluciones.

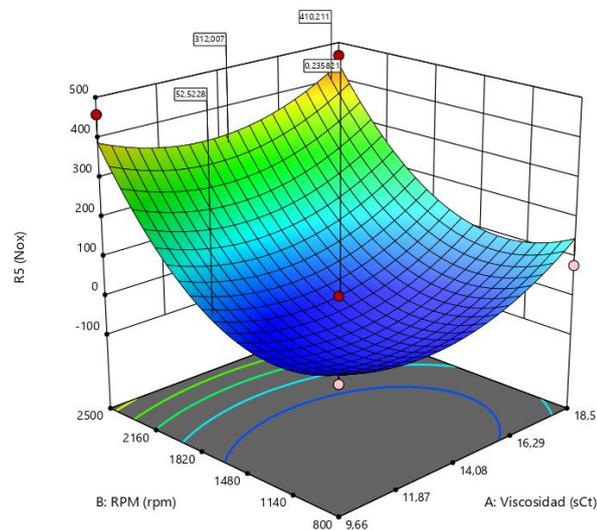


Figura 36: Superficie de respuesta para NO_x (Viscosidad vs RPM)

Fuente: Autores

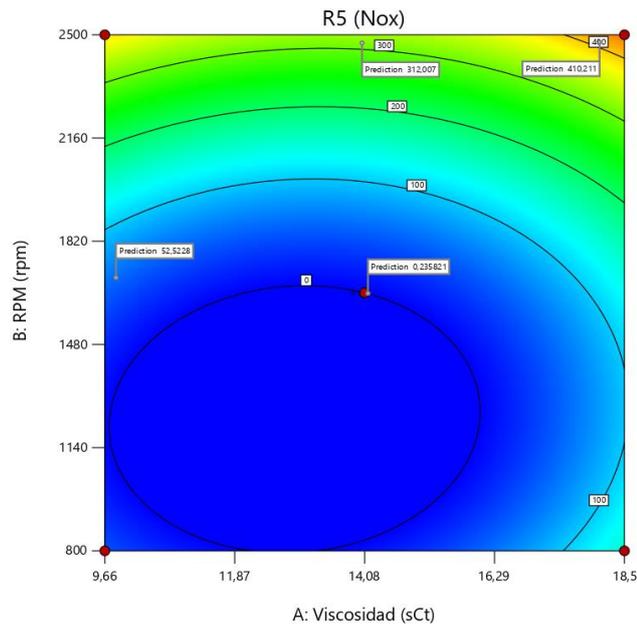


Figura 37: Superficie de contorno para NOx (Viscosidad vs RPM)

Fuente: Autores

Por otro lado, las Figuras (38, 39) ilustran la interacción entre NO_x, viscosidad y carga. La carga se encuentra en el punto (50%) y el índice de viscosidad (14,08), el porcentaje de NO_x es bajo, se realiza una predicción cuyo valor es 0.25%. Por lo tanto, cuando se utiliza un lubricante SAE 10W30, el porcentaje de NO_x es bajo.

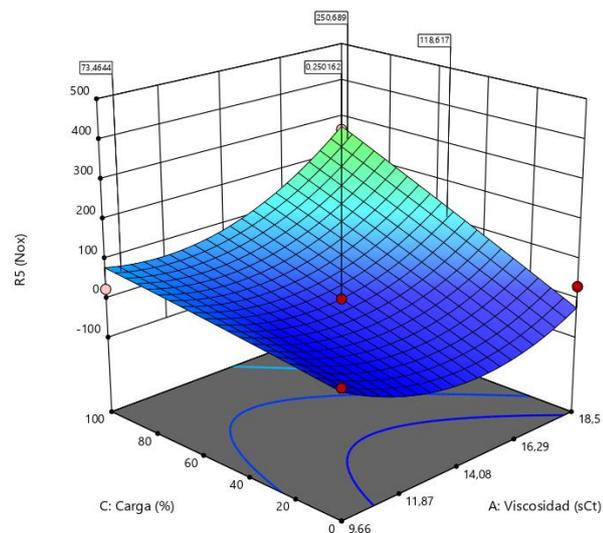


Figura 38: Superficie de respuesta para NOx (Viscosidad vs Carga)

Fuente: Autores

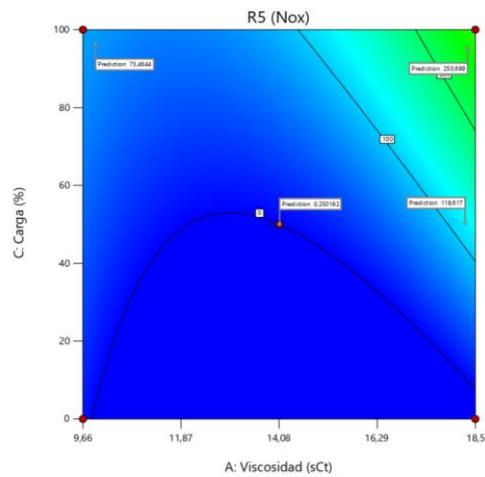


Figura 39: Superficie de contorno para NOx (Viscosidad vs Carga)

Fuente: Autores

3.5. Modelo para Consumo de combustible

En la Figura 40 se muestran las gráficas de residuos para consumo de combustible la cual determina, un valor de p menor que 0.0500 indica que el término del modelo es válido. En este caso, C, A², B² y C² son términos importantes del modelo. Los valores superiores a 0,1000 indican que el término del modelo no es importante. Si hay muchos términos irrelevantes en el modelo (los términos necesarios para respaldar la jerarquía no se cuentan), reducir el modelo puede mejorarlo.

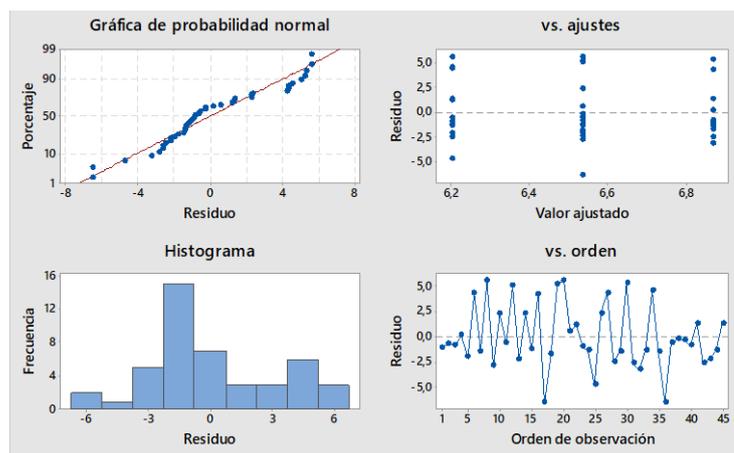


Figura 40: Esquema de consumo de combustible

Fuente: Autores

La Tabla 30 muestra las estadísticas ANOVA de Consumo de combustible. El valor del coeficiente de determinación R² está estrechamente relacionado con su valor, y el valor del modelo cuadrático es cercano a 1.



Tabla 30: Análisis de varianza para Consumo de Combustible

Fuente	Valor p secuencial	Falta de ajuste valor p	R ² Ajustado	R ² Previsto
Lineal	0.0121	<0.0001	0.1756	-0.2535
2FI	0.6697	<0.0001	0.1457	-1.4526
Cuadrática	<0.0001	0.0034	0.6728	-0.6143
Cubica	0.0034		0.7653	

Fuente: Autores

La Tabla 31 muestra el modelo secuencial de adición de cuadrados. El polinomio tiene un orden superior y es muy importante para el modelo.

Tabla 31: Modelo secuencial suma de cuadrados para Consumo de Combustible

	Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F-valor	p-valor
Media vs Total	1522.28	1	1522.28		
Lineal vs Media	22.78	3	7.59	4.12	0,0121
2FI vs Lineal	2.99	3	0.9961	0,5221	0.6697
Cuadrática vs 2FI	46.92	3	15.64	21.41	<0.0001
Cúbica vs Cuadrática	8.80	3	2.93	5.60	0.0034
Residual	16.78	32	0.5242		
Total	1620.55	45	36.01		

Fuente: Autores

El valor F de este modelo es 11,05, lo que indica que este modelo es muy importante. La probabilidad de un valor F tan grande debido al ruido es solo del 0,01%.

La falta de ajuste F valor de 5.60 muestra que la falta de adaptación es muy importante. La probabilidad de un valor F de desajuste tan grande debido al ruido es solo del 0,34%. Una falta severa de ajuste es mala: queremos que el modelo encaje. Se observa en la Tabla 32.

Tabla 32: ANOVA para el cuadrático para Consumo de Combustible

Fuente	Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	Valor F	Valor p
Modelo	72.69	9	8.08	11.05	<0.0001 significativo
A-Viscosidad	0.0061	1	0.0061	0.0083	0.9280
B-RPM	0.4278	1	0.4278	0.5855	0.4493
C-Carga	22.34	1	22.34	30.58	<0.0001



AB	0.81	1	0.81	1.11	0.2996	
AC	0.2601	1	0.2601	0.3559	0.5546	
BC	1.92	1	1.92	2.63	0.1142	
A ²	12.91	1	12.91	17.67	0.0002	
B ²	6.90	1	6.90	9.44	0.0041	
C ²	20.70	1	20.70	28.33	<0.0001	
Residual	25.58	35	0.7307			
Falta de ajuste	8.80	3	2.93	5.60	0.0034	significativo
Error puro	16.78	32	0.5242			

Fuente: Autores

En la Tabla 33 se muestra un valor predicho de R^2 negativo indica que el promedio general puede reflejar mejor su reacción que el modelo actual. En algunos casos, los modelos de orden superior también pueden predecir mejor. El indicador estadístico de ajuste mide la relación señal-ruido. Es deseable una relación superior a 4 y una relación de 16,958 significa que la señal es suficiente. Este modelo se puede aprovechar para recorrer por el espacio de diseño.

Tabla 33: Ajuste estadístico para el modelo Consumo de Combustible

Desv. Estándar	0.8548	R^2	0.7397
Media	5.82	R^2 Ajustado	0.6728
Coef. Var. %	14.70	R^2 Previsto	-0.6143

Fuente: Autores

En la Tabla 34 se muestra que cuando todos los demás factores permanecen constantes, la estimación del coeficiente representa el cambio de respuesta esperado por cambio unitario en el valor del factor. La intersección en el diseño ortogonal es la respuesta promedio general de todos los viajes. Según la configuración del factor, el coeficiente se ajusta al valor medio. Cuando los factores son ortogonales, VIF es 1; de lo contrario, es 0. Un FIV mayor que 1 indica multicolinealidad, cuanto mayor es el FIV, más grave es la correlación de factores.

Tabla 34: Factores en términos de Factores Codificados para Consumo de Combustible

Factor	Estimación del Coeficiente	df	Error estándar	VIF
Intercepción	5.38	1	0.1488	



A-Viscosidad	0.0275	1	0.3022	1,0000
B-RPM	-0.2312	1	0.3022	1,0000
C-Carga	1.67	1	0.3022	1,0000
AB	-0.45	1	0.4274	1,0000
AC	0.2550	1	0.4274	1,0000
BC	-0.6925	1	0.4274	1,0000
A ²	1.59	1	0.3776	1,28
B ²	-1.16	1	0.3776	1,28
C ²	2.01	1	0.3776	1,28

Fuente: Autores

Una vez obtenido el coeficiente determinado, la ecuación 8 se expresa como factor de Consumo de combustible.

A = Viscosidad

B = RPM

C = Carga

$$\begin{aligned} \text{Consumo} = & 14,72 + 0,1125 * A - 0,2375 * B - 1,00 * C - 0,2 A * B \\ & - 0,025 A * C - 0,625 * C - 0,485 * A^2 + 0,315 * B^2 \\ & - 0,76 * C^2 \end{aligned}$$

Ecuación 8

Se establece la optimización de la variable de respuesta consumo de combustible mediante el uso de gráficos de superficie de respuesta y gráficos de contorno. Determina la viscosidad ideal del lubricante para minimizar el consumo de combustible. Las Figuras (41, 42) muestran el comportamiento del consumo de combustible en función de la viscosidad y las revoluciones.

Con un lubricante SAE 5W30 por un valor de revoluciones de 2500, se realiza una predicción cuyo valor obtenido del consumo es 4.33, el valor de consumo producido en el vehículo aparece a medida que la viscosidad cambia con las revoluciones.

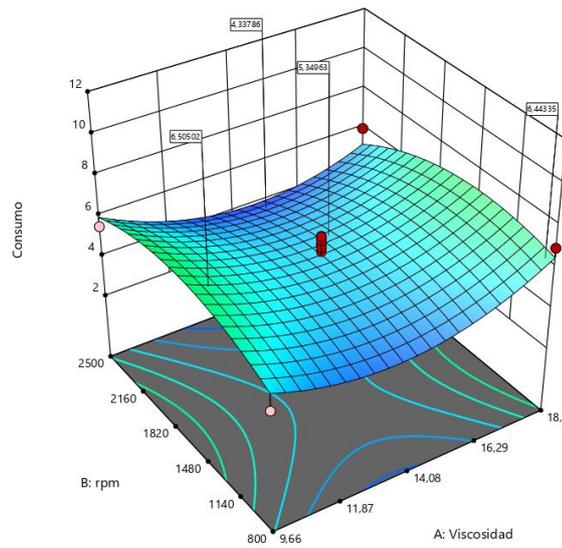


Figura 41: Superficie de respuesta para Consumo de Combustible (Viscosidad vs RPM)

Fuente: Autores

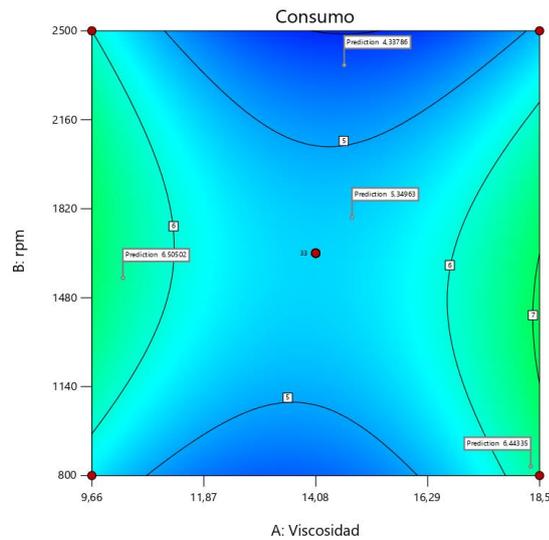


Figura 42: Superficie de contorno para Consumo de Combustible (Viscosidad vs RPM)

Fuente: Autores

Por otro lado, las Figuras (43 y 44) ilustran la interacción del consumo de combustible, entre la viscosidad y carga. La carga se encuentra en el punto (50%) y el índice de viscosidad (14,08), el valor de consumo es bajo, se realiza una predicción cuyo valor es 5.37. Por lo tanto, cuando se utiliza un lubricante SAE 10W30, valor de consumo de combustible es bajo.

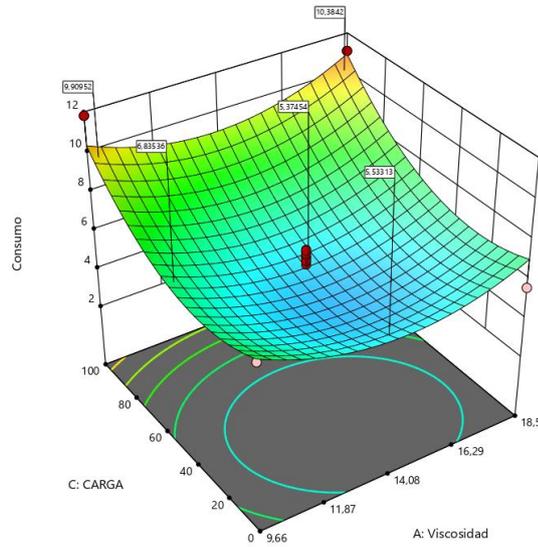


Figura 43: Superficie de respuesta para Consumo de Combustible (Viscosidad vs Carga)

Fuente: Autores

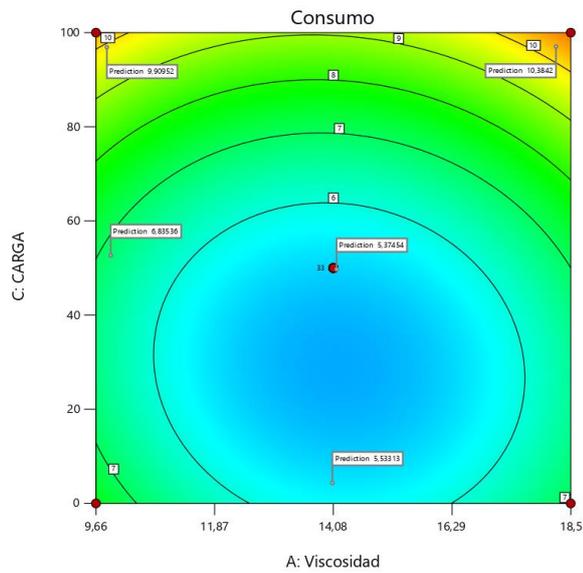


Figura 44: Superficie de contorno para Consumo de Combustible (Viscosidad vs Carga)

Fuente: Autores



Capítulo 4

Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Resultados

La evaluación de las interacciones entre las variables de entrada y salida muestra que los factor más importantes son *viscosidad * carga*.

Considerar *A*: viscosidad, *B*: revoluciones, *C*: carga

4.1.1. Modelo obtenido para HC

El modelo cuadrático obtenido, $HC = 223,2 - 37,3 A + 0,0757 B - 2,484 C + 1,318 A^2 - 0,000031 B^2 + 0,02497 C^2 + 0,00035 A * B - 0,0158 A * C + 0,000851 B * C$, con un **F - valor** de 6,36. Esto significa que es importante. Los valores p de los coeficientes C y C² son menores a 0.05, lo que refleja que los términos del modelo están correlacionados.

4.1.2. Modelo obtenido para CO

En el caso del Monóxido de carbono $CO = 4,63 - 0,806 A + 0,00199 B - 0,0765 C + 0,02820 A^2 - 0,000001 B^2 + 0,000626 C^2 + 0,000001 A * B + 0,000434 A * C + 0,000024 B * C$, el **F - valor** del modelo de 6,57 asegura que el modelo es válido, sus coeficientes C, BC y C² sean coeficientes son eficaces para el modelo y cuyo valor p es inferior que 0.05.

4.1.3. Modelo obtenido para CO₂

Para el dióxido de carbono, se obtuvo un modelo $CO_2 = 7,13 + 1,061 A - 0,00171 B + 0,0737 C - 0,0312 A^2 + 0,000001 B^2 - 0,000391 C^2 - 0,000024 A * B - 0,001848 A * C - 0,000015 B * C$, con un **F - valor** de 4,59, conlleva que es importante. Los p-valores de los coeficientes C y C² son inferiores a 0.05, lo que refleja que los términos del modelo son relevantes.



4.1.4. Modelo obtenido para NO_x

Para el NO_x se obtuvo la ecuación $NO_x = 1102 - 116,1 A - 0,555 B - 4,16 C + 4,39 A^2 + 0,000224 B^2 + 0,00831 C^2 - 0,00306 A * B + 0,183 A * C + 0,001216 B * C$. La **falta de ajuste** del **F - valor** de 12,96. La probabilidad de que el valor **F** no sea adecuado, es del 6,21%. Esta probabilidad es relativamente baja (<10%) e inquietante, lo que hace que el modelo en sí no sea importante. Para este método, B, C, BC, A², B² son elementos importantes del modelo por su **p - valor** inferior 0,05.

4.1.5. Modelo obtenido para Consumo de combustible

Se obtuvo que al consumo se lo puede representar de la siguiente forma $Consumo = 14,72 + 0,1125 * A - 0,2375 * B - 1,00 * C - 0,2 A * B - 0,025 A * C - 0,625 * C - 0,485 * A^2 + 0,315 * B^2 - 0,76 * C^2$. La **falta de ajuste** del **F - valor** de 11,05 implica que hay un de probabilidad de una falta de ajuste del F – valor, es del 5,6%, esta probabilidad es relativamente baja (<10%) es inquietante, lo que genera que el modelo en sí no sea importante. Para este planteamiento. Pero cuyos parámetros: **C, A², B² y C²** son términos importantes del modelo

4.2. Conclusiones

El objetivo general del proyecto de titulación tuvo como finalidad: "Modelos matemáticos para reducir las emisiones contaminantes y consumo de combustible. Los motores de combustión interna utilizan la metodología de superficie de respuesta (MSR)".

Cuyo primer objetivo específico, se identificó las variables dependientes e independientes que afectan en el tratado. Esto se logró seleccionando factores que afectan al consumo de combustible y las emisiones del motor. Se utilizó tres tipos de aceites disponibles en el mercado automotriz, para obtener tres tipos de viscosidades., Las revoluciones del vehículo se consiguió sincronizando las revoluciones que mostraba el escáner con las revoluciones del banco dinamométrico. Se usó la carga que variaba del 0% al 100%.

Se propuso un diseño experimental de Box-Behnken. Este propósito se logra mediante el establecimiento de un protocolo de adquisición de datos. Se utilizó el método de superficie de respuesta para el diseño experimental; diseño de segundo



orden de Box-Benhen, este diseño se usa porque es ideal. Dado que su eficiencia está relacionada con el número de carreras, existen tres factores. La aplicación de este método determina el orden y la combinación de variables, se realizaron 45 corridas experimentales.

Por último, se obtuvo un modelo matemático que reduzca las emisiones contaminantes y consumo de combustible de un Motor de Combustión Interna ajustado a la correlación de las variables en estudio. Se propusieron cinco modelos que minimicen las emisiones de HC, CO, CO₂, NO_x y Consumo de combustible. Tres de los cinco modelos representan ser significativos: El de HC, CO y CO₂ con F-valores de 6.36, 6.57, 4.59 respectivamente. La falta de ajuste del NO_x con F-valor de 12.96 implica que hay un 6.21% y la falta de ajuste del Consumo de combustible con F-valor de 11.05 involucra que existe un 5.6% de posibilidad de una falta de ajuste. Esta probabilidad relativamente baja (<10%) provoca que los modelos en sí, no sean significativos.

Con la finalización del proyecto investigativo se determinó que existe una menor emisión de gases contaminantes con la utilización del lubricante SAE 10W30 en la ciudad de Cuenca-Azuay tanto en la variación de revoluciones, como de carga de dicho vehículo, por la cual existe una menor contaminación al medio ambiente con respecto a los lubricantes analizados, de la misma manera, se estableció que existe un menor consumo de combustible con la utilización del lubricante SAE 10W30 en la ciudad de Cuenca-Azuay tanto en la variación de rpm como de carga del vehículo, por la cual existe un ahorro de combustible con respecto a los lubricantes analizados.

4.3. Recomendaciones

Para obtener una menor emisión de gases contaminantes y menor consumo de combustible en la ciudad de Cuenca en vehículos nuevos (con poco kilometraje), es recomendable utilizar el lubricante SAE 10W30.

Con los estudios realizados, se recomienda no utilizar el vehículo con un 100% de carga permisible si se desea un ahorro de combustible y una menor emisión de gases contaminantes.



4.4. Trabajos Futuros

Al obtener modelos no representativos (NOx, Cesp), se recomienda repetir cada experimento varias veces para reducir la posibilidad de errores. Durante la recopilación de datos.

Se recomienda utilizar diferentes tipos de combustibles en un mismo diseño experimental en el país. Esto aumentará la temperatura de trabajo del lubricante, cambiando así el comportamiento dinámico de la viscosidad del lubricante.

Se aconseja plantear una investigación que se adapte al comportamiento de la viscosidad del aceite lubricante como factor que altere la potencia y toque del motor con un análisis matemático más detallado.

En el futuro se puede realizar un trabajo, que integre nuevos diseños experimentales con diferentes tipos de motores de gasolina y motores diesel. Esto para verificar el modelado en diferentes tecnologías y en entorno controlado en vehículos reales, con el propósito de ajustar un modelo adecuado para el uso diario.



Bibliografía

- Addelman, S. (1979). Statistics for Experimenters. In *Technometrics* (Vol. 21, Issue 3, pp. 387–388). <https://doi.org/10.1080/00401706.1979.10489788>
- Awad, O. I., Mamat, R., Ali, O. M., Azmi, W. H., Kadirgama, K., Yusri, I. M., Leman, A. M., & Yusaf, T. (2017). Response surface methodology (RSM) based multi-objective optimization of fusel oil -gasoline blends at different water content in SI engine. *Energy Conversion and Management*, 150(June), 222–241. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.047>
- Brouwer, M. D., Gupta, L. A., Sadeghi, F., Peroulis, D., & Adams, D. (2012). High temperature dynamic viscosity sensor for engine oil applications. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 173(1), 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.10.024>
- Burshaid, K. I., & Hamdan, M. A. (2013). The reduction of soot formation from fuels using oxygenates additives. *Energy Conversion and Management*, 65, 751–754. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.02.033>
- Castillo, J., Rojas, V., & Martínez, J. (2017). Determination of Torque and Power of a Gasoline Internal Combustion Engine by Using Spark with Pressure Sensor Adapted and Application of a Mathematical Model. *Revista Politécnica-Abril*, 39(1). <https://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen39/tomo1/719.pdf>
- Elhaj, M., Almrabet, M., Rgeai, M., & Ehtiwesh, I. (2010). A combined practical approach to condition monitoring of reciprocating compressors using IAS and dynamic pressure. *World Academy of Science, Engineering and Technology*,



63(March), 186–192. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1057541>

Elhaj, M., Gu, F., Ball, A. D., Albarbar, A., Al-Qattan, M., & Naid, A. (2008). Numerical simulation and experimental study of a two-stage reciprocating compressor for condition monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22(2), 374–389. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2007.08.003>

Etsion, I., & Sher, E. (2009). Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings. *Tribology International*, 42(4), 542–547. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.02.015>

Fontaras, G., Vouitsis, E., & Samaras, Z. (2009). Experimental evaluation of the fuel consumption and emissions reduction potential of low viscosity lubricants. *SAE Technical Papers*, 4970. <https://doi.org/10.4271/2009-01-1803>

Guardiola, C., Martín, J., Pla, B., & Bares, P. (2017). Cycle by cycle NO_x model for diesel engine control. *Applied Thermal Engineering*, 110, 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.170>

Guti, H. (2015). *Análisis y Diseño de Experimentos*. November.

Hawley, J. G., Bannister, C. D., Brace, C. J., Akehurst, S., Pegg, I., & Avery, M. R. (2010). The effect of engine and transmission oil viscometrics on vehicle fuel consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 224(9), 1213–1228. <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO1534>

Holmberg, K., & Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, 5(3), 263–284. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>

INEN, N. T. E. N., & 176. (2006). *Instituto Ecuatoriano de Normalizacion*. 2002.

Ingenier, N. C. D. E., Trabajo, N., Manera, E. D. E., Previ, I., Obtenci, L. A., Titulo, D. E. L., Mec, D. E. I., Tema, N., Un, E. D. E., Combusti, M. D. E., Para, I., Sus, D., Funcionamiento, M. D. E., & Aplicaci, S. U. F. D. E. (2013). *Universidad técnica de ambato*.



Ingeniería, C. D. E., & Automotriz, M. (2020). *Estimación de las emisiones de NOx durante el arranque sobre pendientes mediante el estudio de señales PID'S en un Chevrolet Aveo Family 1.5L para la determinación de su influencia en las emisiones contaminantes en la ciudad de Cuenca.*

Ingeniería, C. D. E., Automotriz, M., Santiago, C., Ramírez, B., Teodoro, C., & Herrera, J. (2016). *DIRECTOR :*

Jia, B., Mikalsen, R., Smallbone, A., & Roskilly, A. P. (2018). A study and comparison of frictional losses in free-piston engine and crankshaft engines. *Applied Thermal Engineering, 140*, 217–224.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.018>

Kang, R., Zhou, L., Hua, J., Feng, D., Wei, H., & Chen, R. (2019). Experimental investigation on combustion characteristics in dual-fuel dual-injection engine. *Energy Conversion and Management, 181*(November 2018), 15–25.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.057>

Kim, N., Cho, S., & Min, K. (2015). A study on the combustion and emission characteristics of an SI engine under full load conditions with ethanol port injection and gasoline direct injection. *Fuel, 158*(2015), 725–732.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.025>

Kourti, T. (2005). Application of latent variable methods to process control and multivariate statistical process control in industry. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 19*(4), 213–246.
<https://doi.org/10.1002/acs.859>

Kyriakides, A., Dimas, V., Lymperopoulou, E., Karonis, D., & Lois, E. (2013). Evaluation of gasoline-ethanol-water ternary mixtures used as a fuel for an Otto engine. *Fuel, 108*, 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.035>

Li, X., Zhen, X., Wang, Y., Liu, D., & Tian, Z. (2019). The knock study of high compression ratio SI engine fueled with methanol in combination with different EGR rates. *Fuel, 257*(July), 116098. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116098>

Liu, J., Gong, C., Peng, L., Liu, F., Yu, X., & Li, Y. (2017). Numerical study of



- formaldehyde and unburned methanol emissions of direct injection spark ignition methanol engine under cold start and steady state operating conditions. *Fuel*, 202(2017), 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.059>
- Loukopoulos, P., Zolkiewski, G., Bennett, I., Sampath, S., Pilidis, P., Duan, F., Sattar, T., & Mba, D. (2019). Reciprocating compressor prognostics of an instantaneous failure mode utilising temperature only measurements. *Applied Acoustics*, 147(December), 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.12.003>
- Macián, V., Tormos, B., Bermúdez, V., & Ramírez, L. (2014). Assessment of the effect of low viscosity oils usage on a light duty diesel engine fuel consumption in stationary and transient conditions. *Tribology International*, 79, 132–139. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.06.003>
- Manni, M., Gommellini, C., & Sabbioni, G. (1995). Effect of physical characteristics of lubricating oils on emissions, fuel economy and oil consumption in a light duty diesel engine. *SAE Technical Papers*, 412. <https://doi.org/10.4271/952552>
- Mendoza Zélis, L. A. (2020). Termodinámica. *Termodinámica*. <https://doi.org/10.35537/10915/68983>
- Monitorizar Instalaciones*. (n.d.).
- Montgomery, D. C. (2020). Mont. In *Catalysis from A to Z*. <https://doi.org/10.1002/9783527809080.cataz11063>
- Monzón, D., & Monzón Paiva, D. (1992). Introducción al diseño de experimentos. *Revista de La Facultad de Agronomía de La Universidad Central de Venezuela, Alcance 34*, 167 p.
- Mulvaney, D., Robbins, P., & Winograd, C. (2012). Combustion Engine. *Green Energy: An A-to-Z Guide*. <https://doi.org/10.4135/9781412971850.n28>
- Najafi, G., Ghobadian, B., Yusaf, T., Ardebili, S. M. S., & Mamat, R. (2015). Optimization of performance and exhaust emission parameters of a SI (spark ignition) engine with gasolineethanol blended fuels using response surface methodology. *Energy*, 90, 1815–1829.



<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.004>

Nayak, S. K., & Mishra, P. C. (2019). Achieving high performance and low emission in a dual fuel operated engine with varied injection parameters and combustion chamber shapes. *Energy Conversion and Management*, 180(September 2018), 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.091>

Nestor Rivera, Juan Chica, Ivan Sambrano, C. G. (2017). Estudio Del Comportamiento De Un Motor Ciclo Otto De Inyección Electrónica Respecto De La Estequiometría De La Mezcla Y Del Adelanto Al Encendido Para La Ciudad De Cuenca . Study Of The Behavior Of An Otto Engine Of Electronic Injection In Relation To The. *Revista Politécnica*, 40(1–9).

NTE INEN 2203. (2000). *Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Determinación de la concentración de emisiones de escape en condiciones de marcha mínima o “ralenti”. Prueba estática. 7.*

Payri, F., & Desantes, M. (2011). Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA) (1ºParte). In *Reverte* (Vol. 1). [https://ingenieromarino.com/motores-de-combustion-interna-alternativos-mcia/%0Ahttps://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/70998/IPP-Payri%3BDesantes - MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ingenieromarino.com/motores-de-combustion-interna-alternativos-mcia/%0Ahttps://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/70998/IPP-Payri%3BDesantes%20-%20MOTORES%20DE%20COMBUSTI%C3%93N%20INTERNA%20ALTERNATIVOS.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Pichler, K., Buchegger, T., Lughofer, E., Klement, E. P., & Huschenbett, M. (2016). *SMASIS2012-8052*. 1–8.

Posmyk, A. (2003). *Influence of material properties on the wear of composite coatings*. 254(January), 399–407. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00130-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00130-3)

Priest, M., & Taylor, C. M. (2000). Automobile engine tribology - approaching the surface. *Wear*, 241(2), 193–203. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00375-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00375-6)

Sakthivel, R., Ramesh, K., Joseph John Marshal, S., & Sadasivuni, K. K. (2019). Prediction of performance and emission characteristics of diesel engine fuelled



- with waste biomass pyrolysis oil using response surface methodology. *Renewable Energy*, 136, 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.109>
- Shinchi Shinchi, F. (2017). Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ectrico. *Trabajo de Titulación Previo a La Obtención Del Título de Ingeniero Ectrico*, 0(0), 1–154.
- Silva, C., Ross, M., & Farias, T. (2009). Analysis and simulation of “low-cost” strategies to reduce fuel consumption and emissions in conventional gasoline light-duty vehicles. *Energy Conversion and Management*, 50(2), 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.046>
- Sim, H. Y., Ramli, R., Saifizul, A., & Soong, M. F. (2020). Detection and estimation of valve leakage losses in reciprocating compressor using acoustic emission technique. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 152, 107315. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107315>
- Simsek, S., & Uslu, S. (2020a). Determination of a diesel engine operating parameters powered with canola, safflower and waste vegetable oil based biodiesel combination using response surface methodology (RSM). *Fuel*, 270(January), 117496. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117496>
- Simsek, S., & Uslu, S. (2020b). Experimental study of the performance and emissions characteristics of fusel oil/gasoline blends in spark ignited engine using response surface methodology. *Fuel*, 277(March), 118182. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118182>
- Taylor, C. M. (1993). *Engine tribology*. [https://doi.org/10.1016/s0301-679x\(97\)86356-6](https://doi.org/10.1016/s0301-679x(97)86356-6)
- Taylor, R. I., & Coy, R. C. (2000). Improved fuel efficiency by lubricant design: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 214(1), 1–15. <https://doi.org/10.1177/135065010021400101>
- Überall, A., Otte, R., Eilts, P., & Krahl, J. (2015). A literature research about particle



emissions from engines with direct gasoline injection and the potential to reduce these emissions. *Fuel*, 147(x), 203–207.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.012>

VALENCIA AGUIRRE, F. V. (2017). Departamento de ciencias de la vida. *Espe*, 132.

Wang, Y., Rong, Z., Qin, Y., Peng, J., Li, M., Lei, J., Wu, Y., Min, H., & Shijin, S. (2016). The impact of fuel compositions on the particulate emissions of direct injection gasoline engine. *Fuel*, 166, 543–552.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.019>

Yusri, I. M., Mamat, R., Najafi, G., Razman, A., Awad, O. I., Azmi, W. H., Ishak, W. F. W., & Shaiful, A. I. M. (2017). Alcohol based automotive fuels from first four alcohol family in compression and spark ignition engine: A review on engine performance and exhaust emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77(October 2015), 169–181. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.080>



Anexos

OrdenEst	Orden Corrida	TipoPt	Bloques	Viscosidad	RPM	Carga	CO2	CO	O2	HC	NOX	Consumo especifico
19	1	2	1	18,5	2500	50	14,7	0,02	0,07	7	460	5,83
33	2	2	1	9,66	2500	50	14,7	0,02	0,05	10	458	5,54
40	3	2	1	14,08	2500	0	14,9	0,02	0,1	10	454	5,64
2	4	2	1	18,5	800	50	14,7	0,01	0,18	7	76	6,98
13	5	0	1	14,08	1650	50	14,7	0	0,07	8	0	4,55
8	6	2	1	18,5	1650	100	12,1	4,46	0,05	170	290	11,18
4	7	2	1	18,5	2500	50	14,7	0,03	0,07	9	458	5,46
12	8	2	1	14,08	2500	100	12,4	4,08	0,06	156	498	12,12
43	9	0	1	14,08	1650	50	14,7	0,01	0,06	8	0	3,67
11	10	2	1	14,08	800	100	14,9	0,02	0,09	11	75	8,82
30	11	0	1	14,08	1650	50	14,8	0,02	0,05	6	0	5,93
42	12	2	1	14,08	2500	100	12,3	4,2	0,05	157	394	11,57
14	13	0	1	14,08	1650	50	14,7	0,02	0,05	6	0	4,31
9	14	2	1	14,08	800	0	14,8	0,02	0,2	8	20	8,82
21	15	2	1	18,5	1650	0	14,7	0,03	0,05	15	48	5,63
23	16	2	1	18,5	1650	100	12,1	4,53	0,05	174	292	11,09
24	17	2	1	14,08	800	0	14,9	0,02	0,18	8	17	0
17	18	2	1	18,5	800	50	14,8	0,01	0,08	9	55	5,09
27	19	2	1	14,08	2500	100	12,6	3,92	0,05	161	480	11,76
22	20	2	1	9,66	1650	100	12,2	4,14	0,06	184	26	11,82
26	21	2	1	14,08	800	100	14,9	0,02	0,14	8	76	7,1
20	22	2	1	9,66	1650	0	14,8	0,02	0,05	11	17	7,38
3	23	2	1	9,66	2500	50	14,7	0,02	0,05	9	450	5,21
44	24	0	1	14,08	1650	50	14,7	0,03	0,05	1	0	5,19
1	25	2	1	9,66	800	50	14	0,02	1,13	15	18	1,45
41	26	2	1	14,08	800	100	14,9	0,02	0,1	9	81	8,86
7	27	2	1	9,66	1650	100	12,4	3,86	0,11	183	25	10,55
10	28	2	1	14,08	2500	0	14,9	0,02	0,05	14	59	4,06
15	29	0	1	14,08	1650	50	14,7	0,07	0,05	3	0	5,13
38	30	2	1	18,5	1650	100	12,1	4,43	0,05	169	266	12,18



6	31	2	1	18,5	1650	0	14,9	0,01	0,06	17	32	4,23
36	32	2	1	18,5	1650	0	14,9	0,01	0,06	8	262	3,59
18	33	2	1	9,66	2500	50	14,7	0,02	0,06	10	458	4,92
37	34	2	1	9,66	1650	100	12,1	4,27	0,07	181	25	10,73
31	35	2	1	9,66	800	50	14,6	0,02	0,35	10	19	4,73
39	36	2	1	14,08	800	0	14,9	0,01	0,19	7	19	0
29	37	0	1	14,08	1650	50	14,7	0,05	0,06	1	0	5,99
28	38	0	1	14,08	1650	50	14,7	0,07	0,05	16	18	6,28
45	39	0	1	14,08	1650	50	14,7	0,03	0,05	8	14	6,22
34	40	2	1	18,5	2500	50	14,7	0,01	0,09	14	465	5,99
32	41	2	1	18,5	800	50	14,8	0,01	0,11	7	80	8,21
5	42	2	1	9,66	1650	0	10,5	0,01	4,25	12	21	3,58
35	43	2	1	9,66	1650	0	14,7	0,02	0,05	10	17	4,04
25	44	2	1	14,08	2500	0	14,9	0,03	0,06	11	63	5,17
16	45	2	1	9,66	800	50	14,6	0,02	0,23	13	19	7,51