

Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño



Evaluación de las emisiones en un motor de combustión interna utilizando bioetanol como combustible.

Tesis para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería

Presenta

Ing. Francisco Javier Velazquez Flores

Director de tesis

Dr. Jorge Limon Romero

Co-Director de tesis

Dr. Armando Pérez Sanchez

Agosto 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

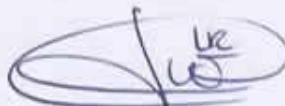
Evaluación de las emisiones en un motor de combustión interna utilizando bioetanol como combustible

TESIS

Que para obtener el grado de Maestro en Ingeniería presenta:

Francisco Javier Velázquez Flores

Aprobada por:



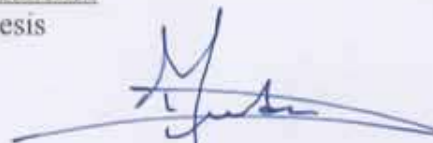
Dr. Jorge Limón Romero
Director de tesis



Dr. Armando Pérez Sánchez
Co-Director de tesis



Dr. Yolanda Angélica Báez López
Miembro del comité



Dr. Diego Alfredo Tlapa Mendoza
Miembro del comité



Dr. Juan Antonio Ruiz Ochoa
Miembro del comité

Ensenada Baja California, México. Junio, 2025


Resumen de la tesis de Francisco Javier Velázquez Flores presentada como requisito para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERIA del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería de la UABC. Ensenada Baja California, México, junio de 2025.

Evaluación de las emisiones en un motor de combustión interna utilizando bioetanol como combustible

Resumen aprobado por:



Dr. Jorge Limón Romero
Director de tesis



Dr. Armando Pérez Sánchez
Co-Director de tesis

La presente investigación se desarrolla con el objetivo de evaluar el desempeño de un motor de combustión interna (MCI) en cuanto a las emisiones producidas. Se utilizó un banco de pruebas con un motor chevrolet Ecotec 2.2 y una computadora capaz de modificar la inyección de acuerdo con la mezcla de bioetanol. Para evaluar su efecto, se probaron diferentes mezclas de bioetanol de caña con gasolina tradicional cuidando que el rendimiento del motor no se viera afectado. Para este trabajo de investigación se utilizaron las mezclas antes mencionadas en las siguientes proporciones: gasolina pura, 20% de bioetanol con un 80% de gasolina, 40% de bioetanol con un 60% de gasolina, 60% de bioetanol con un 40% de gasolina y, por último, 80% de bioetanol con un 20% de gasolina. Es importante mencionar que se realizó una espectroscopia para caracterizar los combustibles y sus mezclas. Además de las mezclas de combustible, también se probaron las revoluciones por minuto (rpm) como otro factor de interés. Este factor se estudió a 2 niveles siendo estos 1000 y 2000 rpm.

Para realizar los experimentos se probó un diseño factorial completo con 2 réplicas, las cuales fueron probadas en un orden totalmente aleatorio. Utilizando el banco de pruebas se evaluaron las siguientes variables de respuesta: temperatura de escape, las emisiones del motor como partes por millón (ppm) de monóxido de carbono, el porcentaje de dióxido de carbono, las ppm de hidrocarburos, las ppm de óxido nítrico, las ppm de dióxido de nitrógeno, las ppm de dióxido de azufre y, por último, el consumo del motor en kilogramos (Kg). Para evaluar estadísticamente los efectos de los factores antes mencionados y su interacción se utilizó la prueba de análisis de varianza y como uno de los resultados más importantes se encontró que el efecto del porcentaje de bioetanol combinado con las revoluciones por minuto (rpm) de trabajo pueden reducir significativamente la producción de monóxido de carbono.

Palabras clave: Banco de prueba, emisiones, bioetanol, diseño factorial, mezclas de combustible

Dedicatoria

A mi esposa Perla Guadalupe Mora Zuñiga por todo el apoyo, paciencia y cariño.

A mis padres por apoyarme en mis estudios.

A mi Hija.

Agradecimientos

A mi director de tesis Dr. Jorge Limón Romero y co-director Dr. Armando Pérez Sánchez por todo el apoyo y la oportunidad de formar parte del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería.

Al Dr. Ulises Alejandro Villalón López por el apoyo con sus conocimientos y el análisis de la espectroscopía infrarroja por transformada de fourier

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por los apoyos económicos otorgados durante el periodo del posgrado.

A mis alumnos de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología por el tiempo y apoyo en la fabricación del proyecto.

Índice

1. Resumen	8
2. Abstract	8
3. Introducción	9
3.1. Planteamiento de problema	9
3.2. Justificación y uso de los resultados	11
3.3. Objetivo General	12
3.4. Objetivos Específicos	12
3.5. Hipótesis	13
3.6. Antecedentes	14
3.6.1. Bioenergía y Biomasa	14
3.6.2. Primeros usos del bioetanol como combustible	15
3.6.3. Bioetanol a nivel internacional	16
3.6.4. Producción de Bioetanol	20
3.6.5. Bioetanol a partir de caña de azúcar	22
3.6.6. Ciclo del CO ₂ al utilizar bioetanol	25
3.6.7. Ventajas del bioetanol sobre el petróleo	26
3.6.8. Bioetanol en México	26
3.7. Espectroscopía Infrarroja por transformada de fourier	27
3.7.1. Principales Ventajas	27
3.8. Análisis FT-IR de Mezclas Etanol-Gasolina	28
3.8.1. Análisis de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR) en Mezclas Etanol-Gasolina	28
3.8.2. Señales características de etanol	28
3.8.3. Señales características de gasolina	28
3.8.4. Tendencias Observadas	29
3.8.5. Tabla de asignaciones vibracionales para mezclas etanol-gasolina	32
4. Metodología	33
4.1. Etapas de la Metodología	33
5. Materiales y Equipos	38
5.1. Enerac 700AV	38
5.1.1. Características técnicas principales	38
5.1.2. Especificaciones de Medición	39
5.1.3. Aplicaciones comunes	40

5.1.4. Ventajas Adicionales	40
5.2. Banco de Pruebas con motor Ecotec 2.2 Litros	40
5.2.1. Especificaciones del motor	40
5.2.2. Características de la estructura	40
5.3. Escáner Veepeak OBD II	41
5.3.1. Especificaciones Técnicas	41
5.3.2. Funcionalidades Principales	42
5.3.3. Ventajas	42
5.4. Computadora Eflexfuel	43
5.4.1. Características destacadas	43
5.5. Báscula Pretul	44
5.5.1. Especificaciones	44
6. Análisis de resultados	45
6.1. Análisis de la temperatura de los gases de escape(Y1) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)	46
6.2. Análisis del porcentaje de Oxígeno(Y2) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)	49
6.3. Análisis de las ppm de monóxido de carbono(Y3) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)	52
6.4. Análisis del porcentaje de dióxido de carbono(Y4) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)	55
6.5. Análisis de las ppm de los hidrocarburos(Y5) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)	58
6.6. Análisis de las ppm de óxido nítrico (Y6) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)	61
6.7. Análisis de las ppm de dióxido de Nitrógeno (Y7) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)	64
6.8. Análisis de las ppm de dióxido de Azufre (Y8) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)	67
6.9. Análisis del consumo(Y9) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)	70
6.10. Resumen de significancia de los factores	73
7. Conclusiones	74
7.1. Conclusiones respecto a objetivos	74
7.2. Conclusiones respecto a Hipótesis	74
7.3. Conclusiones generales	74

Índice de figuras

1. Porcentaje de energía de Bioetanol en Brasil	15
2. Estructura de la cadena de suministro de bioetanol en Australia	16
3. Producción de bioetanol	21
4. Proceso convencional de producción de bioetanol	22
5. La glicólisis y la fermentación son las rutas metabólicas por las que se sintetiza el bioetanol en la levadura de pan	23
6. Cambio del precio relativo del azúcar y del bioetanol en el transcurso de los años 1991 al 2011	24
7. Comparación de las transformaciones del CO ₂ de los combustibles fósiles vs biocombustible	25
8. Resultados de la FT-IR	30
9. Resultados de la FT-IR con valores de frecuencias	31
10. Asignaciones vibracionales para mezclas etanol-gasolina	32
11. Prototipo de Banco de pruebas en Solidworks	33
12. Computadora Eflexfuel	34
13. Matriz de resultados inicial	35
14. Segunda matriz de resultados	35
15. Tercera matriz de resultados	36
16. Matriz de resultados aleatorizados	37
17. Enerac 700AV	38
18. Especificaciones de medición de Enerac700AV	39
19. Banco de Pruebas	41
20. Escáner Veepeak	43
21. Computadora Eflexfuel	44
22. Báscula Pretul con Contenedor de Gasolina	44
23. Resultados del experimento	45
24. Factores del experimento	46
25. Análisis de varianza de la temperatura de gases de escape vs RPM y % de bioetanol	46
26. Resumen del modelo de la temperatura de gases de escape vs RPM y % de bioetanol	46
27. Diagrama de Pareto de la temperatura de gases de escape vs RPM y % de bioetanol	47
28. Gráficas cuatro en uno de la temperatura de gases de escape vs RPM y % de bioetanol	47
29. Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con las temperaturas de escape	48
30. Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con las temperaturas de escape	48
31. Análisis de varianza del porcentaje de oxígeno vs RPM y % de bioetanol	49

32. Resumen del modelo del porcentaje de oxígeno vs RPM y % de bioetanol	49
33. Diagrama de Pareto del porcentaje de oxígeno vs RPM y % de bioetanol	50
34. Gráficas cuatro en uno del porcentaje de oxígeno vs RPM y % de bioetanol	50
35. Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con el porcentaje de oxígeno	51
36. Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con el porcentaje de oxígeno	51
37. Análisis de varianza del monóxido de carbono (ppm) vs RPM y % de bioetanol	52
38. Resumen del modelo del monóxido de carbono (ppm) vs RPM y % de bioetanol	52
39. Diagrama de Pareto del monóxido de carbono (ppm) vs RPM y % de bioetanol	53
40. Gráficas cuatro en uno del monóxido de carbono (ppm) vs RPM y % de bioetanol	53
41. Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con el monóxido de carbono(ppm)	54
42. Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con el monóxido de carbono	54
43. Análisis de varianza del porcentaje de dióxido de carbono vs RPM y % de bioetanol	55
44. Resumen del modelo del porcentaje de dióxido de carbono vs RPM y % de bioetanol	55
45. Diagrama de Pareto del porcentaje de dióxido de carbono vs RPM y % de bioetanol	56
46. Gráficas cuatro en uno del porcentaje de dióxido de carbono vs RPM y % de bioetanol	56
47. Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con el porcentaje de dióxido de carbono	57
48. Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con el porcentaje de dióxido de carbono	57
49. Análisis de varianza de los hidrocarburos (ppm) vs RPM y % de bioetanol	58
50. Resumen del modelo de los hidrocarburos (ppm) vs RPM y % de bioetanol	58
51. Diagrama de Pareto de los hidrocarburos (ppm) vs RPM y % de bioetanol	59
52. Gráficas cuatro en uno de hidrocarburos (ppm) vs RPM y % de bioetanol	59
53. Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con los hidrocarburos	60
54. Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con los hidrocarburos	60
55. Análisis de varianza del óxido nítrico (ppm) vs RPM y % de bioetanol	61
56. Resumen del modelo del óxido nítrico (ppm) vs RPM y % de bioetanol	61
57. Diagrama de Pareto del óxido nítrico (ppm) vs RPM y % de bioetanol	62
58. Gráficas cuatro en uno del óxido nítrico (ppm) vs RPM y % de bioetanol	62
59. Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con el óxido nítrico(ppm)	63

60. Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con el	
óxido nítrico (ppm)	63
61. Análisis de varianza del dióxido de Nitrógeno (ppm) vs RPM y % de bioetanol	64
62. Resumen del modelo del dióxido de nitrógeno (ppm) vs RPM y % de bioetanol	64
63. Diagrama de Pareto del dióxido de nitrógeno (ppm) vs RPM y % de bioetanol	65
64. Gráficas cuatro en uno del dióxido de nitrógeno (ppm) vs RPM y % de bioetanol	65
65. Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con el dióxido de	
nitrógeno(ppm)	66
66. Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con el	
dióxido de nitrógeno (ppm)	66
67. Análisis de varianza del dióxido de azufre (ppm) vs RPM y % de bioetanol	67
68. Resumen del modelo del dióxido de azufre (ppm) vs RPM y % de bioetanol	67
69. Diagrama de Pareto del dióxido de azufre (ppm) vs RPM y % de bioetanol	68
70. Gráficas cuatro en uno del dióxido de azufre (ppm) vs RPM y % de bioetanol	68
71. Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con el dióxido de	
azufre(ppm)	69
72. Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con el	
dióxido de azufre (ppm)	69
73. Análisis de varianza del consumo vs RPM y % de bioetanol	70
74. Resumen del modelo del consumo vs RPM y % de bioetanol	70
75. Diagrama de Pareto del consumo vs RPM y % de bioetanol	71
76. Gráficas cuatro en uno del consumo vs RPM y % de bioetanol	71
77. Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con el consumo	72
78. Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con el	
consumo	72
79. Resumen de la significancia de los factores	73

3. Introducción

3.1. Planteamiento de problema

Durante años se han utilizado combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural. Estos provienen de la descomposición natural de la materia orgánica, un proceso que puede tardar millones de años, por lo que se consideran recursos naturales limitados. El petróleo, compuesto por carbono e hidrógeno, es un hidrocarburo que, al utilizarse como combustible, genera vapor de agua, dióxido de carbono y, en algunos casos, óxidos de nitrógeno. Estos compuestos son perjudiciales para el medio ambiente, además de los daños ecológicos asociados a su extracción, como el despliegue de maquinaria, los derrames durante las excavaciones y la contaminación de mantos acuíferos y del aire [1].

Según la Organización Mundial de la Salud, la contaminación del aire se define como la presencia de agentes químicos, físicos o biológicos que alteran las características naturales de la atmósfera. Los principales responsables son los aparatos de combustión, como los vehículos de motor e instalaciones industriales. Entre los contaminantes más preocupantes se encuentran el monóxido de carbono y el dióxido de nitrógeno. El 99% de la población mundial respira aire que contiene niveles elevados de contaminantes, superando los límites recomendados, siendo los países de menores ingresos los más afectados [2].

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático ha desarrollado sistemas, redes y programas para medir la calidad del aire. Esto ha permitido que las autoridades ambientales de las grandes ciudades enfrenten la problemática de la contaminación atmosférica mediante el análisis de partículas suspendidas y ozono. Las ciudades más afectadas incluyen la zona metropolitana del Valle de México, Guadalajara y Monterrey [3]; sin embargo, cada vez más ciudades medianas y pequeñas presentan malas condiciones del aire.

El Diagnóstico de la Calidad del Aire de Baja California indica que el 70% de los muestreos de partículas suspendidas con diámetros aerodinámicos menores a 10 micrómetros superaron los límites establecidos por la norma. Las mediciones de partículas menores a 2.5 micrómetros se realizaron únicamente en Mexicali y Tijuana, sin cumplirse la NOM en ninguna de las dos. En cuanto al ozono, se cumplió la norma en Tijuana, pero no en Mexicali. La evaluación del monóxido de carbono solo se llevó a cabo en Tijuana, con concentraciones aceptables. No fue posible evaluar el dióxido de azufre en ninguna de las entidades. Esta información nos brinda un panorama de la situación en nuestra región, donde se carece de suficiente información y análisis sobre monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre [4].

A finales del siglo XIX, los científicos comenzaron a entender la relación entre la quema de combustibles fósiles, como el carbón y el petróleo, y la emisión de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. Los trabajos de científicos como John Tyndall [5] y Svante Arrhenius [6] sentaron las bases teóricas del efecto invernadero.

A comienzos del siglo XX, las emisiones de CO₂ siguieron aumentando debido a la industrialización, el crecimiento económico global y la producción en masa de automóviles con motores de combustión interna. La investigación empezó a centrarse en cuantificar estas emisiones y comprender su impacto climático [7].

Durante la década de 1950, la contaminación del aire y las emisiones de gases como el óxido de nitrógeno (NO_x) y el dióxido de azufre (SO₂) se convirtieron en importantes preocupaciones, especialmente en zonas urbanas [8].

Como respuesta, comenzaron a desarrollarse tecnologías para controlar estas emisiones, así como investigaciones sobre sus efectos en la salud humana y el medio ambiente. En este contexto, Mario Molina y Frank Sherwood Rowland destacaron por sus estudios sobre la degradación de la capa de ozono causada por compuestos químicos contaminantes [9]. Estos trabajos impulsaron la creación del Protocolo de Montreal en 1987, un tratado internacional para proteger la capa de ozono, demostrando cómo la investigación sobre emisiones puede tener un impacto global en la protección ambiental.

La necesidad de encontrar combustibles alternativos surge de la problemática del uso de hidrocarburos como la gasolina y el diésel en el transporte, responsables del 15% de las emisiones de gases de efecto invernadero [10]. Además, al ser derivados del petróleo, son recursos no renovables.

Según la Organización de las Naciones Unidas, las energías renovables son aquellas que se reponen más rápidamente de lo que se consumen, como la luz solar y el viento. La energía solar, por ejemplo, llega a la Tierra aproximadamente 10,000 veces más rápido de lo que la humanidad la utiliza. También existen otras fuentes como la energía eólica, geotérmica, hidroeléctrica y la bioenergía, esta última generada a partir de diversos materiales orgánicos, incluidos los biocombustibles líquidos obtenidos de cultivos agrícolas [11].

3.2. Justificación y uso de los resultados

El cambio climático se ve agravado por el considerable aumento en la producción mundial de combustibles fósiles, los cuales representan la principal fuente de emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Además, uno de los desafíos futuros es el agotamiento de estos recursos [12], ya que los combustibles fósiles son finitos y limitados, mientras que la demanda energética global sigue en aumento debido al crecimiento de la población, el desarrollo económico y la urbanización.

Se estima que la población mundial alcanzará los 9,700 millones de personas y, con ello, aumentará la demanda energética [13]. Las necesidades de aceites fósiles no renovables siguen creciendo diariamente, dada la fuerte dependencia que existe para diversas actividades, como la generación de energía eléctrica, la industria y el transporte. A nivel mundial, el consumo de petróleo, gas natural y carbón ha incrementado, lo que también ha provocado un aumento en la emisión de gases de efecto invernadero, como el CO₂.

Las proyecciones de un modelo FAC (Factor de Aumento del Carbono) para estimar los niveles futuros de CO₂ atmosférico indican que estos podrían oscilar entre 453 ppm y 632 ppm para el año 2076 [14]. Por lo tanto, es fundamental que tanto los investigadores como los fabricantes de automóviles trabajen en el desarrollo de motores más limpios, al mismo tiempo que se busquen combustibles alternativos capaces de ofrecer un rendimiento igual o superior al de los actuales.

Al concluir esta investigación, se obtendrá información valiosa sobre las emisiones generadas por distintas mezclas de gasolina y bioetanol, lo cual permitirá determinar si su uso es sustentable.

Estos resultados podrían aportar beneficios en los siguientes aspectos:

- **Económico:** reducción en los costos de combustible.
- **Técnico:** mejora en el rendimiento de los motores.
- **Ambiental:** disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 40 % y un 90 %.
- **Sanitario:** reducción de partículas suspendidas en el aire.
- **Energético:** prevención de una futura crisis energética.

Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 40 % y un 90 % implicaría una menor producción de ozono troposférico y partículas suspendidas, responsables de enfermedades respiratorias, incluyendo el cáncer de vías respiratorias. En este contexto, el hidrógeno se presenta como el elemento más abundante en el planeta y nuestra mejor opción para reemplazar a la gasolina [15].

3.3. Objetivo General

Evaluar las emisiones de un automóvil mediante la mezcla óptima de gasolina-bioetanol, que ofrezca mejor rendimiento de combustible y menores emisiones, manteniendo una eficiencia de combustión y potencia en un motor de encendido por chispa.

3.4. Objetivos Específicos

- Caracterizar el MCI utilizando diferentes mezclas de gasolina, bioetanol.
- Diseñar y manufacturar un dispositivo para la inyección de las mezclas.
- Diseñar experimentos para optimizar la evaluación energética del MCI utilizando diferentes combinaciones (gasolina/bioetanol).
- Implementar el diseño experimental para la optimización energética.
- Evaluar el consumo de combustible y las emisiones producidas por la combustión de las mezclas.
- Redactar un artículo científico.
- Divulgar los resultados de la investigación en Foros, Congresos y Seminarios.

3.5. Hipótesis

- **H1:**El uso de una mezcla de gasolina-bioetanol permitirá una disminución de emisiones de hasta un 20 %, en comparación con el uso de gasolina pura en un motor de combustión interna con encendido por chispa.
- **H2:**El uso de dicha mezcla también permitirá una disminución del consumo de combustible de hasta un 10 %, manteniendo o incluso incrementando la potencia del motor en hasta un 5 %

En la investigación de M.A.S. Al-Baghdadi se analizó un motor monocilíndrico de cuatro tiempos con carburador, utilizando mezclas de hidrógeno y etanol en proporciones del 2, 4, 6, 8, 10 y 12 % en masa, evaluando la potencia del motor, el consumo de combustible y las emisiones de CO y NOx [16].

De forma similar, se realizarán pruebas con un motor ECOTEC de 2.2 litros de combustión interna, de cuatro cilindros y encendido por chispa, con sistema de inyección electrónica, montado en un banco de pruebas. Se analizarán las emisiones generadas por la combustión de mezclas de gasolina-bioetanol.

El estudio será de tipo experimental, con ensayos controlados y aleatorizados. Se realizará un análisis factorial para determinar la mezcla más eficiente en términos de emisiones y costo de producción. Para definir los niveles de las muestras, se tomarán en cuenta las limitaciones de las mezclas. Las combinaciones más comunes de gasolina con bioetanol son E10 y E85, por lo que se realizaron las pruebas con gasolina pura, E20, E40, E60, E80.

Variables del experimento:

- **Independientes:**Composición del combustible (proporción de gasolina, bioetanol)
- **Dependientes:**Emisiones generadas (CO₂, CO, NO_x, SO₂, O₂), consumo de combustible, temperatura del motor.

Se utilizará el analizador de gases **ENERAC 700**, el cual permite medir:

- Temperatura ambiente: 0–66 °C (resolución de 1 °C)
- Temperatura de gases de escape: 0–1100 °C (resolución de 1 °C)
- Oxígeno: 0–25 %
- Óxidos de nitrógeno: 0–5000 ppm
- Hidrocarburos: 0–30,000 ppm
- Monóxido de carbono: 0–15 %
- Dióxido de carbono: 0–20 %

La sonda de medición se colocará en la tubería de escape después del catalizador. También se recopilarán datos sobre condiciones ambientales (temperatura, humedad) y parámetros operativos del motor (temperatura de operación, consumo de combustible).

3.6. Antecedentes

3.6.1. Bioenergía y Biomasa

Son todas las formas de energía asociadas con la fotosíntesis, que han sido utilizadas desde la era Paleolítica(2,500,000-10,000 años A.C.) para cocinar, calentar e iluminar.

La quema de madera fue suficiente para producir calor y luz hasta la revolución industrial (1760 D.C.), en ese entonces el 80 % a 84 % de la energía utilizada dependía de las fuentes fósiles (petróleo, carbón mineral y gas natural), estas fuentes de energía no renovables son escasas, con una duración estimada de 57 años (petróleo), 49 años (gas natural) y 139 años (carbón).

Esta problemática generó la necesidad de buscar nuevas fuentes de energía de la conversión de biomas en electricidad (gasificación y pirólisis) y combustibles líquidos (bioetanol, biodiésel y bioaceite de pirólisis). El almacenamiento anual de biomasa equivale de tres a cuatro veces la demanda energética global actual, lo que representa un sustituto sostenible de los derivados del petróleo, se estima que los cultivos energéticos serán responsables del 30 % de la energía requerida a nivel mundial para el año 2050. Por lo tanto estos cultivos deben tener un alto rendimiento, bajo consumo energético, un alto contenido de compuestos orgánicos de interés (almidón, azúcares y lípidos), pocos productos químicos contaminantes y bajos requerimientos nutricionales [17].

3.6.2. Primeros usos del bioetanol como combustible

El uso de bioetanol como combustible en motores se remonta a finales del siglo XIX en 1876 cuando Nicolaus Otto lo empleó en un motor de combustión interna, de igual manera el primer coche producido por Henry Ford en 1896 era capaz de utilizar bioetanol puro como combustible, y en 1908 el modelo T de ford era un vehículo flexible capaz de funcionar con una mezcla de gasolina y bioetanol [18].

En la década de 1970 Brasil se vio con la necesidad de reemplazar los combustibles fósiles debido a la crisis del petróleo, en la actualidad se realizó una comparativa operacional de la huella de carbón de los vehículos eléctricos, de bioetanol y gasolina, que demostró en segundo lugar a los coches capaces de utilizar bioetanol [19].

El uso intensivo de bioetanol de caña de azúcar en Brasil comenzó en 1975 con la creación del programa nacional del alcohol (PROALCOOL), el cual promovió la producción a gran escala de bioetanol mediante incentivos gubernamentales. Su objetivo era sustituir el uso de gasolina en los vehículos y reducir los impactos económicos y ambientales. El porcentaje promedio de uso de bioetanol en Brasil, en términos de energía en los últimos 10 años es de alrededor del 35% como se muestra en la siguiente figura de la energía primaria total de los vehículos livianos en el cual se utilizaron en términos de bioetanol un total de E50 y E100 de la energía utilizada [20].

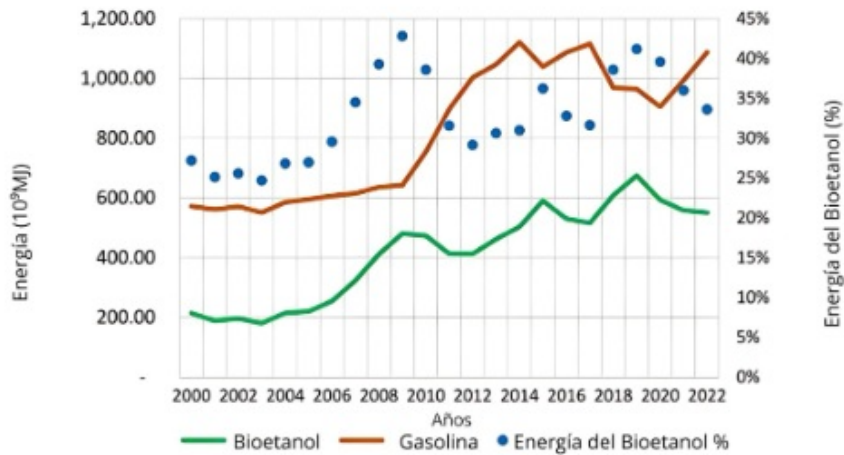


Figura 1: Porcentaje de energía de Bioetanol en Brasil

3.6.3. Bioetanol a nivel internacional

Como principal biocombustible, la producción de bioetanol está experimentando un crecimiento exponencial y es un mercado maduro con tres grandes áreas geográficas que actualmente dominan la cadena de valor que son: Estados Unidos, Brasil y la Unión Europea. Los líderes mundiales en la producción de bioetanol en 2020 fueron Estados Unidos, producido a partir de maíz (53%) , seguido de Brasil a partir de caña de azúcar (melaza, jugo y jarabe) (30%), la Unión Europea (5%), China (3%), India (2%), Canadá (2%), Tailandia (2%), Argentina (1%) y el resto del mundo (2%), utilizando trigo o remolacha de azucarera [21].

El sector del transporte a nivel mundial es actualmente responsable de aproximadamente el 25 % de las emisiones de gases de efecto invernadero y de alrededor del 35 % del consumo de energía. Es por eso que estos países tomaron la iniciativa de combinar los biocombustibles con combustibles fósiles, utilizando el bioetanol como mezcla principal, los programas más populares son E5 (Reino Unido), E10 (Unión Europea), E15 (Estados Unidos) y E25 a E100 (Brasil). Por lo tanto, como se puede observar en Brasil es el país donde más se utiliza el bioetanol hasta llegar a una mezcla de 100 % de biocombustible para motores a base de bioetanol [21].

El bioetanol en Australia se produce a partir de residuos de almidón de trigo, melaza derivada de la caña de azúcar y grano de sorgo. La red general de suministro de bioetanol en Australia se muestra en la siguiente figura. El bioetanol producido en las biorrefinerías se utiliza tanto para propósitos generales como para su mezcla en combustibles fósiles, especialmente gasolina, para ser consumido en vehículos, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero [22].

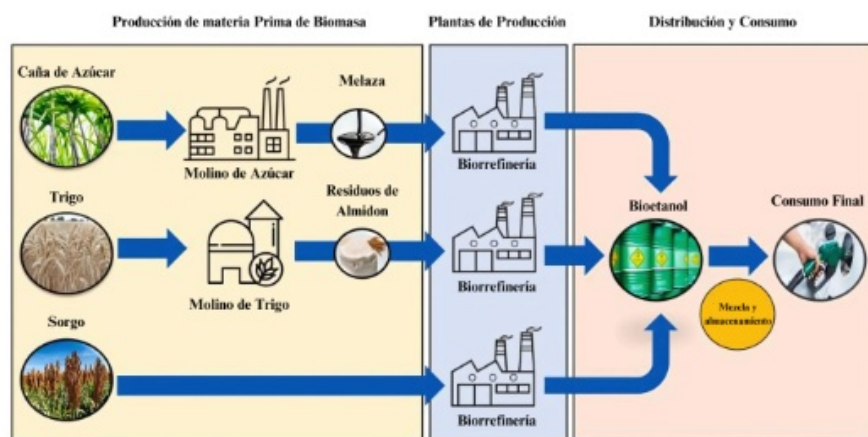


Figura 2: Estructura de la cadena de suministro de bioetanol en Australia

En términos de capacidad, las biorrefinerías australianas tienen el potencial de producir 440 millones de litros por año, con 300, 80 y 60 millones de litros provenientes de residuos de almidón de trigo, melaza y granos de sorgo, respectivamente [22].

En África, se estima que en las zonas rurales de Ghana podrían producir anualmente 623.84 PJ de bioenergía (proveniente de residuos agrícolas, especialmente de cáscara de cacao, maíz, coco, maní, arroz, ñame, malanga, caña de azúcar y sorgo), lo que equivale a 19.781 MW. Se estima que la cantidad total de residuos agrícolas disponibles para biorrefinerías es de 102.256 Gt en peso fresco, equivalente a 62.117 Gt en peso seco. El análisis del artículo “The future of clean energy: Agricultural residues as a bioethanol source and its ecological impacts in Africa” abarcó 87 cultivos, destacándose las cáscaras de cacao (19%), seguidas de piñas (11%), maíz (10%), sorgo (7%), caña de azúcar (5%) y otros cultivos que conforman el 21% restante. Se proyecta que la producción anual de bioetanol a partir de residuos agrícolas superará los 5 Mt, alcanzando una producción neta de 207.127 EJ en África. Uganda es el país con la mayor capacidad de bioetanol con 54.5 EJ, seguido por la República Democrática del Congo (35.36 EJ), Costa de Marfil (19.13 EJ), Tanzania (17.71 EJ) y Nigeria (14.91 EJ). Además Ghana, Camerún, Ruanda, Angola, Burundi y Guinea también tienen contribuciones importantes. La producción total de electricidad a partir de biorrefinerías es de 18.0503 EJ, equivalente a más de 5 billones de kWh, lo que representa el 8.016% de la producción neta de bioetanol. El potencial de producción de bioetanol en África es significativo en comparación con el consumo de petróleo en el sector del transporte, que fue de aproximadamente 190 Mt o 7.95 EJ en 2019. Esto sugiere que el bioetanol podría reducir la dependencia de los combustibles fósiles en este sector [23].

En Indonesia se proyecta que para el 2050 los requerimientos de energía alcanzarán los 2.9 mil millones de barriles de petróleo equivalente, con una tasa de crecimiento anual promedio del 2.8%. La producción de paja de arroz ascendió a 81.38 millones de toneladas en 2017, con una producción energética estimada de 244.15 GJ. La paja de arroz es un residuo agrícola abundante que requiere una gestión adecuada. Su eliminación inadecuada puede causar contaminación ambiental a través de la quema en los campos. Sin embargo la paja de arroz tiene potencial como materia prima para la producción de bioetanol debido a su alto contenido de celulosa y hemicelulosa, lo que permite su hidrólisis en azúcares fermentables. La paja de arroz contiene un 27.2% de hemicelulosa, un 38.7% de celulosa, un 3.2% de lignina y un alto poder calorífico de 14.08 a 15.09 MJ kg⁻¹. El bioetanol puede producirse mediante el pretratamiento de la paja de arroz y la posterior fermentación microbiana. El cálculo de la disponibilidad potencial de la paja de arroz como materia prima para bioetanol se calcula a partir de la serie de datos temporales sobre las áreas de cosecha de arroz, maíz y soja entre 2018 y 2022 en el distrito de Karanganyar y la provincia de Java Central. Se calcula a partir de la producción promedio de paja de arroz por hectárea, que es de 9.77 toneladas métricas por hectárea, según lo informado por la fuente de datos primaria en 2022. La disponibilidad potencial de paja de arroz se obtiene multiplicando el área anual de cosecha de arroz en hectáreas por 9.77 toneladas de paja de arroz por hectárea. El 28.12% de los residuos de paja de arroz que se desechan pueden convertirse en una nueva fuente de materia prima para el bioetanol pero la percepción de los agricultores sobre el bioetanol a partir de residuos de paja de arroz es baja debido

a la dificultad percibida en la tecnología de producción, el alto costo de los insumos, la incertidumbre en la cuota de mercado, el elevado precio del bioetanol y los problemas de comercialización [24].

En el estudio “Bioethanol from lignocellulosics: Status and perspectives in Canada” habla que en Canadá la producción de bioetanol actualmente se basa en el maíz y el trigo. El maíz es una materia prima bien adecuada para la producción de bioetanol debido a su relativamente alto contenido de almidón, que representa alrededor del 70 % al 72 % de la masa del grano. Los rendimientos promedio de producción en Canadá entre 2007 y 2009 fueron de 8.7 toneladas métricas por hectárea, lo que corresponde a aproximadamente 6.1 toneladas métricas por hectárea de almidón que puede ser utilizado en el proceso de bioconversión. Los rendimientos promedio de trigo en Canadá entre 2007 y 2009 fueron más bajos, con un valor aproximado de 2.51 toneladas métricas por hectárea, lo que equivale a unos 2.1 toneladas métricas por hectárea de almidón. Otras fuentes potenciales de almidón incluyen el sorgo, la cebada y la avena, que en comparación con el maíz, se cultivan con menos frecuencia y se caracterizan por bajos rendimientos de almidón que varían entre 1.3 y 2.3 toneladas métricas por hectárea. Es evidente que la mayoría de los cultivos de cereales son mucho menos óptimos para la producción de bioetanol en comparación con el maíz, lo que ha generado un gran interés en fuentes alternativas de biomasa lignocelulósica. Se analizaron quince estudios que estiman la disponibilidad de biomasa lignocelulósica en Canadá, se estima que Canadá tiene entre 64 y 561 millones de toneladas secas de este material que podrían estar disponibles para la producción de bioetanol. Es probable que los residuos agrícolas sean las primeras fuentes de materia prima adoptadas, seguidas del uso de residuos de la cosecha forestal y finalmente el desarrollo de cultivos energéticos. Un desafío para la industria canadiense es que la dificultad de la bioconversión aumenta a medida que se avanza de los residuos agrícolas a los residuos de madera dura y luego a los residuos de madera blanda. La biomasa de las especies de madera dura tiene más celulosa y menos hemicelulosa que las maderas blandas, lo que significa que con las maderas duras se dispone de mayores cantidades de glucosa para la bioconversión. En comparación con las maderas blandas, la hemicelulosa presente en las maderas duras contiene más xilosa, un azúcar C5 que muestra más potencial que los otros pentosas para su conversión a bioetanol. Químicamente, las maderas blandas tienen una forma más recalcitrante de lignina en la que sólo están presentes dos de las tres unidades principales de fenilpropano. En la lignina de las maderas duras y biomasa herbácea también está presente el grupo siringilo. Esta simplificación de la lignina química en las maderas blandas aumenta la dificultad de la deslignificación de este material, debido a la mayor estabilidad de la lignina en forma condensada cuando se expone a condiciones ácidas. Por estas razones la lignocelulosa en las maderas blandas es el material más desafiante para la bioconversión pero también una posible fuente de bioetanol a futuro en Canadá. En 2008, Canadá produjo aproximadamente 800 millones de litros de bioetanol, lo que representa un aumento del 400 % en comparación con la producción en 2005. Esto corresponde a alrededor del 92 % de la capacidad de producción, se espera que las

nuevas plantas en funcionamiento aumenten la capacidad total de producción aproximadamente 1400 millones de litros por año para finales de 2009. Los biocombustibles representaron el 1.6% del mercado total de combustibles en Canadá por volumen y un porcentaje ligeramente superior por participación energética. La capacidad de producción de bioetanol disponible en ese año puede satisfacer alrededor del 2% de los requisitos de gasolina de Canadá en 2008. Actualmente hay al menos 19 plantas de bioetanol en funcionamiento o planificadas en Canadá, casi toda esta capacidad utiliza maíz o trigo como materia prima. Dos de las 19 plantas están produciendo bioetanol para combustible de transporte utilizando materias primas de lignocelulósicas. Una de estas es operada por Corporación Logen en Ottawa, Ontario y tiene una capacidad de 2 millones de litros de bioetanol por año utilizando paja de trigo como materia prima principal. Enerkem opera una planta en Westbury, Quebec, con una capacidad de 5 millones de litros por año, que utiliza residuos de madera como materia prima. Tembec, una gran empresa de productos forestales en el este de Canadá, también fabrica bioetanol a partir de una materia prima lignocelulósica (licor sulfito gastado de una planta de pulpa sulfito). La capacidad de producción en esta planta es de alrededor de 17 millones de litros por año, pero el bioetanol de esta instalación no se vende actualmente al sector del transporte [25].

En el estudio “ Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of production of bioethanol from sorghum in the United States ” los biocombustibles han sido promovidos como una medida para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el consumo de combustibles derivados del petróleo. La ley de independencia y seguridad energética de 2007, administra el programa de estándares de combustibles renovables con un requisito volumétrico total de 136.3 mil millones de litros de biocombustibles para 2022. Este total incluye 56.8 mil millones de litros de biocombustibles celulósicos, que deben lograr una reducción en las emisiones GEI en el ciclo de vida al menos el 20%, 50% y 60%, respectivamente, en comparación con la gasolina. El bioetanol es actualmente el biocombustible dominante utilizado en el sector del transporte. La industria actual de bioetanol en los Estados Unidos se ha desarrollado para utilizar materias primas con alto contenido de almidón, principalmente maíz, para producir bioetanol. Para cumplir con el requisito volumétrico de la ley de independencia y seguridad energética, se pueden utilizar una variedad de materias primas, que incluyen otros cultivos basados en almidón y azúcar, así como residuos de cultivos (rastrotejo de maíz, paja de trigo,

paja de arroz y paja de caña de azúcar). Las tres variedades de sorgo (grano, dulce y forrajero) han recibido recientemente una mayor atención como materias primas para biocombustibles en Estados Unidos. El grano de sorgo que es tolerante a la sequía, que produce cabezas de semilla que generalmente se cosechan para alimentación animal, es el tipo de sorgo dominante. Este tipo de sorgo se cultiva principalmente en el centro de los Estados Unidos (Kansas, Colorado, Nebraska, Missouri y Dakota del Sur) y en las llanuras del sur (Texas y Oklahoma), sumando un total de 2.53 millones de hectáreas en 2012. Se concluyó que el uso de energía durante el ciclo de vida

y las emisiones de gases de efecto invernadero del bioetanol producido a partir de tres tipos de sorgo en Estados Unidos, las rutas de producción de bioetanol a base de sorgo pueden lograr un ahorro sustancial de energía fósil en comparación con la gasolina. La producción de bioetanol a base de grano de sorgo que utiliza gas natural fósil como combustible de proceso puede lograr reducciones moderadamente menores de gases de efecto invernadero en relación con la gasolina convencional de referencia en comparación con el bioetanol de maíz. El bioetanol de sorgo dulce logra aproximadamente un 71 % al 72 % de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en todo su ciclo de vida. La adición de materias primas de sorgo a las opciones existentes para la producción de bioetanol podría ayudar a cumplir con los volúmenes requeridos de etanol renovable, avanzado y celulósico en Estados Unidos, según lo exigido por el programa “The Renewable Fuel Standard” [26].

3.6.4. Producción de Bioetanol

Desde hace tiempo se ha buscado una solución a la seguridad energética, al agotamiento de las fuentes de energía convencionales como el carbón, petróleo y el gas natural, la crisis de los combustibles y el aumento general de la demanda de energía han impulsado la búsqueda de nuevas fuentes [27].

Una de las ventajas del bioetanol con respecto a los combustibles fósiles es su producción a partir de materias primas agrícolas como la caña de azúcar [28], cereales, remolacha, maíz, uva, otra de las ventajas es que durante su procesamiento se puede producir energía eléctrica, si bien existe cierto impacto a la tierra, el agua utilizada y otros componentes de la huella de carbono así como distintos residuos, es mucho menor el impacto que taladrar pozos petroleros y mucho menor riesgo de derrame durante el transporte.

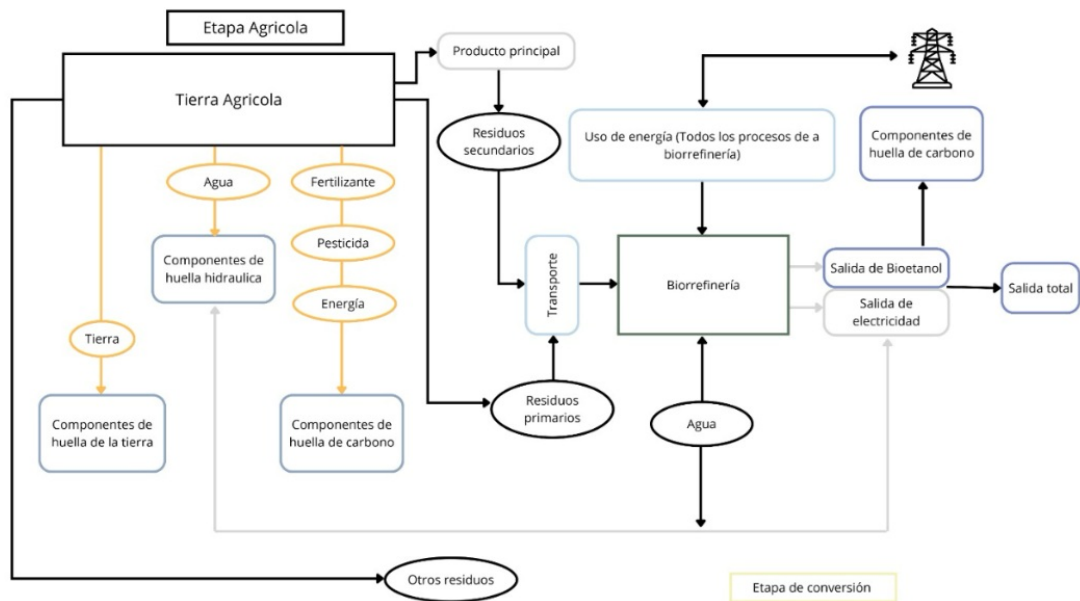


Figura 3: Producción de bioetanol

Una de las maneras de utilizar el bioetanol es como aditivo a la gasolina. Entre las mezclas más comunes se encuentra el E5,E10,E15 [21]. La mayor parte del bioetanol se obtiene de la fermentación de azúcares, existen diferentes materias primas para la producción de bioetanol pero lo más usual es el uso de maíz y caña de azúcar, ya que la producción de azúcares esta comprobada en comparación con otros procesos.

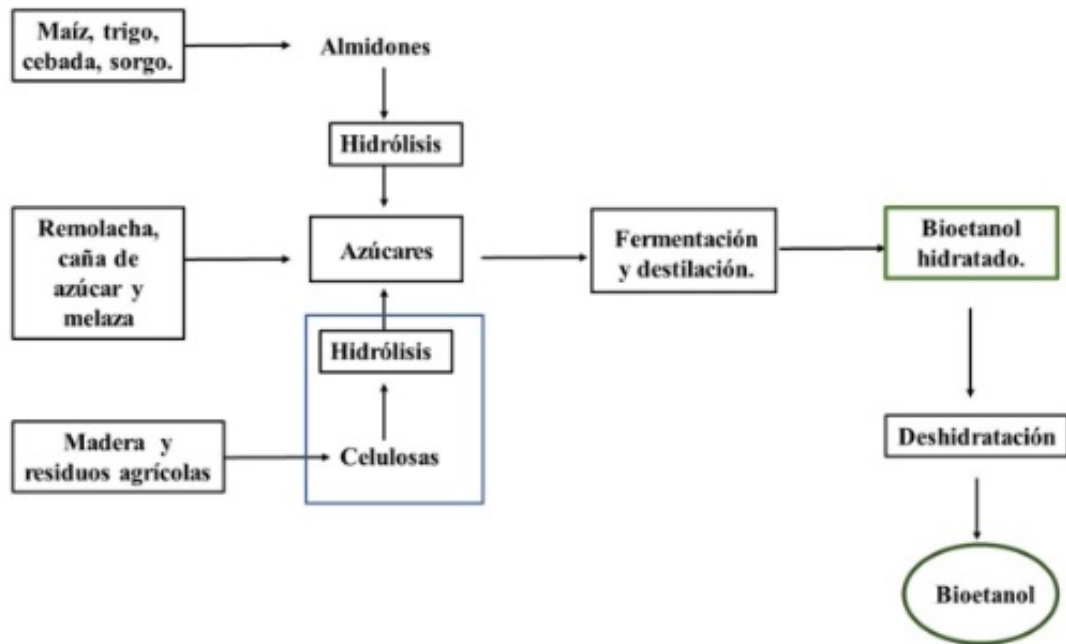


Figura 4: Proceso convencional de producción de bioetanol

3.6.5. Bioetanol a partir de caña de azúcar

La sociedad moderna depende en gran medida de los hidrocarburos derivados del petróleo como combustible para el transporte. Por esta razón, la matriz energética del sector transporte está compuesta por aproximadamente un 25% de fuentes renovables, debido a la participación de los biocombustibles, especialmente el bioetanol de caña de azúcar, que representa alrededor del 43% del consumo de vehículos ligeros. Sin embargo, existe un creciente interés en desarrollar nuevas fuentes y procesos para la producción de biocombustibles, siendo el bioetanol a partir de la caña de azúcar uno de los más prometedores. El bioetanol es un biocombustible que se obtiene a partir de la fermentación de carbohidratos, principalmente por la acción de la levadura del pan. Este proceso convierte los azúcares presentes en la biomasa en etanol [29]

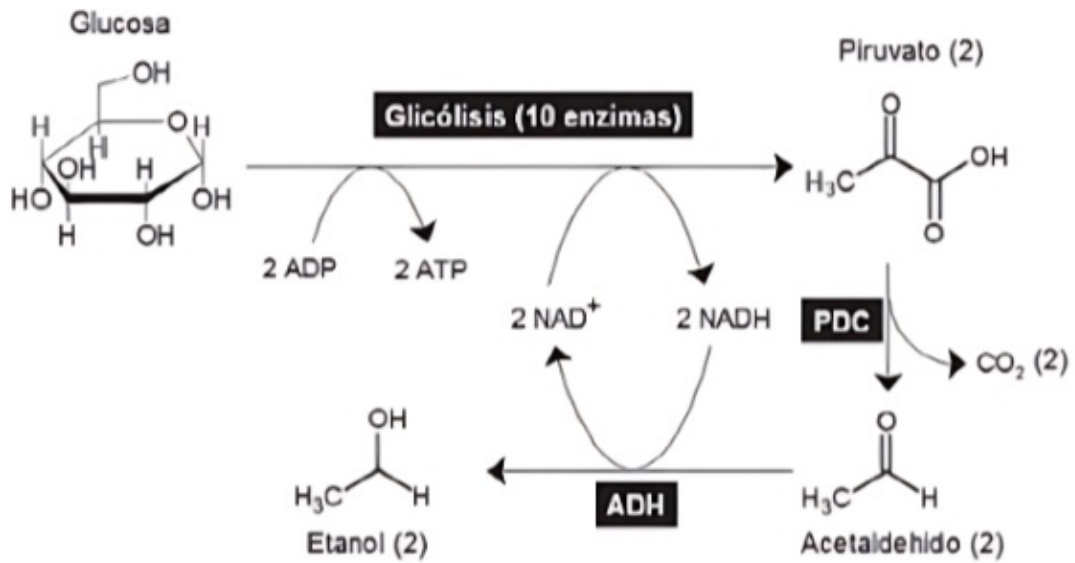


Figura 5: La glicólisis y la fermentación son las rutas metabólicas por las que se sintetiza el bioetanol en la levadura de pan

Por ello, la caña de azúcar se destaca como una fuente versátil, ya que permite obtener bioetanol tanto a partir de sus azúcares fácilmente fermentables como de los compuestos estructurales presentes en sus residuos. Mientras que los azúcares simples y el almidón se utilizan en procesos convencionales, las tecnologías más avanzadas emplean la celulosa y la hemicelulosa. La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es un cultivo utilizado para la producción de azúcar como de bioetanol, ambos con comportamientos de precio inestables. El estudio “La Bioeconomía, las Bio-refinerías y las opciones Reales: El caso del Bioetanol y el Azúcar” demuestra que una biorefinería polivalente, capaz de modificar la proporción de producción entre azúcar (53%) y bioetanol (65%), es más rentable y menos riesgosa que una monovalente [30].

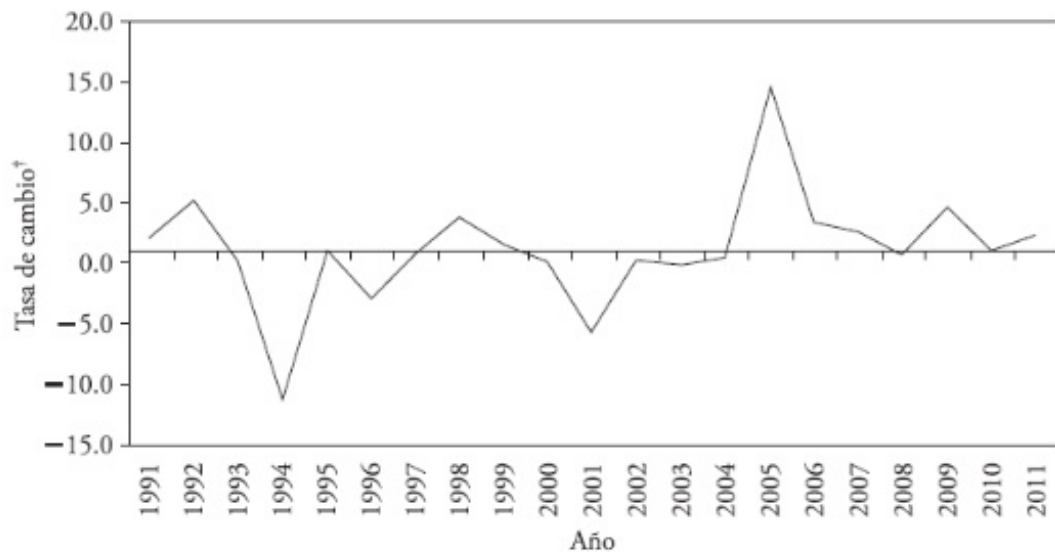


Figura 6: Cambio del precio relativo del azúcar y del bioetanol en el transcurso de los años 1991 al 2011

México es uno de los principales productores de caña de azúcar a nivel mundial [31]. La producción de bioetanol en México, como oxigenante de la gasolina, tiene una demanda potencial de 3 mil millones de litros anuales, que se busca cubrir principalmente con caña de azúcar, aunque actualmente solo se producen 40 millones de litros por año. Para atender esta necesidad, el estudio propone la reconversión de ingenios azucareros a biorrefinerías. Se analizaron tres configuraciones: E0, E50 y E100. Las simulaciones consideran una capacidad de 1.3 millones de toneladas de caña de azúcar cada año. El bioetanol producido es anhidro al 99.6 %, con una eficiencia de fermentación del 90 % para el jugo de caña de azúcar y del 86 % para la melaza, alcanzando un rendimiento máximo de 77 litros de bioetanol por tonelada de caña de azúcar en la configuración E100. En términos de sostenibilidad, la configuración E50 y E100 fueron la opción más favorable ambientalmente, ya que generan más energía y sustituye en mayor medida o por completo a los combustibles fósiles [32].

3.6.6. Ciclo del CO₂ al utilizar bioetanol

Los combustibles alternativos derivados de la biomasa son importantes debido a su neutralidad de carbono por producir una combustión más limpia, desde la perspectiva del ciclo del carbono, el dióxido de carbono (CO₂) producido por la combustión de combustibles fósiles se liberan a la atmósfera de manera lineal sin reciclarse, mientras que al utilizar bioetanol el CO₂ generado durante la combustión es reabsorbido para el crecimiento de las plantas utilizadas como materia prima [33].

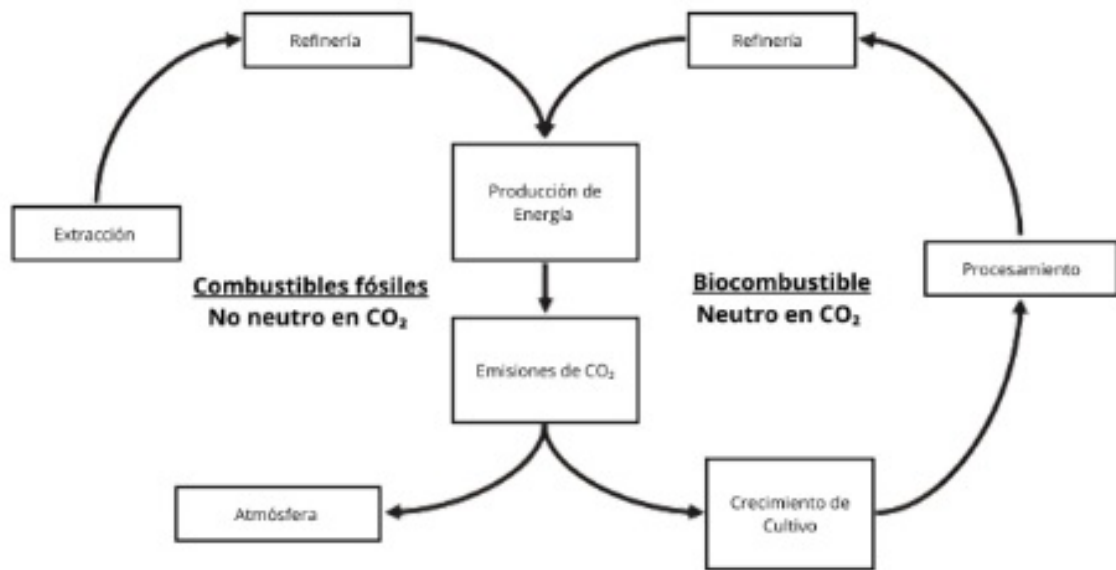


Figura 7: Comparación de las transformaciones del CO₂ de los combustibles fósiles vs biocombustible.

3.6.7. Ventajas del bioetanol sobre el petróleo

- Cumple con las necesidades energéticas a largo plazo de manera sostenible.
- Mantiene un balance en las emisiones de CO₂.
- Ofrece flexibilidad en su producción [34]
- Al utilizarlo como aditivo (E10) puede aumentar hasta 5 % la potencia de los motores.
- Puede reducir hasta 30 % del monóxido de carbono de las emisiones [35].

3.6.8. Bioetanol en México

En México la producción de energía renovable es considerablemente baja en comparación a otros países, ya que es fundamentalmente hidráulica, solar y eólica, y hasta el momento la producción comercial de biocombustibles a partir de cultivos agrícolas o forestales. La producción de energía primaria en México en el año 2004 estaba altamente concentrada en los hidrocarburos, del total de la energía producida, más del 90 % está basada en los hidrocarburos, dividida de esta manera: petróleo crudo 72 %; gas asociado 11.5 %; gas no asociado 5.5 % y condensados 1.7 % [36]

A raíz de esto se han buscado nuevas formas de cuidar el medio ambiente creando nuevas reformas energéticas y buscando nuevas fuentes de energía, una de las soluciones más prometedoras para la reducción de los gases de efecto invernadero es el uso del bioetanol a partir del maíz, sorgo, cebada, caña de azúcar y trigo [37].

3.7. Espectroscopía Infrarroja por transformada de fourier

La Espectroscopía infrarroja por transformada de fourier (FT-IR) sirve para obtener información sobre la estructura molecular de una muestra, identificando los grupos funcionales presentes y, en algunos casos, cuantificando su concentración [39].

3.7.1. Principales Ventajas

- **Identificación de componentes:** permite identificar compuestos químicos en una muestra, comparando el espectro de absorción infrarroja con base en datos de espectros conocidos.
- **Análisis de la estructura molecular:** al examinar la absorción de luz infrarroja por una muestra, la FTIR revela información sobre las vibraciones y enlaces dentro de las moléculas, proporcionando información sobre su estructura.
- **Cuantificación de componentes:** la FTIR puede utilizarse para cuantificar la concentración de un componente en una muestra.
- **Aplicaciones Diversas:**
 - **Química:** análisis de reacciones químicas, identificación de productos y subproductos.
 - **Biología:** estudio de proteínas, ADN, y otros biomateriales.
 - **Industria:** control de calidad en productos farmacéuticos, alimentos, y otros productos
 - **Análisis ambiental:** determinación de contaminantes en el aire, agua, y suelo.
 - **Ciencia de los materiales:** Análisis de plásticos, polímeros, y otros materiales.

3.8. Análisis FT-IR de Mezclas Etanol-Gasolina

3.8.1. Análisis de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR) en Mezclas Etanol-Gasolina

Se prepararon ocho mezclas con diferentes proporciones de etanol (E) y gasolina (G), que van desde etanol puro (E 100 %) hasta gasolina pura (G 100 %). Las mezclas intermedias incluyeron proporciones de E:G de 80:20, 60:40, 40:60, 20:80, 10:90 y 5:95. A cada mezcla se le realizó un análisis espectroscópico mediante FT-IR, mostrado en la figura 8 y 9, registrando las bandas de absorción características para identificar los grupos funcionales predominantes y su evolución con respecto a la composición de la mezcla.

3.8.2. Señales características de etanol

En las mezclas con alta proporción de etanol (E 100 %, 80 % y 60 %), se observó una banda ancha e intensa en 3326.83 cm^{-1} , correspondiente al estiramiento (stretching) O-H del grupo hidroxilo, típico de alcoholes. Esta banda es una firma clara de la presencia de etanol y disminuye progresivamente su intensidad conforme disminuye su proporción en la mezcla. En la mezcla con 20 % de etanol, esta señal es apenas perceptible, y en las mezclas con menor contenido (10 % y 5 %), así como en la gasolina pura, prácticamente desaparece.

Adicionalmente, se observan señales asociadas a los estiramientos de los enlaces C-H del grupo etilo. En particular:

- 2985.0 y 2973.87 cm^{-1} : Estiramiento asimétrico C-H ($-\text{CH}_3$ y $-\text{CH}_2-$)
- 2883.87 y 2871.0 cm^{-1} : Estiramiento simétrico C-H

Estas bandas también tienden a reducirse en intensidad conforme disminuye la proporción de etanol en la mezcla.

La región de 1087.59 cm^{-1} y 1021.88 cm^{-1} es atribuida a la vibración de estiramiento C-O del etanol. Estas señales, al igual que la del grupo O-H, desaparecen progresivamente a medida que disminuye el contenido de etanol.

3.8.3. Señales características de gasolina

A medida que se incrementa la proporción de gasolina en las mezclas, aparecen con mayor claridad bandas asociadas a hidrocarburos aromáticos y alifáticos presentes en la gasolina. Por ejemplo:

- 1607.98 cm^{-1} : Estiramiento C=C aromático, muy característico de compuestos como benceno y sus derivados.

- 1457.24 y 1380.41 cm^{-1} (así como 1377.48 cm^{-1}): Flexión de los grupos metilo y metileno ($-\text{CH}_3$ y $-\text{CH}_2-$), correspondientes a vibraciones de deformación.
- 1274.48 – 1328.52 cm^{-1} : Bandas asociadas a vibraciones de flexión C–C y C–H en alcanos.
- Región de 879.88 a 698.3 cm^{-1} (incluyendo señales en 835.14, 806.04, 804.01, 767.79, 742.00): Deformaciones fuera del plano (out-of-plane bending) de enlaces C–H en compuestos aromáticos. Estas señales son débiles o inexistentes en las mezclas con predominancia de etanol, pero aumentan significativamente en intensidad conforme la proporción de gasolina incrementa, siendo especialmente prominentes en la muestra G 100 %.

Una señal adicional observada en 2162.51 cm^{-1} podría corresponder a un estiramiento C–C o C–N (aunque inusual, podría deberse a trazas de compuestos presentes en la gasolina comercial o impurezas del etanol).

3.8.4. Tendencias Observadas

El análisis comparativo entre los espectros muestra una transición progresiva en el perfil espectral conforme cambia la proporción de etanol y gasolina. En particular:

- Las bandas asociadas al grupo hidroxilo (3326.83 cm^{-1}) y al enlace C–O (1087.59 cm^{-1} y 1021.88 cm^{-1}) son indicadores directos de la presencia de etanol, desapareciendo conforme disminuye su concentración.
- Las bandas características de compuestos aromáticos y alifáticos (especialmente en 1607.98 cm^{-1} y entre 800–700 cm^{-1}) aumentan en intensidad con el incremento de la proporción de gasolina.

Este comportamiento es coherente con la naturaleza química de ambos compuestos: el etanol, un alcohol de cadena corta, presenta vibraciones asociadas al grupo $-\text{OH}$ y enlaces C–O, mientras que la gasolina, una mezcla compleja de hidrocarburos, muestra principalmente señales relacionadas con enlaces C–H y C=C en compuestos aromáticos.

En este estudio se analizaron espectros de absorción infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) de ocho mezclas de etanol comercial (E) y gasolina comercial (G), con proporciones que van desde etanol puro (E 100 %) hasta gasolina pura (G 100 %). Se observó cómo cambian las señales características en función de la proporción de etanol y gasolina, destacando la desaparición progresiva de las señales asociadas al etanol y la aparición creciente de señales características de la gasolina.

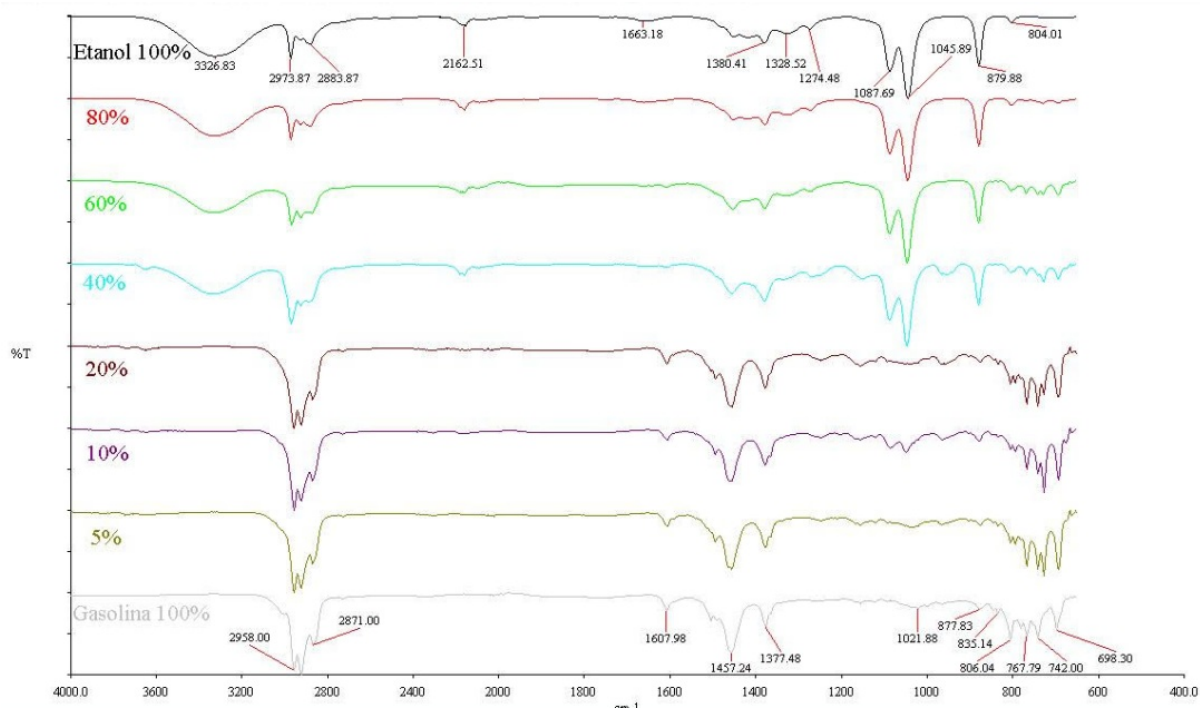


Figura 8: Resultados de la FT-IR

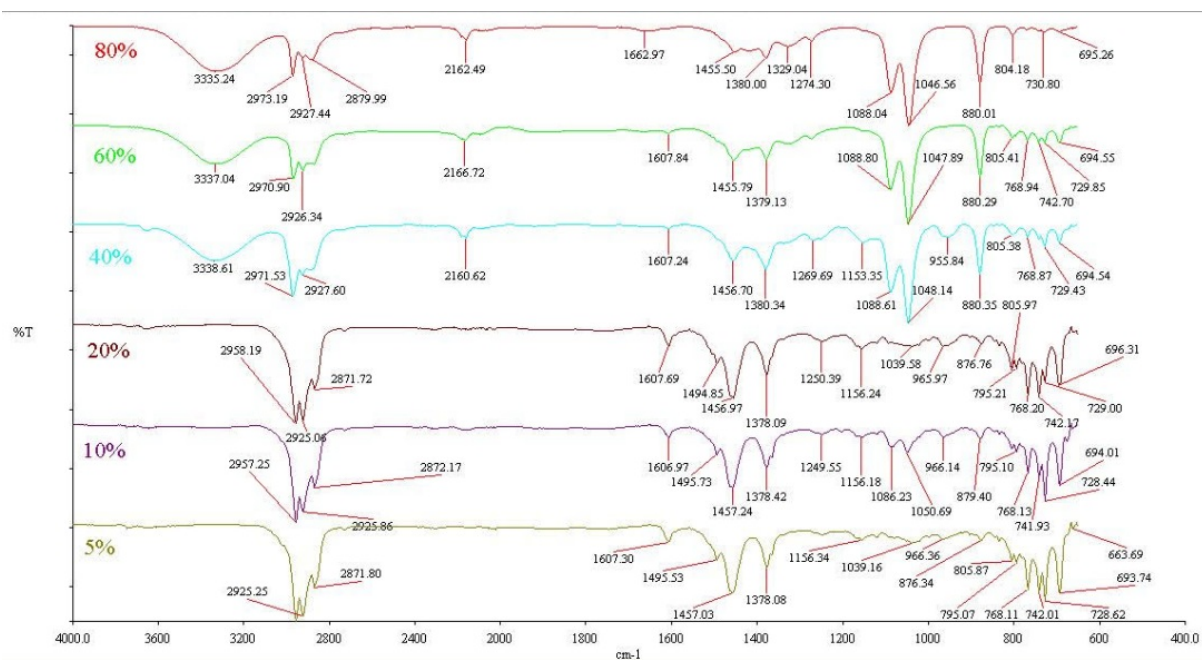


Figura 9: Resultados de la FT-IR con valores de frecuencias

3.8.5. Tabla de asignaciones vibracionales para mezclas etanol-gasolina

Número de onda (cm ⁻¹)	Asignación vibracional	Tipo de vibración	Componente dominante	Observaciones
3326.83	Estiramiento O-H	Estiramiento amplio	Etanol	Intensa en etanol puro; desaparece con gasolina
2985.0	Estiramiento C-H (-CH ₃)	Asimétrico	Etanol/Gasolina	
2973.87	Estiramiento C-H (-CH ₂ -)	Asimétrico	Etanol/Gasolina	
2883.87	Estiramiento C-H (-CH ₃)	Simétrico	Etanol	
2871.0	Estiramiento C-H (-CH ₂ -)	Simétrico	Etanol	
2162.51	C≡C o C≡N	Estiramiento triple enlace	Gasolina (trazas)	
1663.18	C=C o contaminantes carbonílicos	Estiramiento	Gasolina (trazas)	
1607.98	C=C aromático	Estiramiento	Gasolina	Aumenta con gasolina
1457.24	Flexión CH ₂ y CH ₃	Deformación	Ambos	
1380.41	Flexión CH ₂	Deformación simétrica	Ambos	
1377.48	Flexión CH ₃	Deformación	Ambos	
1328.52	C-C o C-H alifático	Flexión	Gasolina	
1274.48	C-C o C-H alifático	Flexión	Gasolina	
1087.59	Estiramiento C-O	Estiramiento	Etanol	Disminuye con gasolina
1021.88	Estiramiento C-O	Estiramiento	Etanol	Disminuye con gasolina
879.88	Deformación fuera del plano (C-H arom.)	Bending fuera del plano	Gasolina	
877.83	Deformación fuera del plano (C-H arom.)	Bending fuera del plano	Gasolina	
835.14	Deformación fuera del plano (C-H arom.)	Bending fuera del plano	Gasolina	
806.04	Deformación fuera del plano (C-H arom.)	Bending fuera del plano	Gasolina	
804.01	Deformación fuera del plano (C-H arom.)	Bending fuera del plano	Gasolina	
767.79	Deformación fuera del plano (C-H arom.)	Bending fuera del plano	Gasolina	Intensa en gasolina pura
742.0	Deformación fuera del plano (C-H arom.)	Bending fuera del plano	Gasolina	
698.3	Deformación fuera del plano (C-H arom.)	Bending fuera del plano	Gasolina	Intensa en gasolina pura

Figura 10: Asignaciones vibracionales para mezclas etanol-gasolina

Dichas asignaciones se pueden observar de manera clara en las figuras 8 y 9.

4. Metodología

4.1. Etapas de la Metodología

- Revisión de antecedentes con enfoque a la utilización del bioetanol
- Diseño de banco de pruebas.

Se propuso la utilización de un banco de pruebas (Figura 11) para mantener bajo control el mayor número de variables y realizar repetidas pruebas en el mismo lugar, se trabajó con un motor Chevrolet Ecotec 2.2 litros, este motor se inspeccionó previamente y cumplió con las tolerancias de su fabricante, por lo que se preparó con un empaque de cabeza nuevo y se relleno con refrigerante y aceite nuevos, cabe resaltar que este motor durante su vida utilizó gasolina como combustible y presentaba carbonización en componentes como pistones, válvulas y admisión, se realizó un esfuerzo por limpiar las superficies y dejarlo en las mejores condiciones posibles.

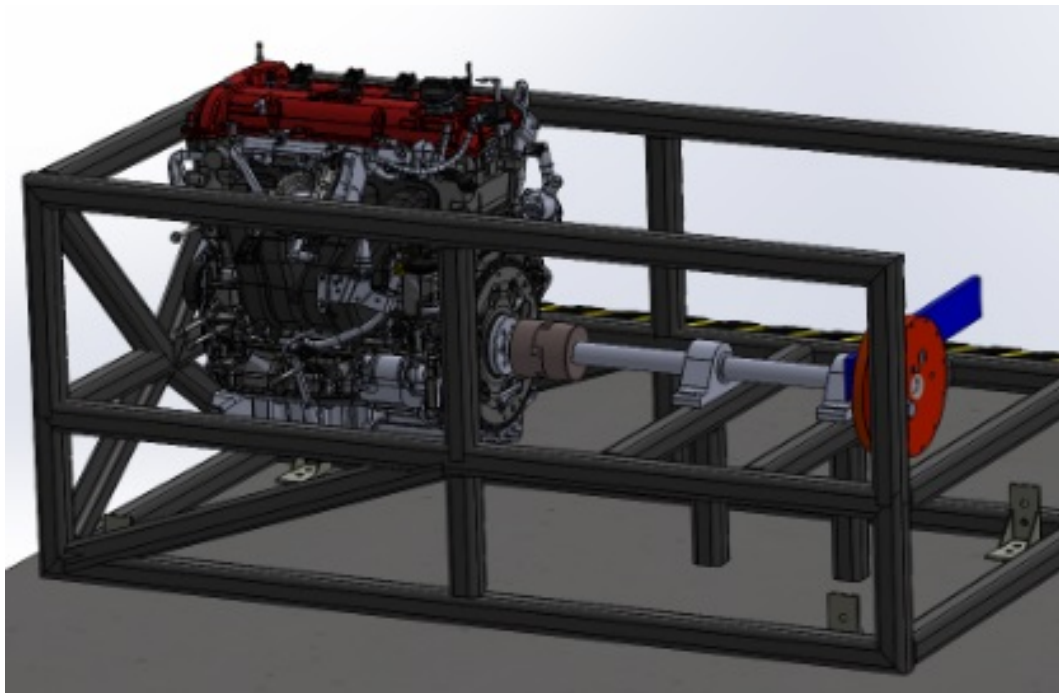


Figura 11: Prototipo de Banco de pruebas en Solidworks

- Desarrollo de sistema de inyección de bioetanol.

La inyección de bioetanol funciona idénticamente a la de gasolina, pero se debe adecuar la cantidad de combustible a inyectar según el porcentaje de bioetanol que contenga para cumplir con la estequiometría del combustible, por lo que se instaló una computadora EflexFuel (Figura 12) que se encarga de corregir la inyección a partir de un sensor de bioetanol en la línea de combustible.



Figura 12: Computadora Eflexfuel

- Optimización de mezclas de combustible.
Para realizar las pruebas y tener una idea clara de lo que sucede al aumentar el porcentaje de bioetanol en el combustible se eligió trabajar con 0, 20, 40, 60, 80 por ciento para poder comparar los resultados contra lo convencional.
- Análisis de resultados mediante diseño factorial de experimentos.

El diseño de experimentos es una metodología sistemática que se utiliza para evaluar y optimizar procesos o productos, identificando los factores que más influyen en el resultado y cómo ajustar sus niveles para obtener los mejores resultados mediante el uso de herramientas estadísticas basándose en pruebas controladas donde se manipulan ciertas variables para observar si su efecto es significativo en la variable de interés [38].

Para mi experimento las variables de entrada que se manipularon son las RPM (X1) y el porcentaje de bioetanol en la mezcla de combustible (X2) para evaluar su impacto en las variables de salida: temperatura de escape(Y1), % de oxígeno(Y2), ppm de monóxido de carbono(Y3), % de dióxido de carbono(Y4), ppm de hidrocarburos(Y5), ppm de óxido nítrico(Y6), ppm de dióxido de nitrógeno(Y7), ppm dióxido de azufre(Y9) y el consumo de combustible(Y9), dando como resultado la siguiente matriz de resultados:

Número de corrida	Factores		Salidas								
	RPM (X1)	% Bioetanol (X2)	Temperatura de Escape (Y1)	% de Oxígeno (Y2)	PPM Monóxido de Carbono (Y3)	% de Dióxido de Carbono (Y4)	PPM Hidrocarburos (Y5)	PPM Óxido Nítrico (Y6)	PPM Dióxido de Nitrógeno (Y7)	PPM Dióxido de Azufre (Y8)	Kg de Consumo de Combustible (Y9)
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

Figura 13: Matriz de resultados inicial

Debido a la existencia de las limitaciones del motor, el factor RPM (X1) solo se trabajo en ralentí a 1000 rpm y a 2000 rpm como condiciones de operación moderada, si bien el motor puede trabajar en un rango de 1000rpm a 5000rpm, el sobrecalentamiento a 3000 rpm fue la limitante para no realizar pruebas arriba de 2000 rpm para evitar posibles daños al motor. El porcentaje de bioetanol puede ir desde 0 % que sería gasolina pura, hasta 100 % siendo solo bioetanol, por lo que para cubrir la mayor cantidad de mezclas posibles se hicieron pruebas con 0 %, 20 %, 40 %, 60 % y 80 % de bioetanol, agregando esto a la matriz de resultado queda de la siguiente manera:

Número de corrida	Factores		Salidas								
	RPM (X1)	% Bioetanol (X2)	Temperatura de Escape (Y1)	% de Oxígeno (Y2)	PPM Monóxido de Carbono (Y3)	% de Dióxido de Carbono (Y4)	PPM Hidrocarburos (Y5)	PPM Óxido Nítrico (Y6)	PPM Dióxido de Nitrógeno (Y7)	PPM Dióxido de Azufre (Y8)	Kg de Consumo de Combustible (Y9)
1	1000	0									
2	1000	20									
3	1000	40									
4	1000	60									
5	1000	80									
6	2000	0									
7	2000	20									
8	2000	40									
9	2000	60									
10	2000	80									

Figura 14: Segunda matriz de resultados

Para aumentar la confiabilidad del experimento se decidió realizar una replica de cada ensayo como se muestra en la figura 15, debido a los costos del bioetanol actuales en México y la preparación necesaria antes de cada prueba ya que se debe vaciar la línea de combustible y llenar con la mezcla que pide en ensayo, quedando la matriz de la siguiente manera:

Número de corrida	Factores		Salidas								
	RPM (X1)	% Bioetanol (X2)	Temperatura de Escape (Y1)	% de Oxígeno (Y2)	PPM Monóxido de Carbono (Y3)	% de Dióxido de Carbono (Y4)	PPM Hidrocarburos (Y5)	PPM Óxido Nítrico (Y6)	PPM Dióxido de Nitrógeno (Y7)	PPM Dióxido de Azufre (Y8)	Kg de Consumo de Combustible (Y9)
1	1000	0									
2	1000	20									
3	1000	40									
4	1000	60									
5	1000	80									
6	2000	0									
7	2000	20									
8	2000	40									
9	2000	60									
10	2000	80									
11	1000	0									
12	1000	20									
13	1000	40									
14	1000	60									
15	1000	80									
16	2000	0									
17	2000	20									
18	2000	40									
19	2000	60									
20	2000	80									

Figura 15: Tercera matriz de resultados

Para agregar mayor confiabilidad a los ensayos se aleatorizó el orden de los ensayos, dando finalmente la siguiente matriz a llenar:

Número de corrida	Factores		Salidas								
	RPM (X1)	% Bioetanol (X2)	Temperatura de Escape (Y1)	% de Oxígeno (Y2)	PPM Monóxido de Carbono (Y3)	% de Dióxido de Carbono (Y4)	PPM Hidrocarburos (Y5)	PPM Óxido Nítrico (Y6)	PPM Dióxido de Nitrógeno (Y7)	PPM Dióxido de Azufre (Y8)	Kg de Consumo de Combustible (Y9)
1	2000	80									
2	1000	60									
3	1000	40									
4	1000	80									
5	2000	40									
6	2000	20									
7	1000	0									
8	1000	20									
9	2000	60									
10	2000	20									
11	2000	0									
12	1000	20									
13	1000	60									
14	1000	80									
15	2000	40									
16	2000	80									
17	2000	60									
18	1000	0									
19	2000	0									
20	1000	40									

Figura 16: Matriz de resultados aleatorizados

Se seleccionó un diseño factorial para poder analizar simultáneamente los efectos principales de dos variables, las RPM de operación y el porcentaje de bioetanol en el combustible y como la combinación de los factores afecta los resultados con una menor cantidad de ensayos, reduciendo la variabilidad y el error de los resultados y mejorando la confiabilidad del experimento.

El experimento consiste en operar por 15 minutos el motor a 1000 o 2000 RPM con alguna de las mezclas mencionadas previamente, cada minuto el dispositivo enerac guarda los valores de las emisiones y de esta lista de valores se obtienen los promedios que son presentados en la tabla de resultados, así como algunas condiciones de operación como la temperatura ambiente y la humedad del ambiente.

- Redacción de Artículo científico y Artículo de Divulgación.

5. Materiales y Equipos

5.1. Enerac 700AV

El Enerac 700AV en la figura 17, es un analizador portátil de emisiones de combustión de nivel de cumplimiento, diseñado para medir con alta precisión gases contaminantes y parámetros de eficiencia en diversas fuentes de combustión, como motores, calderas, hornos y generadores.



Figura 17: Enerac 700AV

5.1.1. Características técnicas principales

- **Sensores SEM de doble rango:** Utiliza sensores electroquímicos avanzados para medir gases como NO, NO₂, SO₂, CO y O₂, ofreciendo alta precisión y confiabilidad.
- **Sistema de acondicionamiento de muestras:** Incluye un condensador termoelectrico (Peltier) que elimina la humedad de las muestras, esencial para la detección precisa de gases como NO₂ y SO₂.
- **Control de temperatura patentado:** Mantiene la temperatura de los sensores por debajo de 30C, evitando desviaciones en las mediciones de NO_x debido a variaciones térmicas.
- **Sensores infrarrojos NDIR:** Permite la medición de CO, CO₂ e hidrocarburos (C_xH_y) mediante tecnología de infrarrojo no dispersivo, cumpliendo con métodos EPA como el 25B.
- **Medición de flujo y velocidad:** Puede equiparse con una sonda tipo Pitot para calcular la velocidad del flujo de gases y las emisiones másicas, conforme al método EPA 2.
- **Almacenamiento y comunicación:** Cuenta con 500 memorias internas para almacenar datos y ofrece conectividad mediante puertos RS-232, USB y Bluetooth, facilitando la transferencia y análisis de información.

- **Pantalla y impresión integradas:** Dispone de una pantalla dual de 4 y 8 líneas (128 x 64 píxeles) con retroiluminación, y una impresora térmica gráfica de 2" para la generación inmediata de reportes.
- **Construcción robusta y portátil:** Fabricado con una carcasa de aluminio resistente, el dispositivo pesa aproximadamente 2.8 kg, lo que facilita su transporte y uso en el campo.

5.1.2. Especificaciones de Medición

Parámetro	Rango típico	Resolución	Precisión estimada
Oxígeno (O ₂)	0–25%	0.1%	±0.2%
Monóxido de carbono (CO)	0–1,500/4,500 ppm	1 ppm	±1–2%
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	0–500/1,500 ppm	0.1 ppm	±1–2%
Dióxido de azufre (SO ₂)	0–1,500/4,500 ppm	1 ppm	±1–2%
Hidrocarburos (C _x H _y)	0–30,000 ppm (NDIR)	1 ppm	±3%
Dióxido de carbono (CO ₂)	0–20% (NDIR)	0.01%	±3%
Temperatura de gases	0–1,100 °C	1 °C	±1 °C
Velocidad de flujo	0–200 ft/s (0–6,500 <u>cfm</u>)	1 ft/s	Conforme a EPA 2

Figura 18: Especificaciones de medición de Enerac700AV

5.1.3. Aplicaciones comunes

- Evaluación de emisiones en motores de combustión interna (gasolina, diésel, gas natural).
- Monitoreo de eficiencia en calderas, hornos, secadores y turbinas.
- Cumplimiento de normativas ambientales locales, estatales y federales.
- Investigaciones académicas y estudios de impacto ambiental.

5.1.4. Ventajas Adicionales

- **Actualizable:**Es posible añadir nuevos sensores y opciones al mismo equipo con el tiempo.
- **Sensores reemplazables en campo:**Facilita el mantenimiento y reduce tiempos de inactividad.
- **Software Enercom gratuito:**Permite la visualización y análisis de datos en tiempo real o posterior a la medición.
- **Cumplimiento con métodos EPA:**Adecuado para pruebas conforme a métodos como CTM-030, ASTM-6522 y CTM-034.

El Enerac 700 es una herramienta versátil y precisa para profesionales que requieren monitorear y analizar emisiones de combustión, garantizando cumplimiento normativo y optimización de procesos [40].

5.2. Banco de Pruebas con motor Ecotec 2.2 Litros

5.2.1. Especificaciones del motor

- **Motor:**2.2 litros DOHC 16 Válvulas 4 cilindros.
- **Caballos de fuerza:**140.
- **Torque:**150 Lb-pie.

5.2.2. Características de la estructura

La estructura principal fue fabricada de PTR de 2" x 2" de calibre 14, se utilizó principalmente soldadura de microalambre flux, a esta estructura se le atornillo el motor y todos los componentes necesarios para sus funcionamiento como radiador, ventilador, cables y computadoras, batería y cuenta con ruedas de hule para su transportación, se muestra en la siguiente figura:

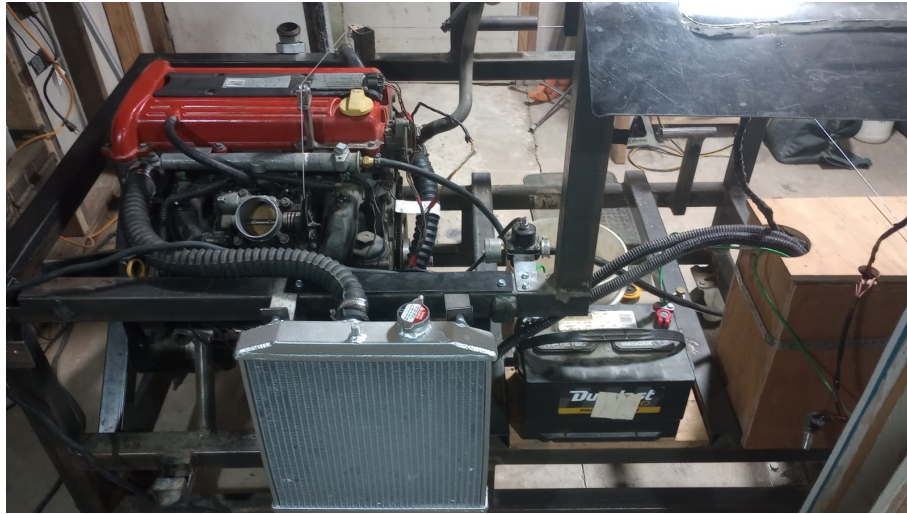


Figura 19: Banco de Pruebas

5.3. Escáner Veepeak OBD II

El escáner Veepeak OBD II (Figura 19) es un escáner inalámbrico compacto y eficiente diseñado para diagnosticar y monitorear el rendimiento de vehículos compatibles con el protocolo OBD II.

5.3.1. Especificaciones Técnicas

- **Modelo:** Veepeak OBDCheck BLE+
- **Método de comunicación :**Bluetooth 4.0 (LE para ios, clásico para Android y Windows)
- **Dispositivos Compatibles:** ios(con bluetooth 4.0 o superior), Android (teléfonos celulares y tabletas), Windows y Mac.
- **Voltaje de operación:**9V-16V
- **Corriente de operación:**Máximo 45mA
- **Temperatura de operación:**-40C a 85C
- **Dimensiones:**1.61" x 1.97" x 0.87"
- **Protocolos OBD II compatibles:**
 - SAE J1850 PWM
 - SAE J1850 VPW
 - ISO 9141-2
 - ISO 14230-4 KWP2000
 - ISO 15765-4 CAN

■ **Compatibilidad de vehículos:**

- EE.UU: desde 1996
- Canadá: desde 1998
- Unión Europea: gasolina desde 2001, diésel desde 2004
- Australia: gasolina desde 2006, diésel desde 2007
- México: desde 2006

5.3.2. Funcionalidades Principales

- **Diagnóstico de códigos de falla:**Lectura y borrado de códigos de diagnóstico (DTC), incluyendo la luz de verificación del motor.
- **Monitoreo en tiempo real:**Visualización y registro de datos de sensores en vivo, como velocidad, RPM, temperatura del motor, entre otros.
- **Pruebas de emisiones:**Verificación de preparación para pruebas de emisiones (I/M readiness).
- **Personalización de tableros:**Creación de paneles de control personalizados para monitorear parámetros específicos del vehículo.
- **Compatibilidad con aplicaciones:** Funciona con diversas aplicaciones de terceros como Torque (Android), OBD Fusion (iOS y Android), Car Scanner ELM OBD2, entre otras.

5.3.3. Ventajas

- **Compatibilidad amplia:**Funciona con una gran variedad de vehículos y sistemas operativos.
- **Conexión eficiente:**Utiliza Bluetooth 4.0 para una conexión rápida y estable.
- **Diseño compacto:**Fácil de transportar y almacenar.
- **Ahorro de energía:**Consumo de corriente bajo, ideal para uso prolongado sin agotar la batería del vehículo[41]



Figura 20: Escáner Veepeak

5.4. Computadora Eflexfuel

La computadora eFlexFuel (Figura 20) permite adaptar vehículos con inyección electrónica para operar con mezclas de gasolina y bioetanol (E85).

5.4.1. Características destacadas

- **Compatibilidad de combustible:** Gasolina, E85 o cualquier mezcla intermedia.
- **Instalación:** Bajo el capó, sin modificar la ECU original ni activar luces de advertencia.
- **Componentes del kit:** Unidad de control, sensor de etanol, arnés de cables específico para el vehículo, conectores rápidos, mangueras.
- **Modos de operación:** Automático, sin necesidad de ajustes manuales; opciones de ajuste de rendimiento y eficiencia.

Este sistema convierte los vehículos a flex fuel, permitiendo el uso de bioetanol sin comprometer el rendimiento [\[42\]](#)



Figura 21: Computadora Eflexfuel

5.5. Báscula Pretul.

5.5.1. Especificaciones

- Capacidad: 40Kg
- Pesada mínima:100g
- Teclado:Push plástico
- Batería:4V C.C / 4aH
- Dimensiones de plato: 34 cm x 23 cm
- Dimensiones: 34 cm x 11cm x 32cm



Figura 22: Báscula Pretul con Contenedor de Gasolina

Con Ayuda de la báscula mostrada en la figura 21 se prepararon las mezclas de Gasolina-bioetanol [43].

6. Análisis de resultados

Número de corrida	Factores		Salidas								
	RPM (X1)	% Bioetanol (X2)	Temperatura de Escape (Y1)	% de Oxígeno (Y2)	PPM Monóxido de Carbono (Y3)	% de Dióxido de Carbono (Y4)	PPM Hidrocarburos (Y5)	PPM Óxido Nítrico (Y6)	PPM Dióxido de Nitrógeno (Y7)	PPM Dióxido de Azufre (Y8)	Kg de Consumo de Combustible (Y9)
1	2000	80	332.600	8.10	0.225	8.860	1040.000	0.300	0.000	7.060	0.825
2	1000	60	136.780	3.720	3.220	9.950	646.640	0.780	0.000	8.710	0.808
3	1000	40	91.800	8.490	1.680	7.830	2390.250	5.200	0.500	12.100	0.535
4	1000	80	73.260	9.420	1.180	7.600	887.730	4.260	0.530	9.800	0.495
5	2000	40	225.180	6.410	0.230	10.410	556.500	14.875	0.000	5.250	0.720
6	2000	20	305.350	6.980	0.380	10.030	622.410	40.230	0.000	11.520	0.790
7	1000	0	33.560	8.070	2.150	7.780	2219.930	10.250	0.000	16.375	0.440
8	1000	20	55.930	15.380	0.590	3.680	2155.680	16.310	0.000	1.125	0.355
9	2000	60	263.810	5.200	0.240	10.980	272.810	12.120	0.000	7.250	0.725
10	2000	20	278.290	5.800	0.760	10.300	717.050	13.000	0.000	0.230	0.740
11	2000	0	262.560	11.110	0.290	6.630	1566.500	19.125	0.000	0.875	0.620
12	1000	20	111.680	13.840	0.230	4.800	1704.780	23.050	1.730	1.680	0.395
13	1000	60	128.810	9.075	1.470	7.550	1044.750	8.810	0.000	0.560	0.345
14	1000	80	113.180	11.210	0.460	5.960	1508.180	1.540	7.400	0.310	0.385
15	2000	40	327.750	12.940	0.210	5.220	633.940	18.290	0.000	2.580	0.700
16	2000	80	283.050	9.940	1.040	7.840	441.760	22.880	0.000	1.820	0.755
17	2000	60	238.125	8.710	0.300	8.310	695.870	23.620	0.000	0.312	0.750
18	1000	0	103.810	10.150	2.390	5.880	1116.500	20.875	20.870	0.187	0.290
19	2000	0	279.062	5.200	0.570	11.280	441.625	24.430	0.000	0.187	0.470
20	1000	40	98.530	9.960	1.760	6.180	1039.400	10.260	0.000	0.300	0.340

Figura 23: Resultados del experimento

En la figura 22 se encuentran los resultados en el orden que se realizaron los ensayos según la aleatorización del diseño de experimentos, esta información se analizó con ayuda del software minitab, obteniendo gráficas acerca de la relación entre variables.

6.1. Análisis de la temperatura de los gases de escape(Y1) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)

A continuación en la figura 23 se muestran los factores y los niveles a los que se realizó el experimento.

Factor Information

Factor	Levels	Values
RPM	2	1000, 2000
% DE ETANOL	5	0, 20, 40, 60, 80

Figura 24: Factores del experimento

El análisis de varianza de la figura 24 nos indica que las rpm de operación son totalmente significativas para las temperaturas de los gases de escape, mientras que el porcentaje de bioetanol y el efecto combinado de estos no genera un cambio significativo en las temperaturas de escape.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	179040	19893	16.32	0.000
Linear	5	172861	34572	28.35	0.000
RPM	1	170836	170836	140.11	0.000
% DE ETANOL	4	2025	506	0.42	0.794
2-Way Interactions	4	6179	1545	1.27	0.345
RPM*% DE ETANOL	4	6179	1545	1.27	0.345
Error	10	12193	1219		
Total	19	191233			

Figura 25: Análisis de varianza de la temperatura de gases de escape vs RPM y % de bioetanol

El valor de R cuadrado mostrado en la figura 25 nos indica que el modelo explica adecuadamente la variabilidad en la respuesta, por lo que el modelo logra predecir la respuesta en base a los factores.

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
34.9182	93.62%	87.89%	74.50%

Figura 26: Resumen del modelo de la temperatura de gases de escape vs RPM y % de bioetanol

A continuación el diagrama de Pareto de la figura 26 nos resalta como las rpm son significativas pero el porcentaje de bioetanol no, ni el efecto combinado.

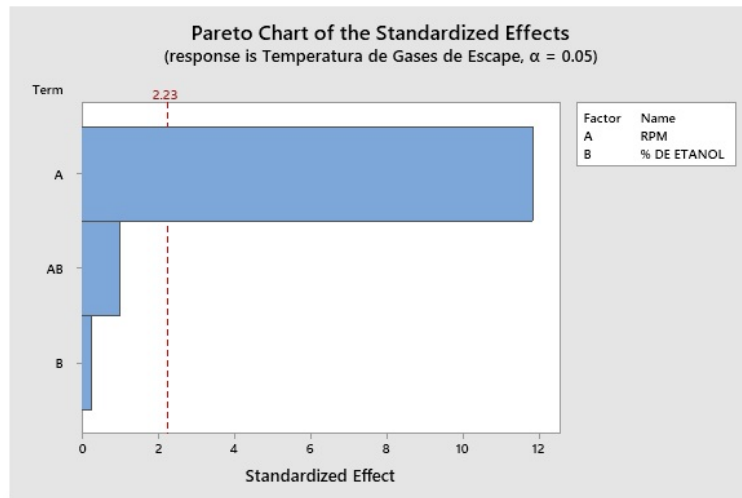


Figura 27: Diagrama de Pareto de la temperatura de gases de escape vs RPM y % de bioetanol

La gráfica cuatro en uno de la figura 27 nos indica que hay normalidad en los datos.

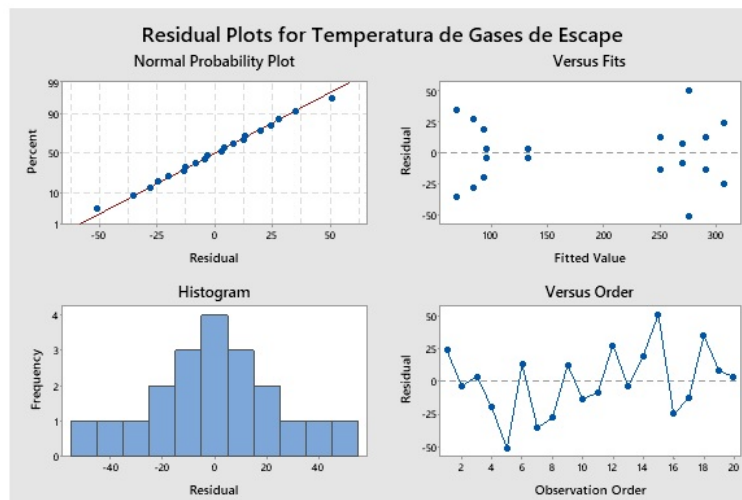


Figura 28: Gráficas cuatro en uno de la temperatura de gases de escape vs RPM y % de bioetanol

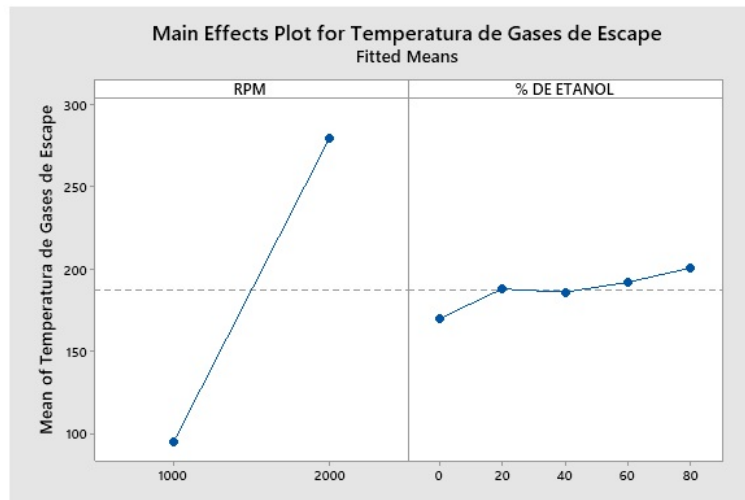


Figura 29: Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con las temperaturas de escape

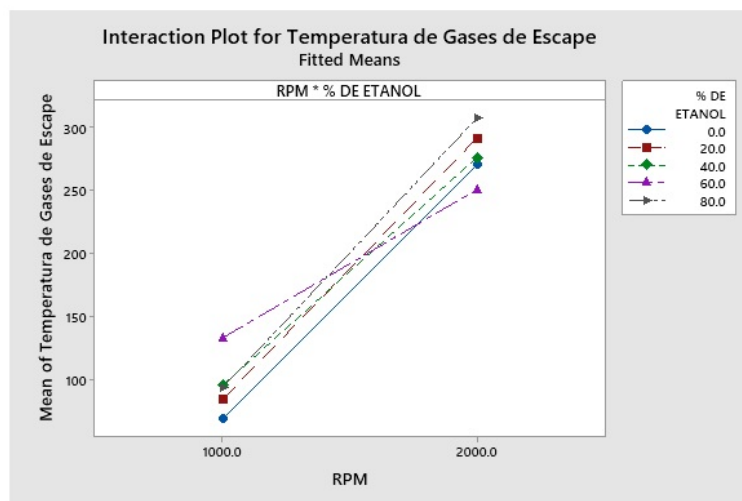


Figura 30: Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con las temperaturas de escape

Con la información presentada en la figuras 24, 25, 26, 27, 28 y 29 se puede concluir que la temperatura de los gases de escape depende completamente de las revoluciones de trabajo y no es tan significativo el cambio en el porcentaje de etanol, sin embargo al analizar sus efectos combinados es importante resaltar que con una mezcla de 60% en condiciones de trabajo se obtiene una menor temperatura en los gases de escape.

6.2. Análisis del porcentaje de Oxígeno(Y2) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)

A continuación en las siguientes figuras se encuentran los resultados obtenidos respecto al porcentaje de oxígeno en los gases de escape.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	104.40	11.600	1.71	0.207
Linear	5	51.64	10.327	1.53	0.266
RPM	1	17.91	17.908	2.65	0.135
% DE ETANOL	4	33.73	8.432	1.25	0.353
2-Way Interactions	4	52.76	13.191	1.95	0.179
RPM*% DE ETANOL	4	52.76	13.191	1.95	0.179
Error	10	67.70	6.770		
Total	19	172.10			

Figura 31: Análisis de varianza del porcentaje de oxígeno vs RPM y % de bioetanol

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2.60198	60.66%	25.26%	0.00%

Figura 32: Resumen del modelo del porcentaje de oxígeno vs RPM y % de bioetanol

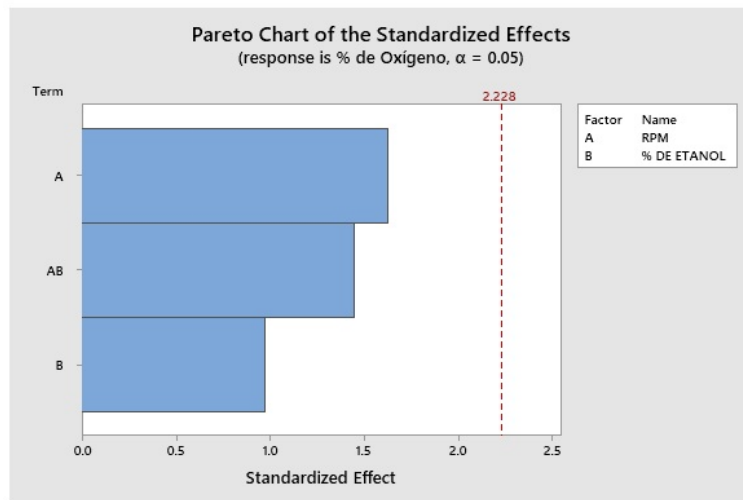


Figura 33: Diagrama de Pareto del porcentaje de oxígeno vs RPM y % de bioetanol

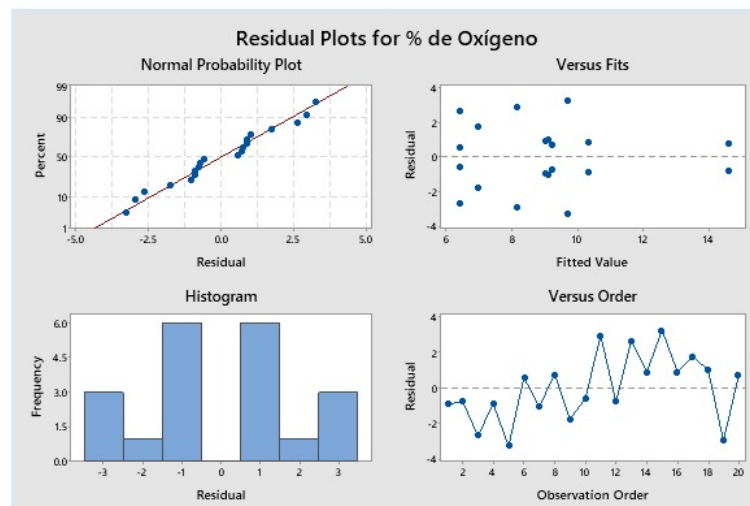


Figura 34: Gráficas cuatro en uno del porcentaje de oxígeno vs RPM y % de bioetanol

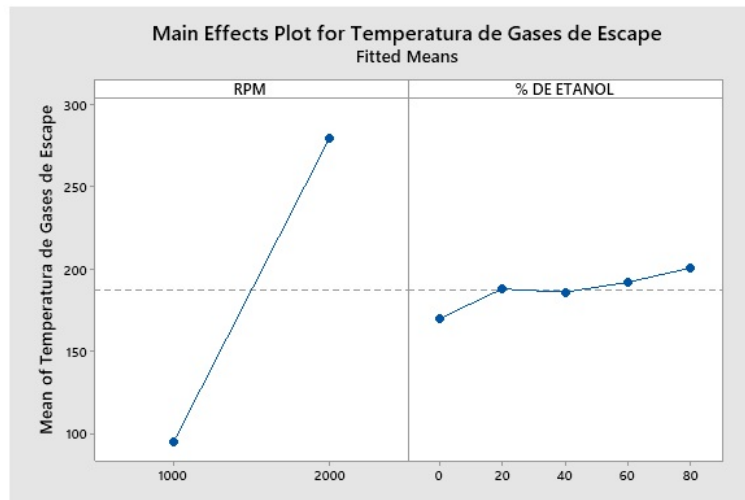


Figura 35: Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con el porcentaje de oxígeno

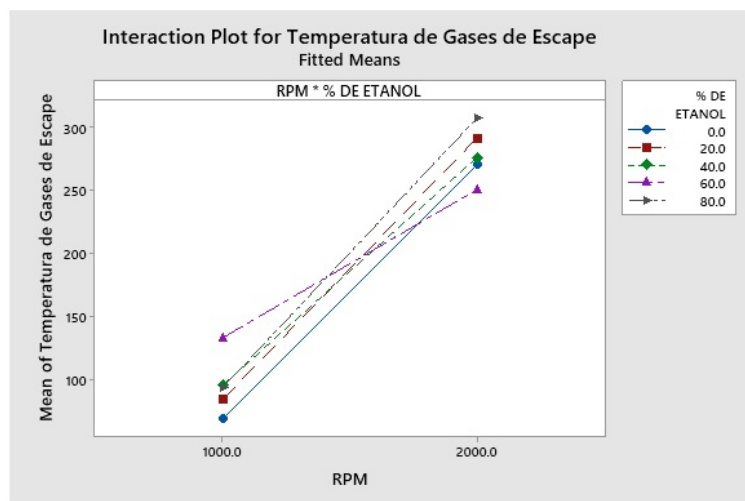


Figura 36: Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con el porcentaje de oxígeno

Los resultados obtenidos en las figuras 30, 31, 32, 33, 34 y 35 nos demuestran que no es significativo estadísticamente las rpm de trabajo ni el porcentaje de bioetanol para el % de oxígeno presente en los gases de escape.

6.3. Análisis de las ppm de monóxido de carbono(Y3) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	12.194	1.3549	5.81	0.006
Linear	5	8.117	1.6233	6.96	0.005
RPM	1	5.924	5.9242	25.40	0.001
% DE ETANOL	4	2.192	0.5481	2.35	0.125
2-Way Interactions	4	4.078	1.0195	4.37	0.027
RPM*% DE ETANOL	4	4.078	1.0195	4.37	0.027
Error	10	2.333	0.2333		
Total	19	14.527			

Figura 37: Análisis de varianza del monóxido de carbono (ppm) vs RPM y % de bioetanol

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.482987	83.94%	69.49%	35.77%

Figura 38: Resumen del modelo del monóxido de carbono (ppm) vs RPM y % de bioetanol

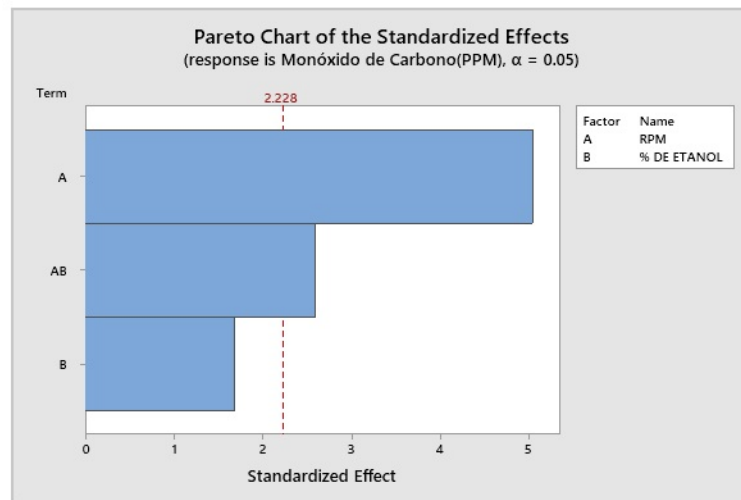


Figura 39: Diagrama de Pareto del monóxido de carbono (ppm) vs RPM y % de bioetanol

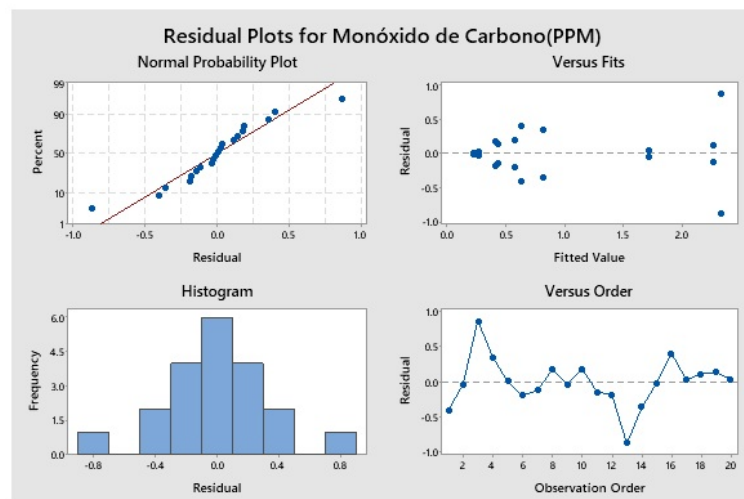


Figura 40: Gráficas cuatro en uno del monóxido de carbono (ppm) vs RPM y % de bioetanol

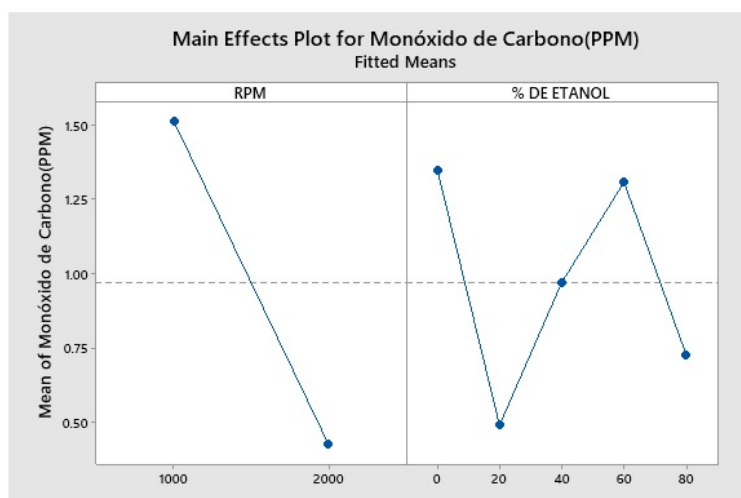


Figura 41: Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y% de bioetanol con el monóxido de carbono(ppm)

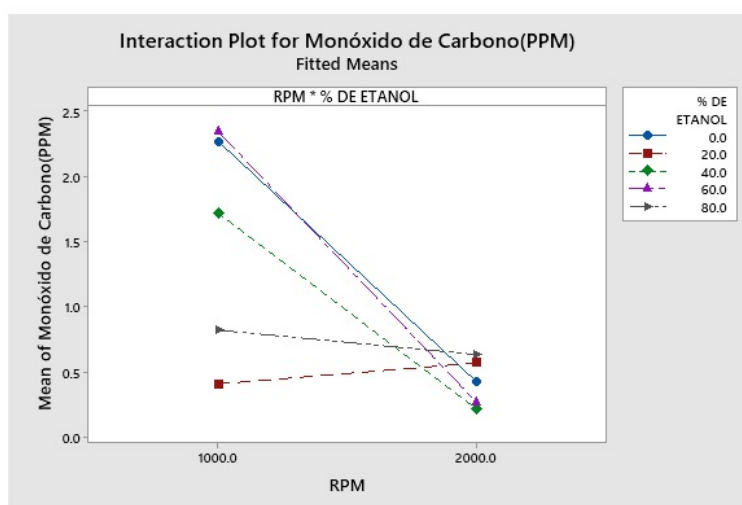


Figura 42: Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y% de bioetanol con el monóxido de carbono

Nuevamente vemos en las figuras 36, 37, 38, 39, 40 y 41 como las RPM de operación son totalmente significativas y el efecto combinado de % de bioetanol con las rpm también producen un cambio significativo en la producción de monóxido de carbono, al utilizar una mezcla de 40% - 60% se logra minimizar las ppm de monóxido de carbono producidas.

6.4. Análisis del porcentaje de dióxido de carbono(Y4) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	53.59	5.954	1.63	0.227
Linear	5	35.70	7.139	1.96	0.171
RPM	1	25.65	25.651	7.04	0.024
% DE ETANOL	4	10.05	2.512	0.69	0.616
2-Way Interactions	4	17.89	4.473	1.23	0.359
RPM*% DE ETANOL	4	17.89	4.473	1.23	0.359
Error	10	36.42	3.642		
Total	19	90.01			

Figura 43: Análisis de varianza del porcentaje de dióxido de carbono vs RPM y % de bioetanol

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.90837	59.54%	23.12%	0.00%

Figura 44: Resumen del modelo del porcentaje de dióxido de carbono vs RPM y % de bioetanol

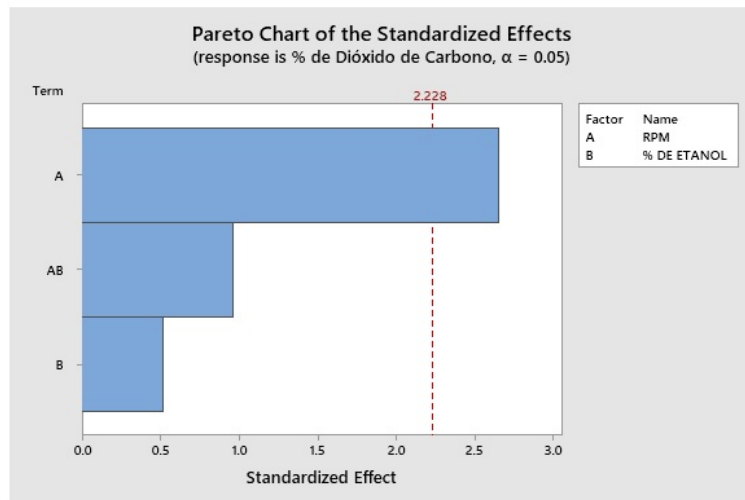


Figura 45: Diagrama de Pareto del porcentaje de dióxido de carbono vs RPM y % de bioetanol

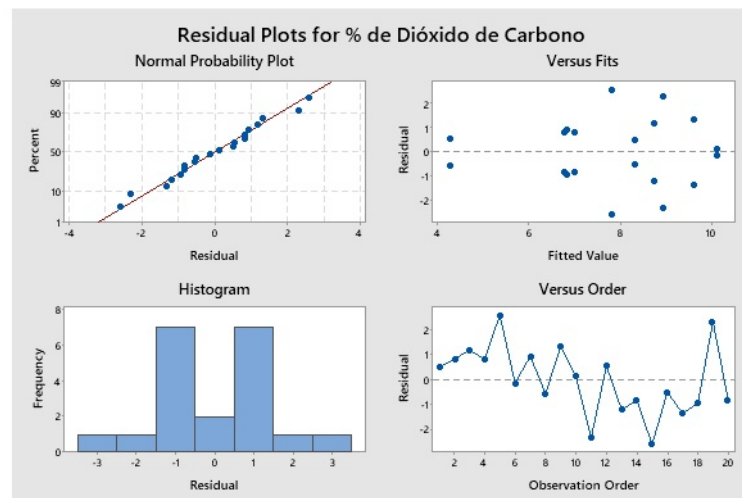


Figura 46: Gráficas cuatro en uno del porcentaje de dióxido de carbono vs RPM y % de bioetanol

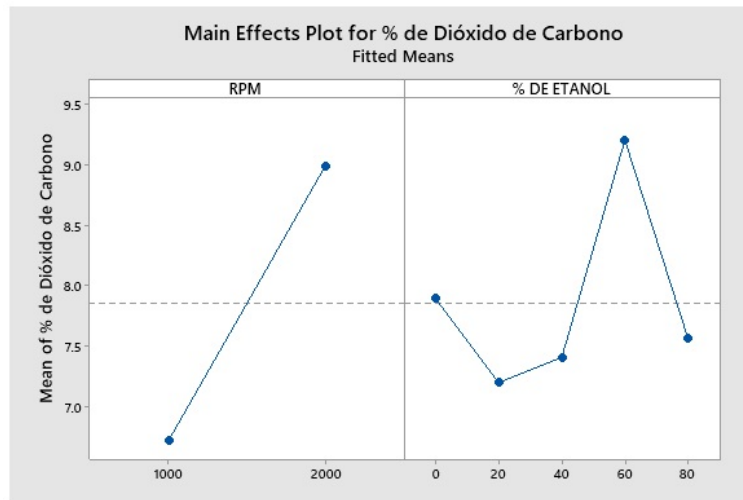


Figura 47: Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con el porcentaje de dióxido de carbono

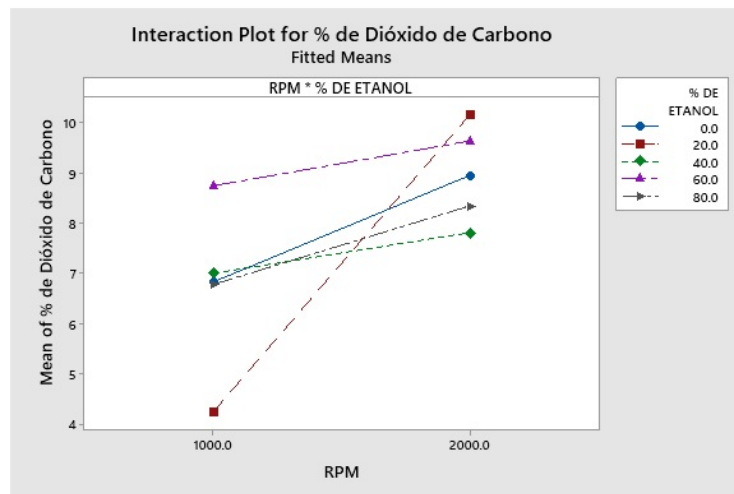


Figura 48: Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con el porcentaje de dióxido de carbono

Al observar los resultados de las figuras 42, 43, 44, 45, 46 y 47 el % de bioetanol en combinación con las rpm, la mezcla de 40% de bioetanol es la que a RPM de trabajo se mantuvo con menores porcentajes de dióxido de carbono, sin embargo, estadísticamente no resulta significativo, solo resulta significativo las rpm de operación.

6.5. Análisis de las ppm de los hidrocarburos(Y5) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	4838708	537634	1.92	0.162
Linear	5	4199810	839962	3.00	0.066
RPM	1	2984071	2984071	10.65	0.009
% DE ETANOL	4	1215739	303935	1.08	0.415
2-Way Interactions	4	638898	159725	0.57	0.691
RPM*% DE ETANOL	4	638898	159725	0.57	0.691
Error	10	2803141	280314		
Total	19	7641849			

Figura 49: Análisis de varianza de los hidrocarburos (ppm) vs RPM y % de bioetanol

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
529.447	63.32%	30.31%	0.00%

Figura 50: Resumen del modelo de los hidrocarburos (ppm) vs RPM y % de bioetanol

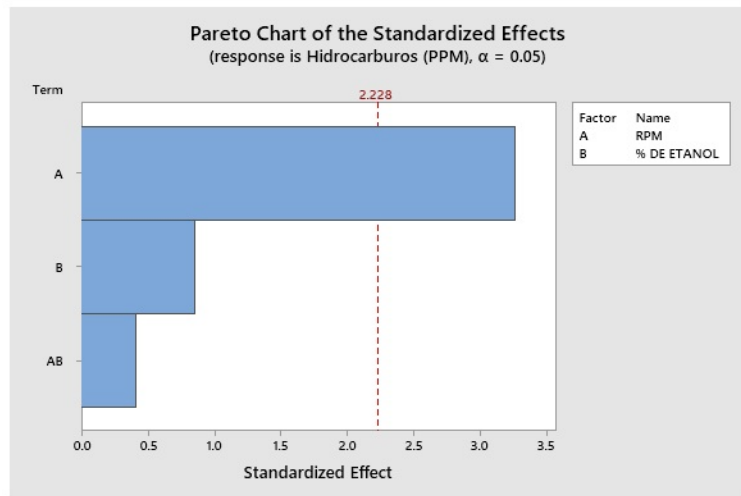


Figura 51: Diagrama de Pareto de los hidrocarburos (ppm) vs RPM y % de bioetanol

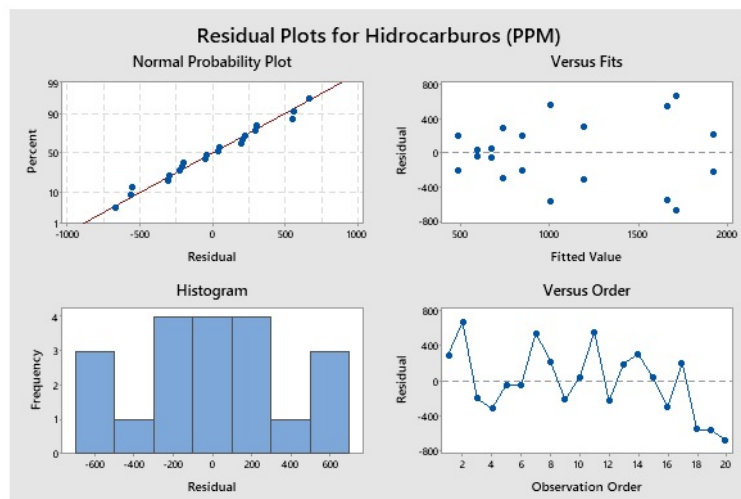


Figura 52: Gráficas cuatro en uno de hidrocarburos (ppm) vs RPM y % de bioetanol

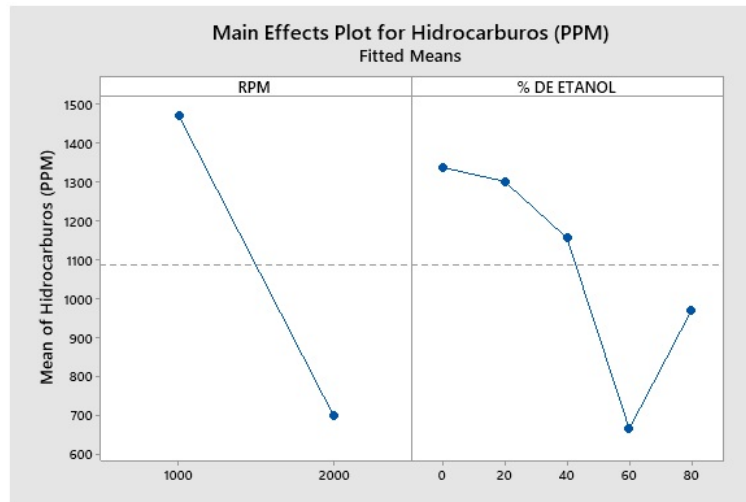


Figura 53: Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con los hidrocarburos

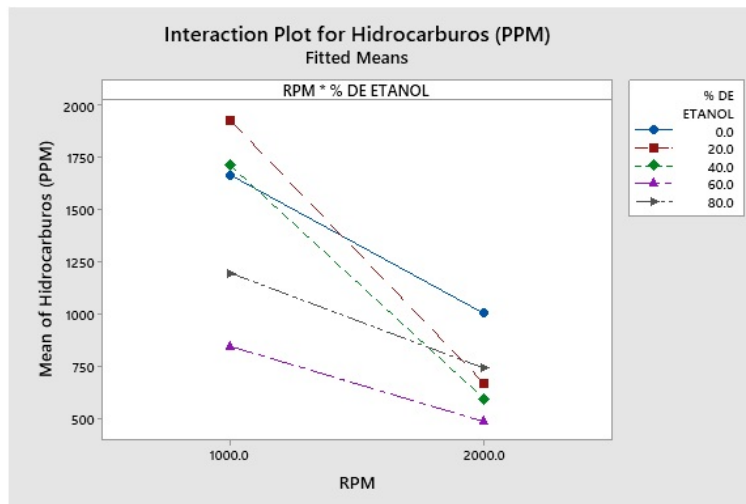


Figura 54: Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con los hidrocarburos

Segun las figuras 48, 49, 50, 51, 52 y 53 estadísticamente no resulta significativo el % de bioetanol ni el efecto combinado, únicamente las rpm de trabajo, sin embargo vale la pena ver como interactuan las variables.

A 1000 rpm el motor se encuentra en ralentí, con una producción mayor de hidrocarburos que bajo condiciones de operación más normales como lo son 2000 rpm, al aumentar el porcentaje de bioetanol hasta 60 % se observa una disminución en la producción de hidrocarburos pero al elevar la mezcla a 80 % vuelve a aumentar resultando contraproducente.

Al observar las interacciones combinadas de las rpm y el porcentaje de bioetanol se puede observar que la mezcla con menos producción de hidrocarburos es al 60 % pero la mezcla al 40 % al llegar a trabajar a 2000 rpm tiene una producción muy similar.

6.6. Análisis de las ppm de óxido nítrico (Y6) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	1052.87	116.986	1.39	0.305
Linear	5	1024.43	204.887	2.44	0.108
RPM	1	383.12	383.119	4.56	0.058
% DE ETANOL	4	641.32	160.329	1.91	0.185
2-Way Interactions	4	28.44	7.110	0.08	0.985
RPM*% DE ETANOL	4	28.44	7.110	0.08	0.985
Error	10	839.59	83.959		
Total	19	1892.47			

Figura 55: Análisis de varianza del óxido nítrico (ppm) vs RPM y % de bioetanol

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
9.16293	55.64%	15.71%	0.00%

Figura 56: Resumen del modelo del óxido nítrico (ppm) vs RPM y % de bioetanol

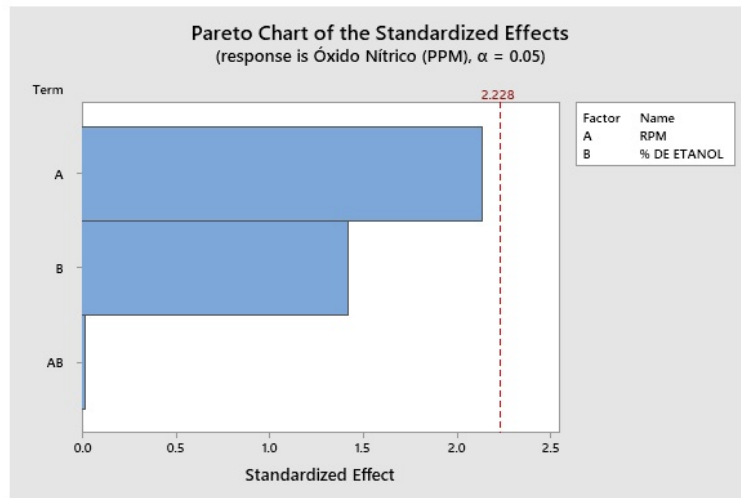


Figura 57: Diagrama de Pareto del óxido nítrico (ppm) vs RPM y % de bioetanol

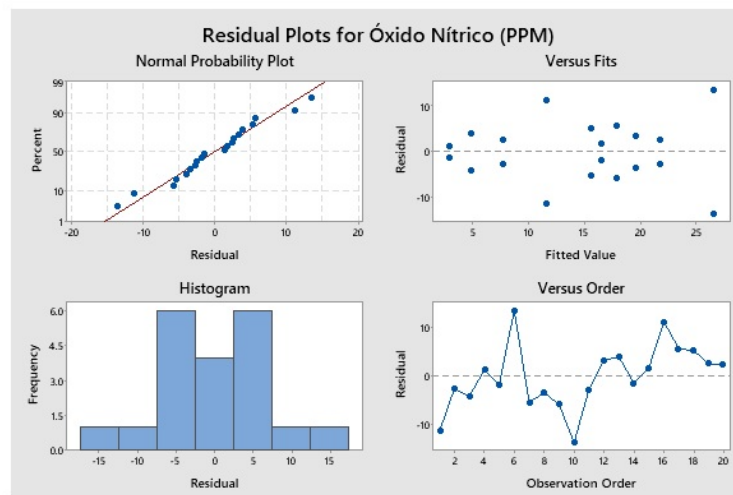


Figura 58: Gráficas cuatro en uno del óxido nítrico (ppm) vs RPM y % de bioetanol

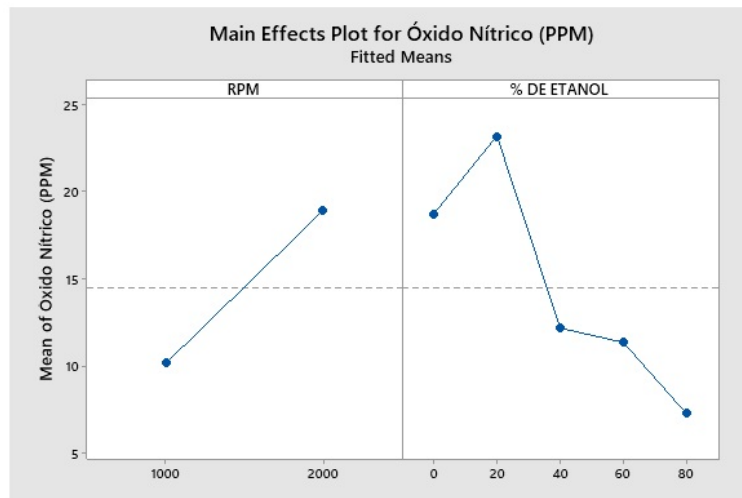


Figura 59: Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con el óxido nítrico(ppm)

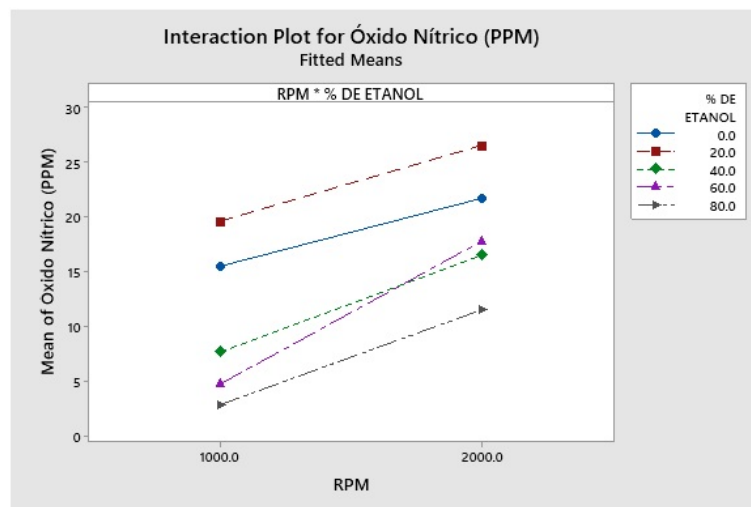


Figura 60: Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con el óxido nítrico (ppm)

Según las figuras 54, 55, 56, 57, 58 y 59 estadísticamente la cantidad de óxido nítrico producido no resulta significativo para ninguna de las variables.

6.7. Análisis de las ppm de dióxido de Nitrógeno (Y7) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	202.70	22.52	0.93	0.541
Linear	5	125.42	25.08	1.03	0.449
RPM	1	48.14	48.14	1.98	0.190
% DE ETANOL	4	77.28	19.32	0.80	0.555
2-Way Interactions	4	77.28	19.32	0.80	0.555
RPM*% DE ETANOL	4	77.28	19.32	0.80	0.555
Error	10	243.00	24.30		
Total	19	445.70			

Figura 61: Análisis de varianza del dióxido de Nitrógeno (ppm) vs RPM y % de bioetanol

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.92949	45.48%	0.00%	0.00%

Figura 62: Resumen del modelo del dióxido de nitrógeno (ppm) vs RPM y % de bioetanol

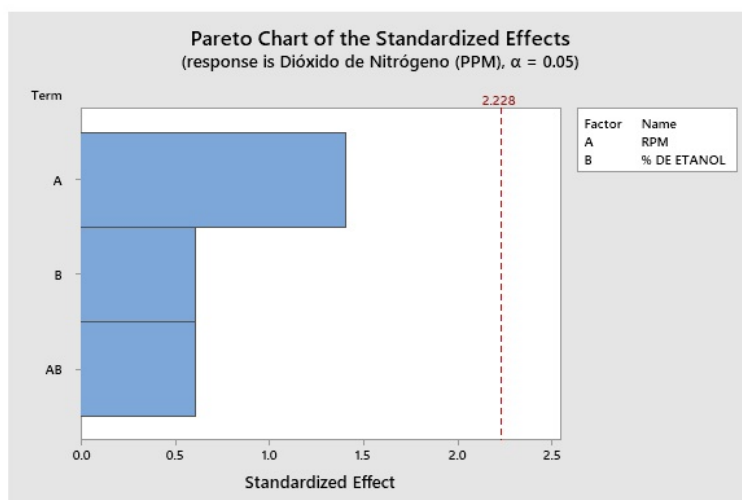


Figura 63: Diagrama de Pareto del dióxido de nitrógeno (ppm) vs RPM y % de bioetanol

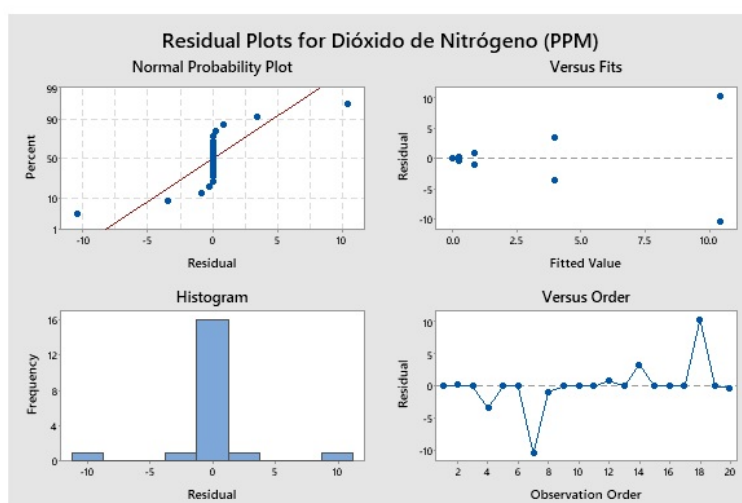


Figura 64: Gráficas cuatro en uno del dióxido de nitrógeno (ppm) vs RPM y % de bioetanol

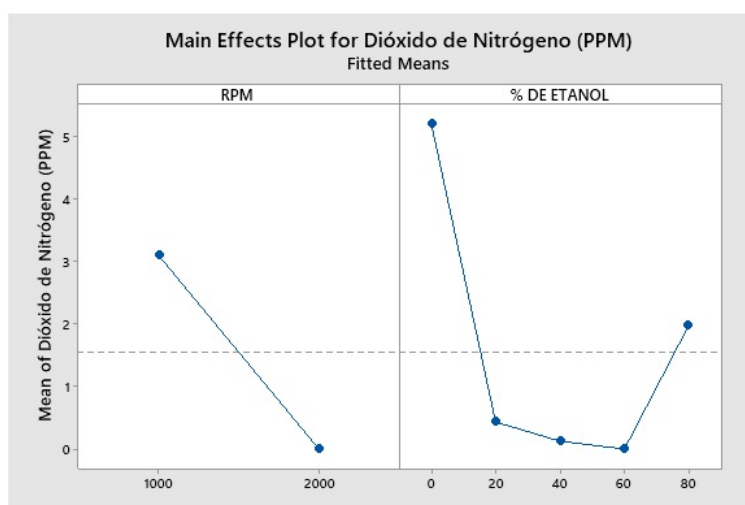


Figura 65: Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con el dióxido de nitrógeno(ppm)

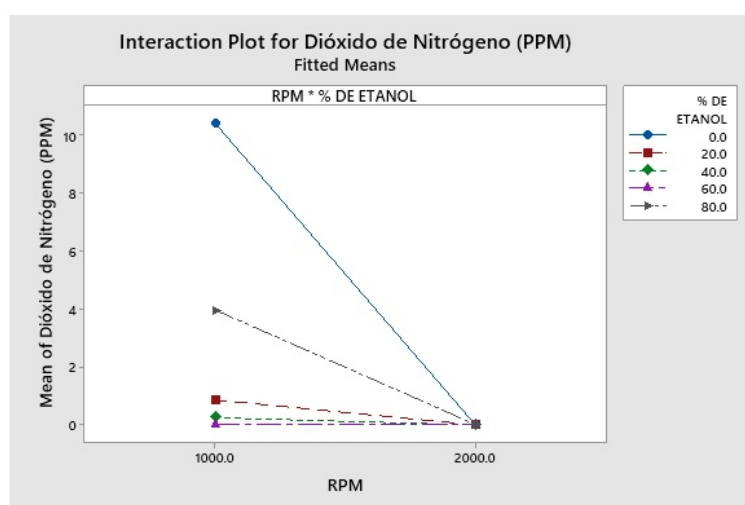


Figura 66: Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con el dióxido de nitrógeno (ppm)

La producción de dióxido de nitrógeno es un evento incontrolable e inevitable debido a que la mayor parte del aire que respiramos es nitrógeno, mostrado en las figuras 60, 61, 62, 63, 64 y 65 no resulta significativo el tipo de combustible a utilizar.

6.8. Análisis de las ppm de dióxido de Azufre (Y8) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	91.070	10.119	0.26	0.972
Linear	5	14.564	2.913	0.08	0.995
RPM	1	9.888	9.888	0.26	0.623
% DE ETANOL	4	4.675	1.169	0.03	0.998
2-Way Interactions	4	76.506	19.127	0.50	0.738
RPM*% DE ETANOL	4	76.506	19.127	0.50	0.738
Error	10	384.371	38.437		
Total	19	475.441			

Figura 67: Análisis de varianza del dióxido de azufre (ppm) vs RPM y % de bioetanol

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
6.19977	19.15%	0.00%	0.00%

Figura 68: Resumen del modelo del dióxido de azufre (ppm) vs RPM y % de bioetanol

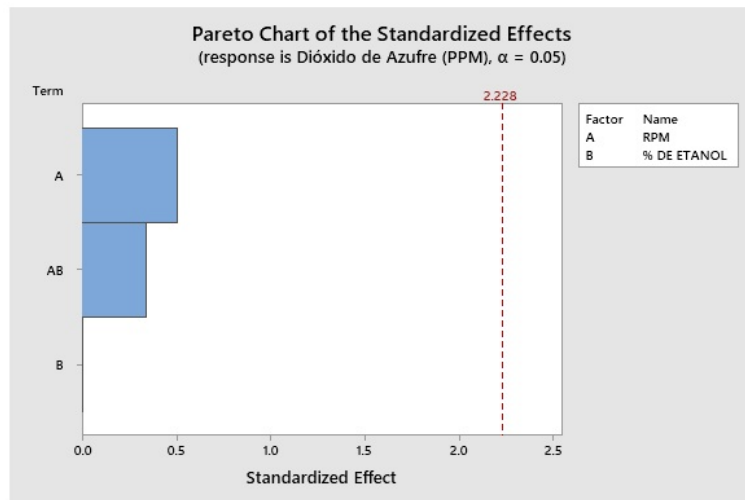


Figura 69: Diagrama de Pareto del dióxido de azufre (ppm) vs RPM y % de bioetanol

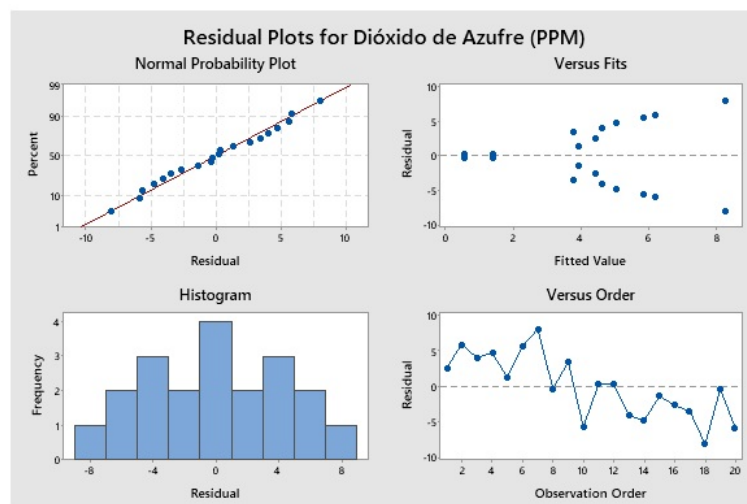


Figura 70: Gráficas cuatro en uno del dióxido de azufre (ppm) vs RPM y % de bioetanol

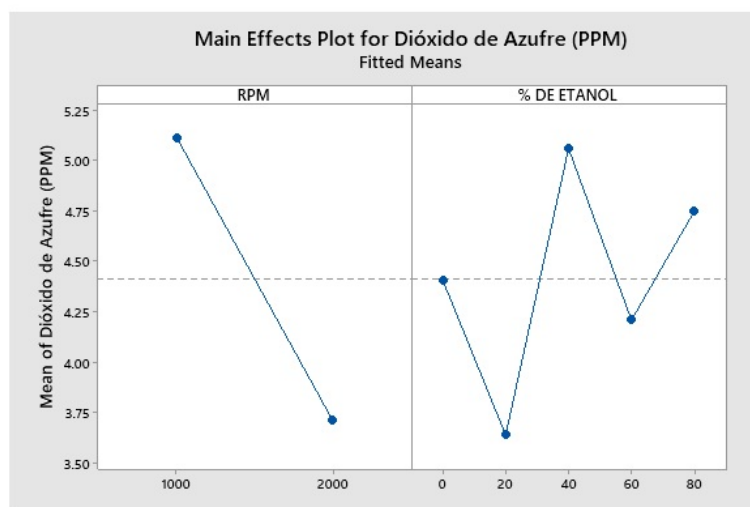


Figura 71: Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con el dióxido de azufre(ppm)

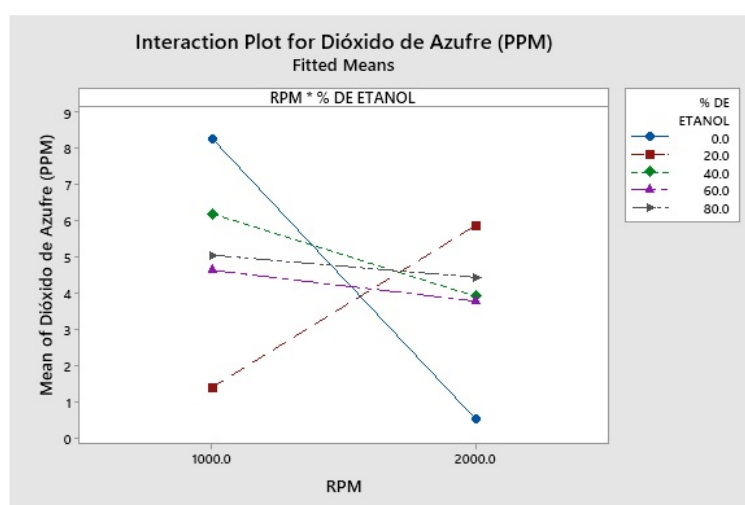


Figura 72: Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con el dióxido de azufre (ppm)

La producción de dióxido de azufre mostrado en las figuras 66, 67, 68, 69, 70 y 71, se debe a un factor externo a la combustión, sucede al quemar aceite de motor, en este caso al realizar las pruebas en un motor usado con kilometraje desconocido y a pesar de las revisiones previas al experimento siguen existiendo muchos lugares por los que el aceite pueda llegar a la cámara de combustión, como lo es a través de la válvula pcb, válvulas, anillos, empaques, estas pequeñas filtraciones le suceden a todos los motores por lo que no es un factor de interés para esta investigación, sin embargo tenemos la capacidad de medirlo y confirmar que no es significativo para ninguno de los factores para su producción ni RPM ni % de bioetanol.

6.9. Análisis del consumo(Y9) versus RPM(X1) y % de bioetanol(X2)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.49817	0.05535	3.46	0.033
Linear	5	0.45738	0.09148	5.73	0.009
RPM	1	0.36639	0.36639	22.93	0.001
% DE ETANOL	4	0.09099	0.02275	1.42	0.295
2-Way Interactions	4	0.04078	0.01020	0.64	0.647
RPM*% DE ETANOL	4	0.04078	0.01020	0.64	0.647
Error	10	0.15976	0.01598		
Total	19	0.65792			

Figura 73: Análisis de varianza del consumo vs RPM y % de bioetanol

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.126396	75.72%	53.86%	2.87%

Figura 74: Resumen del modelo del consumo vs RPM y % de bioetanol

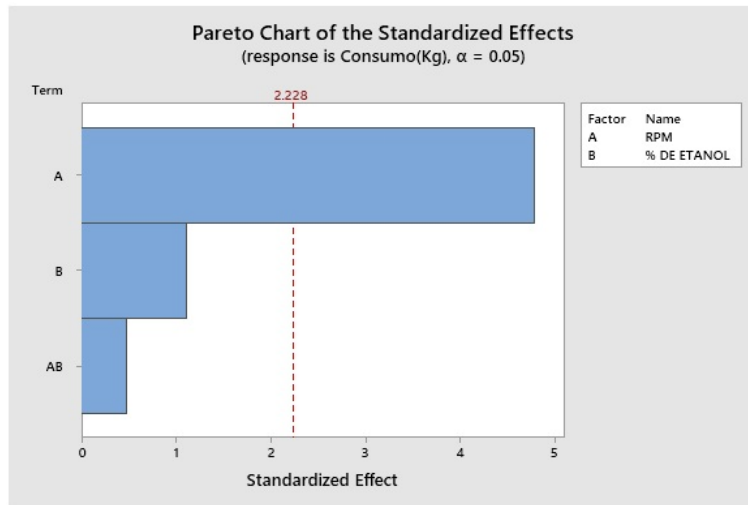


Figura 75: Diagrama de Pareto del consumo vs RPM y % de bioetanol

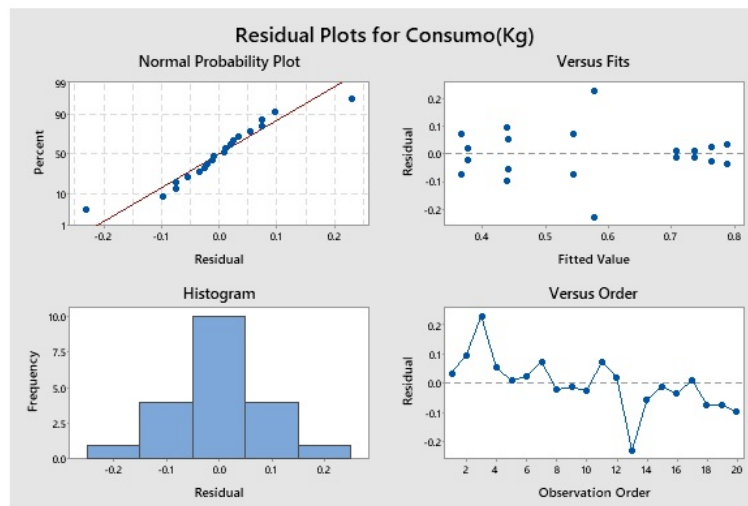


Figura 76: Gráficas cuatro en uno del consumo vs RPM y % de bioetanol

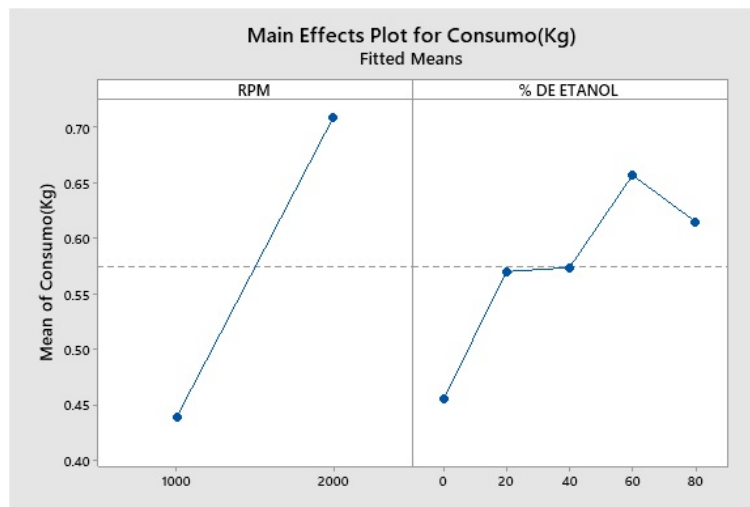


Figura 77: Gráfico de la interacción de los efectos de RPM y % de bioetanol con el consumo

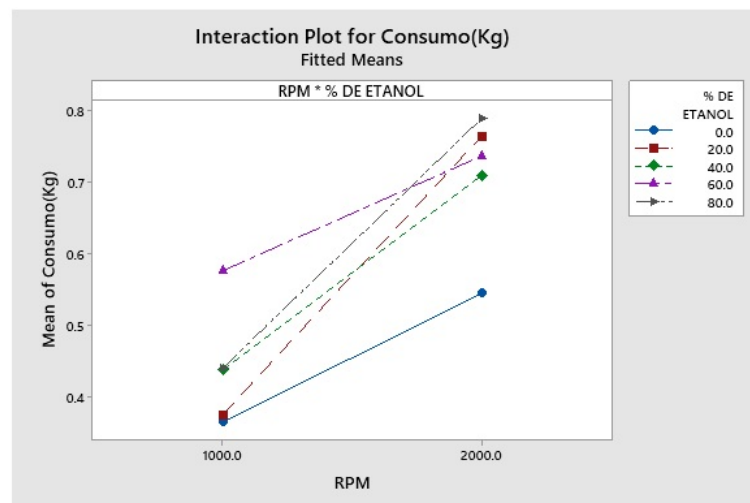


Figura 78: Gráfico de la interacción de los efectos combinados de RPM y % de bioetanol con el consumo

El consumo mostrado en las figuras 72, 73, 74, 75, 76 y 77 no se ve significativamente afectado al aumentar el porcentaje de bioetanol, sin embargo se pudo notar que al aumentar de 40% al 60% de bioetanol el consumo aumenta en peso, pero si tomamos en cuenta que solo el 60% o 40% es gasolina, efectivamente estamos consumiendo menos gasolina, si bien podría parecer que el tanque se vacía más rápido, no estamos consumiendo gasolina pura, las rpm de operación resultan totalmente significativas.

6.10. Resumen de significancia de los factores

A continuación se muestra una tabla en la figura 78 donde con una marca de revisado indica para que salida el factor es estadísticamente significativo y con una cruz para cual no es significativo, en la mayoría de los casos solo las rpm(X1) fueron significantes, por si solo el porcentaje de bioetanol(X2) no resultó significativo, sin embargo el efecto combinado de las rpm con el porcentaje de bioetanol resulto significativo para la producción de monóxido de carbono(Y3).

Factores	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9
X1	✓	X	✓	✓	✓	X	X	X	✓
X2	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X1X2	X	X	✓	X	X	X	X	X	X

Figura 79: Resumen de la significancia de los factores

7. Conclusiones

7.1. Conclusiones respecto a objetivos

Se evaluó las emisiones del motor de combustión interna, con mezclas de bioetanol de 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, para lo que se realizó una FT-IR de cada mezcla demostrando que efectivamente en los combustibles utilizados se encontraban los componentes químicos correctos.

Se realizó el rediseño y modificación del riel de inyección para las mezclas así como la adaptación de la computadora para modificar las señales de inyección.

Se llevo a cabo el diseño del experimento así como su ejecución y evaluación de los resultados y la redacción de un artículo científico.

Se participó en el programa de la hora univertaria en la facultad de ingeniería, arquitectura y diseño, así como la participación en el seminario internacional de ingeniería mecánica 2025 en la facultad de ciencias de la ingeniería y tecnología.

Logrando satisfactoriamente cumplir con los objetivos de esta investigación

7.2. Conclusiones respecto a Hipótesis

La primer hipótesis por si sola parece muy ambiciosa , pero para analizar el impacto ambiental del bioetanol contra la gasolina, se debe recordar que desde la obtención de la materia prima hasta su consumo y liberación al medio ambiente existen muchos procesos en los que se contamina el medio ambiente, siendo el bioetanol un proceso con menor impacto ambiental.

La segunda hipótesis depende de un factor muy importante y que no se logra experimentar en su totalidad con este experimento, porque si bien el motor consumió un poco más de combustible, y la potencia producida no se midió y no se le realizó ninguna modificación significativa al motor, sería muy interesante conocer que pasaría si aumentamos la compresión del mismo motor, ya que el bioetanol cuenta con un octaje superior abriendo la posibilidad de operar con relaciones de compresión más altas y más eficientes que con gasolina, esto definitivamente incrementaría la potencia del motor sin encarecer el combustible, como lo sucede con las gasolinas de alto octanaje que son más costosas y difíciles de obtener.

7.3. Conclusiones generales

Con toda la información obtenida y con los costos actuales una de las mejores mezclas para utilizar el bioetanol puede ser de 40 % bioetanol y 60 % gasolina, aun existe la posibilidad de hacer más estudios, queda como trabajo a futuro analizar las mezclas entre 40 % a 60 % para obtener con mayor precisión el porcentaje exacto donde se aproveche al máximo el bioetanol.

Otra observación muy importante es que la manera en que conducimos puede afectar drásticamente la eficiencia de nuestros vehículos, el motor no está diseñado para estar en ralentí, con base en los resultados se nota como la eficiencia aumenta al girar más rápido el motor y las emisiones disminuyen, es decir está diseñado para viajes en carretera donde las rpm son constantes a un nivel de trabajo intermedio, otro gran problema de la actualidad a considerar con el crecimiento de las ciudades es el control del tráfico, ya que utilizar los motores de combustión interna para trasladarse donde la mayor parte del tiempo se está frenando y arrancando es totalmente ineficiente e incluso perjudicial para los motores ya que al disminuir la entrada de aire tienden a sobrecalentarse.

Como recomendación para futuros experimentos, todos los motores a pesar de ser muy similares, existen motores mejor diseñados que otros, existen motores para distintas aplicaciones, y cada una de ellas fueron consideradas para condiciones de uso específicas e incluso condiciones ambientales específicas, las cuales son importantes resaltar ya que esto puede alterar totalmente los resultados, en este caso por la disponibilidad del motor y con la intención de confirmar la posibilidad de convertir motores tradicionales para ser capaces de utilizar el biocombustible se tomó la ruta de utilizar el ECOTEC 2.2L de un chevrolet 2003 en el banco de pruebas, y esto nos dice que los resultados obtenidos posiblemente no se van a replicar idénticamente en todos los motores.

Por último, en México queda mucho camino por recorrer en la aceptación del biocombustible y mucho trabajo en mejora de infraestructura para producción, distribución, venta y consumo, con esta investigación se demuestra que vale la pena hacer la conversión de los motores actuales para el uso de bioetanol y que la mayoría de motores pueden ser adaptados con facilidad y sin riesgo de fallas o daños internos al motor, siempre y cuando se haga uso correcto del biocombustible y de la operación del motor, brindando así una posible solución a los aumentos de los costos de combustible y la seguridad energética de tener un combustible alternativo.

Referencias

- [1] C. Nunez, “Gran parte de la energía del mundo procede de materiales formados hace cientos de millones de años, y ello tiene consecuencias medioambientales.,” *National Geographic*, 2022.
- [2] O. M. de la Salud, “Contaminación atmosférica.,” 2019.
- [3] J. M. Padilla-Atondo, J. Limon-Romero, A. Perez-Sanchez, D. Tlapa, Y. Baez-Lopez, C. Puente, and S. Ontiveros, “The impact of hydrogen on a stationary gasoline-based engine through multi-response optimization: A desirability function approach,” *Sustainability*, vol. 13, no. 3, 2021.
- [4] INECC., “Diagnóstico de la calidad del aire de baja california.,” 2020.
- [5] T. John, “On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connexion of radiation, absorption and conduction,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 154, pp. 201–225, 1864.
- [6] A. Svante, “On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground,” *Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 41, pp. 237–276, 1896.
- [7] P. Wang, W. Wu, B. Zhu, and Y. Wei, “Examining the impact factors of energy-related co2 emissions using the stirpat model in guangdong province, china,” *Applied Energy*, vol. 106, pp. 65–71, 2013.
- [8] M. Kousoulidou, G. Fontaras, L. Ntziachristos, P. Bonnel, Z. Samaras, and P. Dilara, “Use of portable emissions measurement system (pems) for the development and validation of passenger car emission factors,” *Atmospheric Environment*, vol. 64, pp. 329–338, 2013.
- [9] “Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atomic-catalysed destruction of ozone,” *Nature*, vol. 249, pp. 155–169,174–176,198–222,231–238, 1974.
- [10] R. P. Pradhan, M. S. Nair, J. H. Hall, and S. E. Bennett, “Planetary health issues in the developing world: Dynamics between transportation systems, sustainable economic development, and co2 emissions,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 449, p. 140842, 2024.
- [11] “Qué son las energías renovables?,” *Naciones Unidas*, S.F.
- [12] M. Höök and X. Tang, “Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—a review,” *Energy Policy*, vol. 52, pp. 797–809, 2013. Special Section: Transition Pathways to a Low Carbon Economy.
- [13] L. Zhang, C. Jia, F. Bai, W. Wang, S. An, K. Zhao, Z. Li, J. Li, and H. Sun, “A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (hptsu) technologies,” *Fuel*, vol. 355, p. 129455, 2024.

- [14] P. R. Doose, “Projections of fossil fuel use and future atmospheric co₂ concentrations,” in *Geochemical Investigations in Earth and Space Science: A Tribute to Isaac R. Kaplan* (R. J. Hill, J. Leventhal, Z. Aizenshtat, M. J. Baedeker, G. Claypool, R. Eganhouse, M. Goldhaber, and K. Peters, eds.), vol. 9 of *The Geochemical Society Special Publications*, pp. 187–195, Elsevier, 2004.
- [15] Y. H. Teoh, H. G. How, T. D. Le, H. T. Nguyen, D. L. Loo, T. Rashid, and F. Sher, “A review on production and implementation of hydrogen as a green fuel in internal combustion engines,” *Fuel*, vol. 333, p. 126525, 2023.
- [16] M. Al-Baghdadi, “Hydrogen–ethanol blending as an alternative fuel of spark ignition engines,” *Renewable Energy*, vol. 28, no. 9, pp. 1471–1478, 2003.
- [17] M. Balcilar, O. Özkan, O. Usman, S. S. Akadiri, and M. A. Zambrano-Monserrate, “A global shift: How modern technologies are powering the energy transition in the face of climate change,” *Journal of Environmental Management*, vol. 384, p. 125610, 2025.
- [18] S. I. Mussatto, G. Dragone, P. M. Guimarães, J. P. A. Silva, L. M. Carneiro, I. C. Roberto, A. Vicente, L. Domingues, and J. A. Teixeira, “Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production,” *Biotechnology Advances*, vol. 28, no. 6, pp. 817–830, 2010.
- [19] J. M. F. G. (de Galiza), S. Guillén-Lambea, and M. Carvalho, “Comparative operational carbon footprints of a vehicle in brazil: electric, ethanol, and gasoline,” *Cleaner Energy Systems*, p. 100194, 2025.
- [20] E. N. de Carvalho, A. C. P. B. Júnior, and A. C. de Mendonça Brasil, “Impact of electric vehicle emissions in the brazilian scenario of energy transition and use of bioethanol,” *Energy Reports*, vol. 10, pp. 2582–2596, 2023.
- [21] N. A. Rivera, “Sustainable biofuels. strategy for growth and energy security,” *Revista Mexicana de Economía y Finanzas Nueva Época REMEF*, vol. 17, no. 3, p. 498, 2022.
- [22] N. Taheri, H. Jahani, and M. S. Pishvaei, “Modeling sustainable bioethanol supply chain in australia: A system dynamics approach,” *Renewable Energy*, vol. 227, p. 120481, 2024.
- [23] N. N. Same, A. O. Yakub, D. Chaulagain, A. F. Tangoh, B. E. K. Nsafon, A. B. Owolabi, D. Suh, and J.-S. Huh, “The future of clean energy: Agricultural residues as a bioethanol source and its ecological impacts in africa,” *Renewable Energy*, vol. 237, p. 121612, 2024.
- [24] F. D. Arianti, J. Triastono, M. D. Pertiwi, A. Prabowo, T. Prasetyo, Chanifah, B. Haryanto, Megawati, W. Astuti, I. N. Djarot, A. D. Santoso, and S. P. Wijayanti, “Renewable energy potential of rice straw and paunch manure as bioethanol feedstocks in central java, indonesia,” *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 9, p. 100677, 2024.

- [25] W. Mabee and J. Saddler, “Bioethanol from lignocellulosics: Status and perspectives in canada,” *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 13, pp. 4806–4813, 2010. Special Issue on Lignocellulosic Bioethanol: Current Status and Perspectives.
- [26] H. Cai, J. B. Dunn, Z. Wang, J. Han, and M. Q. Wang, “Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of production of bioethanol from sorghum in the united states,” *Biotechnology for Biofuels*, vol. 6, 2013.
- [27] Óscar J. Sánchez and C. A. Cardona, “Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks,” *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 13, pp. 5270–5295, 2008.
- [28] M. Balat and H. Balat, “Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel,” *Applied Energy*, vol. 86, no. 11, pp. 2273–2282, 2009.
- [29] T. Z. Hernández, A. P. Fuentes, J. C. Tafur, B. E. B. Figueroa, and J. M. P. Castro, “Demostraciones prácticas de los retos y oportunidades de la producción de bioetanol de primera y segunda generación a partir de cultivos tropicales,” *Educación Química*, vol. 25, pp. 122–127, 2014.
- [30] “Real options, biorefineries and bioeconomy: The case of bioethanol and sugar,” *Agrociencia*, vol. 47, pp. 281–292, 2013.
- [31] K. K. Valladares-Diestra, L. Porto de Souza Vandenberghe, V. S. Nishida, L. A. Z. Torres), A. Z. Filho), and C. R. Soccol, “Integrated sugarcane biorefinery for first- and second-generation bioethanol production using imidazole pretreatment,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 381, p. 135179, 2022.
- [32] M. G. López-Ortega, Y. Guadalajara, T. L. Junqueira, I. L. Sampaio, A. Bonomi, and A. Sánchez, “Sustainability analysis of bioethanol production in mexico by a retrofitted sugarcane industry based on the brazilian expertise,” *Energy*, vol. 232, p. 121056, 2021.
- [33] M. C. Chiong, C. T. Chong, J.-H. Ng, S. S. Lam, M.-V. Tran, W. W. F. Chong, M. N. M. Jaafar, and A. Valera-Medina, “Liquid biofuels production and emissions performance in gas turbines: A review,” *Energy Conversion and Management*, vol. 173, pp. 640–658, 2018.
- [34] S. Chavan, D. Mitra, and A. Ray, “Harnessing rice husks: Bioethanol production for sustainable future,” *Current Research in Microbial Sciences*, vol. 7, p. 100298, 2024.
- [35] H. Yaqoob, Y. H. Teoh, T. S. Goraya, F. Sher, M. A. Jamil, T. Rashid, and K. A. Yar, “Energy evaluation and environmental impact assessment of transportation fuels in pakistan,” *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 3, p. 100081, 2021.
- [36] A. P. Fernández and J. A. V. Venegas, “Bioethanol production in mexico: Socio-economic implications,” *Revista Internacional Administracion y Finanzas*, vol. 10, pp. 13–24, 2017.

- [37] P. F. Alberto, R. M. M. Iliana, C.-C. Ignacio, and M. L. David, “La producción de bioetanol y su impacto en el precio de productos agrícolas en México,” *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, vol. 4, no. 12, p. 597–602, 2017.
- [38] A. Janković, G. Chaudhary, and F. Goia, “Optimization through classical design of experiments (doe): An investigation on the performance of different factorial designs for multi-objective optimization of complex systems,” *Journal of Building Engineering*, vol. 102, p. 111931, 2025.
- [39] K. A. Tarach, A. Walczyk, A. Olszewska, J. Sobalska, O. Rogala, and K. Góra-Marek, “Operando ft-ir and uv-vis spectroscopic studies emphasise the nature of coke species formed over ssz-13 zeolite during ethanol-to-hydrocarbons process,” *Catalysis Today*, vol. 453, p. 115274, 2025.
- [40] ENERAC, “Gas analyzer enerac 700,” 2024.
- [41] VEEPEAK, “Obdcheck ble+user instructions,” 2025.
- [42] EFlexFuel, “Eflexfuel,” 2025.
- [43] G. TRUPER, “Báscula electrónica multifunciones 40 kg, pretul,” 2025.