

**ESTUDIO DE LAS PRESTACIONES Y EMISIONES  
CONTAMINANTES DE PEQUEÑOS MOTORES OTTO  
CON DIFERENTES MEZCLAS GASOLINA Y ETANOL  
PROVENIENTE DE LA CAÑA DE AZÚCAR**

Director:

Ph.D., M.Sc., Ing. Oscar Hernando Venegas Pereira

Estudiante de investigación:  
Hernán David Pardo Oñate

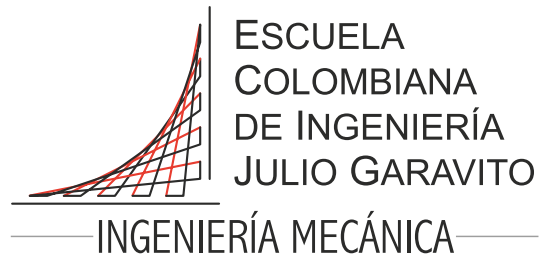
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Programa de Ingeniería Mecánica

Bogotá D.C., Colombia

2020





**ESTUDIO DE LAS PRESTACIONES Y EMISIONES  
CONTAMINANTES DE PEQUEÑOS MOTORES OTTO  
CON DIFERENTES MEZCLAS GASOLINA Y ETANOL  
PROVENIENTE DE LA CAÑA DE AZÚCAR**

Director:

Ph.D., M.Sc., Ing. Oscar Hernando Venegas Pereira

Estudiante de investigación:

Hernán David Pardo Oñate

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Programa de Ingeniería Mecánica

Bogotá D.C., Colombia

2020



**ESTUDIO DE LAS PRESTACIONES Y EMISIONES  
CONTAMINANTES DE PEQUEÑOS MOTORES OTTO  
CON DIFERENTES MEZCLAS GASOLINA Y ETANOL  
PROVINIENTE DE LA CAÑA DE AZÚCAR**

Director:

Ph.D., M.Sc., Ing. Oscar Hernando Venegas Pereira

Estudiante de investigación:

Hernán David Pardo Oñate

Trabajo dirigido

Línea de Investigación:

Energía y potencia en sistemas térmicos

Grupo de Investigación:

Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica (DSIM)

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Programa de Ingeniería Mecánica

Bogotá D.C., Colombia

2020



## **Agradecimientos**

*A mis padres, Fabio Hernando Pardo Díaz y Gloria Cecilia Oñate Flórez, por su apoyo, consejo y paciencia durante mi desarrollo como ingeniero mecánico, a los cuales les debo mi formación como persona.*

*Al Doctor, Ing. Oscar Hernando Venegas Pereira, profesor de planta de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, mi profesor y tutor en el área de máquinas térmicas, quien me infundo un pensamiento crítico y analítico.*

*A Dayani Triana Triana, auxiliar del laboratorio de combustión de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por su colaboración, ayuda, consejo y paciencia en el proceso de aprendizaje, y en el desarrollo de este trabajo, brindando ideas y soluciones.*

*A John Henry Asprilla Hincapié, estudiante del programa de Ingeniería mecánica de la Escuela Colombiana de ingeniería, por su ayuda en la construcción del banco y la toma de datos durante las pruebas con diferentes mezclas de etanol-gasolina.*





## **Resumen**

Este trabajo dirigido, tiene como finalidad presentar un estudio de prestaciones y emisiones contaminantes utilizando diferentes mezclas de etanol y gasolina en un motor de pequeña cilindrada, que es usado para impulsar un aeromodelo; para ello, se diseñó e implemento un banco de pruebas que permitiera medir parámetros efectivos de empuje y gasto másico, así como las emisiones contaminantes de los gases de escape, estas pruebas se realizaron bajo tres condiciones de régimen de giro del motor, con el objetivo de determinar el consumo específico de combustible y el porcentaje de gases contaminantes. Con dichos datos se desarrolla un análisis en el cual se visualizará la viabilidad de aumentar el uso del etanol como combustible en este tipo de motores.

**Palabras clave:** Motor de combustión interna alternativo (MCIA), Combustibles alternativos, Mezclas; Emisiones; Empuje; Consumo específico de combustible.

## **Abstract**

The purpose of this directed work is to present a study of polluting benefits and emissions using different mixtures of ethanol and gasoline in a small displacement engine, which is used to drive a model aircraft; To this end, a test bench was designed and implemented to measure effective thrust and mass expenditure parameters, as well as pollutant emissions from exhaust gases, these tests were carried out under three engine speed conditions, with the objective to determine the specific fuel consumption and the percentage of polluting gases. With these data an analysis is developed in which the viability of increasing the use of ethanol as fuel in this type of engines will be visualized.

**Keywords: Reciprocating engine (RE), Alternative Fuels, Mixtures; Emissions; Thrust; Specific fuel consumption.**

---

# Contenido

---

	<b>Pág.</b>
<b>Contenido</b> .....	<b>IX</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>XI</b>
<b>Lista de Tablas</b> .....	<b>XII</b>
<b>Lista de Símbolos y Abreviaturas</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>Capítulo 1. Antecedentes y Marco Conceptual</b> .....	<b>3</b>
1.1. Antecedentes .....	3
1.2. Combustible alternativos.....	7
1.2.1 Etanol .....	8
1.3. Variables de medición.....	10
1.3.1 Empuje .....	10
1.3.2 Gasto másico .....	12
1.3.3 Emisiones .....	12
<b>Capítulo 2. Planteamiento del Problema</b> .....	<b>15</b>
2.1. Descripción y Formulación del Problema .....	15
2.2. Justificación.....	16
2.3. Objetivos .....	17
2.3.1 Objetivo general.....	17
2.3.2 Objetivos específicos .....	17
2.4. Alcances y Limitaciones .....	17
2.4.1 Alcances .....	17
2.4.2 Limitaciones.....	18
2.5. Metodología .....	18
2.6. Cronograma.....	21
<b>Capítulo 3. Resultados y Análisis</b> .....	<b>23</b>
3.1. Implementación del Banco de Pruebas .....	23
3.2. Determinación de mezclas a ensayar .....	27
3.3. Resultados y análisis de prestaciones.....	30
3.4. Resultados y análisis de emisiones.....	35
<b>Capítulo 4. Conclusiones y Trabajos Futuros</b> .....	<b>41</b>

---

4.1. Conclusiones .....	41
4.2. Trabajos futuros .....	43
<b>Anexo A. Explosionado del Banco.....</b>	<b>45</b>
<b>Anexo B. Soporte Motor .....</b>	<b>47</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>49</b>

---

# Lista de Figuras

---

	<b>Pág.</b>
Figura 1.1: Mapa de las plantas productoras de etanol. [9, 10] .....	5
Figura 1.2: Costo de etanol y de la gasolina. [9]. .....	7
Figura 1.3: Esquema del procesamiento de la caña de azúcar para la obtención de etanol. ....	9
Figura 1.4: Esquema de generación de empuje en una hélice. ....	11
Figura 2.1: Esquema metodológico del proyecto. ....	20
Figura 3.1: Simulación del soporte del motor. ....	25
Figura 3.2: Poder calorífico en función del porcentaje de etanol. ....	30
Figura 3.3: Gasto másico de combustible en función del régimen de giro del motor. ....	31
Figura 3.4: Empuje de datos experimentales y teóricos. ....	32
Figura 3.5: Empuje en función del régimen de giro del motor. ....	32
Figura 3.6: Consumo específico en función del régimen de giro del motor. ....	33
Figura 3.7: Emisiones de monóxido de carbono en función del régimen de giro del motor. ....	36
Figura 3.8: Emisiones de dióxido de carbono en función del régimen de giro del motor. ....	36
Figura 3.9: Exceso de oxígeno en función del régimen de giro del motor. ....	37
Figura 3.10: Relación estequiometría en función del régimen de giro del motor. ....	38
Figura 3.11: Emisiones de hidrocarburos en función del régimen de giro del motor. ....	39

---

# Lista de Tablas

---

	<b>Pág.</b>
Tabla 1.1: Producción de etanol en las principales plantas de Colombia. [9].....	6
Tabla 1.2: Comparación de parámetros importantes entre la gasolina y el etanol. ....	10
Tabla 2.1: Plan de ensayos. ....	19
Tabla 2.1: Cronograma.....	21
Tabla 3.1: Porcentajes de mezclas para gasolina-etanol en 400 ml. ....	29

---

# Lista de Símbolos y Abreviaturas

---

## Latinos

<i>CO</i>	Monóxido de carbono
<i>CO<sub>2</sub></i>	Dióxido de carbono
<i>O<sub>2</sub></i>	Oxígeno
<i>HC</i>	Hidrocarburos
<i>N</i>	Newton
<i>g</i>	Gramos
<i>s</i>	segundos
<i>h</i>	Hora

## Griegos

$\lambda$	Coefficiente de exceso de aire
-----------	--------------------------------

## Subíndices

<i>S</i>	Salida
<i>O</i>	Entrada
<i>comb</i>	combustión

## Abreviaturas

<i>MCIA</i>	Motor de combustión interna alternativo
<i>E</i>	Empuje
<i>Ce</i>	Consumo específico de combustible
$\dot{m}$	Gasto másico de combustible
<i>E10</i>	Mezcla con el 10% de etanol
<i>E15</i>	Mezcla con el 15% de etanol
<i>E20</i>	Mezcla con el 20% de etanol
<i>E25</i>	Mezcla con el 25% de etanol
<i>E30</i>	Mezcla con el 30% de etanol





---

# Introducción

---

En este documento se presenta un trabajo dirigido, el cual estudia las prestaciones y emisiones contaminantes de un motor de encendido provocado que posee una cilindrada de 15 cm<sup>3</sup>, donde se utiliza mezclas gasolina-etanol como combustible; por lo tanto, se estudia el comportamiento de los parámetros efectivos como consumo y empuje, además de analizar la influencia del uso de las mezclas en las emisiones contaminantes de los gases de escape del motor.

Para ello, en el primer capítulo se darán a conocer la problemática actual de los motores de combustión interna y su impacto al medio ambiente, los ensayos y estudios realizados a los motores de combustión interna para disminuir dicho impacto sin afectar las prestaciones del motor. En éste mismo capítulo, se realiza la descripción y formulación del problema a dar solución, para el cual se presenta la justificación, los objetivos generales y específicos, el alcance y las limitaciones del trabajo, para así desarrollar la metodología adecuada, donde se plantea el cómo realizar las pruebas al motor.

En el segundo capítulo se realiza la descripción y formulación del problema a dar solución, para el cual se presenta la justificación, los objetivos, general y específicos, el alcance y las limitaciones del trabajo, para así desarrollar una metodología que estará dividida en módulos, para los cuales se desarrolla un plan de ensayos adecuado, donde se plantea las mezclas a probar, el nivel de carga que será sometido el motor durante las pruebas y el número de frecuencias por cada nivel carga y combustible, adicionalmente se presenta el cronograma seguido para la realización del trabajo.

El tercer capítulo se muestran los resultados y análisis, que se llevaron a cabo en el estudio realizado al motor; por lo tanto, se dividen en cuatro secciones, banco de pruebas, determinación de mezclas a ensayar, prestaciones y emisiones, en cada sección se hace una descripción de los resultados obtenidos, en la cual se evidencian los cambios que se presentaron bajo las diferentes condiciones de operación del motor y tipos de combustible utilizados, donde por medio de tablas y

gráficas se muestra el comportamiento del motor y se desarrolla un análisis en donde se explica las causas del cambio de los parámetros y las emisiones que fueron medidas.

En el cuarto capítulo este documento se dan las conclusiones relacionadas con el estudio, las pruebas y los análisis desarrollados al motor utilizando diferentes mezclas entre etanol y gasolina, donde se contextualiza sobre las ventajas y desventajas de aumentar el uso del etanol como combustible, según las pruebas y análisis desarrollados, adicionalmente, se presenta una sección de recomendaciones para la ejecución de pruebas y análisis de resultados.

---

# Capítulo 1. Antecedentes y Marco Conceptual

---

En este capítulo, se encuentra la información previa necesaria para la comprensión y realización de un estudio en un motor que tiene como combustibles mezclas; para ello, se iniciará con los antecedentes que se tienen con respecto a los estudios realizados en motores de pequeño cilindraje.

Posteriormente se presenta la teoría y los conceptos referentes a combustibles alternativos, como es la forma de fabricación u obtención, división, su influencia y su proyección en el territorio nacional, en donde se dedica una sección para hablar sobre el etanol.

Y finalmente se darán a conocer las diferentes formas de medición para medir los parámetros de un motor, aquí se presentan las medidas esenciales para la caracterización de un motor en este estudio, las cuales son el empuje, el consumo de combustible y las emisiones contaminantes.

## 1.1. Antecedentes

Las emisiones contaminantes de los motores que consumen combustible fósil han generado múltiples problemas al ambiente y a la salud de las personas, este problema es mucho más visible en las ciudades debido a la alta concentración de vehículos, fabricas e industrias, que utilizan motores para sus actividades diarias.

Esto ha llevado a que las grandes ciudades se han emitido normas ambientales que restringe el uso de determinados motores, el caso más visible es la movilidad para vehículos y motocicletas que utilicen motores de 2 tiempos, las cuales contamina entre un 5 a 15 por ciento más que un motor de 4 tiempos para el mismo cilindraje.

No obstante, en ocasiones este problema de emisiones contaminantes se traslada a las zonas rurales en donde no existe un control y una conciencia ambiental que evite dichas afectaciones al

medio ambiente y a la salud de personas y animales, por ello la importancia de buscar una solución que sea útil a todos los motores en todos los sectores.

Por ello y debido a los problemas ambientales producidos por las emisiones contaminantes de los motores de combustión interna o MCI, se busca la forma que los motores emitan menos gases contaminantes, por ello se buscan métodos entre los que se incluyen los combustibles alternativos o sustitutos los cuales permiten bajar las emisiones contaminantes, pero el inconveniente de utilizar estas mezclas es que pueden llegar a afectar la potencia y el consumo del motor sin importar el cilindraje; por lo tanto, se deben realizar medidas de ambos parámetros para mirar de forma global el comportamiento del motor a las mezclas.

Los combustibles alternativos se dividen en dos categorías, la primera categoría son los combustibles sintéticos, los cuales se obtienen mediante procesos termoquímicos a partir de carbón, o gas natural, costosos por su complejidad en la producción, pero con mayores beneficios al ambiente debido a la eliminación de compuestos químicos que no afectan al medio ambiente como es el azufre.

La segunda categoría son los combustibles provenientes de biomasa, a estos combustibles también se le conocen como biocombustibles, los cuales se obtienen mediante la fermentación o extracción del compuesto similar al combustible a sustituir, para el caso de la gasolina se utiliza etanol, que es obtenido principalmente por medio de la fermentación.

Con la mezcla entre gasolina y etanol, varios investigadores han realizado ensayos, análisis y estudios de las propiedades físicas y químicas del combustible [1], [2], [3], [4], las prestaciones y emisiones en motores de mediano y gran cilindraje, con ciclos de 2 y 4 cuatro tiempos [5], pero se han hecho muy pocas investigaciones en motores de pequeñas cilindradas, en especial de 2 tiempos como [6], [7], [8], ya que su impacto en el medio es bajo debido a la volumen de emisión de gases; sin embargo es más contaminante ya que el combustible que utiliza es una mezcla entre gasolina y aceite, lo cual genera unos gases más nocivos para la salud.

Dicha problemática también está dirigida a la forma de obtención de combustibles para los motores que utilizan diésel y gasolina, ya que en Colombia se tiene un gran potencial para mejorar los combustibles usados aumentando los porcentajes de mezclas utilizando sustituyentes orgánicos como el etanol para el caso de la gasolina [9], ya que en dicha referencia se explica como el etanol es el producto químico que más se asemeja en la fórmula química a la gasolina, además se explica cómo sería el modo fabricación y la materia prima necesaria para lograrlo de forma industrial.

En Colombia, la producción de bioetanol se da principalmente en la zona sur occidente del país, específicamente en el departamento del Valle del Cauca donde se encuentran la gran mayoría de los ingenios azucareros y las extensiones del cultivo de caña de azúcar, quienes producen la mayor parte de bioetanol en el país. En la Figura 1.1 [9], [10], se muestra la localización geográfica de las plantas productoras de bioetanol en Colombia.

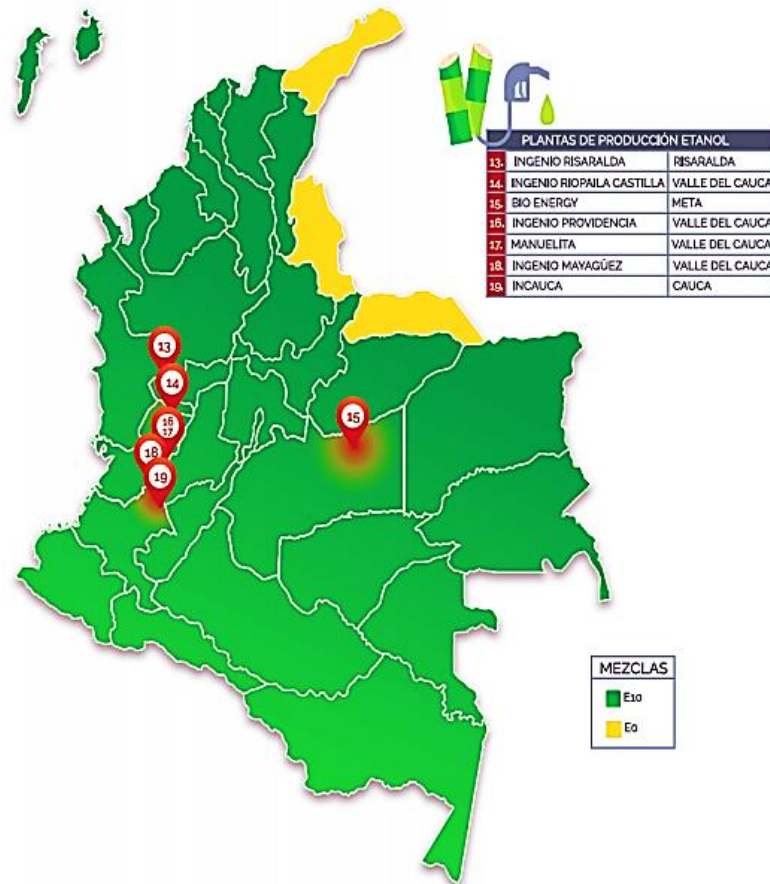


Figura 1.1: Mapa de las plantas productoras de etanol. [9, 10]

Hoy en día, Colombia cuenta con una producción de etanol aproximada de 2.170.000 L/día, como se muestra en la *Tabla 1.1: Producción de etanol en las principales plantas de Colombia.* [9].Tabla 1.1 [9], un valor muy pequeño en comparación al consumo de gasolina diaria en Colombia que gira en torno a los 12.243.000 L/día, estos son datos de Fedecombustibles, por ello se necesita nuevas fuentes de producción con base en otras materias orgánicas que pueden ser cultivadas en el país como es el caso de la remolacha, la yuca o maíz.

Tabla 1.1: Producción de etanol en las principales plantas de Colombia. [9].

Planta	Localización	Etanol [L/día]
Incauca,	Miranda, Cauca	350 000
Ingenio Riopaila Castilla	La Paila, Valle del Cauca	400 000
Ingenio Risaralda	La Virginia, Risaralda	100 000
Bioenergy	Puerto López, Meta	500 000
Ingenio Providencia	Palmira, Valle del Cauca	300 000
Ingenio Mayagüez	Candelaria, Valle del Cauca	250 000
Manuelita	Palmira, Valle del Cauca	250 000

Actualmente, la gasolina comercial generalmente tiene un porcentaje de etanol pequeño en su composición, pero este porcentaje varía dependiendo del país y el modo de fabricación y la materia prima utilizada, en Colombia el porcentaje de etanol está cercano al 10% y según información de Fedecombustibles este etanol es fabricado a base de caña de azúcar debido a la abundancia del cultivo en el país; sin embargo, este porcentaje puede ser aumentado trayendo mayores beneficios al medio ambiente y disminuyendo la demanda por el petróleo [9].

Por ejemplo, Fedecombustibles, registra el costo de los combustibles incluyendo los biocombustibles, es por ello que en la Figura 1.2 [9], se muestra el costo que paga el consumidor final, de la cual cabe resaltar que el costo del etanol es mucho menor que la gasolina, en cuyo caso se ve la oportunidad de aumentar el uso de etanol en los combustibles actuales trayendo doble beneficio a la sociedad colombiana, reducción de emisiones contaminantes y precios más bajos de los combustibles [9].

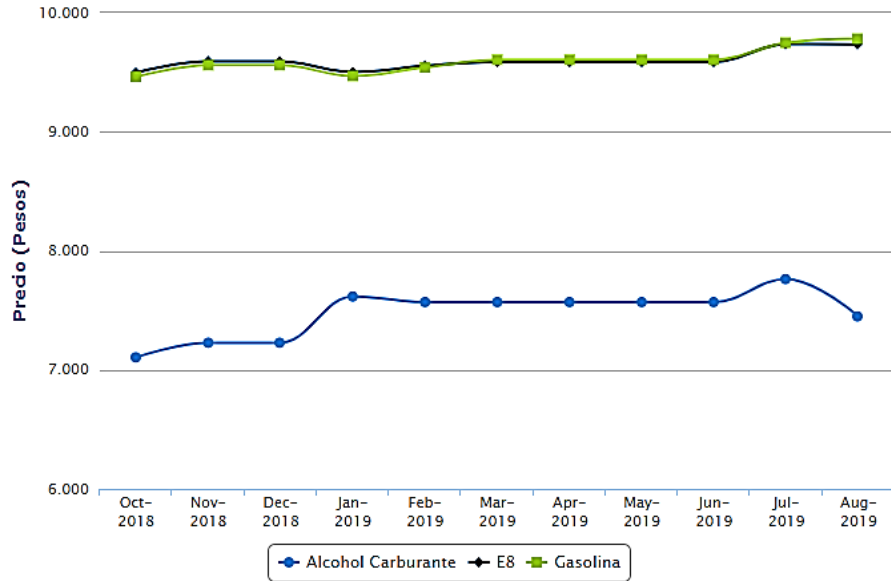


Figura 1.2: Costo de etanol y de la gasolina. [9].

Ya sean realizado estudios en la búsqueda del porcentaje adecuado para una mezcla de biocombustibles a nivel comercial, siendo este del 10% el más común a nivel latinoamericano, puesto que no se deben de realizar cambios en el motor, como la adición o adecuación de equipos, tiempos de mantenimiento, entre otros, sin embargo, el porcentaje puede ser elevado como se muestra en [5]. De este artículo se resalta cual sería el porcentaje de mezcla de etanol-gasolina, E0, E25, E50, E75 y E100, adecuado para motores de altas relaciones de compresión como es el caso de un motor monocilindro de 250c.c.

## 1.2. Combustible alternativos

Los combustibles alternativos o biocombustibles son combustibles generados a partir de material orgánico para motores a gasolina o diésel, para que estos combustibles se puedan usar en los motores, su composición química debe ser muy similar a la composición de la gasolina o el diésel, dicho esto los alcoholes como el etanol o el n-butanol, los cuales se producen por medio de un proceso de transformación de azúcares en alcoholes, mientras que para el biodiesel, es la destilación de un aceite pesado similar en densidad y viscosidad al diésel.

En Colombia actualmente se está produciendo en Bioetanol y Biodiesel para la mezcla con la gasolina y el diésel comercial, el porcentaje actual este entorno al 10%, pero se espera que para el 2020 este porcentaje aumente al 12%, esto debido a la puesta en vigencia de la resolución 40666 y la resolución 40689 del 30 de Agosto de 2019 emitida por los ministerios de Agricultura, Ambiente

y Energía, la primera resolución hace énfasis en el aumento del porcentaje de biocombustibles, mientras que en la segunda resolución hace referencia específica al uso de etanol en motores.

### **1.2.1 Etanol**

La gasolina comercial generalmente tiene un porcentaje de etanol bastante pequeño en su composición, pero este porcentaje varía dependiendo del país, el modo de fabricación y la materia prima utilizada, en Colombia el porcentaje de etanol está cercano al 10%, según Fedecombustibles [9], este etanol es fabricado a base de caña de azúcar debido a la abundancia del cultivo en el país, sin embargo, este porcentaje puede ser aumentado trayendo mayores beneficios al medio ambiente y disminuyendo la demanda por el petróleo.

El etanol o alcohol Etílico puede producirse de dos formas, la mayor parte de la producción mundial se obtiene del procesamiento de materia de origen renovable con alto contenido azúcares como el almidón o glucosas simples que se encuentran en cultivos como caña de azúcar, maíz o derivados como melaza, sorgo, remolacha entre otros, a este etanol carburante se conoce como bioetanol.

Por otra parte, también puede obtenerse etanol mediante la modificación química del etileno, este proceso consta en hacer pasar el gas de etileno por un reactor que debe contener un ácido sulfúrico con un catalizador de sulfato de plata o se utiliza ácido fosfórico soportado en óxido de silicio, cada proceso debe tener sus condiciones de presión y temperatura, posteriormente del reactor saldrá un líquido que debe ser destilado para obtener el etanol.

Para la extracción del etanol por medio de material orgánico, se realiza una fermentación alcohólica que es un proceso por el cual se da la transformación de materias primas orgánicas con altos contenidos de azúcares, este es un proceso muy utilizado en la fabricación de bebidas y biocombustibles, en el caso de la caña de azúcar se puede emplear un método en el cual se obtiene glucosa y fructosa a partir de hidrólisis de la sacarosa, abundante en la caña y se exponen a actividades enzimáticas o bacterianas para la obtención de moléculas de piruvato o glucólisis y finalmente etanol, como se muestra en la Figura 1.3.

Para aclarar, la destilación es un proceso mediante el cual se separan dos sustancias por medio de la evaporación y posterior condensación de una de ellas, para el caso de obtención de etanol se utiliza para la eliminación de agua.



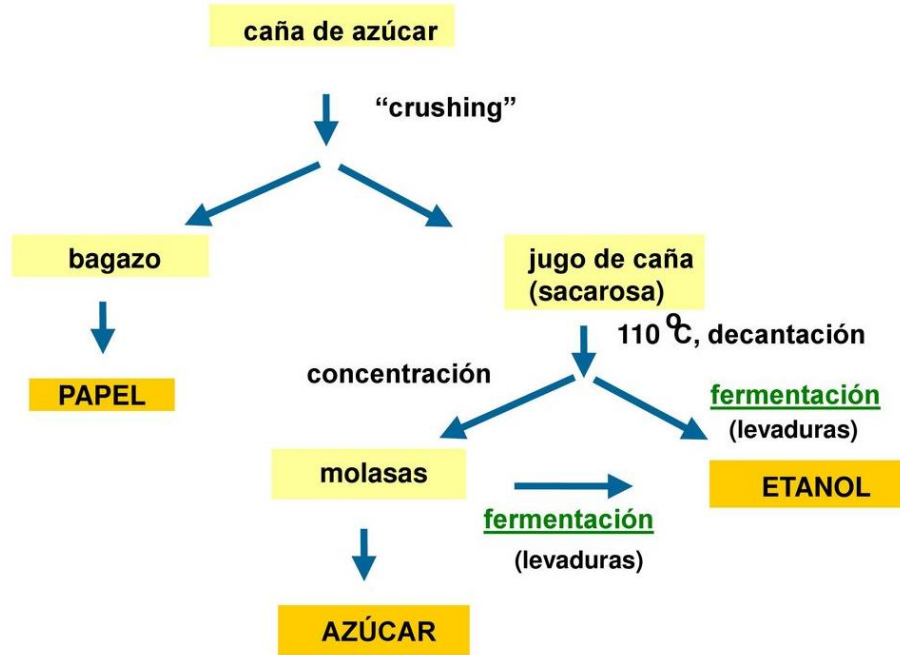


Figura 1.3: Esquema del procesamiento de la caña de azúcar para la obtención de etanol.

En cuanto a la descripción del etanol como combustible es posible nombrar las siguientes características encontradas en estudios previos, en su composición se halla un índice de octanos mayor a los de la gasolina refinada del petróleo, con lo cual se puede asegurar una mayor relación de compresión en los ciclos del motor. También, su presión de vapor es sustancialmente menor a la de la gasolina con lo cual se disminuyen las pérdidas por evaporación, sin embargo, su contenido energético equivale a casi el 66% del contenido por la gasolina.

En la Tabla 1.2, presenta una comparación exhaustiva de algunos parámetros de importancia en los combustibles entre el etanol y la gasolina comercial, en las cuales se exponen propiedades físico químicas que describen estos combustibles como la temperatura de auto ignición, el poder calorífico superior e inferior y el número de octanaje.

Tabla 1.2: Comparación de parámetros importantes entre la gasolina y el etanol.

Propiedad	Gasolina	Etanol
Temperatura de ebullición (°C)	38.8	78.5
Temperatura de inflamación (°C)	21	13
Temperatura de auto ignición (°C)	250	363
Presión de vapor a 20 °C (KPa)	6.5-7.8	5.95
Poder calorífico inferior (KJ/kg)	44000	26810
Poder calorífico superior (KJ/kg)	47300	29670
Número de octano	91/80	109/98

Como aclaración, el poder calorífico superior se refiere a la cantidad total de calor generado en la combustión completa del combustible cuando el vapor de agua generado en el proceso está condensado, es decir, se tiene en cuenta este calor desprendido en el cambio de fase, mientras que el poder calorífico inferior no se tiene en cuenta.

Para la producción de etanol, principal biocombustible con capacidad de masificación para uso en motores regidos por el ciclo Otto, en Colombia principalmente la zona sur occidente del país es en esencia el epicentro de la producción masiva, dado que, en el valle del río cauca se encuentran las condiciones climatológicas ideales para la cosecha y molienda de caña de azúcar, la cual es en Colombia la principal fuente para el refinamiento de etanol.

### 1.3. Variables de medición

Existen varias formas de medir parámetros efectivos; por lo tanto, en esta sección se exponen las diferentes formas de realizar mediciones y los instrumentos que son empleados para hacerlo, también en dicha sección se explica de forma breve como se realiza la medición.

#### 1.3.1 Empuje

El empuje es una fuerza de acción descrita cuantitativamente por la tercera ley de Newton, esta fuerza se puede dar cuando una masa de aire es acelerada en una dirección y sentido fijo generando una acción que causará otra fuerza sobre el sistema igual en magnitud, en la misma dirección, pero en sentido contrario o también llamado una reacción.

Por ejemplo, las fuerzas sobre un perfil alar se generan cuando la hélice gira a gran velocidad, lo cual genera que el aire a su alrededor se acelera y hace que empuja el aire hacia la parte posterior

del avión. Dicho empuje es proporcional a la masa del aire multiplicada por la velocidad media del flujo de aire como se muestra en la Figura 1.4.

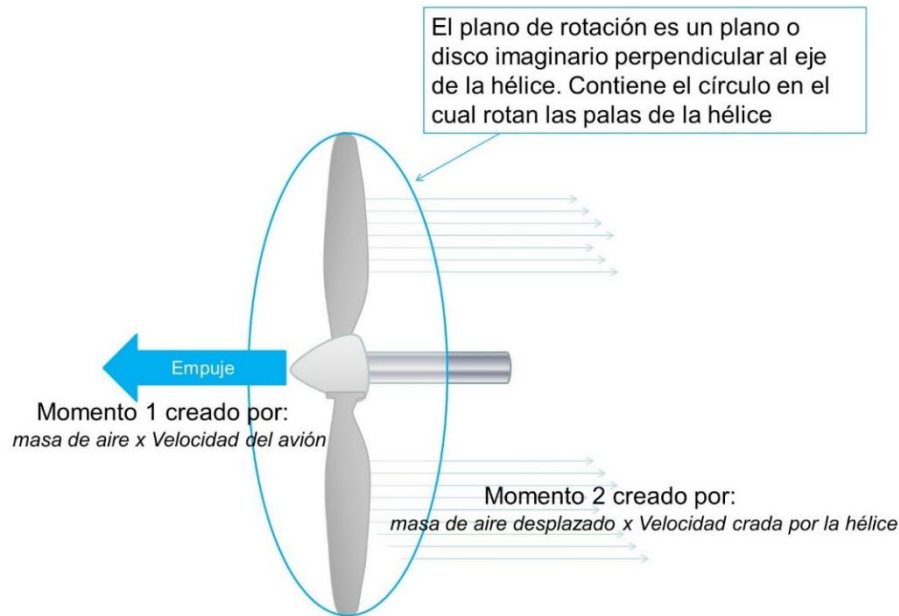


Figura 1.4: Esquema de generación de empuje en una hélice.

Para la medición de empuje en hélices existen tres formas: la primera de ellas es por medio de bancos de prueba, este equipo es capaz de medir las prestaciones de un motor en funcionamiento de potencia, par, revoluciones y rendimiento. El principio de funcionamiento de un banco es ejercer una determinada carga al motor que frene el conjunto hélice motor, actualmente existen diversos tipos de bancos de pruebas y se diferencian por el tipo de carga que se aplica al motor, entre ellos se encuentran los frenos de fricción, los frenos hidráulicos, los frenos eléctricos, frenos hídricos o frenos dinamométricos.

La segunda forma es con el uso de anemómetros, que son instrumentos que miden la velocidad de aire y con ello se puede calcular la fuerza que está ejerciendo el aire propulsado por la hélice, este sistema se utiliza cuando se tienen hélices de gran tamaño, como hélices de generación eléctrica. Por último, la tercera forma es acoplar un dinamómetro, el cual mide la fuerza ejercida por un conjunto de hélice-motor, este sistema se debe montar sobre un mecanismo que genera la menor fricción.

### 1.3.2 Gasto másico

El gasto másico, flujo másico o caudal másico es la magnitud física que expresa la variación de la masa con respecto al tiempo en un área específica. En el Sistema Internacional se mide en unidades de kilogramos por segundo, mientras que en el sistema anglosajón se mide en libras por segundo.

Para medir el consumo de combustible se puede realizar de tres formas, la primera de ellas es por medio de un flujómetro o caudalímetro, el cual mide el caudal por unidad de tiempo, el caudal es la velocidad de paso del combustible por una determinada área de control, normalmente se encuentra en la línea combustible aguas arriba de los inyectores y filtros de combustible.

La segunda forma consta en medir el cambio de volumen de un tanque de combustible en el tiempo, la técnica de realización es tener un determinado volumen de control al cual se le toma el tiempo en pasar por determinadas marcas que sean establecido con anterioridad, posteriormente se le debe realizar una conversión de unidades a las unidades de consumo específico que es kilogramo por el tiempo.

La otra forma de medir el consumo es por medio gravimétrico que consiste en tener una báscula donde se monta el tanque de combustible y se determina el intervalo de medición en el tiempo y se mira el cambio de la masa que registra la báscula, este método es útil ya que permite sacar de una forma rápida el consumo específico de combustible, que es un parámetro comparativo entre motores.

### 1.3.3 Emisiones

Emisiones son todos los fluidos gaseosos, puros o con sustancias en suspensión; así como toda forma de energía radioactiva, electromagnética o sonora, que emanen como residuos o productos de la actividad humana y o natural; sin embargo, las emisiones que emanan de los motores son generalmente dos, emisiones gaseosas o gases de escape y emisiones sonoras o ruido.

Las emisiones afectan la calidad del aire en el área local o regional, ya que en el proceso de combustión ocurre la formación gases como dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y material particulado (HC), que pueden contener metales menores. Las cantidades de cada uno dependerán del tipo y el tamaño del motor, así como del tipo y calidad del combustible, además de la manera de cómo está ocurriendo la quema del combustible en la cámara de combustión.

Estas emisiones de gases se miden con un analizador de gases, el cual utiliza una sonda que capta una porción de gases que son analizadas por medio de filtros los cuales separan y registran según en porcentajes o por partes por millón. Existen varios analizadores y dependen de la capacidad

de analizar los diferentes gases de combustión, no obstante, deben incluir como mínimo los resultados de monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxígeno e hidrocarburos o inquemados. Por otra parte, algunos analizadores de gases tienen la capacidad de analizar los óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre hasta la opacidad de los gases de escape si se requiere.



---

# Capítulo 2. Planteamiento del Problema

---

En este capítulo se plantean los aspectos relacionados con el planteamiento del problema, ya que enmarca el rumbo de la investigación y su relación con el campo de investigación de ingeniería mecánica especialmente en el área de emisiones contaminantes, para los cual se presentan: la descripción del problema, justificación, objetivos, alcance, limitaciones y metodología de trabajo.

## 2.1. Descripción y Formulación del Problema

Las ciudades están sufriendo por la mala calidad de aire, especialmente por la contaminación que emiten los vehículos que utilizan motores MCI; por lo tanto, se han lanzado normativas para reducir las emisiones, por esta razón se busca la forma que dichos motores contaminen menos por medio de múltiples métodos, uno de ellos la utilización de biocombustibles y combustibles sintéticos.

Dicho esto, se busca un combustible con características físico químicas similares a la gasolina comercial, siendo el etanol un buen candidato para la mezcla con dicho combustible, el etanol o alcohol Etilico puede producirse de dos formas, la mayor parte de la producción mundial se obtiene del procesamiento de materia de origen renovable con alto contenido de azúcares como caña de azúcar, maíz o derivados como melaza, sorgo, remolacha entre otros, el etanol producido así se conoce como bioetanol, por otra parte, también se puede obtener el etanol mediante la modificación química del etileno, en un proceso de deshidratación [5].

Actualmente la gasolina tiene un porcentaje de etanol bastante pequeño en su composición, pero este porcentaje varía dependiendo del país, el modo de fabricación y la materia prima utilizada, siendo en Colombia el porcentaje de etanol varia de 8 a 10 por ciento dependiendo de la cosecha del año, esté etanol es fabricado a base de caña de azúcar debido a la abundancia del cultivo en el país;

sin embargo, este porcentaje puede ser aumentado trayendo mayores beneficios al medio ambiente y disminuyendo la dependencia por el petróleo [9].

Se encuentra varios estudios realizados en motores, especialmente en los motores de medio y gran cilindraje [5, 11, 12], que normalmente son los motores que se utilizan para vehículos, a los cuales se les realiza diferentes medidas de potencia, torque y consumo con una determinada mezcla de etanol y gasolina.

Pero el porcentaje de la mezcla depende el tipo de motor y las condiciones al cual estará sometido; sin embargo, haciendo una búsqueda bibliográfica no se ha encontrado estudios en motores con cilindrajes menores a 190cc, por eso se plantea la siguiente pregunta de investigación.

*¿Cuál es el efecto que tiene el bioetanol en términos de prestaciones y emisiones en motores de pequeña cilindrada?*

## **2.2. Justificación**

Este trabajo de investigación se justifica principalmente en tres aspectos, siendo el primero de ellos, es estudiar el impacto ambiental en motores de pequeñas cilindradas, en especial de 2 tiempos, ya que su impacto en el medio es bajo debido al volumen de emisión de gases; sin embargo, es más contaminante ya que el combustible que utiliza es una mezcla entre gasolina y aceite, lo cual genera unos gases más nocivos para la salud. Actualmente se usan en aplicaciones agrícolas remotas como bombas, guadañas, motosierras entre otros, sin embargo, no se tiene un censo poblacional de dichos motores.

El segundo aspecto es estudiar las prestaciones y su relación emisiones contaminantes cuando se hace un cambio de combustibles por las mezclas con diferentes porcentajes de etanol, lo cual pueden variar las características de combustión, por ello el etanol utilizado será a base de caña de azúcar, que es uno de los alcoholes de mayor fabricación en Colombia.

El tercer y último aspecto es generación de información sobre las emisiones en motores de pequeña cilindrada que en la actualidad se han extendido para el uso de drones de gran tamaño, también en aplicaciones en aeromodelos para la recreación, ya que los motores utilizados tienen un cilindraje menor a 100cc y funcionan con un ciclo de 2 tiempos.



## 2.3. Objetivos

Esta investigación se planteó los siguientes objetivos para dar respuesta a la pregunta de investigación, enfocándose en las mezclas con diferente porcentaje de composición de gasolina y el etanol a base de caña de azúcar.

### 2.3.1 Objetivo general

Estudiar las prestaciones y emisiones contaminantes de un motor de pequeño cilindraje trabajando con mezclas gasolina-etanol.

### 2.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar e implementar una estructura que permita la sujeción, el encendido y las pruebas del motor para realización pruebas con mezclas.
- Diseñar e implementar un sistema de medida para determinar de consumo, potencia y emisiones.
- Estudiar el comportamiento de los parámetros efectivos y las emisiones con diferentes tipos de mezclas de etanol.
- Establecer porcentajes de mezclas adecuados para el motor en estudio.

## 2.4. Alcances y Limitaciones

En esta sección se muestran los alcances que se tuvieron para la realización de pruebas, obtención de datos e insumos que se utilizaron, en donde se hace claridad sobre el motor utilizado, el origen de los insumos y las medidas recopiladas, además se presentan las limitaciones que se presentaron.

### 2.4.1 Alcances

El alcance determinado para este estudio es lograr obtener resultados sobre los gases escape y su relación con el empuje y el consumo de forma experimental bajo diferentes tipos de mezcla etanol-gasolina en un motor de 15 cm<sup>3</sup>. Con esos resultados obtenidos realizar un análisis comparativo para dar las conclusiones respectivas y establecer las ventajas y desventajas del uso de dichos combustibles en ese tipo de motores.

El bioetanol a usar será a base de caña de azúcar, del cual solo importa la fuente de materia prima usada para la fabricación, ya que se pueden tener varios métodos de fabricación o destilación del etanol, así como múltiples fuentes de materia prima como la remolacha, cebada, trigo, biomasa, y de forma general de cultivos que contengan gran contenido de almidón y glucosa.

Se analizará un solo motor de 2 tiempos que utiliza una mezcla entre gasolina, etanol y aceite como se muestra en la sección de metodología, adicionalmente, dichas mezclas serán estudiadas en el motor y solo se determinarán las prestaciones que tenga; como empuje, consumo, revoluciones por minuto y emisiones contaminantes.

### **2.4.2 Limitaciones**

Este proyecto de investigación se limita a:

- Un banco estático para medir el empuje desarrollado por una hélice acoplada al motor.
- Los equipos de medida que son empleados (balanza, tacómetro, analizador de gases y dinamómetro) serán los equipos existentes en el laboratorio de combustión de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- No se realizará un análisis del combustible para determinar propiedades fisicoquímicas como el poder calorífico, la composición química y la composición elemental de cada una de las mezclas hechas.
- No se modificarán los aspectos geométricos del motor y sus accesorios, la relación de compresión, la relación de aire combustible y el tiempo de la ignición.
- La carga que tendrá el motor será proporcionada por una hélice tipo K 13x6, la cual genera el empuje del conjunto hélice-motor.
- El etanol a usar se conseguido comercialmente, a base de caña de azúcar.

## **2.5. Metodología**

La metodología correspondiente al desarrollo de éste trabajo inicia con una búsqueda del estado del arte obtenida a través de las diversas fuentes disponibles, acerca de los estudios ya realizados a motores de 2 tiempos, los combustibles utilizados y los sistemas de recopilación de datos para la realización de pruebas de tipo estacionario en motores de pequeño cilindraje.

Después de haber hecho dicha búsqueda, se debe realizar un diseño e implementación de un banco para pruebas en donde se monten los componentes del motor y el propio motor, para ello se debe diseñar una pieza donde se pueda montar el motor fuera del aeromodelo, ya que se desea estudiar solo el motor, también se deben hay una selección previa de los instrumentos de medición.

Posteriormente de haber realizó el banco, se hace una puesta a punto del mismo, donde se prueba la resolución de los equipos previamente seleccionados basándose en los rangos que muestra el manual y las ecuaciones teóricas, con ello se verifican de datos y las condiciones de uso para determinar los requerimientos para su funcionalidad y viabilidad durante las pruebas, para solucionar problemas como fricción y vibración, además, se deben realizar una puesta a punto del propio motor para determinar los rangos de los parámetros a medir del conjunto hélice-motor, especialmente del empuje, gasto y revoluciones por minuto.

Adicionalmente, la metodología planteada llevada a cabo incluye una fase de pruebas de preliminares, esta fase consiste en verificar el funcionamiento de las piezas y equipos, en donde se debe encenderlo y determinar el impacto de la fricción y de las vibraciones en las medidas de los equipos, posteriormente, con los equipos calibrados se debe de realizar una toma de medidas utilizando el combustible comercial o la mezcla E10, pues con dichas mediciones se determinan una base para así determinar un plan de ensayos adecuado como se muestra en la Tabla 2.1, para un total de 45 puntos de ensayo.

*Tabla 2.1: Plan de ensayos.*

<b>Combustible</b>	<b>Valor</b>	<b>Repeticiones</b>
<b>E10</b>	Baja	3
	Media	3
	Alta	3
<b>E15</b>	Baja	3
	Media	3
	Alta	3
<b>E20</b>	Baja	3
	Media	3
	Alta	3
<b>E25</b>	Baja	3
	Media	3
	Alta	3
<b>E30</b>	Baja	3
	Media	3
	Alta	3

Este plan de ensayos se muestra los tipos de combustible a utilizar según sea el comportamiento de los datos recopilados, en donde se tiene en cuenta la carga que se aplica al motor y el número de repeticiones que se deben realizar por cada carga y combustible, y esta repetición se debe realizar con cada variable a medir.

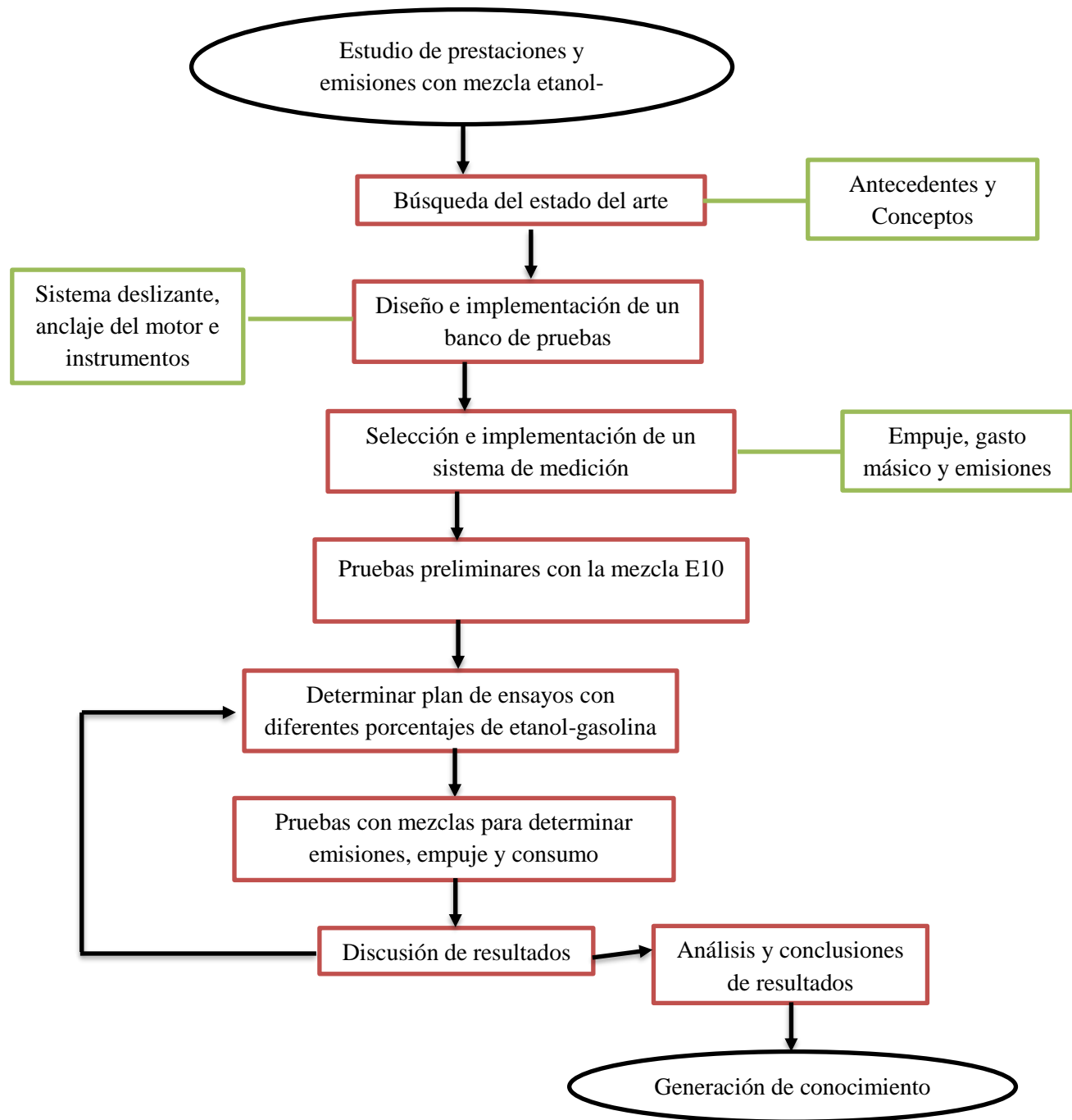


Figura 2.1: Esquema metodológico del proyecto.

Con la recopilación de datos realizada, se proceda a realizar el procesamiento y análisis de los mismos, como se muestra en la sección de Resultados y análisis, donde el análisis de los resultados será de tipo comparativo teniendo como base un iso-gasto másico de combustible para las mezclas, buscando una presentación adecuada para lograr comprender los resultados de las pruebas en cuestión, principalmente de las prestaciones y emisión de gases.

Para finalizar, se darán las conclusiones respectivas sobre el análisis de las mezclas, la emisión de gases y las prestaciones obtenidas, para así dar un aporte técnico y generando conocimiento al aumento en el uso de etanol en las mezclas de gasolina en motores de 2 tiempos para aerodelismo. Por lo tanto se realiza un esquema metodológico mostrado en la Figura 2.1.

## 2.6. Cronograma

Según la metodología planteada, se plantea el cronograma mostrado en la Tabla 2.2, donde como primera medida es tener una estructura de apoyo para el motor y sus componentes necesarios para el encendido, donde se verificará su funcionamiento, rangos de operación, vibraciones, volumen del tanque y tiempo de consumo del combustible; sin embargo, se deben de contar con los insumos necesarios para ello como es el caso del combustible que debe ser el mismo para todas las pruebas, el aceite lubricante y el etanol.

Tabla 2.2: Cronograma.

Actividad	Semanas															
Compra de insumos (etanol, gasolina, aceite lubricante)	■															
Manufacturar la estructura del motor para pruebas.	■	■	■													
Instalación de instrumentos de medición.				■	■	■										
Realizando de mezclas con diferentes porcentajes.							■	■	■	■	■					
Hallar parámetros efectivos y emisiones de gases.							■	■	■	■						
Discusión de resultados.							■	■	■	■	■					
Análisis de resultados											■	■	■			
Redacción del documento final.						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Conclusiones.															■	■
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Posteriormente se debe diseñar e implementar un sistema de medición para obtener las prestaciones del motor, para ello se siguen la metodología en la cual se implementa los instrumentos de mencionados los cuales son probados y se verifica su rango es el adecuado para la toma de datos,

junto a ello se deben de preparar los implementos para la mezcla los cuales se van a utilizar para la realización de mezclas, que según se explicó en la metodología, las mezclas se harán según los resultados obtenidos con las pruebas.

---

## Capítulo 3. Resultados y Análisis

---

En este capítulo, se encuentran los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el motor para diferentes mezclas de etanol y gasolina, por lo tanto, se dividen en cuatro secciones llamadas implementación del banco de pruebas, determinación de porcentajes de mezcla, resultados y análisis de prestaciones y emisiones; donde en cada una de ellas se exponen los resultados y se realiza un análisis mostrando las diferencias entre los diferentes combustibles ensayados, con el fin dar un aporte sobre el aumento del uso de etanol como combustible en los motores de pequeña cilindrada.

### 3.1. Implementación del Banco de Pruebas

En esta sección se muestra el proceso de diseño e implementación del banco de pruebas, el cual se utilizará para la realización de pruebas que permitiera la sujeción del motor con sus accesorios y equipos de medición para la recopilación de datos, por lo tanto, se establecieron los siguientes requerimientos:

- El banco debe tener una pieza que soporte el motor, que sea liviana y tenga un mecanismo de sujeción para el sistema de empuje.
- Para medir correctamente el empuje, se debe garantizar que la fricción sea lo más baja posible con la implementación de un mecanismo, el cual debe ser móvil para medir el únicamente el empuje que es ejercido por el conjunto motor-hélice.
- Tener dispositivos de soporte para los accesorios necesarios para la operación del motor, los cuales deben ser: la batería, el control de chispa, la bomba, línea y el tanque de combustible.
- Se debe garantizar que las vibraciones del motor no afecten las mediciones e implementar un mecanismo que amortigüe su efecto si es necesario; no obstante, este sistema no debe alterar el valor de medidas.

Con estos requerimientos establecidos, primero se realizó el proceso de diseño del soporte para el motor, para ello se tomó como base el soporte al cual se fija el motor cuando es montado en el aeromodelo, el cual tiene unos soportes que hacen parte del fuselaje en la parte delantera, normalmente hechos en madera donde el motor se sobrepone y es anclado por medio de tornillos pasadores; por ello, el diseño tiene una forma similar al anclaje de dichos aeromodelos, pero en la parte posterior se debe estar unida para que tenga una mayor rigidez, siendo el resultado una pieza en forma de U cuadrada, ver anexo B, a dicha pieza deben de coincidir con los orificios que tiene el motor para su sujeción, a su vez, que sirva como acople de los diferentes accesorios como el dinamómetro, los rieles y la línea de combustión.

Una vez seleccionada la geometría y la forma, se determinó cuáles eran las fuerzas las cuales iba a estar sometido el motor, se determinó que serían dos fuerzas en tracción, una fuerza es la que genera el conjunto hélice-motor y la otra sería la reacción de la fuerza de empuje al estar anclada al sistema de medida del empuje, para determinar dicho valor, se hace uso de dos ecuaciones, las cuales se realiza el cálculo teórico del empuje estático, para obtener dichos datos de empuje es necesario tomar datos experimentales, este proceso se puede encontrar en un documento dado por la NASA [13] y del señor Miguel Muñoz en su blog de aerodelismo [14], en el cual se hace una aproximación del empuje estático con la potencia del motor en función del producto de las rpm, el número de palas, el diámetro y el paso de la hélice, ecuación (1) y ecuación (2) respectivamente.

$$Empuje_{teórico} [lbf] = 6000 * (18.7 - 9.5 P/D) * (b * hp) / (n * D) \quad (1)$$

$$Empuje_{teórico} [Kg] = (D/10)^3 * P/10 * (n/1000)^2 * 23 \quad (2)$$

Dónde:

- $D$ : es el diámetro de la hélice en pulgadas.
- $P$ : es el paso de la hélice en pulgadas.
- $hp$ : potencia máxima del motor en caballos fuerza.
- $b$ : número de palas.
- $n$ : son las revoluciones por minuto.

Cuando se evalúa ambas ecuaciones teniendo las dimensiones de la hélice, diámetro de 13 in y paso de 6 in, así como las revoluciones por minuto según el manual que posteriormente se comprobaron durante las pruebas preliminares donde se tomaron los datos de rpm por medio de un



tacómetro de contacto siendo el resultado promediado del empuje máximo da 3.5 Kg o 34 N, con una desviación del 6,7%.

Posteriormente se deben de realizar la evaluación de los materiales, para la cual, los criterios de selección fueron: que sean fácilmente manufacturarles, que soporten las cargas a las cuales será sometida y que sea económico, siendo un candidato ideal la madera, para ello se consideran varios tipos de maderas como cedro, roble, pino y otros materiales como balso, DMF y madera chapada; sin embargo, al momento de realizar pruebas de los materiales en cuestión de la perforación de los agujeros, se determinó que el mejor material sería el cedro ya que presentaba el mejor acabado y rigidez entre las distancias del borde del agujero y la cara de la pieza es de solo 4 mm.

Ya con la pieza definida, geometría, cargas y material, se procede a verificar por medio de simulación el esfuerzo de von Mises, el cual se presenta en la Figura 3.1, donde se aprecia que no presenten fallas cuando se monte el motor, especialmente en los orificios donde se ancla, es de esperar que en la zonas donde carece de materia son concentradores de esfuerzo; no obstante cumple con un factor de seguridad de 2.2, por lo que se puede decir que la pieza esta sobre dimensionada.

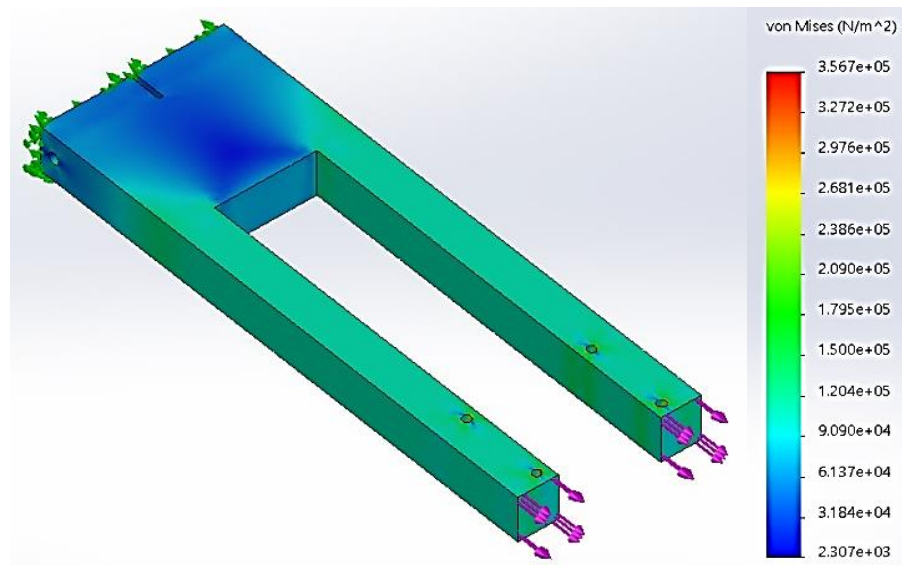


Figura 3.1: Simulación del soporte del motor.

Hecha la verificación de la pieza de soporte, se debe iniciar una fase de pruebas preliminares o puesta a punto, para establecer los requerimientos de selección con lo cual se procede a establecer los criterios de selección y montaje de los instrumentos siendo estos:

- Empuje: tener un rango de medición hasta unos 10 kg o más, contar con una resolución de 10 gramos para ver la variación del empuje cuando se realiza un cambio de combustible, así como tener un sistema de acople rápido que se ajuste a la pieza en forma de U fabricada.
- Consumo: para el consumo de combustible se debe realizar de forma gravimétrica con una balanza que tenga una capacidad mínima de 300 gramos y una resolución de 0,005 gramos.
- Emisiones: se deben tener un analizador de gases que cumpla los requerimientos mínimos de captación de gases de escape para revisión técnico mecánica, las cuales son: monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarburos y oxígeno libre.

Iniciando con el sistema de empuje, se debe de seleccionar el dinamómetro pues este define la longitud de desplazamiento del motor, donde se considera el rango de fuerza que puede generar el conjunto hélice-motor según las ecuaciones evaluadas, dicho esto el dinamómetro seleccionado fue de tipo digital, pues este tiene un rango de medida de 50 Kg o que es lo mismo que 470 N aproximadamente, en cuestión de resolución posee un cambio de 5 gramos, lo cual es más beneficioso ya que con esta resolución se logra tener la medida más cercana al empuje que se genera en el momento, también se verifico el sistema de sujeción tanto al banco como a la pieza de soporte, en donde se realiza por medio de ganchos y argollas; no obstante, la fricción afectaba la medida del dinamómetro cuyo problema fue solventado con la implementación un sistema de rieles el cual permitió disminuir de una forma considerable la fricción que se ejercía entre el banco y el motor, dando respuesta a los requerimientos del banco y de los equipos de medición.

Según lo establecido en los requerimientos para este sistema de consumo de combustible, se implementó una balanza con una capacidad de 750 gramos y con una resolución de 0,001 gramos, lo cual da como resultado que al momento de realizar la toma de medidas el resultado sea más preciso debido a que el cambio por unidad de tiempo es muy pequeño, adicionalmente se determinó que el intervalo de medición sería de un minuto para todas las pruebas a realizar, así garantiza la homogeneidad de las pruebas; sin embargo, en las pruebas preliminares se miró que, con la vibración, se afectaba las medidas de la balanza, por lo cual, para solucionar este problema de las vibraciones en la balanza se implementó un amortiguador de vibraciones el cual se basa en pasar la línea de combustión por un líquido viscoso que disipe la energía que tiene las vibraciones, además se apartó la balanza de la misma mesa donde se encontraba el motor, con ello se logró un aislamiento de las vibraciones el cual no percutió en la toma de datos durante las pruebas.

Por otro lado, las emisiones de gases se miden con un analizador de gases, el cual capta una porción de gases que son analizadas por medio filtros los cuales aptan las partículas de los gases.

Este equipo tiene la capacidad de dar como resultado los porcentajes de monóxido de carbono, dióxido de carbono y oxígeno, los hidrocarburos o inquemados en partes por millón, que son las principales emisiones que emiten este tipo de motores, adicionalmente, este equipo debe ser montado a un lado del banco, ya que sus dimensiones no permiten que sea implementado directamente en el banco de pruebas.

Para finalizar esta sección, en el anexo A se muestra el explosionado del banco propuesto donde se puede visualizar el motor, los rieles, el sistema de medición de empuje con su anclaje y la disposición de los accesorios para el motor, con estos sistemas se garantizó que las vibraciones y la fricción fueran lo más baja posible con lo cual no se tuvo una afectación en la toma de medidas.

### 3.2. Determinación de mezclas a ensayar

Para la realización de mezclas para el combustible, se toma como base gasolina, etanol o alcohol etílico hecho a partir de la caña de azúcar y aceite para motores 2 tiempos, todos estos productos son comercializables y sin ninguna restricción, donde se debe garantizar tener la cantidad suficiente para realizar las mezclas, ya que el cambio de algún componente afecta la pureza de la mezcla.

Ya con los ensayos preliminares hechos se establece el volumen de combustible adecuado para las pruebas el cual será de 400 ml de combustible sin lubricante, que se definió en función del volumen que puede albergar el tanque de combustible y el tiempo para la realización de la toma de datos y la limpieza de los elementos en contacto con el combustible, en donde se tiene un volumen de 100 ml para la limpieza y 300 ml para realizar las mediciones pertinentes, cabe aclarar que el proceso de limpieza se realiza a baja carga teniendo una demora entre 30 a 40 minutos, mientras que la toma de datos puede durar entre 20 a 30 minutos.

Una vez que se tenga la cantidad necesaria para realizar 5 combustibles, cada uno de 400 ml, se procede a realizar el cálculo de las mezclas, estas deben de considerar que la gasolina tiene un porcentaje de etanol del 10%, por lo tanto, las ecuaciones a utilizar para el cálculo de la gasolina y el etanol se muestra en las ecuaciones (2) y (3) respectivamente:

$$Vol_{gasolina} [ml] = \frac{Vol_{total\ de\ mezcla}}{100} * \%gasolina \quad (3)$$

$$Vol_{etanol} [ml] = \frac{Vol_{total\ de\ mezcla}}{100} * \%etanol \quad (4)$$

$$ADVol\ de\ mezcla_{gasolina} [ml] = \frac{Vol_{total\ de\ mezcla}}{0,9} \quad (5)$$

$$ADVol\ de\ mezcla_{etanol} [ml] = Vol_{total\ de\ mezcla} - Vol_{gasolina} - \frac{Vol_{gasolina}}{0,1} \quad (6)$$

Dónde:

- $\%gasolina$  es el porcentaje de gasolina presente en la mezcla.
- $\%etanol$ : es el porcentaje de etanol presente en la mezcla
- $Vol_{gasolina}$ : es el volumen de gasolina que debe estar en cada mezcla.
- $Vol_{total\ de\ mezcla}$ : es el volumen total a utilizar en mililitros.
- $ADVol\ de\ mezcla_{gasolina}$ : es la cantidad de gasolina que se debe adicionar según el porcentaje de etanol para cada mezcla.
- $ADVol\ de\ mezcla_{etanol}$ : es la cantidad de etanol que se debe adicionar según el porcentaje de etanol para cada mezcla.
- $Vol_{total\ de\ mezcla}$ : es el volumen total de mezcla

Al momento de realizar las pruebas se procede a realizar una toma de medidas base diferentes a pruebas preliminares, y esto se debe a que los equipos ya están calibrados por lo tanto se presenta unas variables en estudio alteraciones que son realizadas con el combustible comercial o la mezcla E10, dichas mediciones serán utilizadas para determinar cuál será el plan de ensayos y las consideraciones para realizarlo, es por ello que se definen una serie de mezclas entre gasolina y etanol a probar en el motor las cuales tienen un incremento del 5% entre ellas para ver de forma clara los cambios que causa el combustible en el comportamiento del motor; sin embargo, como se muestra en el esquema metodológico el proceso es iterativo por ende el contenido de etanol puede ir aumentando en función de los resultados que se obtengan en empuje, consumo y emisiones.

En la Tabla 3.1 se presenta los porcentajes de las mezclas utilizados para un volumen de 400 ml para las pruebas de emisiones contaminantes, en las cuales se presentan cual sería el porcentaje de la mezcla de etanol, la cantidad de volumen que dicha mezcla debería de tener. En la columna 1 se muestra la denominación de la mezcla según el contenido de etanol, en las columnas 2 y 3 se muestran cuáles deberían de ser los porcentajes de cada componente en el combustible.

Los resultados de las ecuaciones (3) y (4), se muestran en las columnas 4 y 5; mientras que, los resultados de las ecuaciones (5) y (6) se visualizan en las columnas 6 y 7, que son los mililitros necesarios de cada componente para lograr el combustible con dicho porcentaje de etanol, estos datos se encuentran calculados para un volumen total de mezcla de 400 ml, volumen necesario para la limpieza de la línea de combustión y para la realización de pruebas en diferentes cargas.

*Tabla 3.1: Porcentajes de mezclas para gasolina-etanol en 400 ml.*

<b>Mezcla</b>	<b>Gasolina [%]</b>	<b>Etanol [%]</b>	<b>Volumen Gasolina [ml]</b>	<b>Volumen Etanol [ml]</b>	<b>Adición Gasolina [ml]</b>	<b>Adición Etanol [ml]</b>
E10 (comercial)	10	90	360	40	--	--
E15	15	85	340	60	377,8	22,2
E20	20	80	320	80	355,6	44,4
E25	25	75	300	100	333,3	66,7
E30	30	70	280	120	311,1	88,9

A partir de la Tabla 3.1, se pueden determinar las cantidades de gasolina y etanol que se deben de agregar para lograr una mezcla con el porcentaje de etanol deseado, a dicha mezcla se le deben de adicionar 26 ml de aceite de 2 tiempos, esta cantidad es para tener una mezcla de 20:1, 20 partes de combustible por 1 parte de aceite.

Para la realización de las mezclas se hace el empleo de un Beaker de 1000 ml, al cual se le agrega las cantidades de etanol y gasolina según la tabla de mezcla que se muestra en la sección de resultados y análisis, estas cantidades son medidas por medio de jeringas separadas por cada componente para evitar la contaminación del combustible, cabe aclarar a dicha mezcla se le agregará la cantidad de aceite necesario para una mezcla de 20:1, esta mezcla es fijada por el fabricante que se especifica en el manual de uso.

Una vez realizada la quema de los 100 ml de combustible o mezcla nuevo, da inicio la toma de medidas, la cual se procura que sea en simultáneo, como información adicional, se desea realizar múltiples tomas en el mismo punto según el plan de ensayos propuesto, dando como resultados que se muestran en las secciones 3.3 y 3.4.

### 3.3. Resultados y análisis de prestaciones

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para los diferentes combustibles ensayados; las prestaciones analizadas para dichos combustibles son: el gasto másico de combustible [g/s], el empuje en [N] alcanzado por el conjunto motor hélice y el consumo específico de combustible en [g/Nh] en función del régimen de giro del motor o rpm, clasificándose como baja, media y alta carga, esta clasificación se da por la posición de acelerador, el ruido que generado y las prestaciones de empuje.

Las mezclas probadas fueron realizadas en función de los resultados de las pruebas según la metodología planteada, pero se presentó que el motor presentó una falta de combustible para las mezclas E20, E25 y E30, lo cual generó que se aumentara el paso de combustible al motor en una pequeña cantidad para solventar esta carencia de combustible y esta decisión fue llevada a cabo debido a que al aumentar el régimen de giro bajo las mismas condiciones de graduación de las mezclas E10 y E15, que se regula mediante un tornillo que tiene el motor.

Esta una insuficiencia de combustible se debe en gran parte a la falta del poder calorífico para mantener las mismas prestaciones, como se muestra en la Figura 3.2, en la cual se muestra el resultado de multiplicar el poder calorífico de cada combustible por el porcentaje presente en la mezcla.

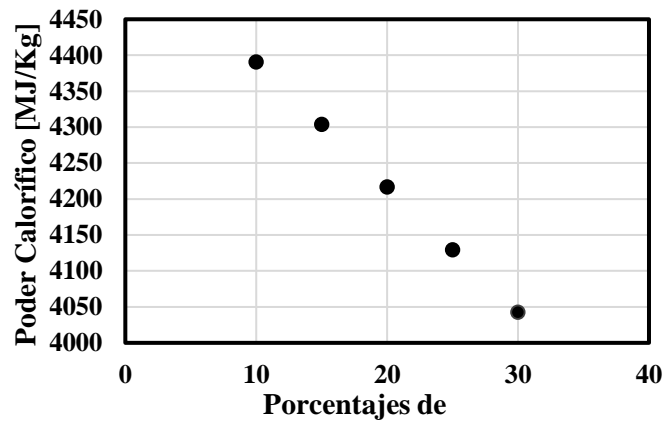


Figura 3.2: Poder calorífico en función del porcentaje de etanol.

Esta regulación en el paso de combustible se mantuvo para las mezclas E10 y E15, según lo establecido en las pruebas preliminares; sin embargo, para la mezcla E20 se realizó un aumento del 12,5% en relación a la graduación de las mezclas E10 y E15, mientras que para las mezclas E25 y E30 la modificación fue del 25%, en relación al paso de combustible para las mezclas E10 y E15.

No obstante, se estableció una medida constante para todas las mezclas la cual fue establecida bajo las condiciones medias entre baja y media carga, aproximadamente entre 6900 a 7000 rpm, siendo esta el iso-consumo o iso-gasto másico teniendo una desviación de 0,01%, entre ellas como se muestra en la Figura 3.3, con el fin de establecer el paso de combustible.

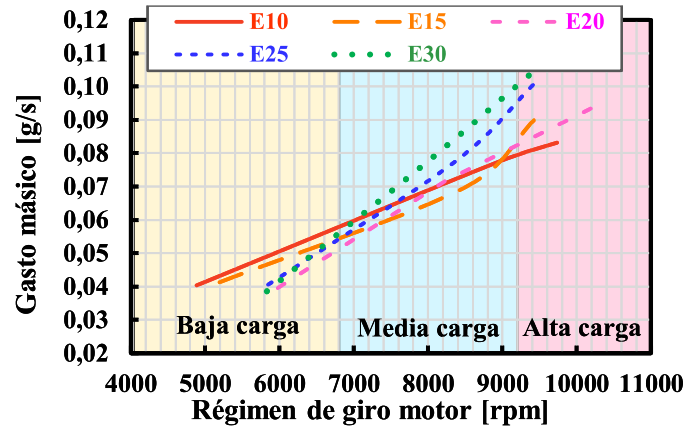


Figura 3.3: Gasto másico de combustible en función del régimen de giro del motor.

Como se puede ver en la Figura 3.3, el gasto másico de combustible varía a niveles de alta carga, especialmente de las mezclas E25 y E30, ya que con al aumentar la presencia de etanol en la mezcla se presenta un menor poder calorífico, en consecuencia hace que aumente el gasto de combustible y por ende se reduce el tiempo de consumo del volumen disponible en el tanque, lo cual es perjudicial si se viera desde el punto de la autonomía.

En la Figura 3.4, se muestran los datos del empuje en Newton, en función del régimen de giro del motor o rpm, que son comparados con las ecuaciones de los autores DIEHL Walter (1) y Muñoz (2), con el objetivo de verificar que los datos recopilados en cuestión de empuje están en una zona de confianza, brindando la certeza de que los datos se encuentre en la magnitud y unidades exactas, adicionalmente esta comparación permite visualizar si se logra una mejora en el empuje al momento de realizar el cambio de combustible.

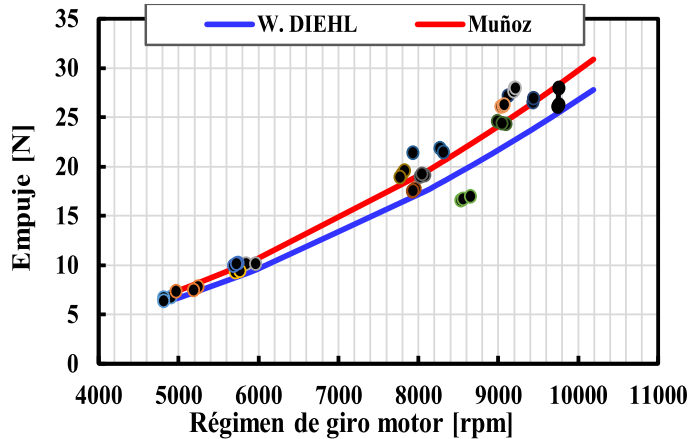


Figura 3.4: Empuje de datos experimentales y teóricos.

De la Figura 3.4, se puede destacar que la mayoría de los datos son muy aproximados a los datos de la ecuación (2), pues estos tiene una desviación del 4%; no obstante, la desviación entre los datos de empuje y la ecuación (1) es del 9,8%; por lo tanto, esta desviación ayuda a justificar que la toma de datos es correcta y que las repeticiones hechas hacen que las medidas fueran estadísticamente representativas, por otra parte se destaca que al incrementar el etanol en la mezcla los puntos fueron acercándose a la ecuación (2), y en ocasiones superaban el valor calculo, lo cual indica que es viable el aumento del etanol si se desea aumentar la prestación de empuje en relación con la teoría planteada por los autores en sus ecuaciones.

En la Figura 3.5, se presenta el empuje obtenido para las diferentes mezclas de etanol-gasolina en función del régimen de giro del motor, en esta figura se resalta la división por niveles de carga y las diferentes curvas por cada combustible ensayado, adicionalmente se puede ver que el aumento del empuje sigue la tendencia de las ecuaciones (1) y (2), la cual es ascendente con una ligera concavidad hacia arriba.

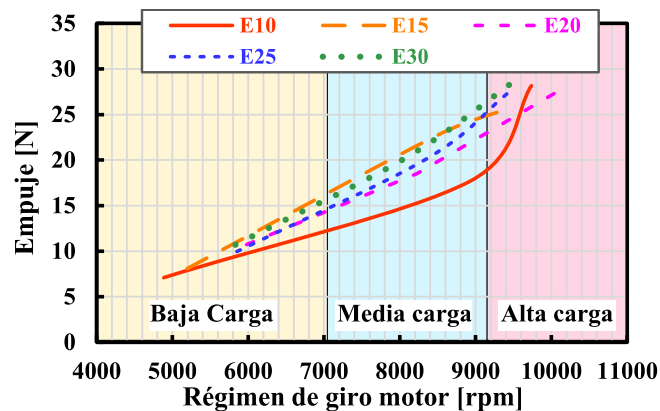


Figura 3.5: Empuje en función del régimen de giro del motor.



De la Figura 3.5, se puede visualizar que el comportamiento de todos los tipos de combustible al incrementar el régimen de giro aumenta el empuje, esto es de esperarse ya que al acelerar se aumenta la velocidad de la hélice generando un mayor movimiento de la masa de aire; por otro lado, el combustible comercial (E10) presenta un aumento de empuje siguiendo una curvatura de acenso que es cóncava hacia arriba, mientras que para los combustibles E15, E20, E25 y E30, el comportamiento es casi lineal y por encima de los resultados obtenidos por la mezcla E10, esto se puede deber al aumento del gasto másico de combustible para las condiciones de media y alta carga.

Con aumento del 5% de etanol para llegar a una mezcla de E15, hace que se incremente en un 5,7% el empuje en promedio con relación a la mezcla E10, esto para todas las condiciones de carga, esta diferencia se puede deber a que al tener un menor poder calorífico se logre una combustión casi completa para dicho nivel de graduación del tornillo; sin embargo, a condiciones de alta carga para todas las mezcla tienen un considerable aumento el gasto másico de combustible como se muestra en la Figura 3.3.

Este aumento no tuvo un gran impacto en el aumento del gasto másico para dichas mezclas para las condiciones de baja y media carga; no obstante, para la condición de alta carga de los combustible E25 y E30 hay una diferencia del 17% en relación con las mezclas E15 y E20, la importancia de evaluar una a una de las mezclas es para verificar el impacto del poder calorífico presente en la mezcla, pues al aumentar el % de etanol, también aumenta el consumo para que iguale o mejore las prestaciones.

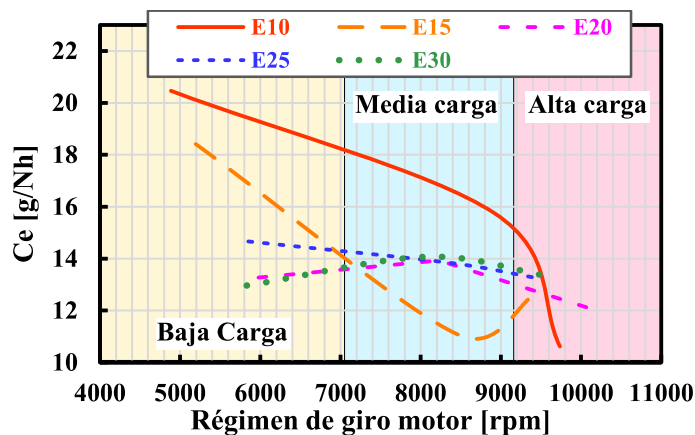


Figura 3.6: Consumo específico en función del régimen de giro del motor.

Por otra parte, en la Figura 3.6 se puede ver el consumo específico de combustible, el cual relaciona el gasto másico de combustible, el empuje generado, este parámetro ayuda a definir cuanto combustible se está consumiendo para generar una determinada potencia por un delta de tiempo. De ésta figura, se puede ver que a un rango entre 7000 a 7500 rpm, el consumo específico es casi igual, teniendo una desviación de 0,01% para todas las mezclas, menos para la mezcla E10, pues para esta mezcla se presenta que genera un bajo empuje en dicho rango de rpm que a medida que aumenta las rpm se mejora la prestación de empuje en relación al aumento del gasto másico de combustible, por lo tanto se ve que dicha curva siempre se encuentra disminuyendo su consumo específico lo cual es positivo ya que indica que el motor está entregando más potencia sin que aumente en la misma medida el gasto de combustible.

Por otro lado, las mezclas E20, E25 y E30 tienen un comportamiento muy similar bajo las condiciones de media y alta carga, y esto es importante ya que como se presentó hubo la necesidad de aumentar el paso de combustible; sin embargo, dicho aumento no afectó las medidas del consumo ya que se aumentó de forma proporcional el empuje como el gasto másico de combustible, caso diferente a los datos de las mezclas E10 y E15, ya que estos al estar al mismo paso de combustible, presentan una gran desviación.

Esta desviación se debe principalmente al empuje que está entregando el motor, ya que el empuje que entrega el motor a media carga para la mezcla E10 es un 24% más bajo en relación al empuje que está generando en el mismo intervalo para la mezcla E15, además para la condición de alta carga esta diferencia tiende a disminuir a medida que se aumenta las revoluciones hasta llegar a una diferencia del 8% entre las mezclas E10 y E15, por esto se nota que en la Figura 3.6 el consumo específico para la mezcla E10 sigue aumentando en condición de alta,

Por otro lado, para la mezcla E15 hay un cambio en la concavidad de la curva; no obstante esta mezcla logra tener un rango óptimo de funcionamiento entre 8300 a 8700 rpm, pues presenta que entrega el mayor empuje con el menor gasto másico, esto quiere decir que se obtiene un consumo bajo con un empuje considerable; sin embargo, cuando se aumenta el régimen de giro del motor este consumo aumenta y de una forma rápida, lo cual indica que para poder mantener el empuje este debe consumir más combustible, caso contrario con los demás combustibles probados.

Ahora para las mezclas de E20 y E30, el comportamiento del consumo es similar, ya que para baja y alta carga el rango de operación es cercano, teniendo una desviación de 0,255 entre estas mezclas, lo cual indica que se puede tener un mayor empuje en altas cargas con el mismo consumo específico de combustible que para baja carga, caso diferente para la mezcla E25, pues esta tiene una

tendencia descendente, obteniendo mejores prestaciones a medida que se aumenta el régimen de giro del motor.

De esta sección se puede determinar que es viable el uso de etanol como combustible, ya que se presenta un ligero aumento del empuje sin tener que sacrificar el gasto másico como se pudo constatar en el consumo específico de combustible; no obstante, esto llega a un límite el cual es la mezcla E30, pues a estas condiciones el empuje aumenta en la misma proporción que el gasto másico por lo cual se llega a un equilibrio en donde el consumo específico quedara constante dando solo como resultado el aumento del gasto y con ello la disminución del tiempo que tarda el motor en consumir el combustible presente en el tanque.

### **3.4. Resultados y análisis de emisiones**

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las emisiones contaminantes, para las diferentes mezclas de gasolina y etanol evaluadas en el motor. Se muestran figuras que representan los porcentajes de monóxido de carbono, dióxido de carbono y oxígeno presente en los gases de escape, además de mostrar cuales son las partes por millón de los hidrocarburos o inquemados y el coeficiente de exceso de aire.

Estos datos fueron obtenidos mediante un analizador de gases, de los cuales se pueden destacar que los datos más relevantes son contenido de monóxido de carbono y de hidrocarburos, ya que estos presentan el mayor daño al medio ambiente y a la salud; para ello, al realizar un estudio de mezclas que adicionen etanol a la gasolina como combustible, se deben de disminuir estas emisiones en un gran porcentaje.

A continuación en las Figura 3.7 y Figura 3.8, se presentan los porcentajes de monóxido de carbono y dióxido de carbono presentes en los gases de escape respectivamente, de los cuales se pueden evidenciar que hay una reducción del contenido del monóxido de carbono a medida que aumenta el porcentaje de etanol y el régimen de giro del motor, ya que según la fórmula química de ambos compuestos, gasolina  $C_8H_{18}$  y etanol  $C_2H_5OH$ , se logra disminuir el contenido de carbono en la mezcla en una proporción del 15% por cada 5% por ciento de aumento del etanol en la mezcla.

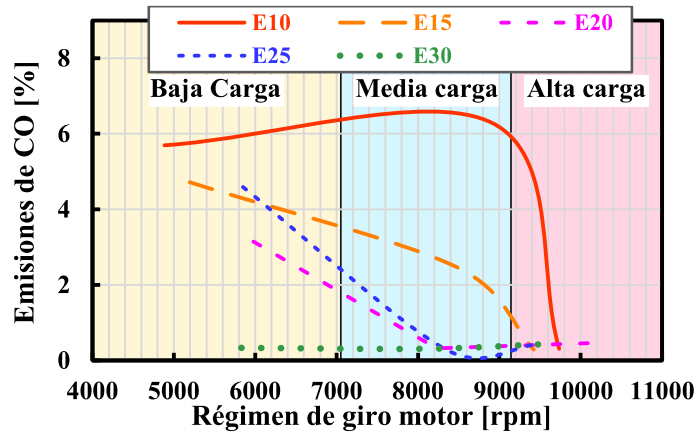


Figura 3.7: Emisiones de monóxido de carbono en función del régimen de giro del motor.

La tendencia de los resultados de la Figura 3.7, siempre es a la baja cuando se aumenta el régimen de giro, especialmente para las mezclas E20 y E25, pues estas disminuyen considerablemente en media carga y se mantienen para la alta carga; para el caso de las mezclas E10 y E15, también tiene a la baja, sin embargo, esta presenta niveles mayores en baja y media carga, mientras que para el caso de la mezcla E30, esta tiene se mantiene en niveles bajos, lo cual indica que si se aumenta el porcentaje de etanol a un E35 o E40, no tendrá una disminución considerable como si es el caso entre las mezclas de E10, E15, E20 y E25, ya que el combustible al disminuir su contenido de carbono se tiene una menor cantidad de productos que pueda reaccionar para formar monóxido de carbono.

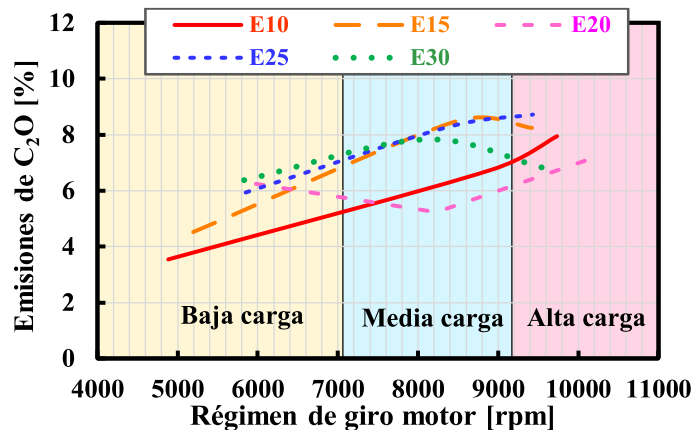


Figura 3.8: Emisiones de dióxido de carbono en función del régimen de giro del motor.

Por otra parte, para la Figura 3.8, en la cual se muestra el contenido de dióxido de carbono para las diferentes mezclas y niveles de carga, la tendencia siempre es a incrementar pues este es el

producto de la reacción del monóxido de carbono con el oxígeno bajo unas condiciones de presión y temperatura.

En la Figura 3.7 y Figura 3.8, se logra ver que el contenido de dióxido de carbono aumenta, mientras que el monóxido de carbono disminuye, esto es normal, ya que, al reaccionar el monóxido de carbono, este se convierte en dióxido de carbono, esto se logra siempre y cuando se tengan condiciones de presión, temperatura y oxígeno. Estas condiciones son posibles en el interior del motor puesto que: la presión de combustión permanece constante ya que no se varía la relación de compresión del motor, por otro lado, al aumentar el régimen de giro del motor, aumenta proporcionalmente el número de veces que se realiza la combustión generando que la temperatura vaya aumentando lentamente, esto se evidencio al momento de realizar las pruebas; sin embargo, no se tomó registro de la misma y para terminar como se muestra más adelante en la Figura 3.9 y Figura 3.10, la cual muestra que el motor siempre tuvo un exceso de aire y con ello un exceso de oxígeno que es ocasionado por el impulso que da la hélice del motor a la masa de aire que lo rodea.

Existe un caso particular con la mezcla E20 que muestra un descenso a media carga en la producción de monóxido y dióxido de carbono, esto es la consecuencia de tener altos niveles de oxígeno, lo que significa que dichos componentes no se están produciendo debido a que hay una combustión incompleta y se puede corroborar debido que hay una mezcla pobre para la condición de media carga como se mostrará en la Figura 3.10.

En la Figura 3.9, se presenta el porcentaje de oxígeno en los gases de escape en función del régimen de giro del motor, esta emisión es vital conocerla para saber cuál es el exceso de oxígeno que se presenta durante la reacción química de la combustión.

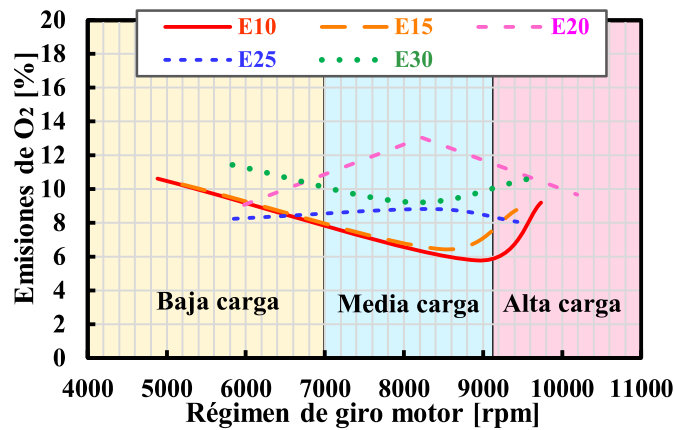


Figura 3.9: Exceso de oxígeno en función del régimen de giro del motor.

De la Figura 3.9, se evidencia que para los combustible E10, E15 y E30, este porcentaje disminuye cuando se encuentra a media carga, pero cuando se aumenta el régimen de giro a alta carga este porcentaje sube, lo cual indica que a media carga se hay una carencia de oxígeno, la cual explica por qué no hay una disminución del monóxido de carbono tan brusca como si se logra ver para las mezclas E20 y E25;

El coeficiente de exceso de aire o lambda se muestra en la Figura 3.10, esta figura es importante para entender si hay un exceso de oxígeno en relación al combustible que se está suministrando, cabe aclarar que lambda es una relación entre el dosado relativo aire real y el aire estequiométrico y su nivel de referencia es 1, el cual indica que esta equilibrada y no hay exceso de aire, si es inferior a 1 significa que déficit de aire, mientras que, si es superior a 1, indica que hay un exceso de aire.

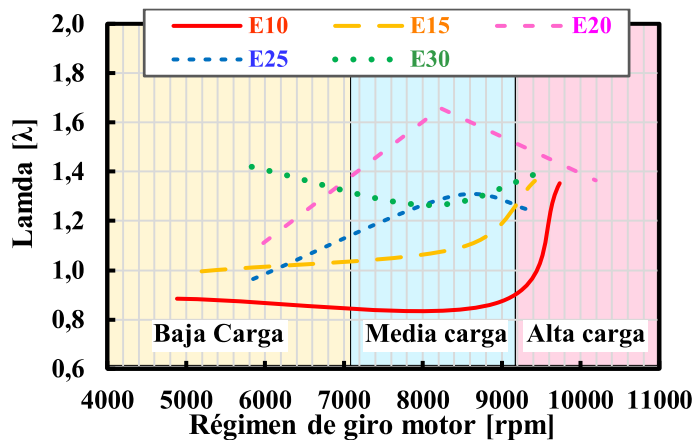


Figura 3.10: Relación estequiometria en función del régimen de giro del motor.

En la Figura 3.10, se logra apreciar que la tendencia de las curvas es muy similar a las curvas de la Figura 3.9; sin embargo, la relación de lambda para las mezclas E10 se mantiene por debajo hasta llegar al régimen de alta carga, caso que no ocurre con los datos de las demás mezclas, pues estos siempre muestran niveles superiores a la unidad, lo cual corrobora que el motor siempre tuvo un exceso de aire para el combustible que está entrando por lo que ocasiono formación de dióxido, menos en el caso de la mezcla E20 donde se evidencia que tuvo un exceso de aire cercano al 65% en relación al combustible por ende no hay producción de monóxido de carbono y dióxido de carbono.

Normalmente los motores modernos para hacer más eficientes y económicos buscan que la relación lambda sea cerca a uno, pero para lograrlo se hace la variación de la cantidad de combustible inyectado según sea el ingreso del aire al motor, dicho esto, de la Figura 3.10, se puede decir que esta relación de aire estequiométrico y real se puede mejorar siempre que se logre inyectar la cantidad

precisa de combustible según sea el régimen de giro; no obstante, los motores utilizados en aeromodelismo no tienen la capacidad de regular este paso de combustible en función del aire que está ingresando en el momento y de forma continua, ya que la inyección de combustible depende de un tornillo que es graduado según sea el tipo combustible y de las revoluciones que presente; sin embargo, se pudo obtener un buen ejemplo del lambda deseado como lo muestra la curva para la mezcla E15, la cual en el régimen de baja y media carga esta solo presenta una desviación del 3% y 8% respectivamente, pero al llegar a alta carga, esta desviación aumenta hasta un 40%, lo cual indica que hay una carencia de combustible para el aire que hay disponible en el proceso de combustión, estos porcentaje son medidas con respecto a la dosado ideal que es de 1.

A continuación, se presenta en la Figura 3.11 las partículas o partes por millón registradas por el analizador de gases para los hidrocarburos o inquemados, estas partículas son rastros de combustible que no reaccionan con el aire las cuales están presentes en los gases de escape, este componente se espera que con el cambio de combustible se logre una reducción considerable, puesto que el principal reactivo es la gasolina, y al haber menos cantidad de gasolina se espera que estas partículas disminuyan.

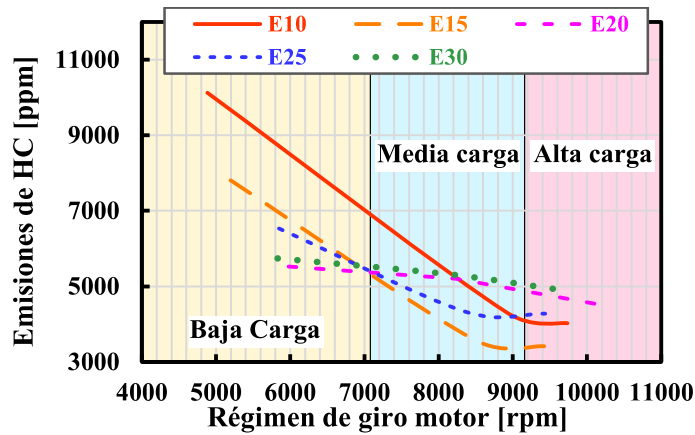


Figura 3.11: Emisiones de hidrocarburos en función del régimen de giro del motor.

Para analizar el comportamiento de reducción de hidrocarburos, se parte de las medidas obtenidas para baja carga, ya que, al tener el mayor consumo con el menor empuje, estas son altas, pero se logra evidenciar que estas se reducen al cambiar el porcentaje de etanol del combustible y el nivel de carga, puesto que a mayor régimen de giro del motor se logra que el combustible haga una mejor combustión en la cámara de combustión, por lo tanto, se reducen en un 61% para los combustibles E10 y E15, en el caso del combustible E20 un 41%, mientras que para los combustibles

E25 y E30 un 18%, este porcentaje es medido con los datos obtenidos a baja carga y alta carga, ya que este comportamiento es similar para las condiciones de media carga.

Adicionalmente se pudo comprobar que las partículas por millón si disminuyen significativamente; sin embargo, estas no bajan de 3200 ppm, ya que, al ser un motor de 2 tiempos, este siempre quema aceite, lo cual genera este nivel de ppm, siendo una de las razones por la cual se desea implementar el etanol para reducir su producción y emisión al medio ambiente.

Ya para finalizar, se establece que un buen límite para la implementación de etanol en este tipo de motores es una mezcla E30, pues que como se muestra en la Figura 3.7 y Figura 3.8, al aumentar el porcentaje de etanol se obtiene que son las emisiones más bajas de monóxido de carbono y dióxido de carbono en comparación con las demás mezcla, también se pudo determinar que todas las mezcla tienen un exceso de aire que es generado por el movimiento de la hélice lo cual en determinadas ocasiones puede afectar las operación del motor ya que ingresa demasiado aire al sistema, haciendo que el combustible inyectado sea insuficiente, por otra parte se observó en la Figura 3.11, que las ppm disminuyen significativamente en comparación a la mezcla comercial E10; no obstante, las ppm tiende a normalizarse por culpa del aceite lubricante y en ocasiones a aumentar debido a la acumulación de hollín en el motor causado por tiempo de operación.



---

# Capítulo 4. Conclusiones y Trabajos Futuros

---

## 4.1. Conclusiones

En primera medida, se logró diseñar e implementar un banco que permitió la sujeción del motor para las diferentes pruebas con los combustibles, como se muestra en la sección de resultados de implementación del banco de pruebas y en los anexos A y B, en donde se consideraron dos ecuaciones teóricas para hallar las cargas a las cuales estaría sometido el motor, así mismo, en este banco se pudo instalar un sistema de medida que cumpliera con los requerimientos de rango y resolución para realizar la toma de datos, estos dispositivos son: un dinamómetro digital, una balanza tipo gramera y un cronometro, el analizador de gases del laboratorio y un tacómetro de contacto.

Para la determinación de mezclas, se sigue el esquema metodológico planteado, el plan de ensayos y en razón de los resultados obtenidos de los combustibles ensayados, en la cual se determinó que, un volumen adecuado de combustible para ensayar sería de 400ml, donde se tienen 100ml para la limpieza y 300ml para la toma de medidas, adicionalmente para ver un cambio representativo en la operación del motor, se toman incrementos de 5% en la composición del etanol en el combustible hasta llegar a un porcentaje equivalente de 30% de etanol, donde se tuvo en cuenta el contenido de etanol que tiene la gasolina que es del 10% según Fedecombustibles.

Con la adquisición de datos, se logró realizar un estudio sobre el comportamiento de los parámetros efectivos y las emisiones de los gases de escape, en la cual al aumentar el porcentaje de etanol en la mezcla del combustible se logra establecer que: la medida comparativa sería bajo una condición de isogasto másico de combustible a unas condiciones entre 6500 a 7000 rpm debido a la disminución del poder calorífico de las mezclas al aumentar el porcentaje de etanol, también se logra

comparar los resultados de empuje con ecuaciones teóricas donde se tiene una desviación entre 4% y 9,8%.

En cuestión de resultados experimentales de gasto másico se logra ver que al aumentar el porcentaje de etanol en la mezcla este aumenta un 7% en relación a la mezcla comercial, que es compensado por un ligero aumento en las prestaciones de empuje; no obstante, el consumo específico de combustible al depender del gasto y el empuje se presenta una disminución del 24% en relación con la mezcla E10, lo cual es positivo ya que indica que se logra tener un mayor empuje con una menor cantidad de combustible.

Por otra parte, se concluye que se logra disminuir notablemente el contenido de monóxido de carbono y de los hidrocarburos o inquemados al incrementar la presencia de etanol, esta reducción se dio en un 37% para la condición de baja carga, 22% para la condición de media carga y un 10% para la condición de alta carga en relación a la mezcla comercial E10 en ambas emisiones contaminantes, por otra parte, se denota transformación del monóxido de carbono en dióxido de carbono, especialmente cuando aumenta el régimen de giro del motor; sin embargo, esta es determinada por el exceso de aire para la cantidad de combustible inyectado al motor, pues esto altera las condiciones de temperatura que influyen en la formación del monóxido de carbono.

Se pudo establecer que la mezcla E30 es el límite de etanol que se le puede agregar a un combustible que se utilice en motores de pequeño cilindraje, ya que el aumento del empuje y del gasto másico es en la misma proporción, llegando a un equilibrio en el consumo específico de combustible, adicionalmente, se logra evidenciar la reducción de las emisiones del monóxido de carbono y dióxido de carbono en comparación con las demás mezclas ensayadas, por lo que no justifica el aumento del porcentaje de etanol ya que dichos niveles son los mínimos alcanzados.

Para finalizar, se da respuesta a la pregunta de investigación, la cual era, ¿Cuál es el efecto que tiene el bioetanol en términos de prestaciones y emisiones en motores de pequeña cilindrada?, pues con los datos recopilados se establecieron que algunas prestaciones aumentan como es el empuje, a lo mismo que también se aumenta el gasto de combustible, sin embargo, se logra reducir en gran medida los hidrocarburos y la producción de monóxido de carbono, por lo cual es posible aumentar el porcentaje de etanol en el combustible hasta un E30 sin afectar en gran medida las prestaciones del motor a las condiciones atmosféricas de la ciudad de Bogotá.

## 4.2. Trabajos futuros

Las pruebas realizadas tienen un grado de desfase en simultaneidad, por lo cual, se recomienda que para la toma de datos se cuente con al menos 4 personas, las cuales deben dividirse el trabajo entre la operación y la recopilación de datos.

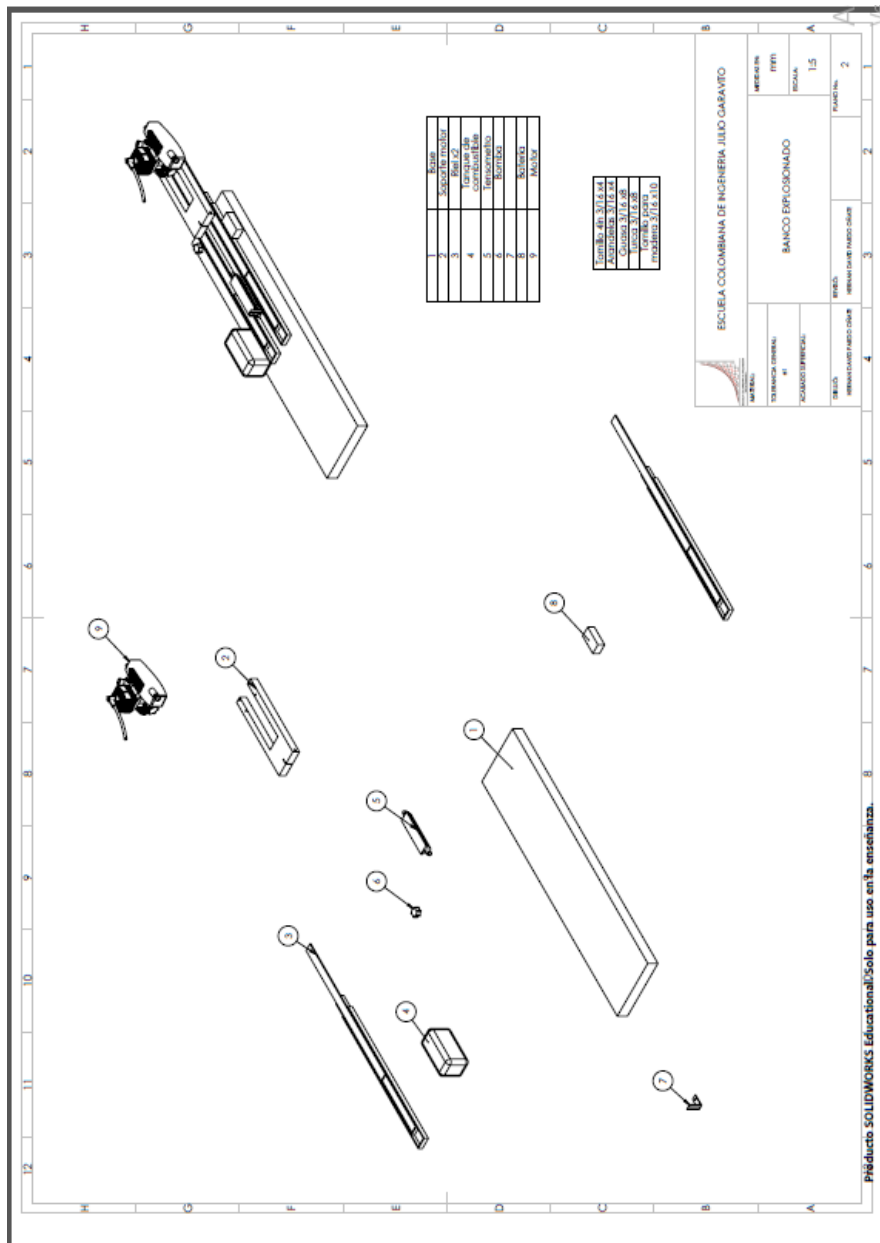
Hacer una selección de equipos adecuados que permitan la correcta toma de medidas, pues el motor vibra en exceso, y esto causa una desviación en los instrumentos de medida y en ocasiones daños, que interrumpen la toma de datos, afectando la homogeneidad de las pruebas.

Realizar más pruebas con mayor porcentaje de etanol, siguiendo el incremento porcentual del 5% entre las mezclas, hasta llegar a un 100%, sin embargo, hay que realizar también pruebas de mantenimiento, que podrían generar un estudio de desgaste de componentes o del mismo motor, ya que una de las recomendaciones de los expertos en aeromodelismo es la limpieza del motor después de realizar un vuelo, puesto que el etanol es un agente corrosivo para dichos motores.

Otro aspecto a destacar es el cambio de los materiales para futuras pruebas, pues, la base y la pieza en U, fueron ellas en madera por la economía del material y facilidad de manufactura, ya que puede ser cambiadas por materiales como aluminio o acero.

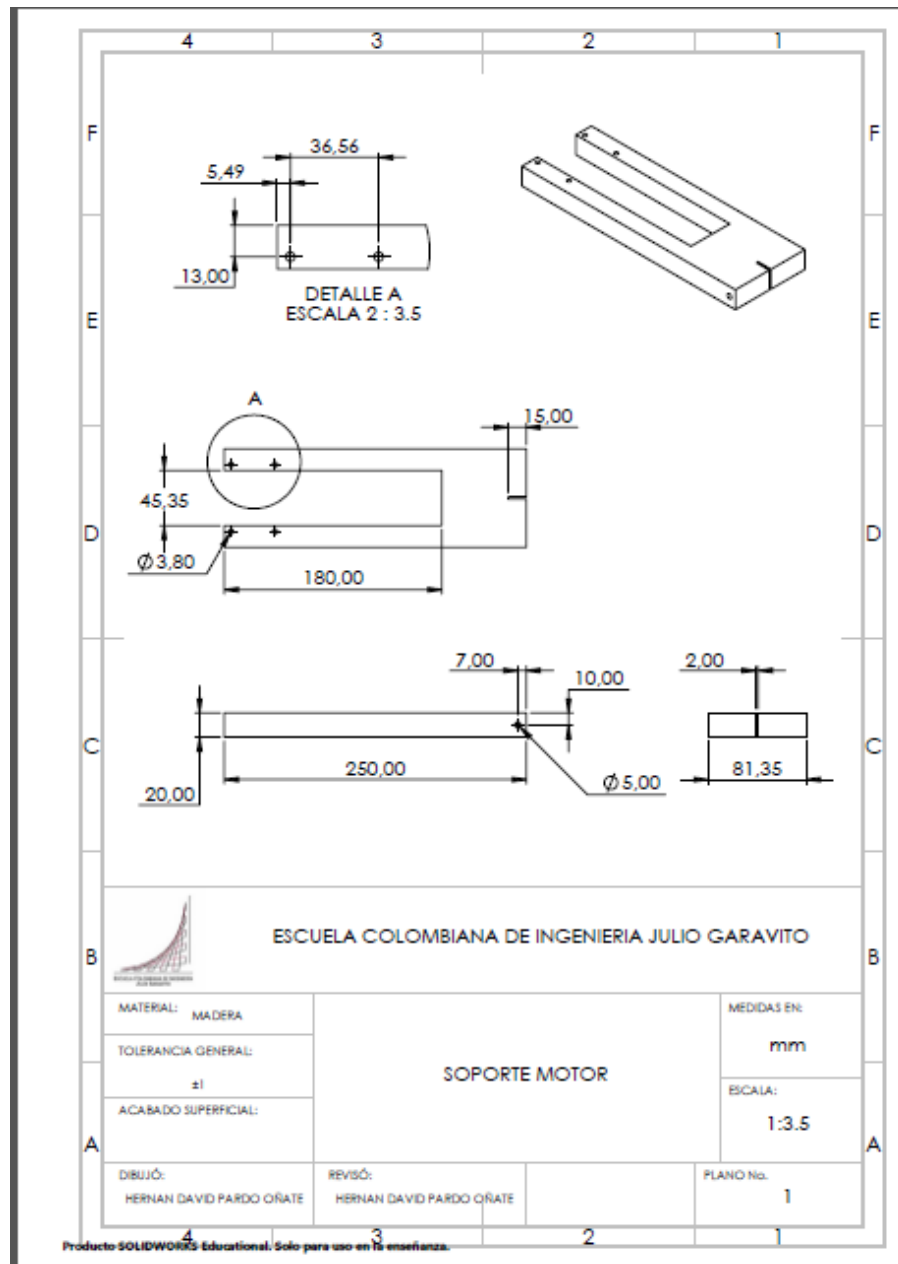


# Anexo A. Explosionado del Banco





# Anexo B. Soporte Motor







---

# Bibliografía

---

- [1] A. K. Agarwal, «Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines.,» 2007.
- [2] M. Al-Hasan, «Effect of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission.,» *Energy Conversion and Management*, 44, pp., 2003.
- [3] M. S. C. C. M. Balki, «The effect of different alcohol fuels on the performance, emission and combustion characteristics of a gasoline engine.,» *Fuel*, 115, pp. , 2014.
- [4] M. Celik, «Experimental determination of suitable ethanol–gasoline blend rate at high compression ratio for gasoline engine.,» *Applied Thermal Engineering*, 28, pp. , 2008.
- [5] E. D. C. L. A. F. E. S. Alexander García Mariaca, «MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA (MCI) OPERANDO CON MEZCLAS DE ETANOL GASOLINA,» Bogotá, Colombia, 5 de enero de 2016. .
- [6] M. H. M. S. B. G. D. Ghazikhani, «Experimental investigation of exhaust temperature and delivery ratio effect on emissions and performance of agasoline–ethanol twostroke engine.,» *Case Studies in Thermal Engineering*, 2, pp. , 2014.
- [7] I. D. L. G. J. P. G. Schifter, «Combustion characterization in a single cylinder engine with mid-levels hydrated ethanol-gasoline blended fuels.,» *Fuel*, 103, pp. , 2013.
- [8] T. Y. H. C. C. K. A. Topgül, «The effects of ethanol–unleaded gasoline blends and ignition timing on engine performance and exhaust emissions.,» *Renewable Energy*, 31, pp. , 2006.
- [9] Fedebiocombustibles, «PROCESO DE OBTENCION DEL ETANOL,» <http://www.fedebiocombustibles.com/main-pagina-id-4-titulo-proceso>, Bogotá, 2019.
- [10] D. N. d. Planeación, «Lineamientos de política para promover la produccion sostenible de biocombustibles en Colombia,» Conpes 3510. Documento Conpes 3510, Bogotá, 2008.

- 
- [11] D. M. C. P. F. R. Jaime Torres, «ESTUDIO DE LA MEZCLA DE GASOLINA CON 10% DE ETANOL ANHIDRO. EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS.,» Bucaramanga, Santander, Colombia., 13 de Noviembre 2002.
- [12] O. F. A. C. Oscar Edwin Piamba Tulcán, «DESEMPEÑO DE MOTOR UTILIZANDO COMO COMBUSTIBLE MEZCLA DE ETANOL ANHIDRO Y GASOLINA EN RELACION DE 10% EN VOLUMEN E10,» Cusco, Perú, 25 de Octubre de 2007.
- [13] W. DIEHL, «Static Thrust of Airplane Propellers. Bureau of Aeronautics,» Navy Department, Washington, D. C, 1982.
- [14] M. Muñoz, «Sistemas funcionales; sistema de propulsión (hélices).,» Recuperado de: <http://www.manualvuelo.com/SIF/SIF32.html>., 2015.

