



POSGRADOS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA AUTOMOTRIZ CON MENCIÓN EN NEGOCIOS AUTOMOTRICES

RPC-SO-36-NO.825-2021

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON
COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN
APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:

ANÁLISIS DE ADITIVOS EN EL
COMBUSTIBLE PARA LA OPTIMIZACIÓN
DE PRESTACIONES EN MOTORES DE
VEHÍCULOS PARA COMPETICIÓN

AUTOR:

JUAN DANIEL BUSTOS GONZÁLEZ

DIRECTOR:

NÉSTOR DIEGO RIVERA CAMPOVERDE

CUENCA – ECUADOR

2025

Autor:**Juan Daniel Bustos González**

Ingeniero Mecánico Automotriz.

Candidato a Magíster en Ingeniería Automotriz con Mención en Negocios Automotrices por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

jbustosg@est.ups.edu.ec

Dirigido por:**Néstor Diego Rivera Campoverde**

Ingeniero Mecánico Automotriz.

Magister en Sistemas Automotrices.

nrivera@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2025 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

JUAN DANIEL BUSTOS GONZÁLEZ

Análisis de aditivos en el combustible para la optimización de prestaciones en motores de vehículos para competición

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a toda mi familia que siguen apoyándome en mi camino, que confían en mí y que con su presencia como fuente de amor son mi inspiración para seguir cumpliendo metas.

De manera especial para Niss, Juanse y Mercy.

AGRADECIMIENTO

A Dios, que me concede la vida y con ello la oportunidad de día a día seguir creciendo.

De manera especial al Ing. Néstor Rivera quien como maestro y amigo es un referente fundamental en mi formación y me acompaño en el desarrollo de este trabajo.

Al Ing. Jorge Fajardo, quien me motivo a seguir esta maestría y estuvo siempre pendiente del proceso para la consecución de esta meta.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	8
Abstract	9
1. Introducción	10
2. Determinación del Problema.....	12
3. Marco teórico referencial.....	14
3.1 Aditivos	14
3.1.1 Alcohol como aditivo	14
3.1.2 Tolueno como aditivo.....	15
3.1.3 Aditivos en base a N-Alcanos	15
3.1.4 Aditivos tipos Éter.....	16
3.2 Combustibles	16
3.2.1 Octanaje en combustibles	16
3.2.2 Combustibles para vehículos de altas prestaciones.....	17
3.3 Combustión en Motores de competición	17
3.3.1 Proceso de combustión	17
3.3.2 Cotas de distribución y Mapa de Inyección de vehículos de altas prestaciones	18
3.3.3 Características de funcionamiento.....	19
3.4 Emisiones	20
3.5 Medición de rendimiento en vehículos	20
3.5.1 Normas SAE	20
4. Materiales y metodología.....	22
4.1. Vehículo	22
4.2. Banco dinamométrico.....	23
4.12.1 Régimen de giro.....	29
4.12.2 Carga	29
4.12.3 Etanol (ET).....	29
4.12.4 Base N-alcanos (BC).....	30
4.12.5 Gasolina concentrada para RG (G1)	30

4.12.6	Gasolina concentrada KTL (G2)	31
4.12.9	Tratamiento de Datos.....	33
4.12.10	Validación de datos.....	¡Error! Marcador no definido.
5.	Resultados y discusión.....	35
5.1	Potencia y fuerza tractora.....	35
5.2	Consumo de combustible	36
5.3	Emisiones	37
5.3.1	Monóxido de carbono	38
5.3.2	Hidrocarburos no combustionados	39
5.3.3	Óxidos nitrosos	40
5.3.4	Dióxido de carbono	41
5.3.5	Oxígeno.....	43
6.	Conclusiones.....	57
6.1	Potencia	44
6.2	Gases de escape.....	46
6.3	Consumo y gasto por utilización de aditivo.....	51
6.4	Optimización	53
	Referencias	60

ANÁLISIS DE ADITIVOS EN EL COMBUSTIBLE PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PRESTACIONES EN MOTORES DE VEHÍCULOS PARA COMPETICIÓN

AUTOR:

JUAN DANIEL BUSTOS GONZÁLEZ

RESUMEN

Este estudio propuso investigar y optimizar el uso de aditivos para aumentar la potencia y reducir las emisiones de gases contaminantes, considerando el costo de cada aditivo para identificar la opción más adecuada. Para lograr este objetivo, se empleó un diseño de experimentos con cuatro aditivos ampliamente utilizados en la competencia automovilística, utilizando un enfoque de superficie de respuesta. Este diseño permitió determinar la cantidad de corridas experimentales, el orden de toma de datos y la cantidad de aditivo en cada corrida. Las cantidades de aditivos se definieron de acuerdo con las indicaciones de los fabricantes y las regulaciones institucionales, y se mezclaron en un litro de combustible para evaluar la potencia, el consumo y las emisiones del motor a 2500 rpm. Los datos obtenidos fueron tratados mediante un análisis de residuos para identificar posibles patrones o problemas en la medición. Al detectarse irregularidades, se procedió a la evaluación de los resultados ya la optimización, con el fin de obtener los valores óptimos que permiten cumplir con el propósito del estudio.

Como resultado de la optimización de las variables, se obtuvo una potencia máxima de 26,27 kW con valores de aditivos de ET a 101,51 ml, BC a 119,69 ml, G1 a 23,35 ml y G2 a 129,82. ml, por cada litro de combustible utilizado.

Palabras clave:

Emisiones, Optimización, Competencia automovilística, Potencia

ABSTRACT

This study proposed to investigate and optimize the use of additives to increase power and reduce polluting gas emissions, considering the cost of each additive to identify the most appropriate option. To achieve this goal, an experiment design was employed with four additives widely used in automotive competition, using a response surface approach. This design made it possible to determine the number of experimental runs, the order of data collection and the amount of additive in each run. The amounts of additives were defined according to the manufacturers' indications and institutional regulations, and mixed in one liter of fuel to assess the engine's power, consumption and emissions at 2500 rpm. The data obtained were processed through a residue analysis to identify possible patterns or problems in the measurement. When irregularities were detected, the results were evaluated and optimized, in order to obtain the optimal values that allow the purpose of the study to be fulfilled.

As a result of the optimization of the variables, a maximum power of 26.27 kW was obtained with additive values of ET at 101.51 ml, BC at 119.69 ml, G1 at 23.35 ml and G2 at 129.82. ml, for each liter of fuel used.

Keywords:

Emissions, Optimization, Automotive competition, Power

1. INTRODUCCIÓN

En Ecuador, se ha observado un notable incremento en las actividades deportivas automovilísticas, lo que ha generado una alta competitividad y ha impulsado el desarrollo de modificaciones para alcanzar una potencia óptima en los motores. Sin embargo, esta potencia puede estar limitada por la baja calidad del combustible disponible en el país (Cevallos Díaz & Conrado Chamorro, 2022; EMOV, 2018), debido a su bajo octanaje. Este factor puede ocasionar fenómenos como el autoencendido o pre-ignición en motores de altas prestaciones, lo que conlleva a una combustión ineficiente, mayores emisiones contaminantes, pérdida de potencia y posibles daños en los componentes internos del motor.

La utilización de aditivos al combustible es una de las soluciones más comunes para contrarrestar estos problemas. En el mercado existen numerosos tipos de aditivos que cumplen diversas funciones, tales como detergentes, anticorrosivos y mejoradores de lubricidad (Daud et al., 2022). En vehículos de altas prestaciones y considerando el bajo índice de octanaje de los combustibles disponibles en el país, los aditivos más utilizados son los potenciadores de octanaje y aquellos que mejoran la calidad general del combustible. Otra solución potencial es el uso de combustibles diseñados para otros tipos de vehículos, como el combustible de aviación. Sin embargo, las normativas de competencias deportivas reguladas por la Federación Ecuatoriana de Automovilismo y Kartismo (FEDAK) prohíben el uso de combustibles diferentes a los comercializados en el país, aunque la utilización de aditivos está completamente permitida, excepto en competiciones de vehículos Utilitarios Todoterrenos UTV (FEDAK, 2023).

Este estudio propone aumentar las prestaciones de un vehículo mediante la adición de aditivos a la gasolina. Dado que las modificaciones usuales en vehículos de competencia y las altas exigencias de las carreras tienden a incrementar la presión en la cámara de combustión, esto eleva significativamente la temperatura interna del motor. Estos factores son los principales responsables del aumento en las emisiones y la disminución del rendimiento del motor (Rivera et al., 2017). La combinación de estas condiciones con la baja calidad del combustible en el país

provoca una disminución en las prestaciones del vehículo. Los alcoholes son los aditivos más comúnmente utilizados para mejorar el rendimiento del combustible (Cevallos Días & Conrado Chamorro, 2022). No obstante, este estudio explorará y optimizará el uso de diferentes aditivos, sin limitarse únicamente a los más populares.

El estudio se llevará a cabo mediante el uso de gasolina mezclada con varios aditivos en diferentes proporciones. Para evaluar los resultados de manera precisa, se realizarán pruebas de rendimiento en un solo vehículo, utilizando gasolina con los aditivos seleccionados y gasolina pura como referencia de control, ya que una combustión eficiente genera los mejores resultados en términos de potencia (Rivera et al., 2017). Los datos de rendimiento se obtendrán mediante pruebas en un banco dinamométrico, un analizador de gases.

Una vez recopilados los resultados, se implementará un análisis matemático para identificar las proporciones óptimas de las mezclas que maximicen la potencia del motor, logrando así su optimización. De este modo, el vehículo generará mayor potencia, lo que contribuirá a un mejor desempeño en competencias y a una reducción en las emisiones contaminantes generadas por las actividades automovilísticas.

2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

El incremento en las competiciones automovilísticas y la utilización de aditivos en proporciones no estudiadas incrementan las emisiones producidas por este tipo de deporte. La adición de aditivos no siempre garantiza un aumento de potencia y, en algunos casos, puede resultar únicamente en un aumento de las emisiones de gases de escape (Dehghani et al., 2021). Por lo tanto, es crucial realizar un estudio exhaustivo sobre las consecuencias del uso de aditivos en el ámbito deportivo, especialmente en un contexto actual donde el control de emisiones es fundamental para la sostenibilidad global, teniendo un contexto de la ciudad de Cuenca Ecuador con un gran porcentaje de gases de emisión causado por los vehículos (Rivera et al., n.d.).

El uso de aditivos para mejorar el rendimiento de los vehículos ha sido ampliamente estudiado. En estos estudios se han empleado los aditivos más empleados con el objetivo de optimizar las condiciones de combustión, reducir las emisiones y aumentar la potencia del motor. Se han realizado investigaciones tanto en motores diésel como en motores a gasolina, utilizando diferentes tipos de pruebas para evaluar la eficiencia de los aditivos. Estas pruebas incluyen evaluaciones a velocidad constante, potencia constante y bajo cargas variables. Los resultados han sido diversos; mientras que algunas combinaciones de aditivos han mostrado mejoras significativas en potencia, otras han arrojado resultados negativos (Nanthagopal et al., 2020). Por lo tanto, la mejora en la potencia depende tanto del tipo de aditivo como de la proporción de mezcla utilizada. Esto sugiere que agregar una mayor cantidad de aditivo no siempre resulta en un mayor rendimiento, ya que la eficacia de los aditivos puede variar considerablemente según las condiciones de la mezcla y las características del motor. (Roy et al., 2019).

Existen también investigaciones de carácter teórico, donde se analizan las propiedades de los aditivos, como el aporte de oxígeno y sus características químicas. Estas investigaciones simulan el proceso de combustión con base en la nueva composición química del combustible. Sin embargo, al tratarse de estudios teóricos, los resultados obtenidos en simulaciones pueden diferir de las pruebas

reales debido a las diversas variables presentes en estudios prácticos. (Ershov et al., 2020)

Un estudio realizado por el equipo de Yusuf mostró que las variables observadas para evaluar el rendimiento de las mezclas de combustibles y aditivos se han medido a través de pruebas en bancos dinamométricos, analizadores de gases de escape y los datos obtenidos de los sensores del vehículo. El objetivo de estas pruebas ha sido determinar las condiciones de combustión y establecer si la mezcla mejoró el proceso de combustión, además de comparar las diferencias entre distintos tipos de mezclas. En este estudio, el principal aditivo utilizado fue el alcohol. (Yusuf & Inambao, 2021).

3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 ADITIVOS

Los aditivos en el campo automotriz se emplean con el objetivo de mejorar las condiciones de funcionamiento del motor, y dependiendo del sistema en el que actúan, existen numerosos tipos disponibles. En el mercado se encuentran aditivos para el aceite, el refrigerante y el combustible. Sus funciones varían desde mejorar la lubricidad hasta aumentar el octanaje del combustible, y vienen en diversas presentaciones.

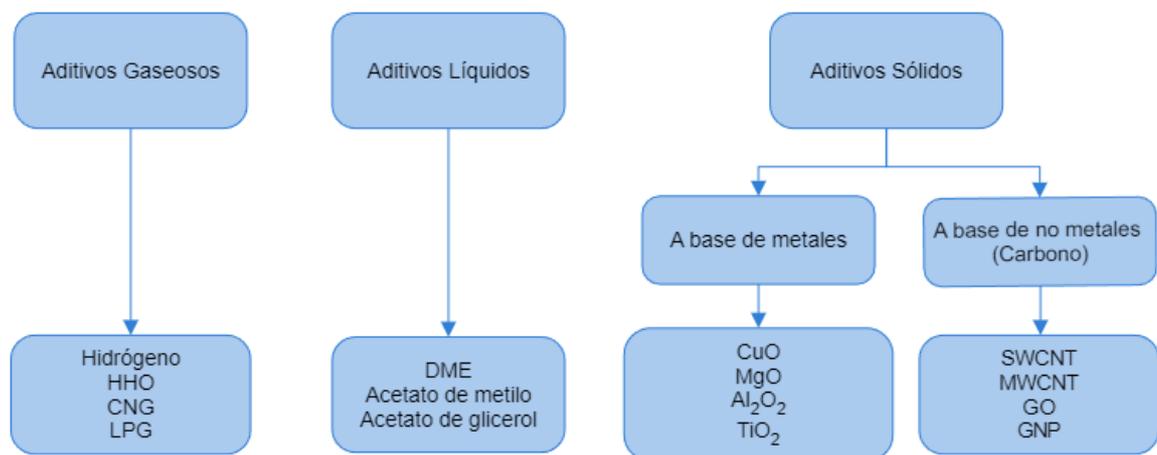


Figura 1: Tipos de aditivos

Los aditivos diseñados para mejorar el rendimiento del combustible son comúnmente conocidos como potenciadores o elevadores de octanaje. El tipo de aditivo más utilizado en este contexto suele ser de base alcohólica y generalmente se presenta en forma líquida. Además, se han empleado otros compuestos, principalmente derivados del petróleo, para mejorar la calidad del combustible.

3.1.1 Alcohol como aditivo

Los alcoholes son uno de los aditivos más utilizados en el sector automotriz, siendo el etanol el más empleado (Safieddin Ardebili et al., 2020). Esto se debe a su estructura química, que aporta oxígeno al proceso de combustión, lo que ayuda a reducir las emisiones causadas por una combustión incompleta y, al mismo tiempo, incrementa la potencia generada.

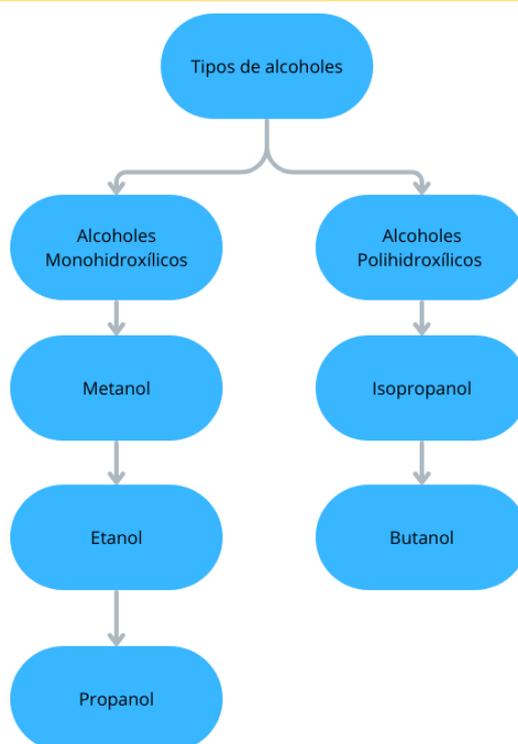


Figura 2: Aditivos tipo alcohol

El oxígeno presente en los alcoholes desempeña un papel clave en el proceso de oxidación, proporcionando energía adicional durante la combustión. Cada tipo de alcohol posee propiedades distintas, lo que afecta de manera diferente el proceso de combustión. (Yusuf & Inambao, 2021).

3.1.2 Tolueno como aditivo

El tolueno es un compuesto aromático derivado de la destilación de hidrocarburos y es ampliamente utilizado como aditivo para aumentar el nivel de octanaje en los combustibles. Esto permite extender el rango de operación del motor, ya que, al elevar el número de octanos, la mayor parte de la combustión ocurre después del punto muerto superior, lo que mejora la eficiencia del ciclo de combustión (Böğrek et al., 2021). Sin embargo, la adición de tolueno genera un aumento en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), aunque reduce la emisión de otros gases contaminantes resultantes de la combustión. (ÖZER, 2020).

3.1.3 Aditivos en base a N-Alcanos

Este tipo de mezcla consiste en varios aditivos diseñados para mejorar el combustible y aumentar su octanaje. Generalmente, está compuesta por tolueno,

n-hexano y otros hidrocarburos aromáticos policíclicos. Es importante destacar que no todos los productos de este tipo contienen los mismos compuestos ni en las mismas proporciones, lo que implica que cada formulación debe manejarse de manera individual, según sus características específicas.

3.1.4 Aditivos tipos Éter

Los compuestos de tipo éter suelen obtenerse mediante reacciones químicas entre dos o más compuestos, siendo los derivados del petróleo los más comúnmente utilizados. Estos éteres se emplean para aumentar el nivel de octanaje en los combustibles, lo que ayuda a prevenir el fenómeno del autoencendido. Además, su uso contribuye a la reducción de las emisiones de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) no quemados (Lin et al., 2022).

3.2 COMBUSTIBLES

En Ecuador, se comercializan tres tipos de gasolina, clasificadas según su octanaje. La gasolina de mayor octanaje, según los entes gubernamentales, es la gasolina súper con 95 octanos, seguida por la gasolina extra y la gasolina ecopaís, ambas con 87 octanos. La principal diferencia entre estas últimas es el uso de etanol en la gasolina ecopaís, lo que mejora el combustible y lo hace más ecológico. (PETROECUADOR, 2023).

Sin embargo, los controles realizados por la EMOV han demostrado que el octanaje real de las gasolinas no siempre coincide con el valor especificado para el consumidor, mostrando mediciones de octanaje inferiores a las declaradas (EMOV, 2018).

3.2.1 Octanaje en combustibles

El octanaje de un combustible es un indicador de la cantidad de presión que puede soportar antes de auto incendiarse debido a la compresión generada por el pistón. Cuanto mayor sea el número de octanos, mayor será la resistencia del combustible a la auto detonación, lo que lo hace más adecuado para motores con relaciones de compresión altas (Amaral et al., 2021) . El uso de combustibles con bajo octanaje

en motores con alta relación de compresión puede provocar auto detonaciones, lo que resulta en una combustión deficiente, pérdida de potencia y un aumento en las emisiones contaminantes.

3.2.2 Combustibles para vehículos de altas prestaciones

Los combustibles utilizados en vehículos de alta competición deben ser de alto octanaje debido a las configuraciones de los motores, que generan altas temperaturas y presiones dentro de la cámara de combustión. Estas condiciones pueden provocar el fenómeno de autoencendido, lo que incrementa las emisiones y reduce la potencia del motor. Para evitar este problema, se han buscado alternativas como el uso de gasolina mezclada con etanol o Sunoco. En el mercado nacional, la gasolina más utilizada es la Súper, ya que es la que presenta el mayor octanaje disponible.

3.3 COMBUSTIÓN EN MOTORES DE COMPETICIÓN

3.3.1 Proceso de combustión

El proceso de combustión en vehículos de competición sigue los mismos principios básicos que en otros vehículos, con la diferencia de que los mapas de inyección de los motores de competición son completamente gestionados por las personas que los preparan. Para ello, se utilizan computadoras programables que permiten ajustar las cotas de distribución del motor para maximizar la potencia. Estas modificaciones aumentan el rendimiento del motor, pero también incrementan la presión y la temperatura dentro de los cilindros.



Figura 3: Ecus Reprogramables

3.3.2 Cotas de distribución y Mapa de Inyección de vehículos de altas prestaciones

Las cotas de distribución en vehículos de alta competición difieren significativamente de las de los vehículos destinados al transporte diario. Mientras que los vehículos convencionales están diseñados para prolongar la vida útil del motor, los vehículos de altas prestaciones están optimizados para entregar la máxima potencia posible. Esto se logra mediante ajustes como el adelanto de la apertura de las válvulas, el retraso en el cierre de las válvulas de escape y el adelanto en la generación de la chispa, todos ellos configurados en valores bastante altos (Bustos Gonzales & Calle Espinoza, 2016).

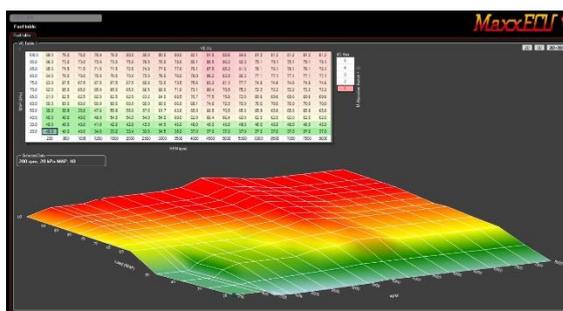


Figura 4: Mapa de inyección del vehículo utilizado

Además, los mapas de inyección en estos vehículos se obtienen mediante pruebas en banco dinamométrico y suelen tener múltiples configuraciones, las cuales pueden seleccionarse mediante un interruptor en forma de perilla, dependiendo de las condiciones de la competición.



Figura 5: Perilla para cambio de mapas de inyección

3.3.3 Características de funcionamiento

La forma más común de evaluar el rendimiento de los motores y las modificaciones realizadas son las curvas características, obtenidas mediante pruebas en un banco dinamométrico. Estas curvas permiten medir la potencia y el torque del motor cuando funciona con la máxima cantidad de combustible y la mayor densidad de aire en la admisión (Campoverde Molina & Campoverde Rivera, 2023).



Figura 6: Curva características

En el contexto de la competición, estas curvas ayudan a determinar si las modificaciones en las cotas de distribución mejoran el rendimiento del vehículo. Si no se observan mejoras, el vehículo se ajusta a sus condiciones originales de funcionamiento. Estas curvas también se utilizan para evaluar el comportamiento de nuevos combustibles y de aquellos con aditivos, permitiendo identificar si el combustible mejora las prestaciones y, cada vez más importante, si contribuye a la reducción de emisiones (Lin et al., 2022).

Sin embargo, el proceso de obtener curvas características puede sobre exigir el motor. Dado el tipo de estudio y la cantidad de pruebas experimentales necesarias, es más eficiente realizar mediciones en un solo punto específico de la gráfica para evitar el desgaste excesivo del motor.

3.4 EMISIONES

El control de emisiones ha cobrado relevancia en la industria automotriz debido al cambio climático, ya que el 14% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero proviene del transporte, y de este porcentaje, el 73% es generado por vehículos (Lamb et al., 2021), Esto ha llevado a que las normativas internacionales sean cada vez más estrictas, con medidas que incluso prohíben los vehículos de combustión interna en ciertas áreas urbanas. Se sabe que la calidad de la combustión y del combustible influyen directamente en las emisiones de los vehículos (Rivera-Campoverde et al., 2021), de igual forma el tiempo de uso del vehículo y la velocidad del mismo provocan distintos consumos y emisiones contaminantes (Arias Montaña & Ludeña Ayala, 2018). Por lo tanto, la búsqueda de combustibles más eficientes y de tecnologías que reduzcan las emisiones se ha vuelto prioritaria, promoviendo el uso de metodologías como el downsizing, combustibles ecológicos y aditivos que optimicen la combustión.

3.5 MEDICIÓN DE RENDIMIENTO EN VEHÍCULOS

El rendimiento de un vehículo es un indicador clave para los fabricantes, quienes deben realizar pruebas replicables con resultados consistentes bajo las mismas condiciones. Si los resultados varían, es posible que las mediciones sean incorrectas o que se haya pasado por alto alguna variable influyente. Para evitar inconsistencias, existen pruebas estandarizadas, muchas de las cuales están precargadas en los bancos dinamométricos. Estas normas fueron desarrolladas por organismos internacionales como la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) y la Organización Internacional de Normalización (ISO), y su aplicación depende en gran medida de las regulaciones nacionales de cada país.

3.5.1 Normas SAE

La SAE ha desarrollado numerosos estándares relacionados con la medición del rendimiento de los vehículos, siendo uno de los más utilizados la norma SAE J1349. Este estándar especifica los métodos para la determinación de la potencia neta del motor, definiendo las condiciones de prueba, los procedimientos y los requisitos de

equipo para asegurar la precisión y consistencia en las mediciones de potencia. La norma SAE J1349 se puede aplicar en bancos que miden la potencia de las ruedas, eliminando los esfuerzos y pérdidas generados por el tren motriz. Además, algunos de los bancos dinamométricos modernos ya cuentan con tecnología que permite obtener directamente gráficas estandarizadas.

Las condiciones para realizar las pruebas bajo este estándar incluyen aspectos específicos relacionados con las condiciones climáticas, que deben ser controladas para asegurar la repetibilidad de los resultados.

Condiciones climáticas

- Temperatura del ambiente debe estar entre 15 °C a 35°C
- La presión estándar debe estar en los 100 Kpa
- La humedad relativa debe estar entre 0% y 100%

Condiciones del motor

El motor se debe encontrar con todos los sistemas auxiliares como:

- Alternador
- Bomba de agua
- Sistema de escape
- Bomba hidráulica (Si aplica)

Combustible

El combustible utilizado para la prueba debe tener características bien definidas y estables

Aceite y refrigerante

El aceite y el refrigerante debe mantenerse dentro del rango operativo dado por el fabricante.

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Este proyecto tiene como objetivo determinar el porcentaje óptimo de mezcla y el tipo de aditivo que se puede agregar a la gasolina para mejorar la potencia y reducir las emisiones en vehículos de alta performance. Para ello, se emplearán distintos aditivos disponibles en el país para vehículos de competición, los cuales se añadirán a la gasolina de mayor octanaje disponible comercialmente. Las pruebas de rendimiento se realizarán en un banco dinamométrico, junto con mediciones de gases mediante un sensor integrado, permitiendo así evaluar el impacto de cada mezcla en términos de potencia y emisiones.

Los datos obtenidos se someterán a un proceso de filtrado y verificación para identificar y corregir posibles errores de medición. Posteriormente, se analizarán los resultados con el fin de determinar la proporción ideal de cada aditivo que maximice el rendimiento del motor y minimice las emisiones. Adicionalmente, se evaluará si cada aditivo contribuye a aumentar el octanaje del combustible y en qué medida. Finalmente, se establecerán conclusiones sobre los aditivos más efectivos para mejorar el rendimiento y comportamiento en motores de alta performance.

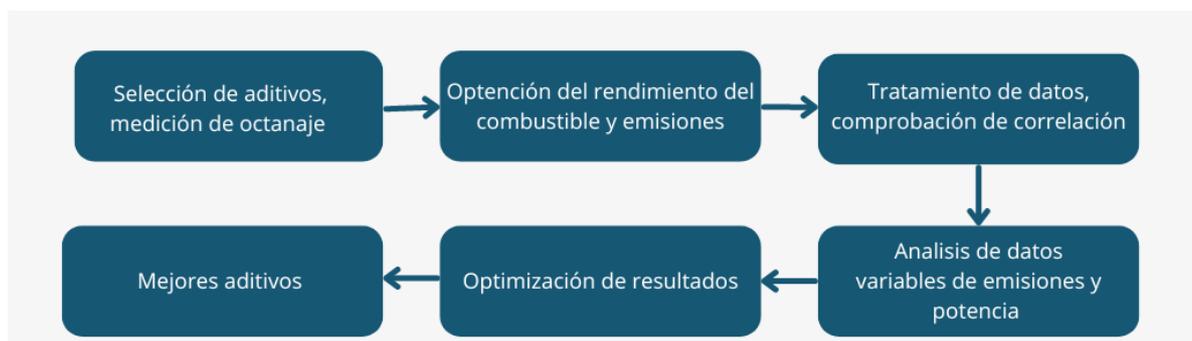


Figura 7: Ciclo Demming

4.1. VEHÍCULO

El vehículo seleccionado para el experimento es un Mitsubishi Lancer JT 2.0, equipado con un motor 4G94. Este vehículo ha sido modificado en su electrónica

con el objetivo de optimizar y aumentar la potencia generada. A continuación, se presentan los rangos de operación específicos del motor.

Tabla 1: Parámetros de funcionamiento

Parámetros	
Válvula de Admisión	Apertura 10° antes del PMS, cierre 50-60° después del PMI
Válvula de Escape	Apertura 50-60° antes del PMI, cierre 10-15° después del PMS
Avance en Ralentí	8-12° antes del PMS
Avance Máximo bajo Carga	30-35° antes del PMS
Relación de Compresión	9.5:1
Presión de Compresión	170-200 psi (11.7-13.8 bar) por cilindro



Figura 8: Vehículo utilizado

4.2. BANCO DINAMOMÉTRICO

Para obtener la potencia y la fuerza tractora del Mitsubishi Lancer JT 2.0, se utilizará el banco dinamométrico MAHA LPS 3000. Este equipo permite medir la potencia directa en las ruedas del vehículo y generar carga a través de un freno dinamométrico de corrientes parásitas. Además, el banco puede realizar mediciones de potencia bajo diversas normativas, incluyendo la SAE J1349, garantizando así precisión y consistencia en los datos obtenidos.



Figura 9: Banco dinamométrico

Tabla 2: Características de funcionamiento del banco dinamométrico

Características del banco dinamométrico	
Torque	6000 Nm
Número de rodillos	2xR100
Precisión de medición	2%
Peso total	1500 kg
Longitud de rodillos	750 mm
Diámetro de rodillos	318 mm
Distancia entre rodillos	540 mm
Velocidad máxima	260 km/h

4.3. MEDIDOR DE FLUJO DE COMBUSTIBLE

El banco dinamométrico mencionado previamente permite la conexión con un medidor de flujo de combustible AIC FUEL FLOW Master 5004, que ofrece lecturas precisas del flujo constante de combustible, flujo promedio, y la cantidad total de combustible utilizado. Este sistema se conecta directamente al tanque de combustible y al riel de inyectores, proporcionando datos en tiempo real durante las pruebas de rendimiento.

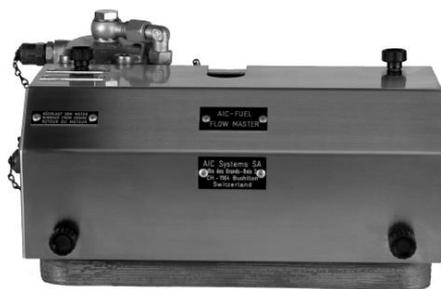


Figura 10: Medidor de flujo de combustible

4.4. MEDIDOR DE GASES DE ESCAPE

Para analizar las emisiones de gases del vehículo a diferentes revoluciones, se emplea el MAHA MGT 5. Este dispositivo utiliza el método no dispersivo de absorción de infrarrojos para medir monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC) y dióxido de carbono (CO₂). Para detectar oxígeno (O₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x), el MAHA MGT 5 cuenta con celdas electroquímicas. La conexión al banco se realiza mediante una sonda de escape, permitiendo registrar y monitorear las emisiones de gases en condiciones controladas.

Tabla 3: Gases medidos por el analizador de gases y sus unidades de medida

VARIABLE	SÍMBOLO	RANGO	UNIDAD
MONÓXIDO DE CARBONO	CO	0 - 10	%
HIDROCARBUROS NO COMBUSTIONADOS	HC	0 - 5000	ppm
DIÓXIDO DE CARBONO	CO ₂	0 -16	%
OXÍGENO	O ₂	0 - 21	%
ÓXIDOS NITROSOS	NO _x	0 - 5000	ppm
FACTOR LAMBDA	λ	0 - 2	-

4.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para asegurar la reproducibilidad del experimento, se documentarán los datos iniciales y los tratamientos aplicados a cada muestra. El estudio se enfoca en evaluar el impacto de diferentes aditivos en el combustible de un vehículo de altas prestaciones modificado. Aunque los aditivos seleccionados ya han sido utilizados

en otros experimentos, el ambiente de altas presiones y temperaturas de este motor plantea condiciones distintas, por lo que los resultados podrían diferir de los observados en vehículos convencionales. Aditivos en vehículos de este tipo no suelen estudiarse con estas condiciones, por lo que este análisis será importante para entender sus efectos en la reducción de emisiones y el aumento de potencia.

4.6. TÉCNICAS DE MEJORA CONTINUA

Para cada aditivo, el estudio evaluará el comportamiento del motor con diversas concentraciones, optimizando para determinar aquellos que ofrezcan los mayores beneficios. En esta fase, se utilizará el Ciclo de Deming como metodología de optimización y mejora continua, lo cual implica iterar en las fases de planificación, ejecución, verificación y actuación. Además, la implementación de técnicas estadísticas respaldará las estrategias de prueba, contribuyendo a mejorar la precisión y eficacia en cada fase del desarrollo experimental.

4.7. PLANEACIÓN DEL EXPERIMENTO

Este experimento tiene como objetivo medir y optimizar el rendimiento de un vehículo de alta competencia usando combustible mezclado con aditivos. Para diseñar el experimento, se identificarán y clasificarán los factores que afectan el rendimiento del motor en variables de estudio, bloqueo, ruido y variables de respuesta.

4.8. VARIABLES DE RESPUESTA

Son aquellas que reflejan el comportamiento del motor y se busca optimizar, generalmente son valores asociados a la post combustión, como los gases de escape o la potencia generada.

Tabla 4: Variables de respuesta

VARIABLE DE RESPUESTA	SIMBOLO	UNIDAD
Monóxido de Carbono	CO	[%]
Hidrocarburos no combustionados	HC	[ppm]

Dióxido de Carbono	CO ₂	[%]
Oxígeno	O ₂	[%]
Óxidos Nitrosos	NO _x	[ppm]
Consumo	C	[l/h]
Fuerza Tractora	F	[N]
Potencia	P	[W]

4.9. VARIABLES DE ESTUDIO

Estas son las variables que se manipulan deliberadamente para optimizar las variables de respuesta. En este experimento, la variable de estudio es la cantidad de aditivo utilizado en cada corrida experimental, expresada en mililitros de aditivo por litro de gasolina (siendo la gasolina Súper el combustible base).

Tabla 5: Variables de estudio

VARIABLES DE ESTUDIO	SIMBOLO	UNIDAD
Cantidad de Etanol	ET	[ml]
Cantidad de Ad. En base n Alcanos	BN	[ml]
Cantidad de Aditivo GK	GK	[ml]
Cantidad de Aditivo GR	GR	[ml]

4.10. VARIABLES DE BLOQUEO

Estas variables pueden influir en el experimento, pero su efecto en las variables de respuesta se considera nulo o controlable. Por ello, se emplean rangos predefinidos de valores para disminuir la variabilidad del estudio.

Tabla 6: Variables de bloqueo

VARIABLES DE BLOQUEO	SIMBOLO	UNIDAD
Temperatura del Refrigerante	T_{ref}	[° C]

Temperatura de la banda de rodadura	T_{rod}	[° C]
Octanaje	RON	RON
Régimen de giro	η	[RPM]
Temperatura del lubricante	T_{lub}	[° C]
Cotas de reglaje	Cr	°

4.11. VARIABLES DE RUIDO

Son difíciles de controlar y afectan las variables de respuesta, pudiendo comprometer la precisión del estudio. Se emplean rangos específicos o fórmulas de ajuste para mitigar su impacto.

Tabla 7: Variables de Ruido

VARIABLES DE RUIDO	SIMBOLO	UNIDAD
Temperatura del Aire	T_{aire}	[° C]
Temperatura del Combustible	T_{comb}	[° C]
Humedad relativa del Aire	H_{rel}	[%]
Presión Atmosférica	P_{atm}	[Pa]

4.12. DISEÑO Y MÉTODO DE MEDICIÓN

Para la obtención de los porcentajes de mezcla de cada aditivo, estos serán específicos para cada uno según las recomendaciones del fabricante, quienes generalmente especifican niveles de mezcla en porcentajes muy pequeños. En algunos casos, los niveles están regidos por normativas gubernamentales o internacionales, dada su amplia aceptación en la experimentación.

4.12.1 Régimen de giro

Para evaluar el rendimiento del motor, uno de los principales factores es la velocidad de régimen de giro. A fin de obtener una curva de funcionamiento representativa, el estudio se concentrará en un punto de medición puntual de 2500 rpm, evitando así sobre exigir al motor debido al alto número de corridas experimentales. Este valor está basado en la normativa ecuatoriana NTE INEN 2 203 2000, que regula la revisión técnica vehicular en la ciudad de Cuenca.

4.12.2 Carga

En cuanto a los niveles de carga en el banco de pruebas, se aplicará el máximo (100%) para maximizar las prestaciones, sin explorar el comportamiento del motor a diferentes cargas.

4.12.3 Etanol (ET)

El etanol como aditivo ha sido ampliamente utilizado en vehículos de uso diario tanto para mejorar la combustión como para elevar el octanaje. En este experimento, el etanol se usará en un vehículo modificado para competición. El máximo porcentaje de mezcla permitido será del 15%, generando dos niveles experimentales que se detallan en la siguiente tabla.

Cada porcentaje de mezcla se calculará en base a un litro de gasolina, de modo que el 15% corresponde a 150 ml de etanol por litro de gasolina. Aunque las regulaciones para vehículos de uso común limitan la mezcla de etanol al 5%, en vehículos adaptados o de alta presión en la cámara de combustión, se permite extender el porcentaje de mezcla hasta un 15%.

Tabla 8: Niveles para la primera categoría

Mezcla de Etanol	Valor	UNIDAD
Cantidad máxima	150	[ml]
Cantidad mínima	0	[ml]

4.12.4 Base N-alcanos (BC)

Este aditivo oxigenador es similar al etanol, y en este experimento se usará en un máximo de 15%, equivalente a 150 ml por cada litro de gasolina. Debido a que no se tiene regulaciones por parte del fabricante para utilizar como aditivo, además que las regulaciones institucionales regulan su uso al 5% para vehículos de uso cotidiano. En las regulaciones de los organizadores de eventos deportivos limitan la utilización de mejoradores de octanaje hasta un 15%.

Tabla 9: Niveles para la Categoría de BC

Mezcla de Base N-alcanos	Valor	UNIDAD
Cantidad máxima	150	[ml]
Cantidad mínima	0	[ml]

4.12.5 Gasolina concentrada para RG (G1)

Este aditivo es una mezcla de varios aditivos, tiene una cantidad recomendada por el fabricante para mejorar el octanaje del combustible dependiendo del valor a querer alcanzar de octanaje. Según los datos proporcionados, para elevar el octanaje de la gasolina súper (93 octanos según el ente EMOV) a 101 octanos, se deben añadir 118,25 ml (4 onzas) por galón de combustible, lo que corresponde a un 2,956%. En este estudio, se expresará la mezcla en ml para precisión en la cantidad añadida.

Al convertir esta dosis recomendada por galón a litros, usando la equivalencia de 3,7854 litros por galón, se obtiene un valor de 31,24 ml por litro. Para maximizar el análisis y observar posibles curvaturas en los resultados, el presente estudio utilizará el doble de esta cantidad, es decir, 62,48 ml por litro de gasolina.

Tabla 10: Niveles para la categoría G1

Mezcla de Base N-alcanos	Valor	UNIDAD
Cantidad máxima	62,48	[ml]
Cantidad mínima	0	[ml]

4.12.6 Gasolina concentrada KTL (G2)

Este aditivo cuenta con una indicación del fabricante para una mezcla al 10%, lo que equivale a 1 galón de aditivo por cada 9 galones de combustible. Al expresar esta proporción por litro, se obtiene un valor de 110,8 ml de aditivo por litro de gasolina. Para el experimento, se aplicará el doble de esta cantidad como máximo para analizar la curvatura en los resultados.

Tabla 11: Niveles para la categoría G2

Mezcla de Base N-alcanos	Valor	UNIDAD
Cantidad máxima	221,6	[ml]
Cantidad mínima	0	[ml]

4.12.7. Tratamiento de corridas experimentales

Para la distribución de valores en las corridas experimentales, se emplea el diseño de Box-Behnken, lo cual permite aleatorizar las corridas y minimizar el ruido, facilitando también la detección de curvatura en las respuestas. Este diseño generará un total de 27 corridas experimentales, estableciendo así los valores precisos de aditivo por litro en cada corrida.

Tabla 12: Diseño de experimentos de superficie de respuesta

OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	BC	ET	G1	G2
26	1	0	1	100	100	31,24	110,8
12	2	2	1	150	100	31,24	221,6
21	3	2	1	100	50	31,24	0
25	4	0	1	100	100	31,24	110,8
17	5	2	1	50	100	0	110,8
23	6	2	1	100	50	31,24	221,6
14	7	2	1	100	150	0	110,8
9	8	2	1	50	100	31,24	0
18	9	2	1	150	100	0	110,8

10	10	2	1	150	100	31,24	0
20	11	2	1	150	100	62,48	110,8
13	12	2	1	100	50	0	110,8
4	13	2	1	150	150	31,24	110,8
1	14	2	1	50	50	31,24	110,8
3	15	2	1	50	150	31,24	110,8
2	16	2	1	150	50	31,24	110,8
5	17	2	1	100	100	0	0
27	18	0	1	100	100	31,24	110,8
11	19	2	1	50	100	31,24	221,6
8	20	2	1	100	100	62,48	221,6
19	21	2	1	50	100	62,48	110,8
6	22	2	1	100	100	62,48	0
22	23	2	1	100	150	31,24	0
16	24	2	1	100	150	62,48	110,8
24	25	2	1	100	150	31,24	221,6
7	26	2	1	100	100	0	221,6
15	27	2	1	100	50	62,48	110,8

4.12.8. Protocolo de medición

Para que el experimento tenga replicabilidad y pueda ser realizado por otro experimentador de investigación se realizó con el protocolo descrito a continuación.

- Preparar instrumentos de medición y adquisición de datos.
- Switch en On, y Encender el Motor
- Confirmar temperaturas de refrigerante a mayor de 90°, banda de rodadura entre 30-40 °C, lubricante entre 80-85 °C.
- Adquirir datos de condiciones ambientales
- Apagar el motor
- Selección y preparación de la Mezcla a utilizar y llenar el tanque de pruebas
- Encender el motor

- Estabilizar el motor a 2500 rpm, en marcha directa y establecer el valor de carga del banco a 100%
- Mantener el motor funcionando a las mismas condiciones durante 3 minutos hasta que se estabilicen los valores.
- Obtener los datos de las variables planteadas de ruido, bloqueo y salida
- Liberar la carga del motor
- Dejar el vehículo en ralentí.
- Mantener funcionando el motor por dos minutos.
- Apagar el motor

4.12.9 Tratamiento de Datos

Debido a que las mediciones en todos los experimentos pueden presentar algún grado de imprecisión o error, antes de utilizarlas en el análisis o en las conclusiones, se realiza una validación de datos. Esta etapa permite verificar si alguna de las variables de salida contiene errores significativos.

4.12.1 Validación de datos

La validación de los datos obtenidos en el diseño experimental permite identificar si existen tendencias, errores de medición, o algún otro indicio de que los datos no son aptos para el estudio. Para este propósito, se realizó el análisis en Minitab, enfocado en cada una de las variables de respuesta, presentándose en cuatro gráficas: gráfica de probabilidad normal, histograma, y gráficas de residuos vs valor ajustado y vs orden de observación.

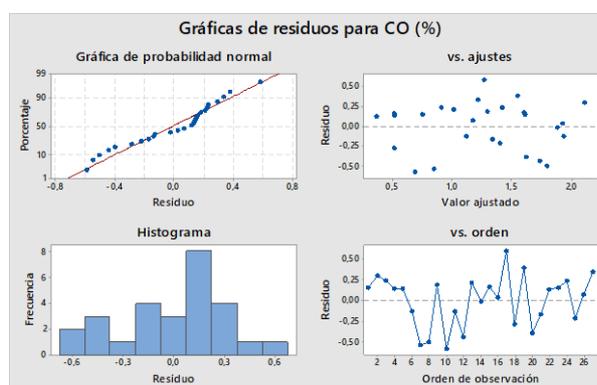


Figura 11: Gráfica de residuos para CO

De acuerdo con la Figura 11 de residuos para las mediciones de CO, la gráfica de probabilidad normal indica un buen ajuste, ya que los residuos tienden a una

distribución normal. La gráfica de residuos vs valores ajustados no muestra ningún patrón, lo cual es una señal positiva de que las mediciones y los valores obtenidos no presentan relaciones sistemáticas. En el histograma se observa una distribución con cierta tendencia a la normalidad, complementando la información de la gráfica de probabilidad.

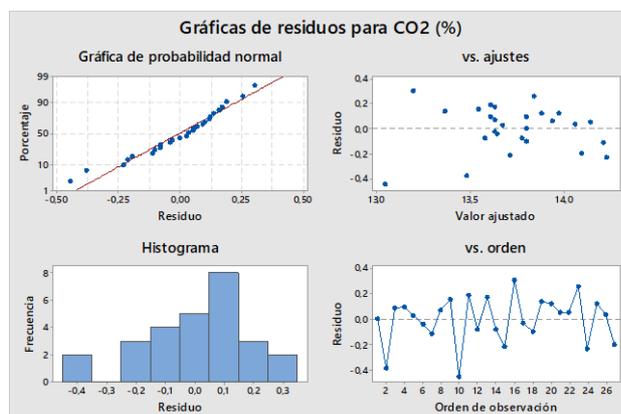


Figura 12: Gráfica de residuos para CO₂

Para los gases CO₂, se observa un resultado similar. La figura número 12 de probabilidad normal y el histograma sugieren que los datos tienden a la normalidad. Las gráficas de residuos vs valores ajustados y vs orden de observación confirman que los valores son aleatorios y no presentan relaciones sistemáticas.

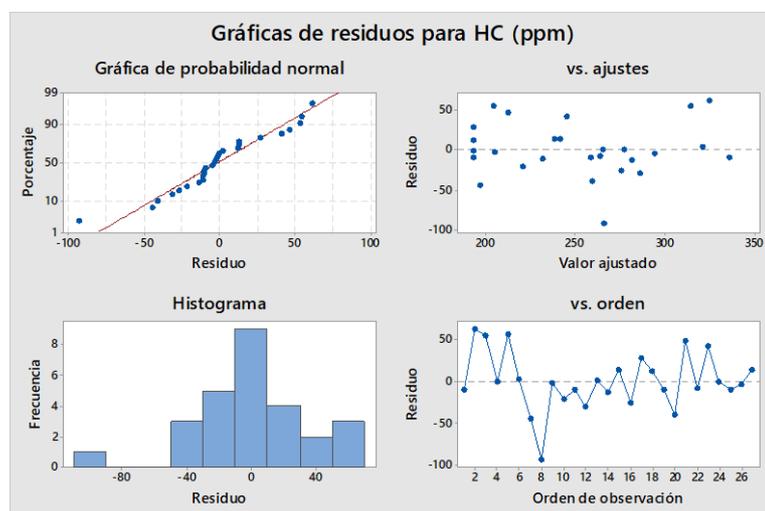


Figura 13: Gráficas de residuos para HC

En las mediciones de HC, se obtuvieron resultados consistentes con los anteriores, validando que los datos son adecuados para el estudio. Del mismo modo, las demás gráficas de residuos muestran resultados similares, confirmando la confiabilidad de los datos para el análisis.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 POTENCIA Y FUERZA TRACTORA

En los resultados obtenidos, se analizaron las interacciones de los aditivos con la potencia generada, el consumo de combustible y las emisiones, observándose que cada aditivo modifica de manera diferente el comportamiento del combustible. En primer lugar, se evalúa la potencia, que es la respuesta principal para un vehículo de competencia. En la figura 14, se observan los efectos principales sobre la potencia cuando se incrementa la cantidad de aditivo en la mezcla. En el caso del aditivo de Base N, la máxima potencia se alcanza con 50 ml por litro de combustible. Los aditivos Etanol y G1 presentan comportamientos similares; existe un punto de mínima potencia dentro del rango de prueba, mientras que en los extremos de concentración se alcanza la potencia máxima. No obstante, el valor de potencia es superior con G1 en comparación con el Etanol. El último aditivo muestra una disminución de potencia a bajas concentraciones, pero incrementa la potencia al aumentar su cantidad en la mezcla.

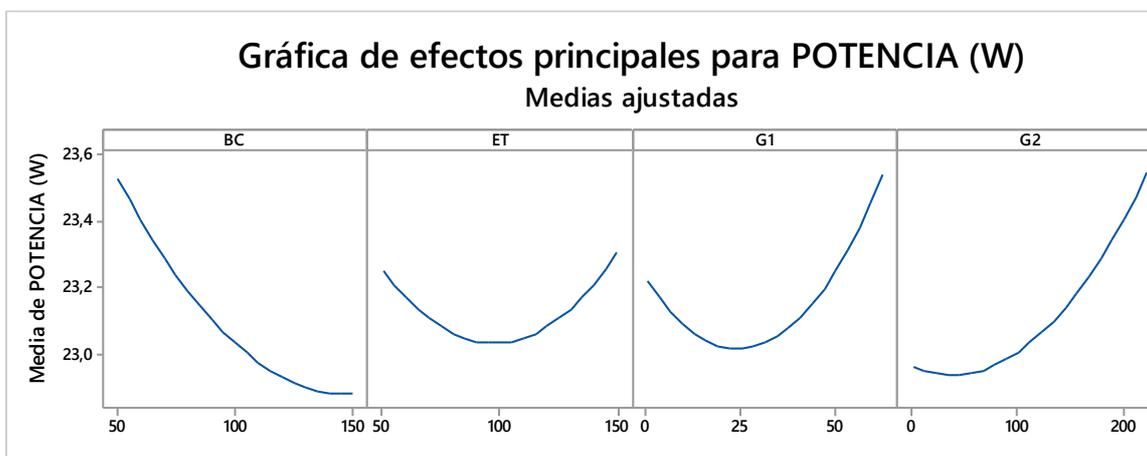


Figura 14: Efectos principales para la potencia

En cuanto a las interacciones entre aditivos, en la Figura 15 se observa que, al combinar BC con ET, la potencia tiende a disminuir, lo que sugiere que el valor de ET es predominante en los resultados. Al comparar BC y G1, el comportamiento es similar, aunque BC muestra una ligera preponderancia en el resultado combinado. Sin embargo, en combinación con G2, el comportamiento varía; mientras que

cantidades elevadas de BC tienden a disminuir la potencia, una mayor concentración de G2 aumenta la potencia, incluso en presencia de altos niveles de BC. Esto indica que G2 mejora la potencia, incluso cuando algunos factores podrían disminuirla.

Al evaluar el Etanol, la interacción con G1 revela que pequeñas cantidades de ET aumentan la potencia, lo que indica que G1 potencia la respuesta. Conforme aumenta la concentración de Etanol, la potencia continúa incrementándose, sugiriendo una relación no lineal entre ambas variables. Con G2, la combinación no muestra cambios notables en potencia, al igual que la interacción entre G1 y G2.

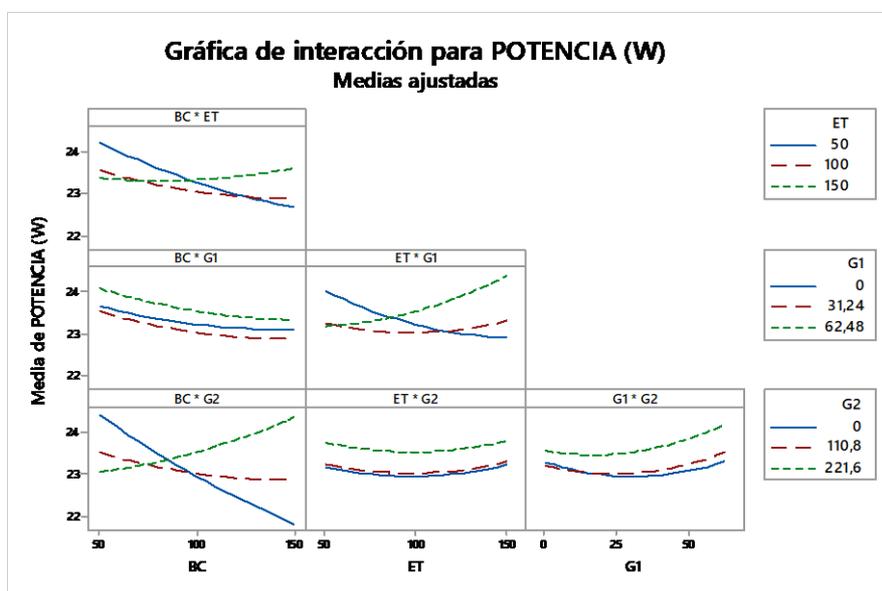
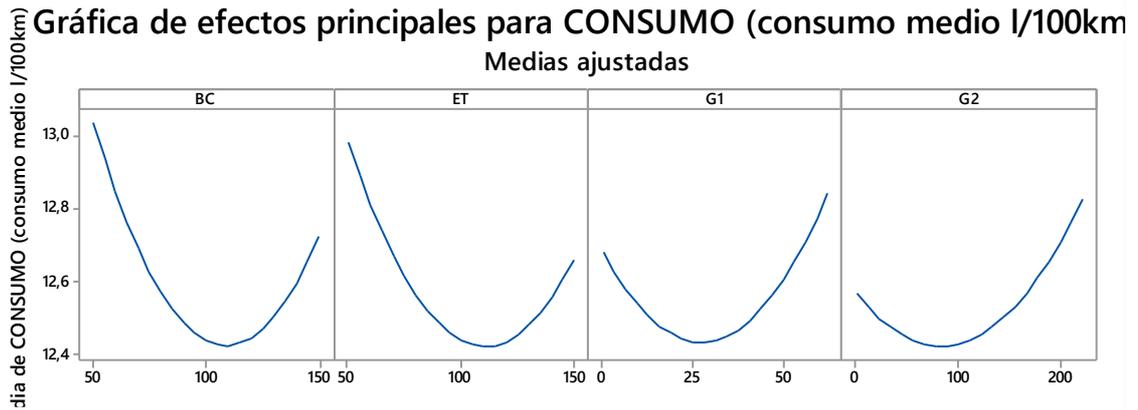


Figura 15: Gráfica de interacción para la potencia

5.2 CONSUMO DE COMBUSTIBLE

En el análisis del consumo promedio de combustible l/100 km, los aditivos presentan una tendencia común, el consumo aumenta en los extremos de concentración, mientras que en niveles medios tiende a disminuir.

Figura 16: Gráfica de efectos para el consumo medio de combustible



La Figura 16 y 17 revela que los aditivos ET y BC impactan más en el consumo debido a su relación con el AFR (relación aire-combustible). Valores elevados de AFR al combinarse con gasolina inevitablemente aumentan el consumo; por lo tanto, para mantenerlo bajo, se deben moderar las cantidades de estos aditivos. G2 puede ayudar a reducir el consumo en combinación con ET y BC. Teniendo como resultado que la interacción más fuerte es el uso de BC y G2 ya que al aumentar los dos aditivos el consumo es el más elevado de las interacciones.

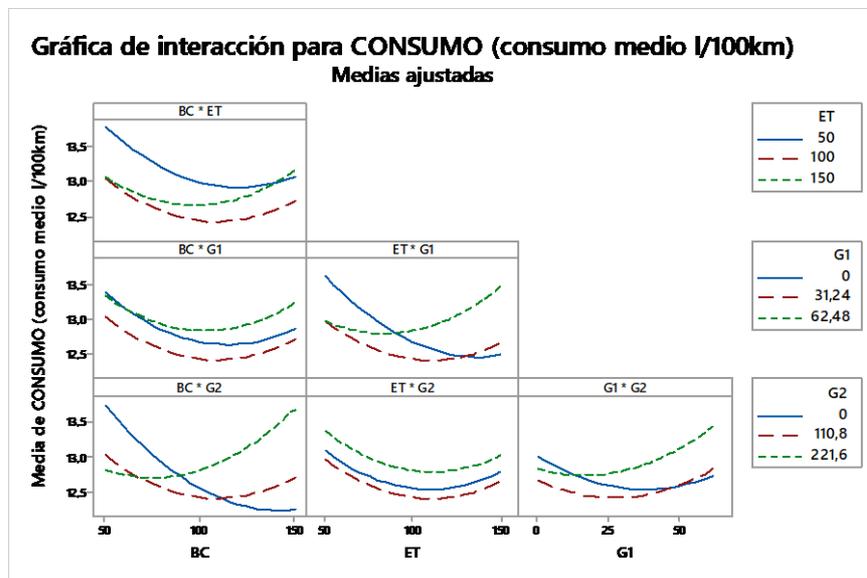


Figura 17: Gráfica de interacción para el consumo medio de combustible

5.3 EMISIONES

En las emisiones contaminantes, los aditivos muestran comportamientos distintos en función del gas específico.

5.3.1 Monóxido de carbono

En el caso del monóxido de carbono (CO), el gráfico 18 indica que ciertos porcentajes de aditivos reducen las emisiones de CO, pero en los extremos de concentración, estas aumentan debido a una combustión incompleta.

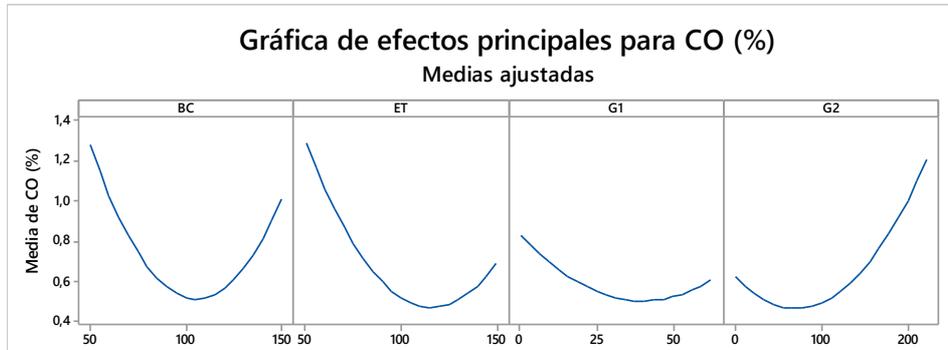


Figura 18: Gráfica de efectos para CO

Dentro de la figura 19 la interacción muestra que una mayor cantidad de etanol disminuye las emisiones de CO, siendo una de las variables que más contribuye a esta reducción, al igual que G1. Las concentraciones elevadas de G1 y G2 también logran reducir significativamente las emisiones de CO.

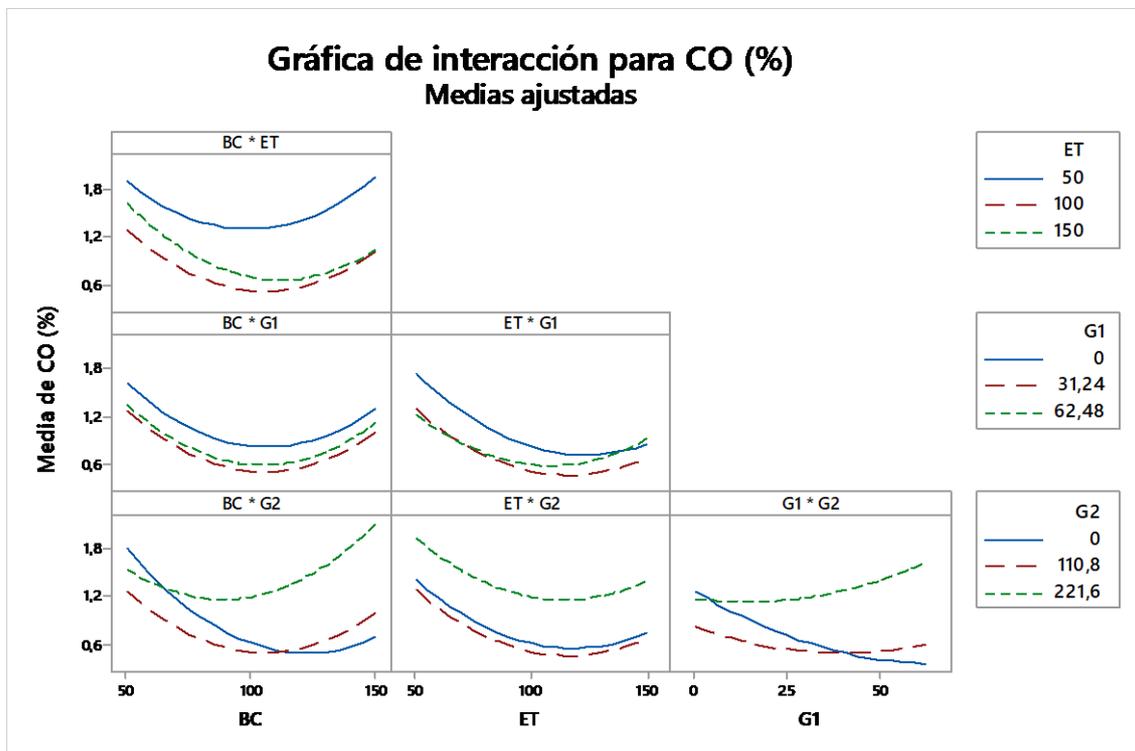


Figura 19: Gráfica de interacciones para CO

5.3.2 Hidrocarburos no combustionados

En el caso de los hidrocarburos (HC), cada aditivo genera variaciones significativas. El aditivo BC sigue una curva ancha, con emisiones moderadas en los valores medios, aunque en concentraciones muy bajas o altas incrementa la generación de HC. El Etanol muestra una reducción similar a BC, pero los extremos de su rango de concentración producen un valor más altas de emisiones de HC. En el caso de G1, mayores concentraciones en la mezcla resultan en más emisiones de HC, mientras que G2 es el que produce la mayor emisión en altas concentraciones, pero logra reducir las emisiones cuando su cantidad es de aproximadamente 100 ml.

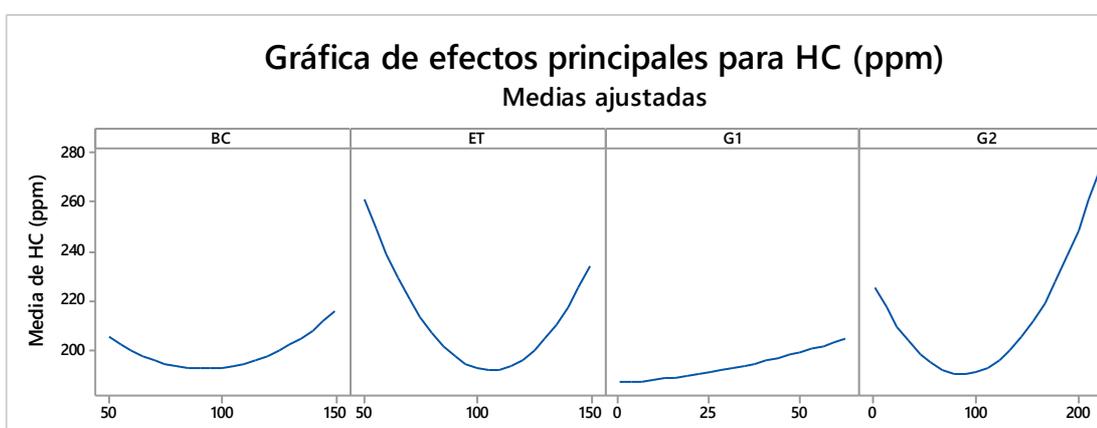


Figura 20: Gráfica de efectos para HC

En el caso de los hidrocarburos (HC), cada aditivo genera variaciones significativas. El aditivo BC sigue una curva ancha, con emisiones moderadas en los extremos, aunque en concentraciones muy bajas o altas incrementa la generación de HC. El Etanol muestra una reducción similar a BC, pero los extremos de su rango de concentración producen altas emisiones de HC. En el caso de G1, mayores concentraciones en la mezcla resultan en más emisiones de HC, mientras que G2 es el que produce la mayor emisión en altas concentraciones, siendo más efectivo cuando su cantidad es de aproximadamente 100 ml.

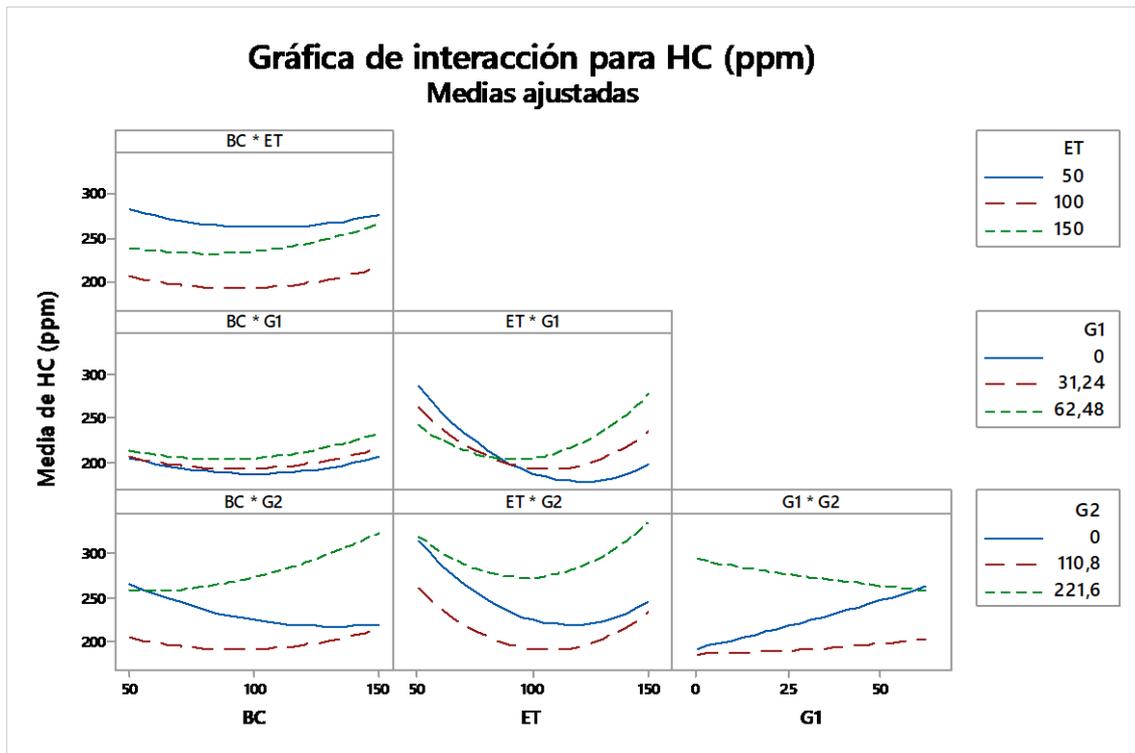


Figura 21: Gráfica de interacción para HC

5.3.3 Óxidos nitrosos

Para las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), el comportamiento es similar en todos los aditivos, pero opuesto a los resultados previos. En este caso, las emisiones de NOx disminuyen en los extremos de concentración, mientras que a niveles medios aumentan. En el caso de BC y ET, el valor mínimo de NOx ocurre con 50 ml en la mezcla. Para G1, los valores de los extremos son elevados en comparación con otros aditivos y con G2, el aumento en la concentración disminuye la generación de NOx en la combustión.

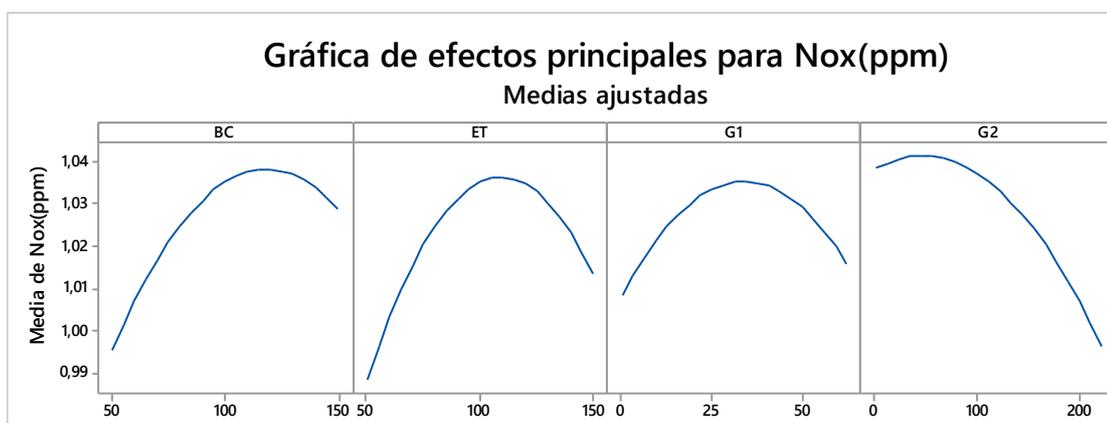


Figura 22: Gráfica de efectos para Nox

En la figura 23 de interacción se observan varios patrones. En particular, las mezclas con altas concentraciones de BC y una cantidad mínima de G2 generan la mayor emisión de NOx, en comparación con el resto de combinaciones evaluadas. Sin embargo, el uso de G2 parece tener la capacidad de reducir estas emisiones, lo que sugiere que G2 podría mitigar el efecto de BC en la generación de NOx.

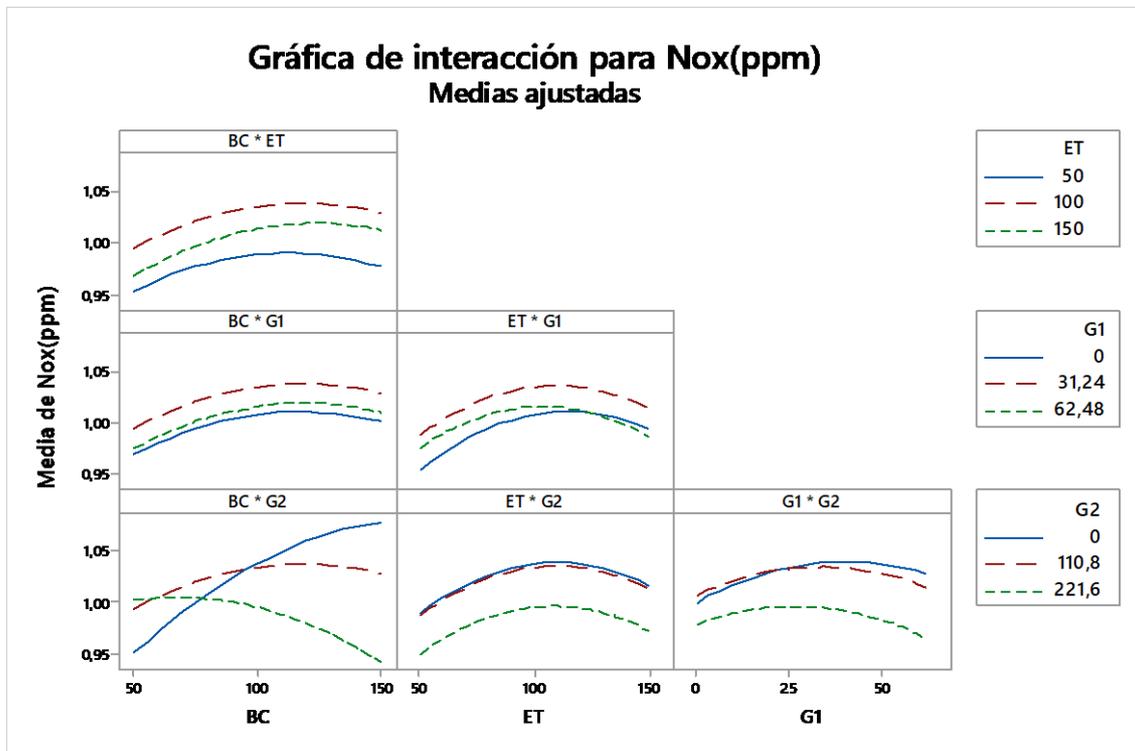


Figura 23: Gráficas de interacción para Nox

5.3.4 Dióxido de carbono

Para las emisiones contaminantes de CO_2 , se identifican comportamientos diferenciados entre los aditivos. Tanto BC como G2 presentan un patrón en el cual los extremos de la concentración generan menos CO_2 , mientras que el punto máximo de emisión ocurre en valores cercanos al centro de la Figura 24. En contraste, ET y G1 muestran un comportamiento donde los extremos de concentración producen mayores niveles de CO_2 , lo cual sugiere una respuesta más sensible en concentraciones altas de estos aditivos.

Gráfica de efectos principales para CO₂ (%) Medias ajustadas

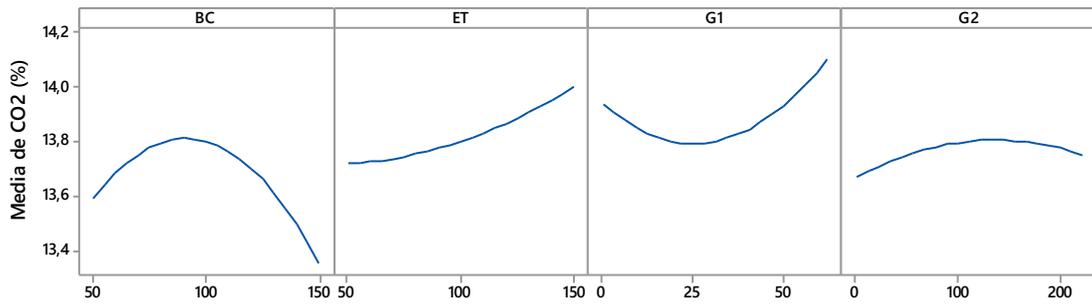


Figura 24: Gráfica de efecto para CO₂

La generación de CO₂ es un indicador relevante del desempeño de la combustión. Un aumento en este gas suele reflejar una mezcla bien optimizada. En este caso, las combinaciones con ET y una alta cantidad de G1, o bien solo con ET, logran incrementar la generación de CO₂, lo cual respalda la eficiencia de combustión en estas configuraciones.

Gráfica de interacción para CO₂ (%) Medias ajustadas

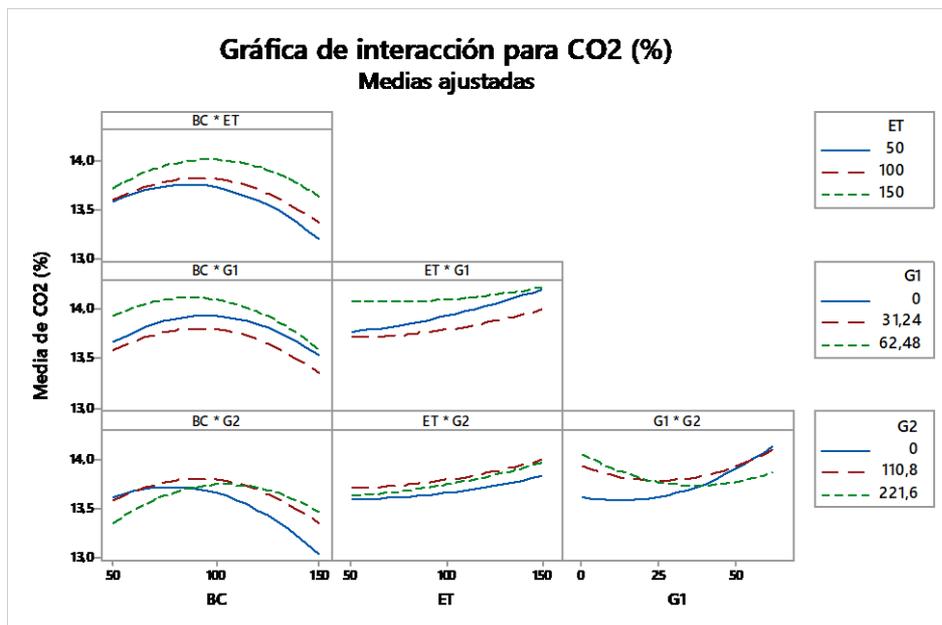


Figura 25: Gráficas de interacción de CO₂

5.3.5 Oxígeno

Las emisiones de O_2 presentan tres patrones distintos. Al añadir mayores cantidades de BC, se produce más O_2 durante la combustión. Por otro lado, ET y G1 muestran un pico de emisión en valores centrales de concentración, con menores porcentajes en los extremos de mezcla. Finalmente, G2 tiene un comportamiento inverso al de BC, al aumentar su concentración en la mezcla, disminuye la cantidad de O_2 emitida.

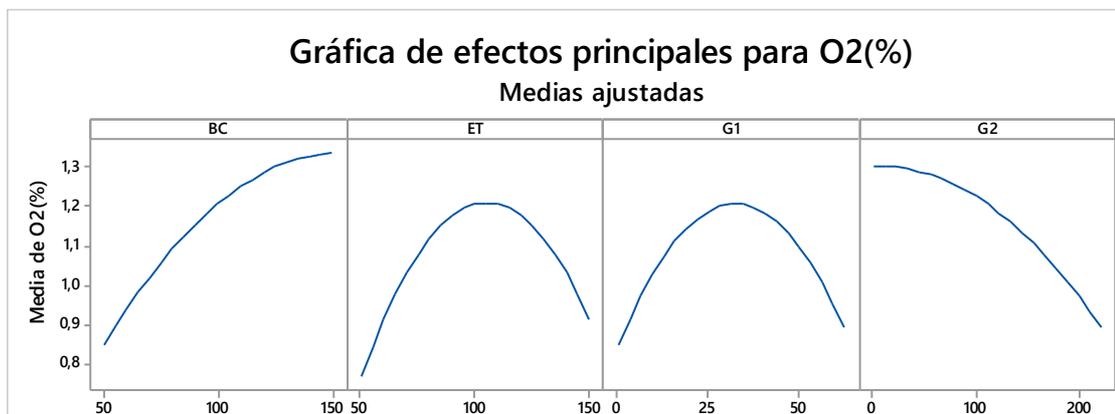


Figura 26: Gráfico de efectos O_2

En las interacciones entre aditivos, se observa que una alta concentración de BC, junto con una cantidad máxima de G2, genera la menor cantidad de O_2 . Además, el etanol, cuando se mezcla con G2, tiende a reducir la presencia de O_2 en los gases de escape. Esto indica que G2 y ET son los principales aditivos para disminuir el contenido de O_2 en las emisiones.

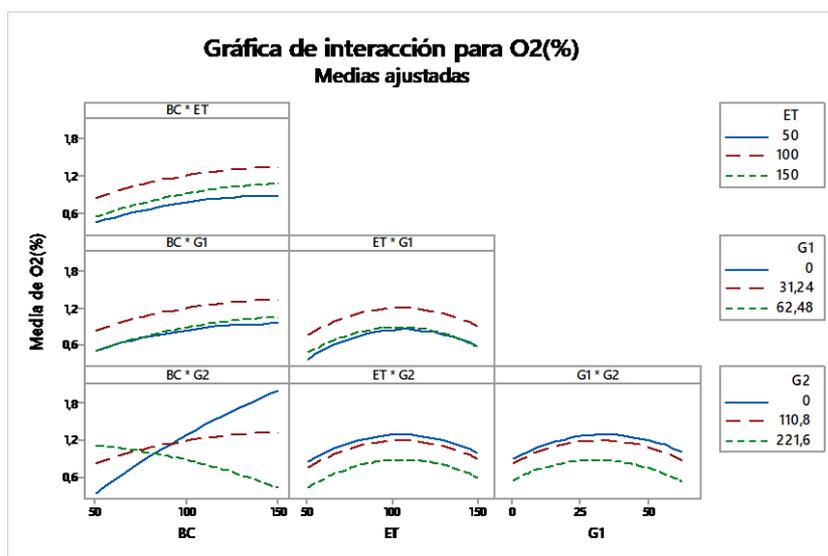


Figura 27: Gráfica de interacciones para O₂

5.4 VARIABLES DE RESPUESTA

Cada uno de los aditivos generan diferentes tipos de resultados en la combustión, puesto que los valores encontrados en las variables de respuesta difieren en su comportamiento con los valores de los aditivos y la cantidad utilizada, de estos valores depende la optimización y el enfoque que se dese dar. De igual forma la cantidad de potencia aumentada que se encuentra por cada aditivo es diferente, y la combinación entre ambos es diferente.

5.4.1 Potencia

Únicamente con la utilización de ET y BC el valor máximo de potencia que se obtiene es al tener ambas a la mínima mezcla, mientras que con las máximas cantidades la potencia disminuye. Sin embargo, con la utilización de los demás aditivos en la dosificación dada por el fabricante, la potencia se incrementa cuando se mezcla con las máximas cantidades de ET y BC, pero si se utiliza con las cantidades mínimas de ET y BC, el valor obtenido de potencia es aún más alto.

Utilizando las máximas cantidades de todos los aditivos se obtiene la máxima potencia medida que se puede observar en la tercera gráfica de la Figura 28.

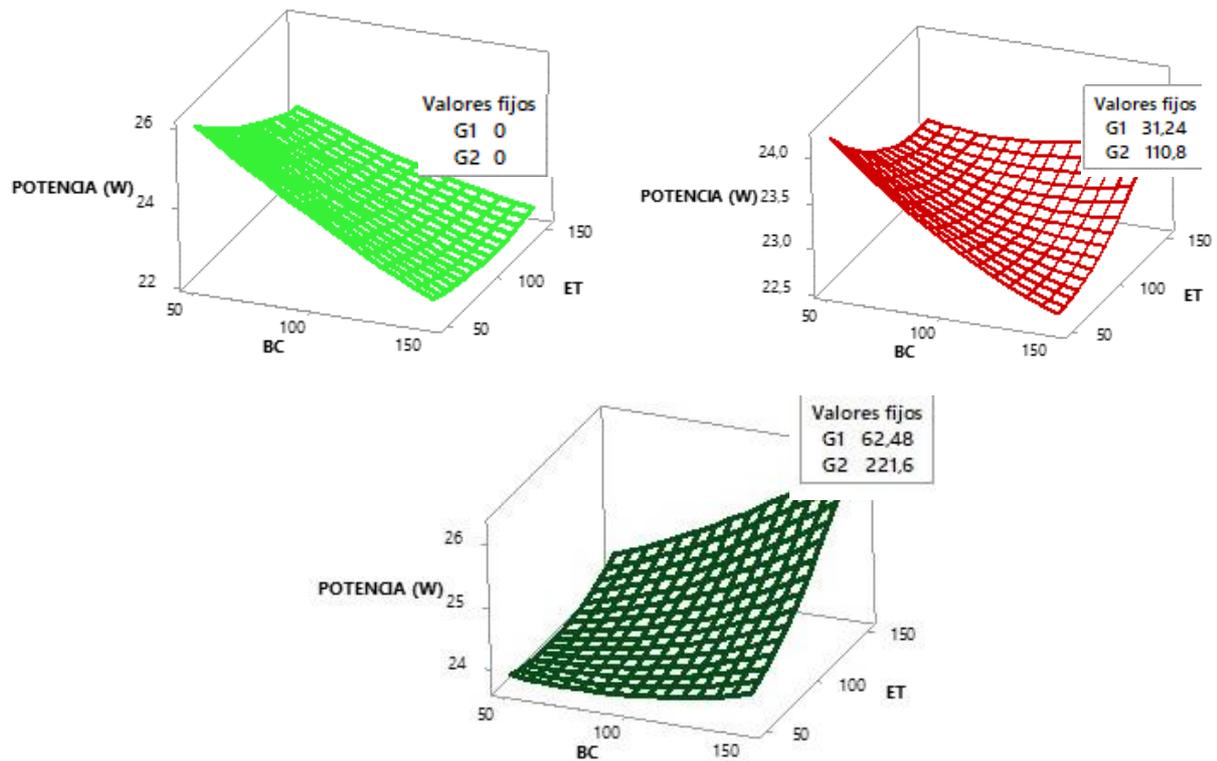


Figura 28: Gráfica de superficie de potencia con G1 y G2 constantes

Con los dos aditivos G1 y G2, reacciona de manera diferente con los valores de BC y ET, sin embargo, se puede observar que hay ciertas similitudes con las figuras 14 y 15 anteriores como que el valor máximo es mezclando la máxima cantidad de cada uno de los aditivos. Por lo que la optimización de únicamente la potencia, es la mezcla de cada uno.

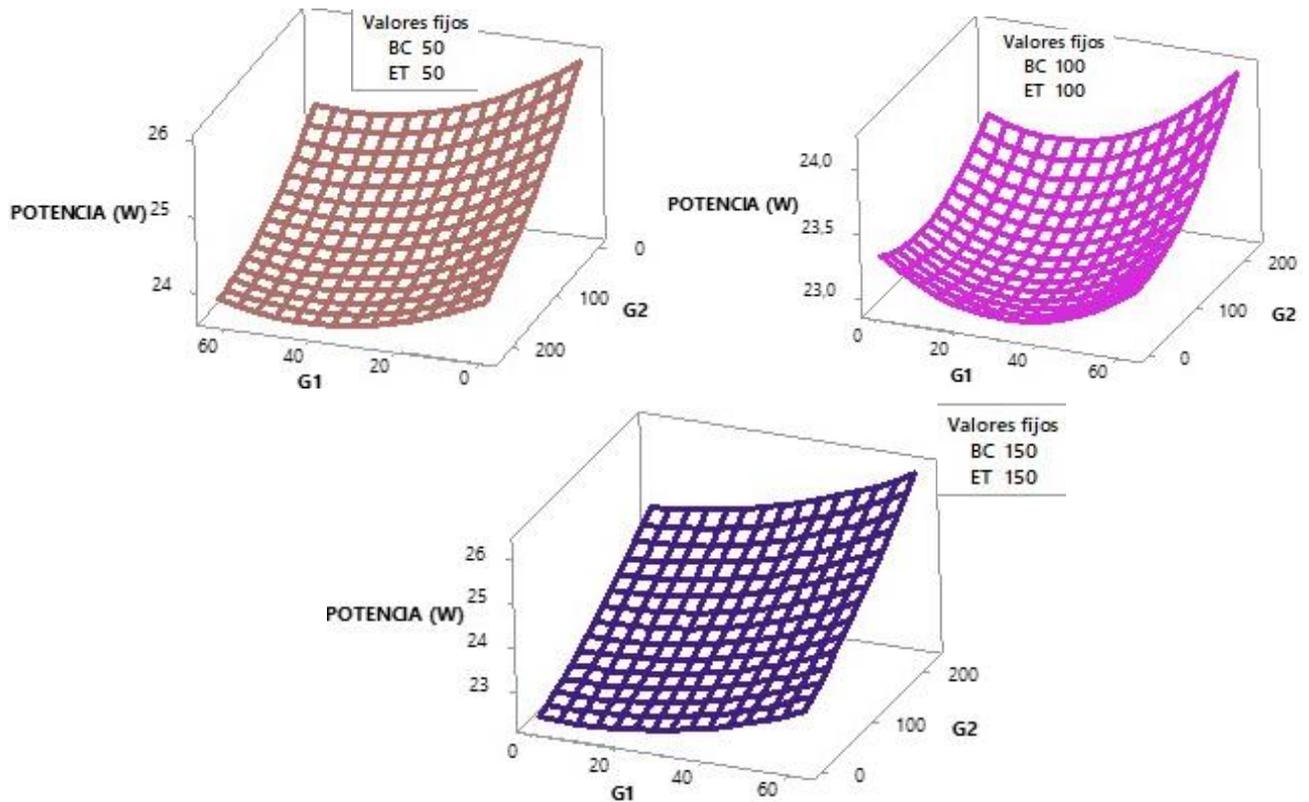


Figura 29: Gráfica de superficie de Potencia con ET y BC constantes

5.4.2 Gases de escape

En los gases de escape para optimizar se debe reducir o aumentar la emisión de los tipos de gases, depende del tipo de gas contaminante analizado, en el caso del CO, su reducción es lo que se busca en el experimento, en la Figura 30 se puede observar los comportamientos de los aditivos y las variaciones de la variable de respuesta, donde se puede visualizar que la emisión con los valores inferiores y medios de BC y ET máximos ocurren cuando se encuentra con poco aditivos en la mezcla y con la máxima cantidad, encontrando que los valores inferiores de resultado se encuentran cerca de los valores medios de G1 y G2, que son los valores dados por los fabricantes. En el caso de la tercera gráfica de la misma figura se puede observar que el comportamiento es algo distinto, ya que con los valores altos de ET y BN en la mezcla, los gases contaminantes de CO aumentan conforme la cantidad de G2 lo hace, por lo que, en el punto máximo de este valor, conjuntamente con el valor G1 alto, el valor de los gases es el mayor de las gráficas de superficie. Sin embargo, en la mezcla con G2 al 0 de cantidad mezclada, el valor del CO es el más bajo de todos.

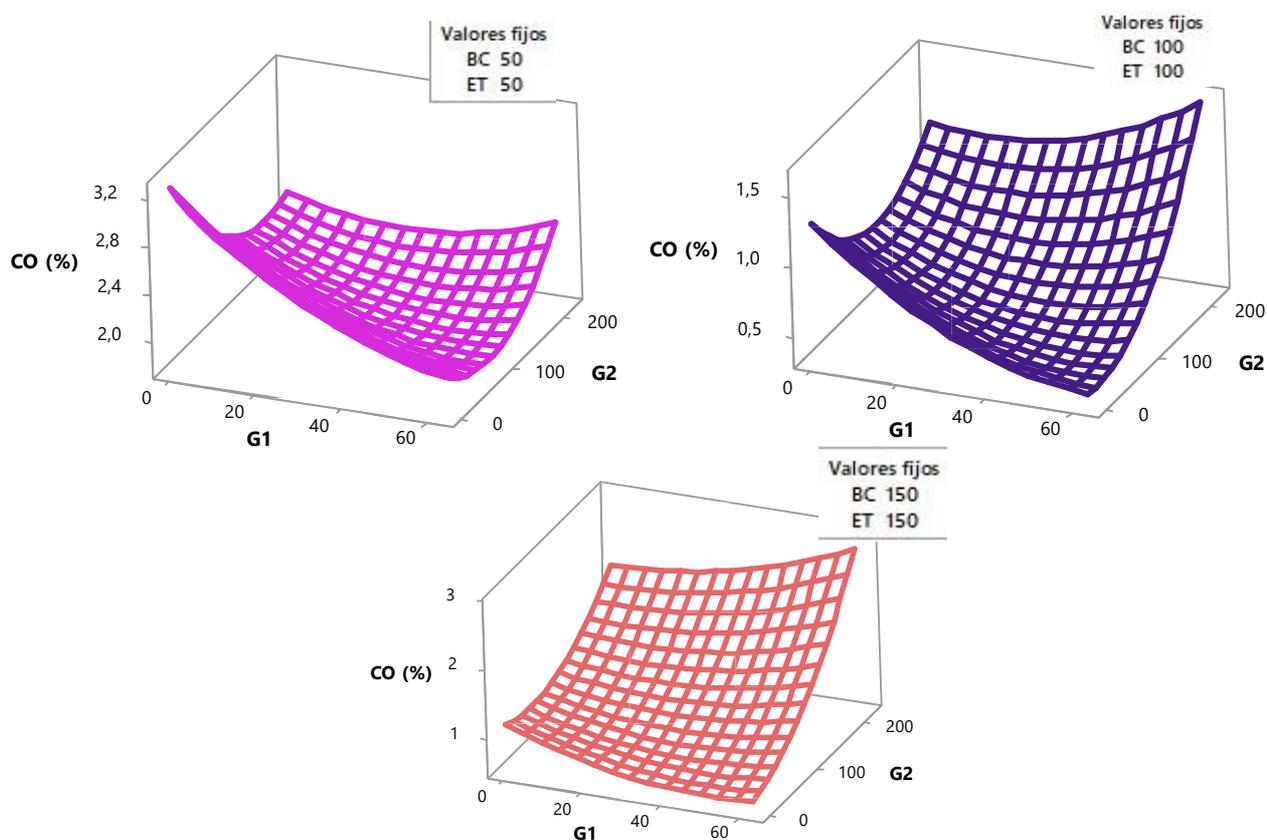


Figura 30: Gráfica de superficie para Co con BC y ET constantes

Con los gases HC, los valores de la variable de respuesta son muy diferentes a los de CO, cada cantidad de aditivo influye de forma muy distinta a las respuestas obtenidas, de igual forma con esta variable lo que se busca es minimizar la cantidad de gases emitidos, medido en ppm. Con las cantidades de BC y ET de 50 ml en 1 litro de gasolina y con la utilización de la máxima cantidad de G1 y un valor medio de G2 el valor de las emisiones de HC es mínimo, ya que al añadir más cantidad de G2 la cantidad de HC aumenta. Si únicamente se utiliza ET y BC los valores de HC son considerablemente altos. En las siguientes Figuras se puede observar que al aumentar la cantidad de BC y ET disminuye la cantidad de HC, especialmente sin la utilización de G1 y G2, ya que, al aumentar la concentración de estos dos últimos, aumenta de igual forma la generación de HC.

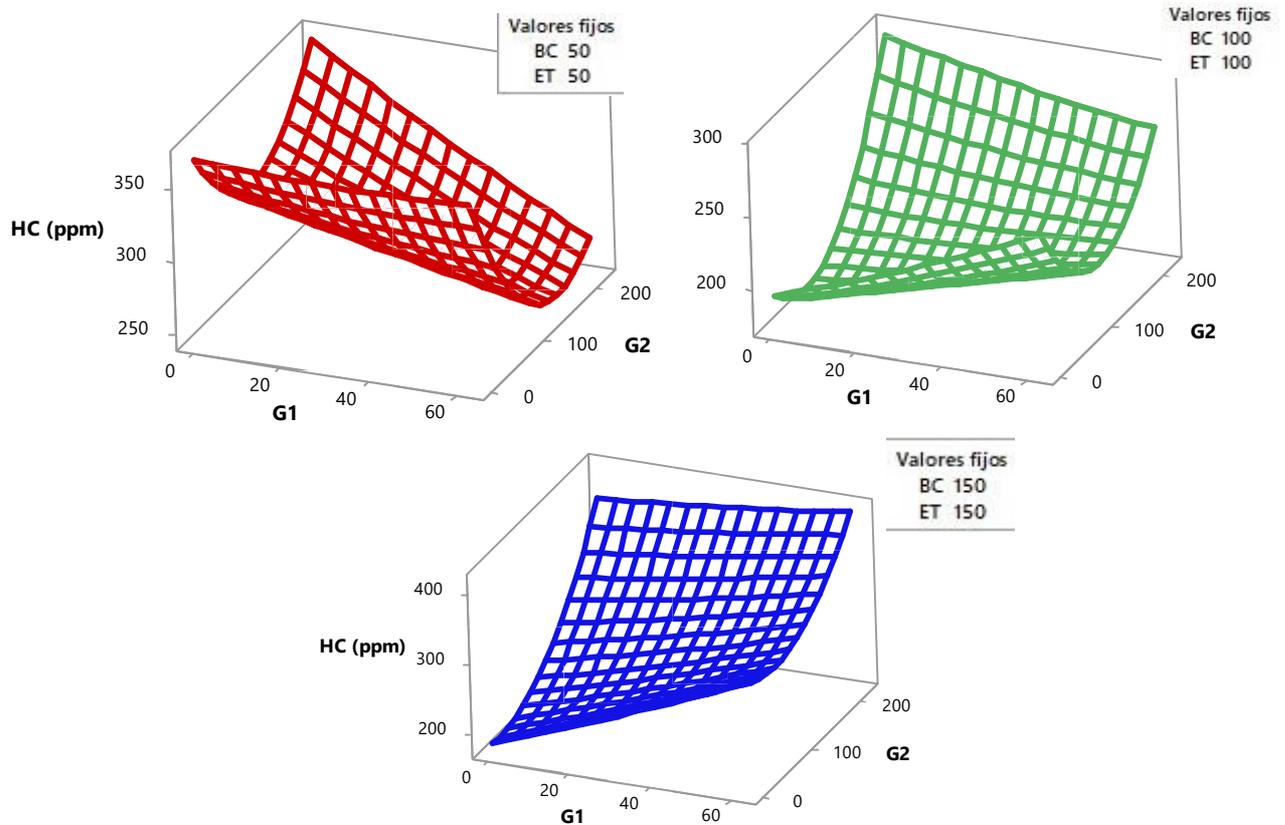


Figura 31: Gráfica de superficies de HC con ET y BC constantes

En el caso de los gases contaminantes del tipo CO_2 , los valores que se buscan es la maximización, puesto que entre más CO_2 en los gases contaminantes, es un indicador de la buena combustión que tuvo el combustible, el comportamiento es muy variable y distinto que los anteriores gases, siendo que las cantidades de cada uno de los aditivos influyen de manera muy marcada.

En la primera gráfica de superficie encontrada en la Figura 32 se puede encontrar que la mayor cantidad de emisión de CO_2 es cuando no se añade nada de aditivo G2 con una concentración de 20 ml tanto de ET como de BC y la cantidad máxima de G1.

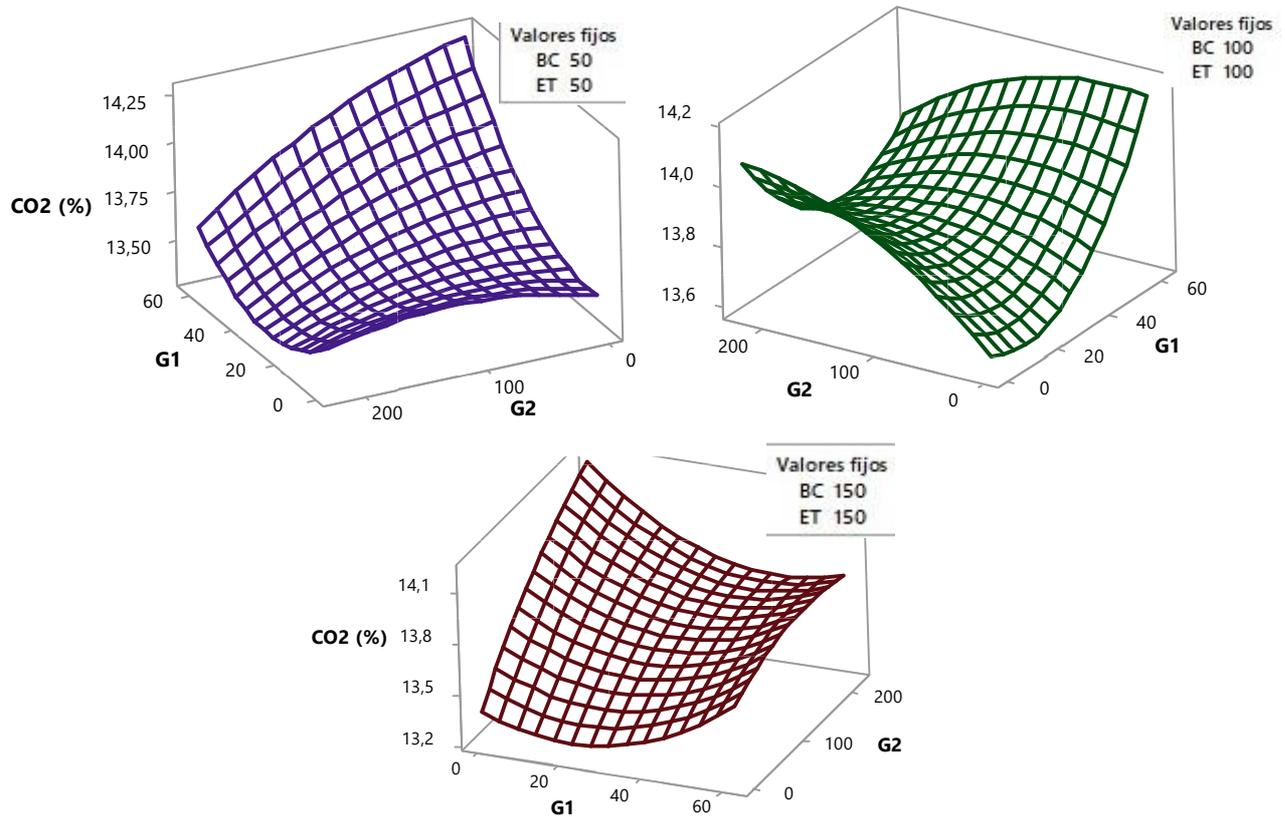


Figura 32: Gráfica de superficies para CO₂ con ET y BC constantes

Para los valores de los gases contaminantes O_2 se busca que se minimicen, puesto que este gas es un indicador que como se quema la mezcla, entre más cantidad de O_2 , significa que la combustión fue parcial, dentro del experimento se puede encontrar que varios valores de mezclas pueden a disminuir dicho gas, conforme se añade a la mezcla más BC y ET la utilización de G2 disminuye la cantidad de O_2 producido, con el aditivo G1 al añadir en la mezcla los beneficios observados no son significativos, siendo G2 quién más ayuda a la reducción de este gas.

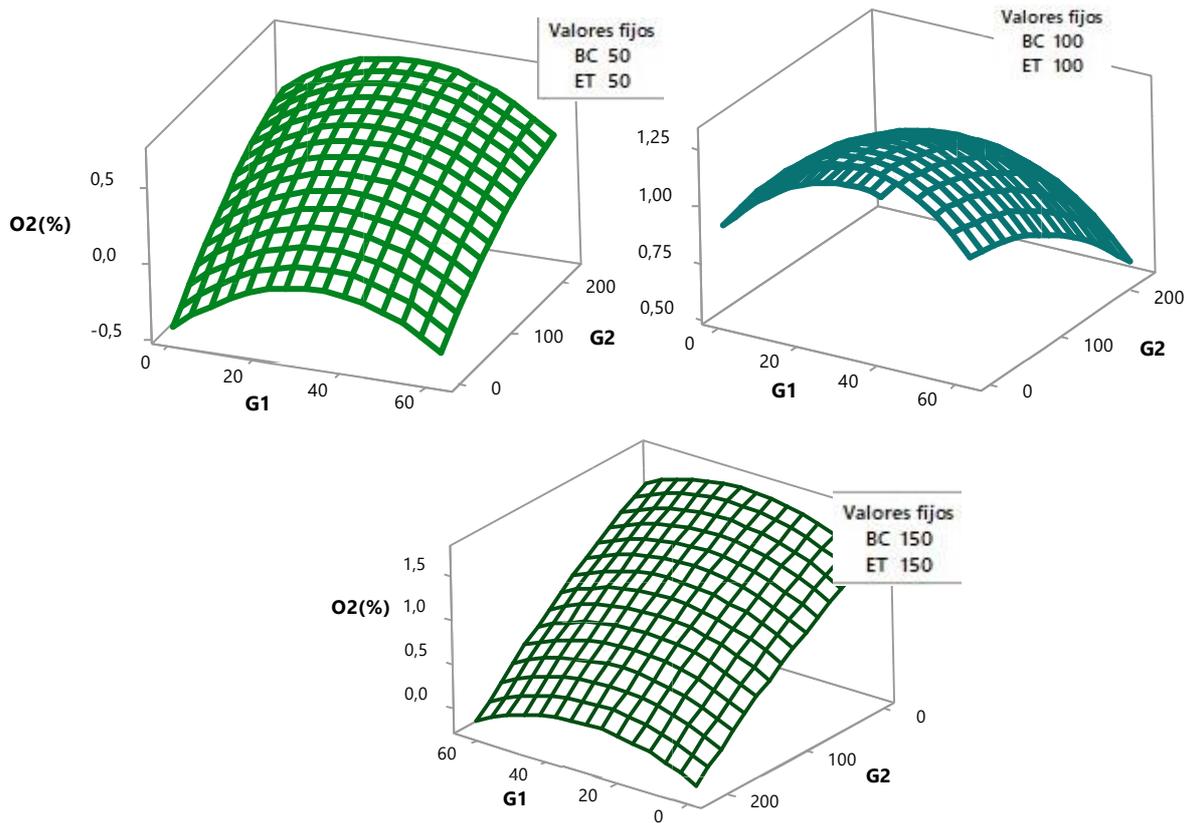


Figura 33: Gráfica de superficie para O2 con ET y BC fijos

Los gases tipos NOx son aquellos producidos por la alta temperatura y presión en la cámara, en vehículos preparados para la competencia estos dos elementos están muy presentes, los aditivos que más ayudan son ET y BC con 50 ml, teniendo la menor emisión sin utilizar los otros aditivos.

Ya con los valores altos de ET y BC la generación de NOx aumenta y el añadir los otros dos aditivos ayuda a disminuir los valores generados por la utilización en cantidades mayores a 100 ml por litro de gasolina.

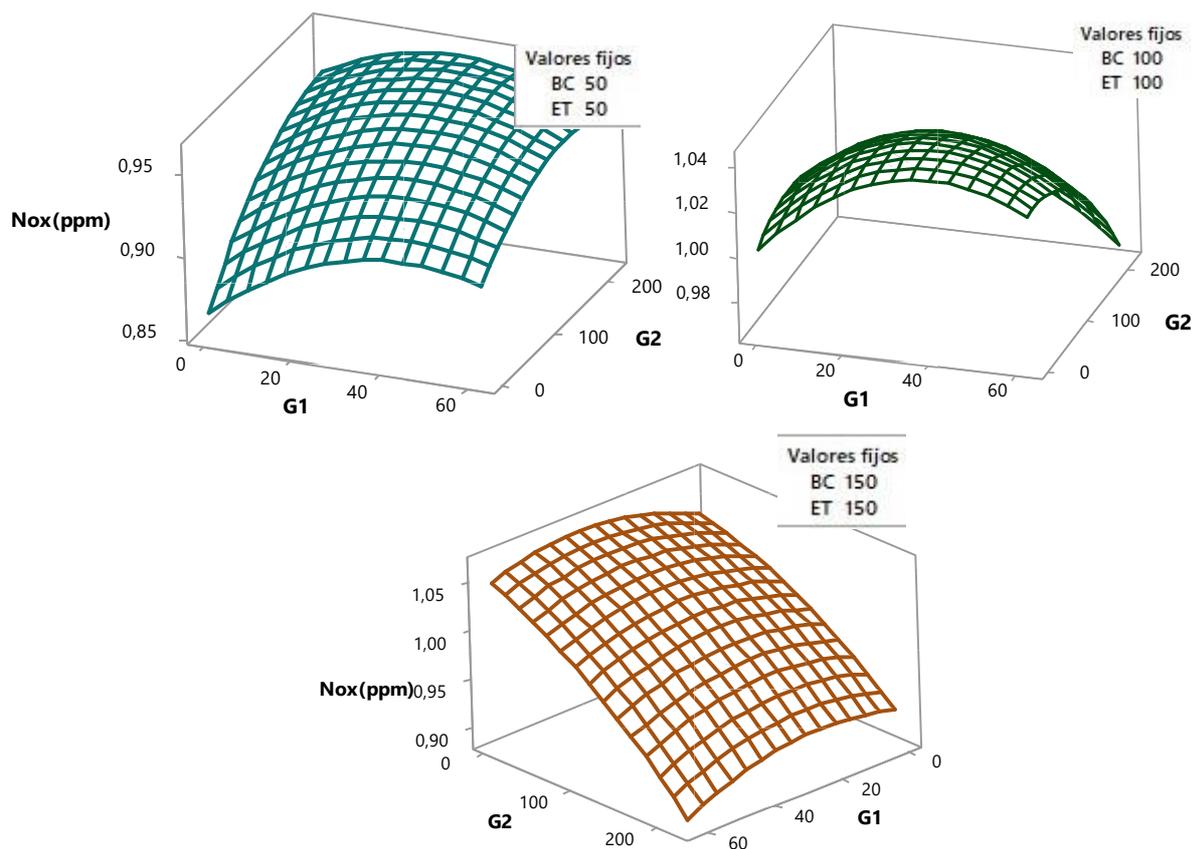


Figura 34: Gráfica de superficie de NOx con ET y BC

5.4.3 Consumo y gasto por utilización de aditivo

Dentro del consumo del combustible, se puede lograr una reducción del consumo de un 20%, este valor se puede obtener al mezclar BC y ET de 100 ml, y valores centrales de G1 y G2. Además, se puede observar que con la utilización de cantidades altas de ET y BC el consumo se incrementa, esto es explicado debido a que el AFR de las sustancias es más alto que el combustible. Los efectos de G1 y G2 depende de la cantidad de los dos aditivos mencionados anteriormente, aunque G2 es quien tiene menos influencia en disminuir o aumentar el consumo, sin embargo, el caso de G2 es muy diferente puesto que influye de gran medida al consumo entre más cantidad se agrega a la gasolina.

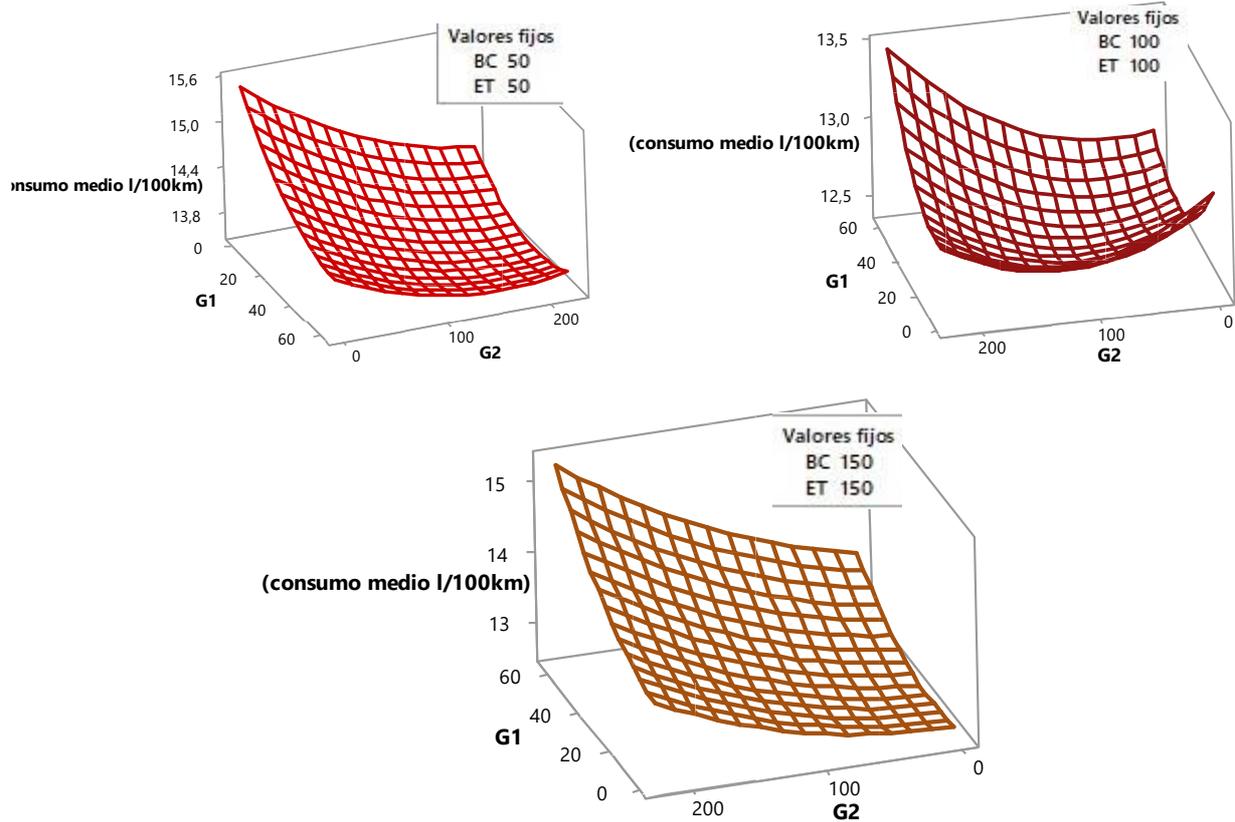


Figura 35: Gráfica de superficie para consumo medio con ET y BC fijos

Uno de los factores primordiales para la utilización del aditivo es el valor que puede llegar a costar la mezcla, y cuanto gasta el vehículo, de los aditivos con gran valor son G2 y G1, es por ello también que las cantidades utilizadas para la mezcla son muy inferiores a ET y BC, donde la cantidad que se puede adquirir por el valor es baja. Es por ello que se puede observar en las gráficas que conforme el uso de G1 y G2 el valor asociado se incrementa.

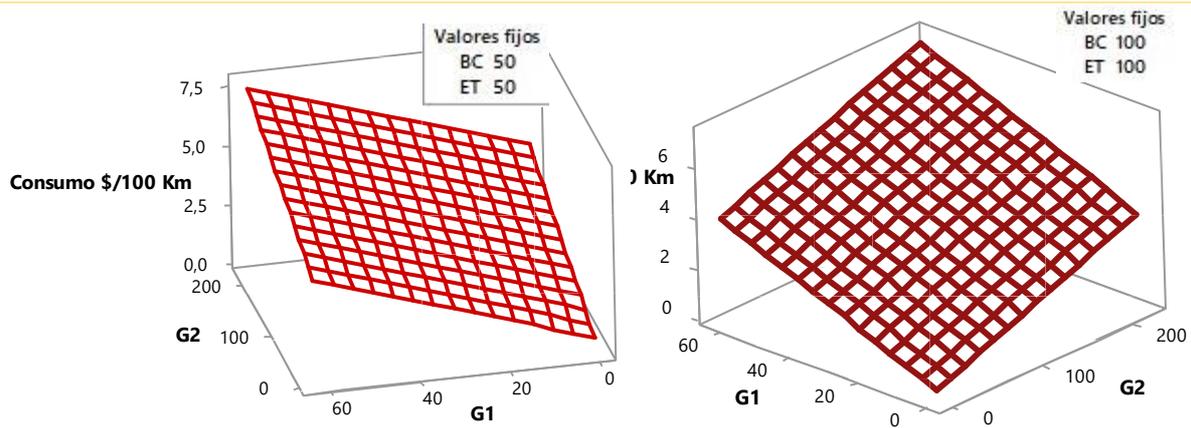


Figura 36: Gráfica de superficie para el costo del combustible con ET y BC fijos

5.5 OPTIMIZACIÓN

La optimización del problema dependerá de las variables seleccionadas. Si el objetivo es únicamente mejorar la potencia del vehículo, la estrategia óptima es utilizar la concentración máxima de todos los aditivos, como se muestra en la figura 37.

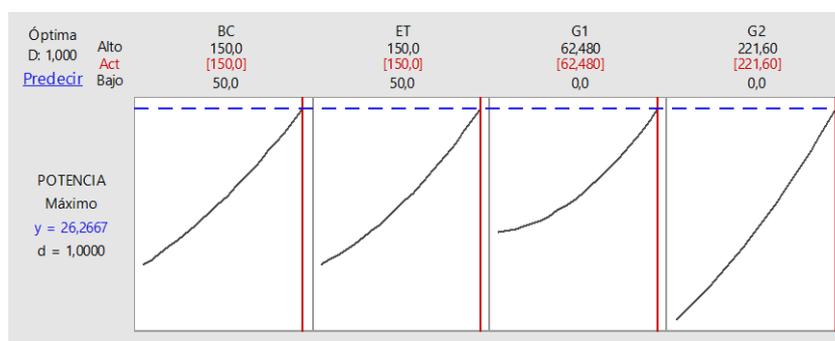


Figura 37: Optimización de la potencia

Si se busca maximizar la potencia del motor teniendo en cuenta el consumo y el costo de la mezcla, existen diferentes configuraciones óptimas. En el caso de maximizar la potencia y minimizar el consumo, los valores ideales son, ET a 101,51 ml, BC a 119,69 ml, G1 a 23,35 ml y G2 a 129,82 ml, por cada litro de combustible. Por otro lado, cuando se consideran tanto el costo de la mezcla como el consumo, se omite el uso de G2 y G1 debido a sus altos costos. Para minimizar el precio, la mezcla se realiza sin G2 y G1, ya que son los aditivos más costosos, alcanzando hasta 17 dólares americanos por cada 8 onzas.

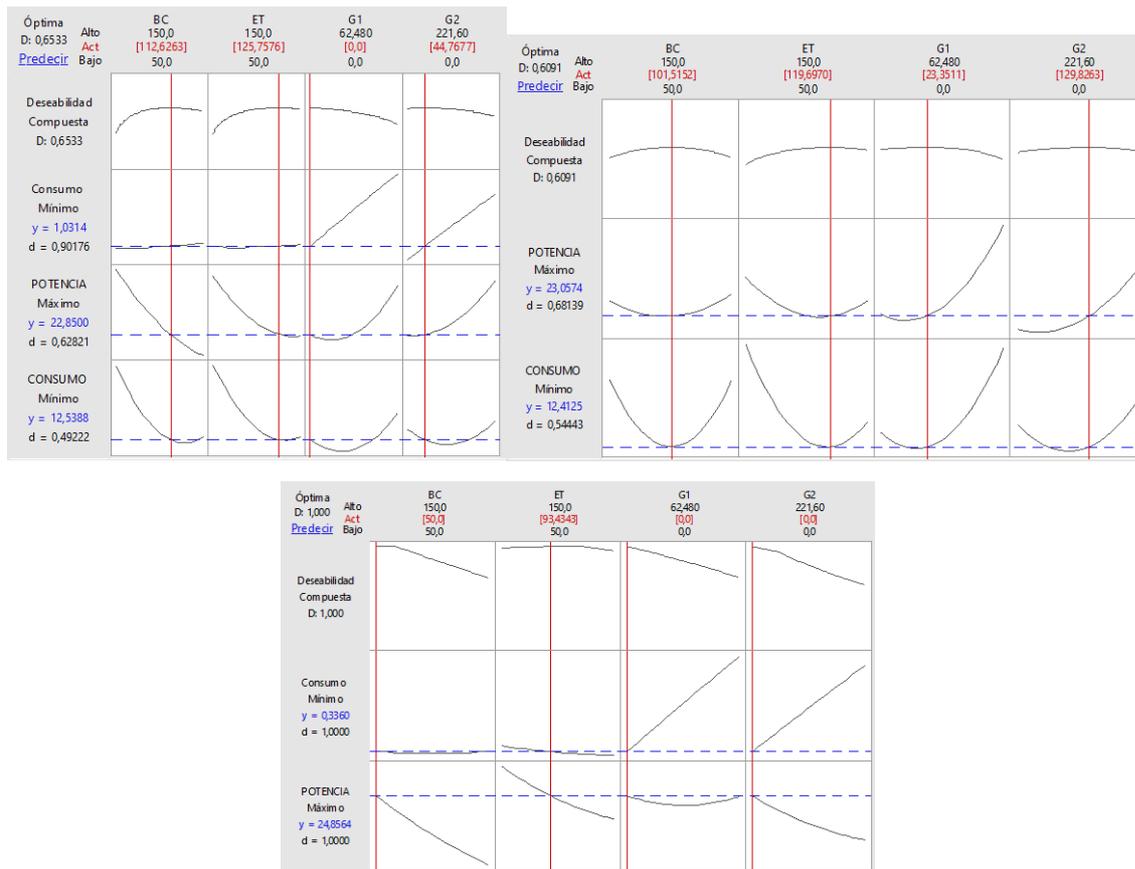


Figura 38: Optimización de potencia con restricciones de consumo y costo

La gráfica de contornos permite identificar una zona operativa óptima donde se logra un balance eficiente entre consumo de combustible y potencia generada, manteniendo constantes los parámetros BC y ET en 100. Los contornos azules y rojos representan las isocuantas de consumo de combustible (\$/100 km) y potencia del sistema (W), respectivamente. La región blanca en la intersección de estos contornos señala el conjunto de condiciones experimentales en las que el sistema alcanza un consumo mínimo de \$2.1 por cada 100 km y una potencia en el rango de 23 a 28 W.

Esta zona operativa sugiere que es posible optimizar el desempeño energético del sistema, reduciendo el consumo sin comprometer el rendimiento de potencia.

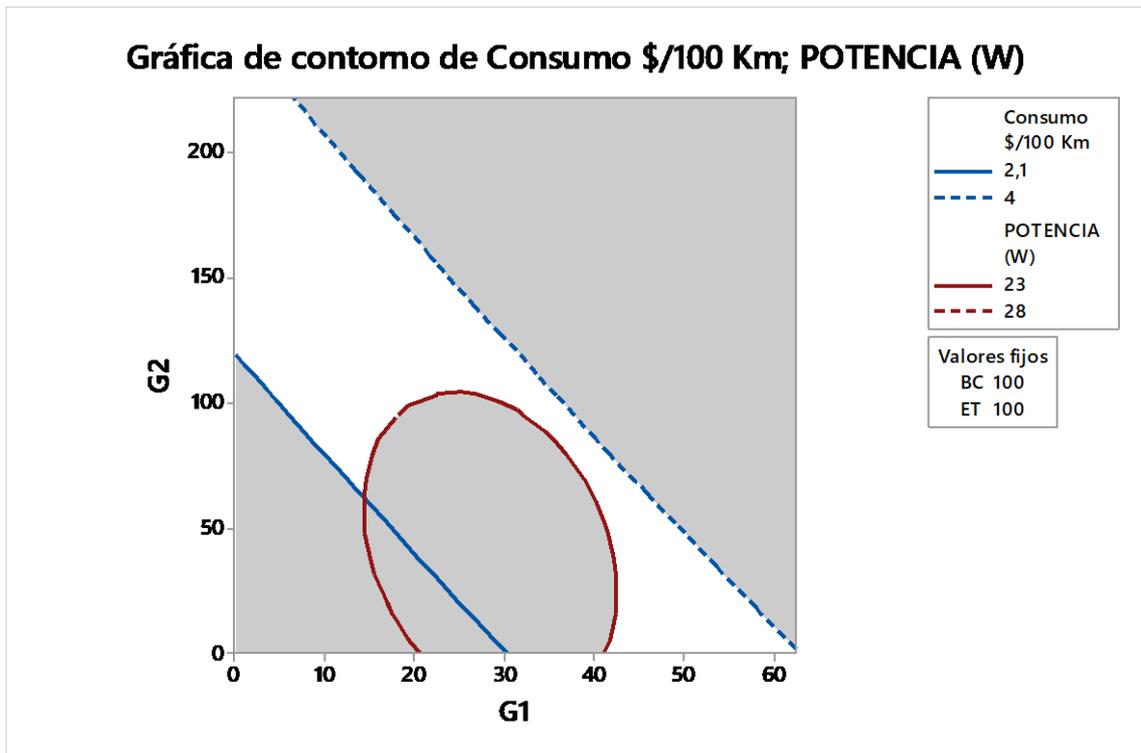


Figura 39: Gráfica de contorno con consumo y potencia

Para maximizar la potencia y reducir las emisiones, la optimización arroja valores específicos para cada aditivo. En este caso, el aditivo ET y G1 con 113.64 ml y 62,48 ml respectivamente por litro de combustible es el más utilizado, mientras que BC y G2 tienen las menores concentraciones en la mezcla. No obstante, si se toma en cuenta el costo, tanto G1 como G2 quedarían excluidos, ya que su alto precio limita su uso en grandes cantidades.

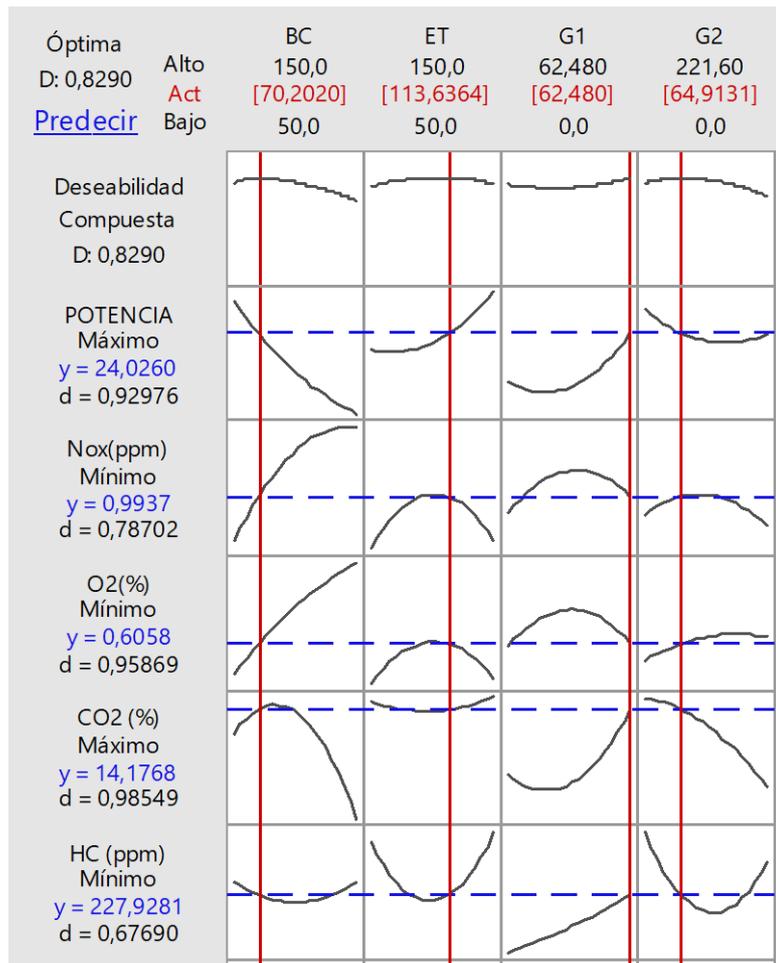


Figura 40: Optimización de potencia con emisiones mínimas

6. CONCLUSIONES

En base a los datos obtenidos y las optimizaciones realizadas, se llega a las siguientes conclusiones:

- Cada optimización presenta distintos valores para las variables estudiadas, ya que estos dependen de las restricciones aplicadas según el objetivo de la respuesta buscada. Además, que cada aditivo tiene un efecto único para cada uno de las variables estudiadas, tendiendo algunos aditivos que ayudan a maximizar el valor, mientras otros disminuyen la misma variable.
- Para maximizar la potencia del vehículo es necesario la utilización de los valores máximos de cada uno de los aditivos, ya que la interacción entre ellas potencia el efecto que realiza cada una de forma independiente
- En el consumo de combustible, los aditivos disminuyen la cantidad utilizada por el vehículo en valores de aditivos de BC (101,52ml), ET (119,70ml), G1 (23,35ml) y G2 (129,83 ml) por litro de gasolina reduciendo en un 3% el consumo, en valores mayores o menores de los aditivos, tienden a aumentar el valor de la variable.
- Para las emisiones, cada uno de los aditivos disminuye cada tipo de gas contaminante, para el caso del CO los aditivos que ayudan a la menor generación es el ET y G1 en concentraciones altas de los aditivos llegando a mejorar en un 47% en la disminución, para los hidrocarburos no combustionados los aditivos que ayudan a disminuir su generación son BC y ET en concentraciones moderadas, mientras que G1 y G2 en niveles altos tienden a aumentar su generación. Para los gases NOx todos los aditivos en concentraciones altas disminuyen su generación y aumentan en el uso de concentraciones moderadas, los aditivos que mejor ayudan a la reducción son ET y BC en concentraciones 163.64 ml y 70.20 ml respectivamente.

- En el caso de CO_2 y O_2 que son los gases que representan el estado de combustión, donde el CO_2 debe aumentar su generación y disminuir la presencia de O_2 , se logra controlando la cantidad de BC, ET y G2 en la mezcla.
- Para obtener la máxima potencia, teniendo en consideración el consumo del combustible, se encuentra que los valores óptimos para este objetivo son ET (101,51 ml), BC (119,69 ml), G1 (23,35 ml) y G2 (129,82 ml) por litro de combustible teniendo un valor de deseabilidad del 60%.
- Para obtener la máxima potencia, pero disminuyendo los gases contaminantes y aumentar la generación de CO_2 se obtiene que los valores óptimos son para BC (70.2020 ml) , para ET (113,63 ml), para G1 es (62,38 ml) y para G2 es (64.91 ml) por litro de gasolina. Teniendo un valor de deseabilidad compuesta del 83%.

7. RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones, se puede llegar a utilizar diferencias en las cotas de distribución para maximizar la presión en la cámara y la potencia obtenida, debido a que, al utilizar aditivos, el combustible eleva su octanaje y las propiedades de combustión, por lo que al utilizar diferentes valores en dichas cotas se pueden aprovechar de mejor manera las propiedades del combustible con aditivos.

De igual forma se puede utilizar diferentes autos con diferentes configuraciones en las cotas de funcionamiento con la finalidad de comprobar el comportamiento del combustible con diferentes formas de pistón y la disposición de la bujía, así mismo encontrar que vehículos pueden aprovechar de mejor manera el combustible y cuales perjudican al vehículo.

REFERENCIAS

- Amaral, L. V., Santos, N. D. S. A., Roso, V. R., Sebastião, R. de C. de O., & Pujatti, F. J. P. (2021). Effects of gasoline composition on engine performance, exhaust gases and operational costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110196>
- Böğrek, A., Haşimoğlu, C., Calam, A., & Aydoğan, B. (2021). Effects of n-heptane/toluene/ethanol ternary fuel blends on combustion, operating range and emissions in premixed low temperature combustion. *Fuel*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120628>
- Bustos Gonzales, J. D., & Calle Espinoza, C. J. (2016). *OPTIMIZACIÓN DE LAS COTAS DE REGLAJE DE LA DISTRIBUCIÓN DE UN MOTOR SUSUKI G13B TWIN CAM MEDIANTE DISEÑO EXPERIMENTAL*.
- Campoverde Molina, A. P., & Campoverde Rivera, D. N. (2023). *Estimación del consumo de combustible a través de las señales PID'S mediante la utilización del ciclo de emisiones reales en la cuida de Quito-Ecuador*.
- Cevallos Días, D. S., & Conrado Chamorro, G. I. (2022). *Estudio del rendimiento en el consumo de combustible de un vehículo a inyección directa a gasolina al utilizar etanol en diferentes porcentajes*.
- Cevallos Díaz, D. S., & Conrado Chamorro, G. I. (2022). *ESTUDIO DEL RENDIMIENTO EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE UN VEHICULO A INYECCION DIRECTA A GASOLINA AL UTILIZAR ETANOL EN DIFERENTES PORCENTAJES*.
- Daud, S., Hamidi, M. A., & Mamat, R. (2022). A review of fuel additives' effects and predictions on internal combustion engine performance and emissions. *AIMS Energy*, 10(1). <https://doi.org/10.3934/ENERGY.2022001>
- Dehghani, M., Kazemi Shariat Panahi, H., Aghbashlo, M., Lam, S. S., & Tabatabaei, M. (2021). The effects of nanoadditives on the performance and emission characteristics of spark-ignition gasoline engines: A critical review with a focus on health impacts. *Energy*, 225. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120259>
- EMOV. (2018). *INFORME COMBUSTIBLES 2018*.
- Ershov, M. A., Potanin, D. A., Tarazanov, S. V., Abdellatief, T. M. M., & Kapustin, V. M. (2020). Blending Characteristics of Isooctene, MTBE, and TAME as Gasoline Components. *Energy and Fuels*, 34(3), 2816–2823. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03914>
- FEDAK. (2023). *REGLAMENTO GENERAL DE REGLAMENTO GENERAL DE RALLY*.
- Arias Montaña, E. I., & Ludeña Ayala, J. A. (2018). *ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y NIVELES DE EMISIONES CONTAMINANTES DE UN VEHÍCULO DE CATEGORÍA M1 EN RUTAS CON MAYOR GRADO DE SATURACIÓN EN LA CIUDAD DE CUENCA*.
- Lamb, W. F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J. G. J., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Khourdajie, A. Al, House, J., Pachauri, S., Figueroa, M., Saheb, Y., Slade, R., Hubacek, K., Sun, L., Ribeiro, S. K., Khennas, S., De La Rue Du Can, S., ... Minx, J. (2021). A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. In *Environmental Research Letters* (Vol. 16, Issue 7). IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abee4e>

- Lin, M., Zhang, X., Wen, M., Zhang, C., Kong, X., Jin, Z., Zheng, Z., & Liu, H. (2022). Effects of Unconventional Additives in Gasoline on the Performance of a Vehicle. *Energies*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/en15051605>
- Nanthagopal, K., Kishna, R. S., Atabani, A. E., Al-Muhtaseb, A. H., Kumar, G., & Ashok, B. (2020). A compressive review on the effects of alcohols and nanoparticles as an oxygenated enhancer in compression ignition engine. In *Energy Conversion and Management* (Vol. 203). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112244>
- ÖZER, S. (2020). The effect of adding toluene to increase the combustion efficiency of biodiesel. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1776421>
- PETROECUADOR. (2023). *INFORME ESTADÍSTICO*.
- Rivera, N., Chica, J., Zambrano, I., & García, C. (2017). Study Of The Behavior Of An Otto Engine Of Electronic Injection In Relation To The Stoichiometry Of The Mixture And The Advance To The Ignition For Cuenca City. In *Revista Politécnica- Octubre* (Vol. 40, Issue 1).
- Rivera, N., Mata, C., Lalangui, J., Bermeo, A., Valdez, L., & Morocho, J. (n.d.). *Análisis de emisiones contaminantes originados por el parque automotor en Cuenca*.
- Rivera-Campoverde, N. D., Muñoz-Sanz, J. L., & Arenas-Ramirez, B. D. V. (2021). Estimation of pollutant emissions in real driving conditions based on data from OBD and machine learning. *Sensors*, 21(19). <https://doi.org/10.3390/s21196344>
- Roy, S., Zare, S., & Askari, O. (2019). Understanding the effect of oxygenated additives on combustion characteristics of gasoline. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 141(2). <https://doi.org/10.1115/1.4041316>
- Safieddin Ardebili, S. M., Solmaz, H., İpci, D., Calam, A., & Mostafaei, M. (2020). A review on higher alcohol of fusel oil as a renewable fuel for internal combustion engines: Applications, challenges, and global potential. In *Fuel* (Vol. 279). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118516>
- Yusuf, A. A., & Inambao, F. L. (2021). Progress in alcohol-gasoline blends and their effects on the performance and emissions in SI engines under different operating conditions. In *International Journal of Ambient Energy* (Vol. 42, Issue 4, pp. 465–481). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1531261>