

RAE

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Aeronáutico.
2. **TÍTULO:** Influencia del uso de combustibles alternativos en motores a pistón de aviación.
3. **AUTORES:** Jaime Alberto Leyton Moreno y Jesús Andrés Vega Moreno.
4. **LUGAR:** Bogotá D.C.
5. **FECHA:** Noviembre de 2015.
6. **PALABRAS CLAVE:** Combustible alternativo, Motores a pistón, Biocombustible, AvGas, Emisiones contaminantes, Ciclo Otto, Poder calorífico, Curva de destilación, Etanol, Lycoming, Caña de azúcar, Gasolina de Aviación.
7. **DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El objetivo principal de este proyecto es evaluar la influencia del uso de combustibles alternativos en motores a pistón de aviación, a través de la caracterización de mezclas de Bioetanol proveniente de caña de azúcar con combustible de aviación AvGas 100/130. Las pruebas químicas realizadas sobre las muestras incluyen determinación de poder calorífico, viscosidad, densidad y curva de destilación. A partir de los resultados encontrados, se evalúa el desempeño teórico de cada mezcla a través del ciclo Otto, en condiciones isentrópicas y politrópicas, teniendo como referente los parámetros geométricos y mecánicos del motor Lycoming IO-540. Adicionalmente describen las condiciones teóricas de atomización y el porcentaje de reducción de dióxido de carbono en cada caso.
8. **LINEAS DE INVESTIGACIÓN:** Este proyecto pertenece a la línea de investigación de Energía y Vehículos de la facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, enfocado en el núcleo problémico de Propulsión y Energía Renovables.
9. **METODOLOGÍA:** El enfoque de la investigación corresponde a un enfoque empírico-analítico a través del cual se toman datos experimentales obtenidos en diferentes pruebas de laboratorio, y se aplican sobre un modelo matemático descrito a través de un algoritmo que permite realizar una búsqueda de resultados con respecto al problema planteado, que en este caso se relaciona con los índices de emisiones contaminantes entregadas a la atmósfera y los efectos del biocombustible en el rendimiento teórico de un motor específico.
10. **CONCLUSIONES:** Las mezclas de Bioetanol con combustible de aviación AvGas 100/130 permiten reducir las emisiones de Dióxido de Carbono en el motor Lycoming IO-540 hasta en un 24% al emplear 20% de biocombustible proveniente de caña de azúcar con un 80% de combustible tradicional. Las mezclas con porcentaje de etanol superior al 20% requieren de alteraciones en el motor con el fin de evitar problemas en el proceso de atomización en los inyectores y asegurar las condiciones adecuadas de operación en vuelo. También se estima que las mezclas con combustible alternativo en concentraciones superiores al 20% en volumen podrían generar tapones de vapor en los ductos de distribución de combustible en el motor.

**INFLUENCIA DEL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN MOTORES
A PISTÓN DE AVIACIÓN**

**JAIME ALBERTO LEYTON MORENO
JESÚS ANDRÉS VEGA MORENO**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AERONÁUTICA
BOGOTÁ D.C.
2015**

**INFLUENCIA DEL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN MOTORES
A PISTÓN DE AVIACIÓN**

**JAIME ALBERTO LEYTON MORENO
JESÚS ANDRÉS VEGA MORENO**

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Aeronáutico

Director:

**LUISA FERNANDA MÓNICO MUÑOZ
Ph.D en Sistemas Propulsivos en Medios de Transporte**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AERONÁUTICA
BOGOTÁ D.C.
2015**

Nota de Aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C. 02 de Octubre de 2015

A mi familia que me brindo el apoyo durante mi proceso de formación como Ingeniero Aeronáutico, especialmente a Ana Milena Moreno Acosta, Flor Acosta de Moreno y Luis Alberto Leyton Vargas, ya que han estado presentes en cada etapa y proyecto que emprendo.

A mi familia en el exterior, especialmente a mi hermana Gina Paola Leyton Moreno, ya que es un ejemplo a seguir como Ingeniera Aeronáutica.

A mis amigos de la Universidad de San Buenaventura Bogotá, especialmente a Jesús Andrés Vega Moreno, porque me ayudo en mi formación integral como ingeniero y persona.

A las personas que han dejado una huella en mi vida dentro y fuera del país, ya que gracias a ellos he conocido y explorado nuevas etapas de mi vida tanto intelectual como personal.

Jaime Leyton

A mi familia que apoyó mi desarrollo como Ingeniero Aeronáutico, especialmente a Mariela Morales, José Moreno, Gladys Moreno y Mario Vega. Sin su apoyo no hubiese logrado nada.

A todas aquellas personas que dejaron este mundo y que hicieron parte de mi vida, de quienes quise aprender y valorar mucho más o haber compartido más tiempo con ellas.

A mis amigos de la Rama Estudiantil AIAA, con quienes compartí toda la experiencia de crecer en la carrera y enfrentar nuevos retos que nos hicieron cada vez más grandes.

Y a todas las demás personas que de una u otra forma me dieron el ánimo para dar lo mejor de mí, sin importar en que ciudad o país se encuentren.

Jesús Vega

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de San Buenaventura Bogotá por brindarnos los espacios de desarrollo requeridos por nuestro proyecto, así como las herramientas y equipos relacionados.

A sus profesores por permitirnos explorar nuevos conocimientos entorno al desarrollo de nuestro perfil como ingenieros aeronáuticos.

A la Doctora Luis Fernanda Mónico Muñoz, por guiar el desarrollo de este proyecto con disciplina, empeño y dedicación.

Al laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia por acoger nuestra solicitud en la realización de las pruebas relacionadas con la caracterización de las mezclas de combustibles propuestas.

Al Doctor Oscar Venegas Pereira, por asesorarnos en el desarrollo de la estimación cualitativa del proceso de atomización.

A Inspecciones Aeronáuticas de Colombia LTDA, por brindarnos el combustible de aviación (AvGas100/130) requerido en la realización de las diferentes pruebas químicas.

A nuestras familias por apoyarnos económica y moralmente, en cada proyecto que emprendemos en busca de nuestro crecimiento profesional.

Muchas Gracias

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	16
1. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
1.1. Descripción y formulación del problema.....	17
1.2. Justificación	18
1.3. Objetivos de la investigación.....	18
1.3.1. Objetivo general	18
1.3.2. Objetivos específicos	18
1.4. Delimitación del problema.....	19
1.4.1. Alcances.....	19
1.4.2. Limitaciones	19
2. MARCO DE REFERENCIA	20
2.1. Antecedentes	20
2.2. Marco legal o normativo.....	26
2.3. Marco teórico.....	29
2.3.1. Combustibles	29
Generalidades	30
Caracterización de combustibles.....	32
Combustibles de aviación.....	36
Combustibles alternativos	39
2.3.2. Motores.....	40
Generalidades	41
Ciclo Otto ideal	42
Ciclo real	46
Aplicaciones y Descripción de un Motor de Ignición por Chispa	50
2.4. Alternativas de solución previstas	55
3. METODOLOGÍA	57
3.1. Enfoque de la investigación.....	57
3.2. Línea de investigación/Núcleo problemático	58
3.3. Selección del motor	58

3.4.	Selección de mezcla.....	60
3.5.	Propiedades de las mezclas.....	61
4.	DESARROLLO INGENIERIL.....	62
4.1.	Análisis teórico del ciclo en el motor	62
4.2.	Pruebas y propiedades	69
4.3.	Proceso de Combustión	81
4.4.	Efectos en el proceso de Atomización.....	87
5.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	93
5.1.	Rendimiento de cada mezcla en el ciclo termodinámico isentrópico	93
5.2.	Rendimiento de cada mezcla en el ciclo termodinámico Politrópico	98
5.3.	Emisiones contaminantes.....	102
5.4.	Adaptabilidad en motores a pistón de aviación	105
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	110
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	113
	GLOSARIO.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Temperatura vs Porcentaje de Destilación	34
Figura 2. Presión del vapor en la cámara de combustión	35
Figura 3- Diagrama P-v del Ciclo Otto Ideal	43
Figura 4. Diagrama T-s del Ciclo Otto Ideal	46
Figura 5. Configuraciones Comunes de Posición de Cilindro	52
Figura 6. Partes principales de un motor SI 4 tiempos	54
Figura 7. Diagrama P-v del Ciclo Otto Ideal con Turbocargador	55
Figura 8. Motor Lycoming IO-540 con Hélice Adaptada	59
Figura 9. Esquema del Algoritmo de Ciclo Otto Isentrópico	64
Figura 10. Esquema de Algoritmo de Ciclo Otto Politrópico	67
Figura 11. Variación Estimada en el Poder Calorífico	71
Figura 12. Montaje de Densidad para Mezclas de AvGas y Bioetanol	73
Figura 13. Curva de Variación de Densidad	74
Figura 14. Montaje de destilación para Mezclas de AvGas	76
Figura 15. Curvas de Destilación	77
Figura 16. Variación Estimada de la Viscosidad de las mezclas.....	80
Figura 17. Reactivos y Productos en la combustión.....	84
Figura 18. Inyector de Combustible P/N LW-18625	88
Figura 19. Inyector de Combustible P/N LW-14540	88
Figura 20. Regímenes de Atomización en un inyector.....	90
Figura 21. Relación entre Números de Reynolds y Ohnesorge.....	91
Figura 22. Variación del IMEP en Condiciones Isentrópicas	94

Figura 23. Variación del BMEP en Condiciones Isentrópicas	94
Figura 24. Potencia Específica de Frenado en Condiciones Isentrópicas	94
Figura 25. Consumo Específico de Combustible en Condiciones Isentrópicas	96
Figura 26. Potencia de Frenado en Condiciones Isentrópicas	96
Figura 27. Torque Teórico Producido en Condiciones Isentrópicas	96
Figura 28. Potencia Indicada en Condiciones Politrópicas	99
Figura 29. BMEP en Condiciones Isentrópicas.....	99
Figura 30. Potencia Específica de Frenado en Condiciones Politrópicas.....	99
Figura 31. OPD en Condiciones Politrópicas.....	101
Figura 32. BSFC en Condiciones Politrópicas	101
Figura 33. Reducción de emisiones de CO2.....	104

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de Diferentes tipos de AvGas	36
Tabla 2. Propiedades del AvGas 100/130	38
Tabla 3. Propiedades del Bioetanol	40
Tabla 4. Especificaciones del Motor Lycoming IO-540	59
Tabla 5. Nomenclatura de Mezclas	60
Tabla 6. Poder Calorífico Superior de Cada Mezcla	70
Tabla 7. Poder Calorífico Superior Estimado.....	72
Tabla 8. Parámetros de Cálculo de Densidad de las Mezclas	73
Tabla 9. Valores de Viscosidad en las Diferentes Mezclas a 25°C	80
Tabla 10. Calculo de Fracción Molar para E10.....	82
Tabla 11. Variables e incógnitas del Balance Estequiométrico.....	83
Tabla 12. Entalpía de las sustancias	84
Tabla 13. Proceso Iterativo de la temperatura de llama adiabática	85
Tabla 14. Relaciones AF y Llama adiabática en las mezclas.....	86
Tabla 15. Regímenes de Atomización Encontrados.....	92
Tabla 16. Emisiones Contaminantes de Dióxido de Carbono por Mol de Combustible....	103
Tabla 17. Matriz de Decisión de Adaptabilidad.....	108

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Procedimiento de Realización de la Prueba Estandarizada de Determinación de Poder Calorífico para Combustibles de Hidrocarburos Líquidos mediante Bomba Calorimétrica (Norma ASTM D240 -02).

Anexo 2: Procedimiento de Realización de la Prueba Estandarizada de Densidad y Densidad Relativa (Gravedad Específica) de líquidos a través de Picnómetro Bingham. (Norma ASTM D1217 -93)

Anexo 3: Procedimiento de Realización de la Prueba Estandarizada de Destilación de Productos de Petróleo. (Norma ASTM D86 -95)

Anexo 4: Procedimiento de Realización de la Prueba Estandarizada de Viscosidad para Líquidos Transparentes y Opacos (Viscosidad cinemática y dinámica). (Norma ASTM D445 -65)

Anexo 5: Cotización y Resultados Obtenidos sobre las pruebas de Poder Calorífico, Viscosidad Cinemática y Contenido de Azufre (Cotización: Consecutivo 042-mayo-2015) (Informe: Consecutivo LQUI-025-2015)

LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIACIONES

Símbolos

a	Parámetro Fracción máxima (Ley de Vibe)	Q_{HV}	Poder Calorífico Superior
AF	Relación Aire-Combustible	Q_{in}	Calor ingresado al ciclo
B	Diámetro del pistón	R	Constante de la mezcla aire-gasolina
b_{mep}	Presión media efectiva de frenado	Re	Número de Reynolds
$bsfc$	Consumo específico de combustible de frenado	r_c	Relación de compresión en el motor
BSP	Potencia específica de frenado	S	Carrera del pistón
c	Calor específico	T	Temperatura en el Cilindro
c_p	Calor específico a presión constante	T_0	Temperatura de ambiente
c_v	Calor específico a volumen constante	T_1	Temperatura de entrada al cilindro
$CA50$	Ángulo de quema del 50% de mezcla	T_2	Temperatura en fase de compresión
D_n	Diámetro de orificio de inyección	T_3	Temperatura en combustión
$imep$	Presión media efectiva indicada	T_4	Temperatura en expansión
k	Coefficiente de Dilatación Adiabática	T_{comb}	Temperatura corregida con incremento
k_c	Constante del proceso de compresión politrópico	ΔT_{comb}	Incremento de temperatura por combustión
k_e	Constante en expansión politrópica	T_{ex}	Temperatura en el escape
l	Longitud de Biela	T_θ	Temperatura en función del ángulo del cigüeñal
m	Indicador de energía liberada (Ley de Vibe)	\bar{U}_p	Velocidad media del pistón
m_a	Masa de aire en el cilindro	u_n	Velocidad a la salida del inyector
m_e	Masa de residuos reciclados	V	Volumen en el interior del Cilindro
m_f	Masa de combustible en el cilindro	V_1	Volumen máximo por cilindro
m_m	Masa de la mezcla aire - combustible en el cilindro	V_2	Volumen en fase de compresión
n	Revoluciones por ciclo (2 para C. Otto)	V_3	Volumen en fase de combustión
nc	Coefficiente Politrópico de Compresión	V_4	Volumen en fase de expansión
ne	Coefficiente Politrópico de Expansión	V_c	Volumen libre
N	Revoluciones por segundo del motor	V_d	Volumen desplazado por el cilindro
N_c	Número de Cilindros en el motor	V_{r4}	Volumen en expansión corregido
Oh	Número de Ohnesorge	V_T	Cilindrada del motor
OPD	Energía entregada por desplazamiento	W_{1-2}	Trabajo requerido para compresión
P	Presión en el cilindro	W_{3-4}	Trabajo realizado en expansión
P_0	Presión de ambiente	W_b	Trabajo de frenado
P_1	Presión de entrada al cilindro	W_{net}	Trabajo neto del ciclo
P_2	Presión en fase de compresión	\dot{W}_b	Potencia de frenado
P_3	Presión en fase de combustión	\dot{W}_f	Potencia perdida por fricción
P_4	Presión en fase de expansión	\dot{W}_i	Potencia indicada
P_{comb}	Presión corregida con incremento	x	Posición del Pistón en el cilindro
P_{ex}	Presión a la salida del escape	x_r	Fracción de residuos reciclados
P_θ	Presión en función del ángulo de cigüeñal	x_{rc}	Fracción de residuos corregida
q_c	Calor perdido durante la compresión	ρ_f	Densidad del combustible
Q_c	Perdidas en intervalo de Compresión	ρ_m	Densidad de la mezcla AF en el cilindro
Q_{ct}	Perdidas de calor totales en Compresión	λ	Relación Radio-Biela
Q_e	Perdidas en intervalo de Expansión	μ_f	Viscosidad dinámica del combustible
Q_{et}	Perdidas de calor totales en Expansión	η_c	Eficiencia de combustión

η_m	Eficiencia mecánica estimada	θ	Ángulo de posición del cigüeñal
η_t	Eficiencia térmica	θ_0	Ángulo de cigüeñal de inicio de combustión
η_v	Eficiencia volumétrica	θ_{ic}	Ángulo de cigüeñal de inicio de compresión
σ	Tensión superficial	$\Delta\theta_0$	Intervalo de combustión en GRC
τ	Torque	θ	Ángulo de posición del cigüeñal

Abreviaciones

AF: Relación Aire Combustible

API: American Petroleum Institute

ASTM: American Society for Testing and Materials

AvGas: Aviation Gasoline

BDC: Punto Muerto Inferior

BMEP: Presión Media Efectiva de Frenado

BSFC: Consumo Específico de Combustible de Frenado

BSP: Potencia Especifica de Frenado

GRC: Grados de Rotación del Cigüeñal

HHV: Poder Calorífico Superior

IMEP: Presión Media Efectiva Indicada

LHV: Poder Calorífico Inferior

MCIA: Motor Alternativo de Combustión Interna

MSNM: Metros sobre el Nivel del Mar

O: Motor con Cilindros Opuestos de Eje Directo y Carburador

OPD: Salida de Potencia por Desplazamiento

P/N: Número de Parte o “Parte Número”.

RPM: Revoluciones por Minuto

IO: Motor con Cilindros Opuestos de Eje Directo y sistema de Inyección

TDC: Punto Muerto Superior

TIO: Motor Turbocargado con Cilindros Opuestos de Eje Directo y sistema de Inyección

TIGO: Motor Turbocargado de Cilindros Opuestos con Reducción y sistema de Inyección

INTRODUCCIÓN

La cantidad de aeronaves de transporte alrededor del mundo ha triplicado su cantidad en los últimos 25 años, por lo que la tasa de emisiones contaminantes depositadas en la atmosfera por estos vehículos es mayor, con hasta 667 millones de toneladas de CO₂ anuales. En ciudades como Bogotá, esta contribución a la contaminación corresponde a un 6% y los estudios entorno a métodos de mitigación de este tipo de emisiones son limitados. Una alternativa viable que permite reducir la cantidad de gases contaminantes emitidos a la atmósfera es la implementación de combustibles alternativos en los diferentes tipos de motores empleados en aviación. A nivel nacional, únicamente se ha certificado el uso de estos combustibles en vehículos de transporte terrestre, a pesar de que países como Brasil han realizado avances importantes en la implementación de biocombustibles en diferentes sectores industriales, generando un desempeño adecuado en las máquinas, con menores costos de operación y reducción en las tasas de emisión neta de gases de efecto invernadero. Con el apoyo de entidades brasileñas y organismos internacionales, la empresa Embraer, ha comenzado a producir aeronaves con motores totalmente accionados por combustión de Bioetanol, tal como el EMB 202 Ipanema, cuyas aplicaciones agrícolas en operaciones de fumigación permiten la certificación de este tipo de combustibles para vuelo a baja altitud sobre el nivel del mar. Para la implementación de este tipo de combustibles en aeronaves de aviación general y transporte regional, se deben evaluar las propiedades de las mezclas de combustible de aviación (AvGas para motores recíprocos) con combustibles alternativos, con la finalidad última de establecer la viabilidad de su implementación y su posterior certificación.

1. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El proyecto contempla la realización de diversas pruebas químicas a diferentes tipos de mezclas de combustible de aviación AvGas 100/130 con etanol obtenido a partir de biomasa, principalmente caña de azúcar de acuerdo a la oferta del mercado nacional. Dichas pruebas incluyen la determinación de propiedades del combustible tales como poder calorífico, densidad, viscosidad cinemática y curva de destilación. De esta forma se pueden caracterizar diferentes porcentajes de mezcla con el fin de comparar los resultados del rendimiento del motor al emplear diversos combustibles.

Posteriormente, a través de un análisis teórico del desempeño de cada mezcla en el ciclo termodinámico correspondiente, se establece la etapa inicial de determinación de viabilidad del uso de biocombustibles en aviación para motores recíprocos.

1.1.Descripción y formulación del problema

De acuerdo con el crecimiento en la influencia de los combustibles alternativos, debido a los tratados internacionales y su reciente inclusión en las operaciones de vehículos terrestres, se evalúa de manera teórica la posibilidad de incluir este tipo de combustibles en los motores a pistón de aviación, con el fin de reducir la emisión de gases que contribuyen al efecto invernadero y mitigar la contribución de este sector de la aviación al cambio climático. Sin embargo, es necesario evaluar los efectos del uso de este tipo de combustibles en los motores comúnmente empelados en aeronaves tipo FAR 23, con el fin de no afectar drásticamente su rendimiento y garantizar la seguridad de su operación. De esa manera, se plantea la siguiente pregunta: ¿Qué influencia generan los combustibles alternativos en motores de pistón de aviación?

1.2. Justificación

Este proyecto busca generar una base teórica para la implementación de combustibles alternativos en diferentes modelos de motor a pistón de aviación, a partir de un estudio de viabilidad de la aplicación de estos combustibles en la industria aeronáutica colombiana, y de acuerdo con las regulaciones emitidas por la autoridad competente. A través de investigaciones posteriores a este proyecto, se podría certificar la utilización de biocombustibles en diversos modelos de aeronave ampliamente empleados a nivel nacional, reduciendo el impacto ambiental provocado por las emisiones de gases de efecto invernadero expulsados en el proceso de combustión.

1.3. Objetivos de la investigación

De acuerdo con el problema descrito, se establece un objetivo general y tres específicos en torno a la caracterización de mezclas de combustible y al estudio del ciclo termodinámico de un motor aplicable al proyecto, tal como se muestra a continuación.

1.3.1. Objetivo general

Establecer la influencia de los combustibles alternativos en motores a pistón de aviación.

1.3.2. Objetivos específicos

- ➔ Caracterizar diferentes mezclas de combustible AvGas 100/130 con Bioetanol proveniente de caña de caña de azúcar.
- ➔ Realizar los cálculos térmicos y dinámica de gases de un motor reciproco ciclo Otto para cada mezcla de combustible.

- Redactar un artículo publicable mostrando los resultados obtenidos en la comparación de las mezclas realizadas.

1.4.Delimitación del problema

1.4.1. Alcances

En este proyecto se pretende realizar un análisis práctico de laboratorio a diferentes mezclas de combustibles sin llevar a cabo pruebas de rendimiento experimental en un motor real seleccionado. De esa manera los cálculos de rendimiento y potencia son únicamente teóricos y los resultados dependen de la cantidad de propiedades que se logren determinar para cada una de las mezclas escogidas. Adicionalmente se incluyen cálculos de emisiones contaminantes, temperatura de llama adiabática y la estimación de los efectos del combustible alternativo en el proceso de atomización.

1.4.2 Limitaciones

Las pruebas químicas de caracterización de las mezclas están restringidas de acuerdo a la disponibilidad de los laboratorios consultados y a los costos requeridos para la realización de dichas pruebas (según aplique). Igualmente la cantidad de mezclas de combustible alternativo están sujetas a la disponibilidad en la adquisición de Bioetanol a nivel nacional, teniendo como mínimo biocombustibles producidos a partir de caña de azúcar.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Antecedentes

En concordancia con los acuerdos pactados en el protocolo de Kioto en 1997, durante la Convención Marco sobre el Cambio Climático, la reducción de las emisiones de gases generadores de efecto invernadero por parte de los países participantes debía alcanzar valores de 5,2% para el año 2012, de manera que a través de diferentes metodologías, dentro de las que se encuentra el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), se plantearon alternativas de sustitución de los combustibles fósiles como fuentes de energía para diversos sectores (Perczyk, 2007A). De esa manera, países considerados desarrollados comenzaron a invertir en países en vía de desarrollo, con el fin de obtener fuentes de biomasa que pudieran emplearse como sustituto de los combustibles fósiles comúnmente empleados. Los combustibles obtenidos a partir de biomasa aprovechan el ciclo del CO₂ en las plantas, ya que teóricamente se considera que el dióxido de carbono absorbido de la atmósfera por las plantas durante su proceso de respiración equivale al emitido durante su combustión (Perczyk, 2007B).

De esa manera, de diferentes cultivos como la caña, el maíz, la soja y la palma se pueden obtener combustibles alternativos, tanto para motores de ciclo Otto, como para motores Diésel. En el caso de los motores impulsados con gasolina (Ciclo Otto), se emplean mezclas de alcohol carburante (etanol), mientras que para motores Diésel se utilizan mezclas obtenidas de aceites naturales (Biodiesel) (Corpoica, 2008). A nivel nacional, según la Unidad de Planeación Minero Energética, Colombia cuenta con una ubicación geopolítica competitiva en cuanto a Biocombustibles a nivel de Latino América. Según la ley 693 de

2001, la canasta energética de Colombia se ha diversificado de acuerdo a la sostenibilidad ambiental, mejoramiento de la calidad de combustibles, desarrollo agroindustrial, generación de empleo, desarrollo agrícola y abastecimiento energético (UPME, 2009). La producción de etanol según la canasta energética nacional, se realiza mediante los procesos de fermentación e hidrólisis de materias primas como la caña de azúcar, yuca, maíz, entre otros, por lo que se han puesto en marcha proyectos de interés a partir de la producción de caña de azúcar. Empresas como Providencia, Manuelita y Mayagüez, abarcan una producción en promedio de 700,000 litros de alcohol carburante al día.

Según UPME, Colombia en Diciembre de 2008 tuvo una demanda de gasolina nacional de alrededor del 64% con mezcla de alcohol, por lo que para el 2011 se empezó a utilizar 10% de alcohol carburante en la totalidad de la gasolina producida en territorio nacional. El etanol producido se obtiene en su mayoría de destilerías y abarca un 61% de su producción a nivel local. La ley 1151 de 2007, la cual expide el plan nacional de desarrollo 2006-2010, se encarga de la coordinación, puesta en marcha y desarrollo de biocombustibles en Colombia. Esta ley busca encontrar y promover políticas de diversificación de la canasta energética del país, como se menciona previamente. Con dichos cambios se realizó la publicación CONPES 3510, que busca promover la producción de biocombustibles a largo plazo de acuerdo al desarrollo del sector económico y político de la sociedad colombiana (UPME, 2009).

Es así como durante los últimos años el consumo de combustibles en Colombia ha aumentado de manera exponencial, por ello se han realizado programas que buscan mejorar la producción de Biocombustibles, principalmente de etanol proveniente de caña de azúcar y yuca, ya que tienen un rendimiento de 9.000 y 4.500 L/ha/año, aportando a su vez empleos directos. Según el ministerio de agricultura y de desarrollo rural del país existen más de 41

millones de hectáreas para el sector agrícola que pueden ser aprovechadas en cultivos para el desarrollo de biocombustibles (MINMINAS, 2007). La percepción alrededor de la producción de biocombustibles en Colombia posee sectores a favor y en contra, ya que la generación de biomasa es un factor positivo en cuanto a que no incrementa las emisiones de CO₂ y genera desechos biodegradables, a diferencia de los combustibles fósiles. Sin embargo su impacto negativo se argumenta en que al usar productos a base de caña de azúcar, maíz y otros similares, se afectan los mercados y se eleva el costo de alimentos, reduciendo adicionalmente a la biodiversidad de flora.

Es necesario tener en cuenta que a pesar de los impactos ambientales y sociales que este cambio genera, en 2001 Colombia reglamentó el uso de una mezcla de gasolina con etanol y de diésel con biodiesel para hacer más competitivo al sector energético a nivel mundial, y con ello la producción en el 2005 paso de 27 millones de litros a 337 millones de litros de combustible con etanol (García. 2012). Actualmente, la producción nacional de etanol se obtiene principalmente a base de caña de azúcar y presenta una eficiencia energética mayor a que otras materias primas. La producción para el año 2010 en las regiones del Valle del Cauca fue de 95.6%, Cauca con 1.8%, Caldas con el 1.3%, Risaralda 1.2% y Norte de Santander con el 0.1% (García, 2012).

A nivel internacional, Brasil se posicionó como pionero en la implementación de la industria de biocombustibles con el programa brasileño de alcohol (Pro alcohol), basado en la producción de la caña de azúcar que se cultivaba en dicho país a comienzos de 1975 y que hacia los años 80, debido a la baja en el precio del combustible disminuyó sustancialmente, aunque a comienzos del milenio aumentó nuevamente a nivel comercial (Duffey, 2010). La producción mundial de biocombustibles para el 2011 llegó a 124.00 millones de litros lo que implicó un crecimiento del 130% a nivel mundial. Países como Estados Unidos, Brasil y la

Unión Europea han implementado etanol como fuente de combustible alternativo en sus sociedades también.

Con la creciente implementación del uso de este tipo de combustibles (etanol y biodiesel), diversas pruebas han sido realizadas para determinar el rendimiento de los mismos en motores recíprocos de automóviles comúnmente usados, donde se ha demostrado que las mezclas de biodiesel con proporciones del 20%, 30% y 40%, en comparación con el Diésel fósil, proveen el mismo máximo torque en frenado en operaciones entre las 2000 y 3000 rpm en motores turbo-cargados de inyección indirecta (IDI) (Sanjid, 2013A). Al emplear combustibles de mostaza en mezcla esterificada sobre estos motores Diésel, con porcentajes de proporciones similares, el consumo específico de combustible (BSFC) tiende a disminuir, ya que la reacción con el oxígeno en la combustión, así como el índice de cetano, son mayores que en los combustibles fósiles tradicionales. Al agregar algunos aditivos metálicos se pueden alcanzar incluso valores menores de consumo específico de combustible, sin embargo, el valor del poder calorífico puede llegar a disminuir la potencia brindada por el motor (Sanjid, 2013B).

En el caso de los motores de encendido por chispa, el etanol empleado, proveniente de biomasa (caña, remolacha, yuca, entre otros) se mezcla con combustible fósil tradicional en proporciones que, según la ley 693 de 2001, de acuerdo con el porcentaje de etanol se denominan E, siendo E0 un combustible sin etanol y E10 un combustible con 10% de etanol anhidro (IICA, 2007). Al emplear mezclas E10 y E20 en diferentes tipos de configuración de motores, se observa que el torque y la potencia brindada por el motor no varían. De acuerdo con las pruebas realizadas en motores mono-cilíndricos de ignición, el tipo de inyección influye en este comportamiento, ya que a pesar de que el poder calorífico de las mezclas es menor, su inyección es regulada para alcanzar los valores requeridos de operación del ciclo

(Camarillo, 2011). Esto a su vez puede verse reflejado en un mayor consumo de combustible en los motores que no presentan ninguna adaptación, por lo que a nivel comercial, una medida de competitividad de las mezclas de etanol consiste en la reducción del precio por galón en comparación con el precio del combustible tradicional, con el fin de garantizar su uso y la viabilidad de su producción (Horta, 2006).

De acuerdo con los estudios realizados sobre las mezclas de etanol, y con el fin de garantizar su aplicabilidad en motores comúnmente empleados en automóviles, se ha determinado que por cada 10% de aumento en proporción de mezcla de combustible, se obtiene un aumento de aproximadamente 1,3% en el índice de octano, con respecto a la gasolina común. Al analizar la temperatura de autoencendido en condiciones estándar, esta temperatura aumenta hasta un 60% para el etanol puro, por lo que la temperatura de autoencendido de las mezclas varía de acuerdo a la proporción empleada (Yücesu, 2006).

La variación de la densidad en la mezcla de etanol con gasolina se presenta como un incremento proporcional al porcentaje de etanol en la mezcla, la cual afecta directamente el consumo de combustible del motor. Cuando se pretende realizar modificación de un motor para optimizar su operación con este tipo de sustancias, se debe empobrecer la mezcla (cuando se tiene un sistema de alimentación con carburador), ya que debido al incremento en la densidad, la corriente de aire tiende a incorporar más cantidad de combustible al flujo de entrada al cilindro. En los motores alimentados por inyección, debido al aumento de la presión estática producto del incremento de la densidad, la diferencia de presión entre el inyector y la cámara de combustión permite un incremento considerable del flujo másico de combustible (HE B, 2003A). Cuando no se realizan las adaptaciones necesarias sobre el motor, este tiende a mantener constante la potencia entregada y a aumentar el consumo específico de combustible debido a que el poder calorífico de las mezclas de etanol con

gasolina tiende a ser hasta un 3% menor que el encontrado en gasolina corriente (HE B, 2003B).

Teniendo en cuenta las propiedades de la mezcla de etanol con gasolina, y especialmente el comportamiento del consumo específico de combustible, el octanaje y el poder calorífico, se puede indicar que su aplicación sobre los motores convencionales disminuye hasta un 10% la eficiencia total. Es así como la adaptación de los motores en cuanto a inyección y relación de compresión pueden contrarrestar los efectos del uso de la mezcla. Al aumentar el índice de compresión de los motores de ignición por chispa, se aprovecha adecuadamente el aumento en octanaje y al alterar las condiciones de mezcla de aire y combustible se obtienen mejores relaciones en la combustión (Carvalho, 2008). También es necesario resaltar que en el flujo másico de gases de salida del motor, las emisiones de gases contaminantes tóxicos, como el CO y los HC se reducen considerablemente, ya que el oxígeno presente en el etanol permite que la reacción de combustión se efectúe con un mayor rendimiento que el encontrado en la gasolina corriente, aumentando el porcentaje de combustión completa y limitando las partículas de hidrocarburo en la mezcla. La tasa de emisiones de NO_x en los motores que emplean biocombustibles a base de etanol está directamente relacionada con la presión de ambiente, así como con otras condiciones externas, ya que se ha demostrado que a bajas presiones atmosféricas encontradas a más de 2600 metros sobre el nivel del mar, las emisiones de NO_x aumentan debido al comportamiento de la llama a través de las moléculas que se encuentran a menor presión que la estandarizada (Mantilla, 2010).

Las pruebas realizadas sobre las mezclas de etanol con gasolina han sido realizadas a partir de gasolina corriente para automóviles, sin embargo, cuando se busca emplear este tipo de mezclas en motores de aviación, se deben emplear mezclas con AvGas, generalmente

AvGas 100LL, cuyas propiedades con respecto a la gasolina común distan en composición, confiabilidad y emisiones. La gasolina comúnmente empleada en automóviles posee un alto porcentaje de compuestos aromáticos que generan un bajo calor de combustión, tendencia a la pre-ignición y bajo desempeño en mezcla pobre. Así mismo, la gasolina común posee mayor peso molecular debido a su composición de hidrocarburos, lo que conduce a la producción de depósitos en el motor, así como una mayor proporción de hidrocarburos oleofínicos que tienden a generar gomas en los depósitos, válvulas y escape. Adicionalmente en la gasolina corriente, los aditivos detergentes tienden a generar corrosión en el motor, que al aplicarlos en las condiciones de operación de los motores de aviación generan daños considerables. De esa manera, el AvGas posee mayores porcentajes de hidrocarburos parafínicos que dan mayor estabilidad en el almacenamiento de larga duración y brindan mejores condiciones a la altura de operación de las aeronaves que los utilizan (Repsol, 2014).

A la fecha, no se han encontrado estudios de mezcla de biocombustibles con AvGas en cuanto a determinación de propiedades físico-químicas, ni a eficiencias de operación en motores de aviación recíprocos, sin embargo, la compañía brasilera Embraer desarrolló el modelo de avión agrícola *Ipanema*, homologado para el uso de etanol hidratado como combustible a bajas altitudes, con una reducción de más del 40% del valor de costo de km en vuelo y con un incremento del 5% de potencia útil del motor (Neiva-Embraer,2008).

2.2. Marco legal o normativo

En Colombia, la normatividad en torno al uso de combustibles alternativos y su aplicación en motores a pistón de aviación se limita a las restricciones en la regulación de la producción y distribución de biocombustibles, así como las limitantes en índices de emisiones contaminantes y generación de ruido.

De acuerdo con la Federación Nacional de Biocombustibles, la regulación en la producción de combustibles alternativos provenientes de biomasa se dividen en dos secciones principales de acuerdo con la oferta nacional: biodiesel y alcoholes carburantes. En el caso del Biodiesel, la Ley 939 de 2004 estimula la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal para motores diésel, y a partir de las resoluciones 182087 y 182142 de 2007, se modifican los criterios de calidad de los mismos y se estipulan los criterios de mezcla con combustibles de origen fósil, así como se registran los productores nacionales e importadores.

Por otra parte, la normatividad en torno a la producción de etanol o alcohol carburante comenzó en el año 2001, a partir de la Ley 693, donde se estimula la producción, comercialización y consumo de etanol proveniente de biomasa. La ley 788 de 2002 dicta las disposiciones tributarias del comercio de Bioetanol en Colombia y a partir de las resoluciones 180687 de 2003 y 1565 de 2004 se establecen las condiciones de acopio y mezcla de alcoholes con combustibles fósiles, así como se establecen las propiedades de calidad de los mismos para su uso en automóviles. Otras regulaciones relacionadas a la producción, distribución y manejo de Bioetanol son:

- Resolución 181069 de 2005: que modifica la resolución 180687 de 2003.
- Resolución 2200 de 2005: que modifica la resolución 1565 de 2004.
- Conpes 3510 de 2008: que establece las políticas de producción sostenible de biocombustibles.
- Decreto 1135 de 2009: que modifica las regulaciones en torno al uso de gasolina en automotores.

- Resolución 181555 de 2010: que regula los precios de la gasolina con respecto a su inclusión de Bioetanol, como gasolina motor corriente y gasolina oxigenada.
- Decreto 4892 de 2011: que modifica las condiciones de operación de gasolinas en automóviles.
- Resolución 90932 de 2013: donde se establece el porcentaje de mezcla óptimo para aplicación de biocombustibles en automotores a partir de abastecimientos mayoristas de E10.
- Ley 1715 de 2014: A partir de la cual se regulan las energías renovables no convencionales en el Sistema Energético Nacional.

La normatividad específicamente enfocada hacia la aviación civil con motores a pistón está contemplada por la autoridad aeronáutica nacional. Según la unidad administrativa especial de aeronáutica civil, UAEAC, en la política ambiental se promueve la prevención y minimización del impacto de los factores contaminantes sobre los seres humanos y el medio ambiente. En esta regulación se plantean objetivos en cuanto a la racionalización del uso de materiales y energía, la reducción de la generación de residuos y el mejoramiento de la calidad de los mismos. Mediante la conformación del comité de asuntos ambientales de aeronáutica civil se pretende controlar lo descrito anteriormente, de acuerdo con la Resolución 04571 del 18 de Septiembre de 2002.

De igual manera, la Ley 1333 del 2009 del ministerio de medio ambiente, describe el procedimiento sancionatorio ambiental para corregir las infracciones al medio ambiente relacionadas con la UAEAC, quien a su vez genera boletines de servicio en cuanto al manejo de residuos sólidos y autorización urbana dirigida a los aeropuertos. En conjunto se trabaja

por el cumplimiento de lo pactado en la convención de Viena de 1985 y en el protocolo de Montreal de 1987.

Adicionalmente, el reglamento aeronáutico Colombiano (RAC) establece en su parte once la normatividad ambiental de la aviación civil, la cual determina las medidas de prevención y evaluación del ruido de las aeronaves, estableciendo los niveles de ruido producidos en aeródromos y sus alrededores y clasifica las aeronaves en aviones a reacción subsónicos, aviones propulsados por hélices de más de 5700 kg y aviones de más de 9000 kg propulsados por hélice (RAC, 2015). No se especifica en la normatividad nacional las restricciones de ruido aplicadas directamente a motores recíprocos; sin embargo, otros aspectos relacionados con motores a combustión interna alternativos se denotan en los estándares de aeronavegabilidad descritos en el RAC 23.

2.3. Marco teórico

Las bases científicas necesarias para el desarrollo de esta investigación involucran el conocimiento en torno al desarrollo de combustibles fósiles y alternativos, así como algunos conceptos termodinámicos relacionados con los motores de ignición por chispa, mencionados en esta sección.

2.3.1. Combustibles

En esta sección se detallan algunos efectos básicos sobre el estudio de los combustibles, así como una introducción a los aspectos principales de las sustancias estudiadas en este proyecto, dentro de las que se incluyen combustible de aviación AvGas y etanol obtenido a partir de la fermentación de biomasa. También se describen algunos aspectos básicos sobre la caracterización física y química de los combustibles y su aplicabilidad.

Generalidades

A lo largo de la historia, la relación del hombre con la naturaleza ha dado como resultado la transformación de materia prima en diversas fuentes de energía, desde combustibles sólidos como la madera, el recurso energético más antiguo descubierto por la humanidad, hasta la implementación de combustibles líquidos provenientes de restos de seres vivos existentes en tiempos remotos. Los combustibles son sustancias que al quemarse, es decir, estar en contacto con el oxígeno o aire en ciertas condiciones, producen calor. De manera general, existen tres clases de combustibles: sólidos, líquidos y gaseosos; dentro de los combustibles sólidos se encuentran el carbón, lignitos, coques y madera. Dentro de los combustibles líquidos se encuentran el petróleo y sus destilados, así como biocombustibles y productos sintéticos, mientras que en combustibles gaseosos se destacan algunos gases provenientes del interior de la tierra, así como otros fabricados artificialmente. Otra forma de clasificar los combustibles es a partir de su método de producción, ya sean extraídos de un entorno natural o mediante procesos químicos de laboratorio (García R, 2001).

Durante el proceso de combustión, la energía química es transformada en calor, por lo que las sustancias clasificadas como combustibles suelen contener elementos químicos como el hidrogeno, carbono o azufre, que al oxidarse generan reacciones exotérmicas. En algunos casos, es necesario cambiar el estado del combustible para aprovechar de manera eficiente sus propiedades y su potencial de generación de calor; sin embargo, este estado va relacionado también a su aplicación industrial. Los combustibles sólidos, obtenidos naturalmente o a partir de procesos de fabricación, se destacan por su facilidad de transporte, su bajo costo y su almacenamiento simple, aunque también presentan desventajas como una

mayor cantidad de restos de cenizas e ineficiencia en el proceso de combustión, ya que no se aprovecha todo el potencial energético en su totalidad.

Para los combustibles de tipo gaseoso se presentan ventajas en cuanto a su peso, alto potencial de generación de calor, altos niveles de pureza de combustible y condiciones de encendido estándar; sin embargo, dentro de sus desventajas se encuentran las condiciones de almacenamiento y el riesgo relacionado a sus índices de inflamabilidad a altas temperaturas. En el caso de los combustibles líquidos, artificiales o derivados del petróleo, se destacan sus valores de poder calorífico mayor que el presentado en los combustibles sólidos, su combustión tiene bajo porcentaje de restos de cenizas, así como su facilidad de transporte y manipulación. Las restricciones en torno a estos combustibles se presentan debido a los requisitos específicos de los depósitos de almacenamiento posterior a su producción, ya que debido a su volatilidad, presentan un alto nivel de inseguridad.

La mayoría de los combustibles líquidos empleados actualmente, se producen a partir de destilación, siendo este un método primario de la refinación del petróleo. En la actualidad se emplean diferentes métodos para mejorar el destilado, tales como el “craqueo” catalítico, donde se aplica una presión y temperatura elevadas al petróleo mediante un catalizador y se separan los aceites densos de los livianos. Otro método empleado es la hidrogenación, semejante al craqueo catalítico, pero con base en una atmósfera de hidrógeno que separa los hidrocarburos no saturados, los cuales absorben el hidrógeno del medio. Las gasolinas obtenidas a partir de la destilación del petróleo corresponden a una mezcla de hidrocarburos líquidos y son clasificadas de acuerdo a su volatilidad, número de octanaje y número o índice de actuación con el fin de determinar su aplicabilidad en la industria. Dentro de combustibles

líquidos que no son derivados del petróleo se encuentran el exquisito de aceite, las arenas de alquitrán, entre otros.

Caracterización de combustibles

La caracterización de los combustibles hace referencia a la determinación de sus propiedades físicas y químicas, con el fin de establecer sus condiciones de operación óptimas y su aplicabilidad en diferentes tipos de procesos. La densidad es una de las principales propiedades de un combustible, ya que determina el volumen que se requiere para su almacenamiento, así como su estado en diferentes condiciones ambientales; sus unidades en sistema internacional son kg/m^3 y esta propiedad depende de la temperatura, por lo que en combustibles líquidos, un incremento en la temperatura genera que su densidad disminuya. La densidad relativa o gravedad específica es un parámetro adimensional que permite comparar la densidad de una sustancia con respecto a una referencia. En el proceso de caracterización de combustibles se emplean los grados API como medida de la densidad relativa de una sustancia, con el fin de facilitar su identificación. En la ecuación 1 se muestra la relación entre la gravedad API y la densidad relativa bajo ciertas condiciones de referencia.

$$\text{API} = \frac{141.5}{\text{Densidad relativa (60°F)}} - 131.5 \quad [1]$$

Otra propiedad que permite caracterizar un combustible es la viscosidad de los mismos, la cual hace referencia a la resistencia de una sustancia a fluir y permite estimar las pérdidas de presión en las líneas de combustibles, de acuerdo con el número de Reynolds en el que se encuentra un flujo específico. De manera general, la viscosidad relativa es el esfuerzo cortante de un fluido sobre una superficie dividido entre el gradiente de la velocidad

que presenta. La influencia de la densidad en la viscosidad (dinámica) puede generar un análisis inexacto en la caracterización del fluido, por lo que se emplea la viscosidad cinemática para limitar los efectos de la variación en la densidad. De ese modo, la viscosidad cinemática hace referencia a la razón de la viscosidad dinámica sobre la densidad del fluido y sus unidades en sistema internacional son m^2/s . Adicionalmente, la viscosidad varía con respecto a la temperatura, por lo que en las especificaciones de los combustibles se tiene un límite de viscosidad máximo a bajas temperaturas y mínimo a altas temperaturas.

En combustibles de aviación así como en otras aplicaciones de transporte, la volatilidad es una de las propiedades de mayor relevancia, ya que indica la tendencia del combustible a cambiar de un estado líquido a gaseoso, es decir, la capacidad del combustible de evaporarse dentro de una mezcla de aire/combustible. Este parámetro determina el comportamiento del motor en arranque, así como su aceleración, ya que una baja volatilidad puede generar mezclas de aire/combustible pobres que reducen la potencia obtenida en el sistema. La Figura 1 representa el porcentaje de destilación para diferentes combustibles, donde el 10% de porcentaje destilado determina la cantidad de combustible evaporado por acción del ambiente, el 50% muestra el punto intermedio de temperatura de combustible para una operación normal en un motor y el 90% muestra en totalidad el combustible evaporado, con altos niveles de energía, pero con pérdidas en su almacenamiento.

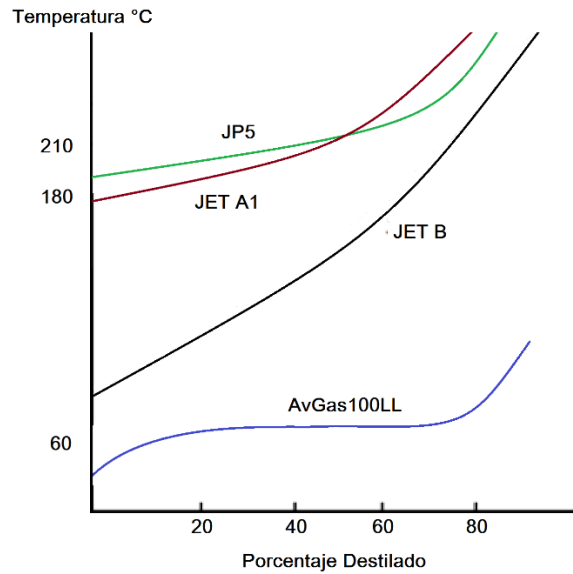


Figura 1. Temperatura vs Porcentaje de Destilación

Tomado de Aviación ULM en www.aviacionulm.com/gasolinas.html

En los motores de encendido provocado que usualmente emplean gasolina, el índice de octano es una propiedad fundamental en el desempeño de la máquina. Este determina el punto de inflamación de la mezcla durante la fase de combustión en el interior del cilindro, estableciendo el punto de origen de ignición sin chispa (por exceso de presión) que provoca una explosión precipitada. La Figura 2 muestra la relación de la presión del combustible en la cámara de combustión de un motor a pistón a partir de su detonación, donde el pico que se observa es el punto más alto de presión que se produce en la fase de detonación. De esa manera, la resistencia del combustible a detonar se mide por el índice de octano, que asegura que el comportamiento del combustible sea apropiado en referencia al comportamiento del isoctano (con máxima resistencia a la auto-detonación) y al n-heptano (con mínima resistencia a la auto-detonación) (Aviación-ULM, 2013).

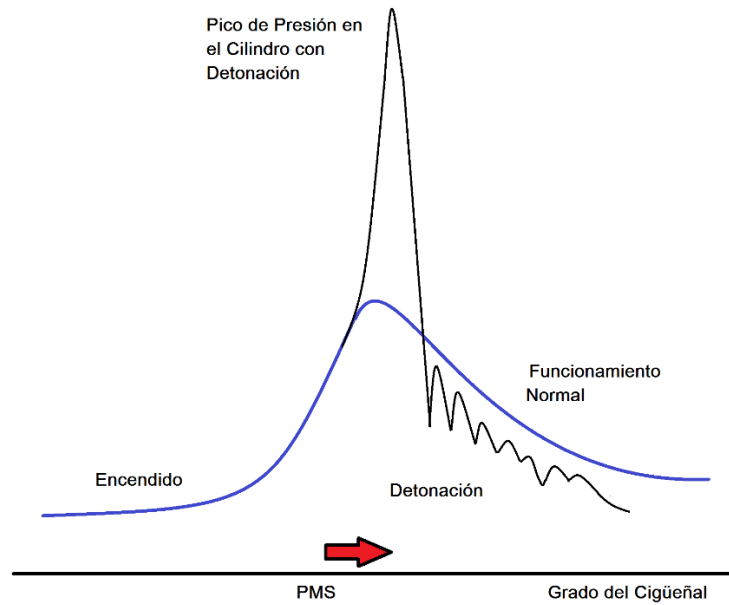


Figura 2. Presión del vapor en la cámara de combustión

Tomado de Aviación ULM en www.aviacionulm.com/gasolinas.html

Finalmente, la presión de vapor del combustible corresponde a la presión producida por los gases en equilibrio a temperaturas específicas. Algunos procesos experimentales como el método de reflujo de valor, permiten determinar la presión del vapor y la composición en las mezclas de combustibles. Los valores de presión de vapor en cada combustible corresponden al tipo de operación del mismo, ya que se busca evitar fenómenos como la creación del “tapón de vapor”, en el cual el combustible tiende a evaporarse a través de las tuberías del sistema, provocando la formación de burbujas de gas y limitando el flujo de combustible hacia los cilindros. Generalmente, el valor mínimo de presión de vapor para gasolinas comunes es de 0.38kg/cm^2 , equivalente a 5.5 psi. En la Tabla 1 se muestran algunas de las especificaciones físicas y químicas relevantes de diferentes combustibles de aviación o AvGas para motores recíprocos (Aviación ULM, 2013B).

Tabla 1. Propiedades de Diferentes tipos de AvGas

Especificaciones diferentes tipos de AVGAS					
Grado		80/87	Sin plomo	100/130	100LL
Color		Rojo	Purpura	Verde	Azul
Composición		0.05	0.07	0.05	0.05
Volatilidad	Punto final	170	225	170	170
Fluidez	Punto de congelación	-60°C	-58°C	-58°C	-58°C
Índice de octano	Mezcla pobre	80		100	100
Índice de octano	Mezcla rica	87		130	130
Aditivos		0,14		1.12	0.56
Densidad kg/l		0,75		0,75	0,75

Tomado de Aviación-ULM. En www.aviación ulm.com/gasolinas.html

Combustibles de aviación

Los combustibles de aviación están fabricados a partir de los requerimientos de trabajo que se adapten a sus condiciones de operación. La mayoría de combustibles en aviación están compuestos en su totalidad por hidrocarburos y aditivos. Dentro del proceso de fabricación de estos combustibles se tienen en cuenta parámetros físicos y químicos como la fluidez, propiedades de combustión, corrosión, estabilidad del fluido, límites contaminantes, entre otros.

De acuerdo con el tipo de motor, así como el modelo de aeronave, se emplean diferentes combustibles. Usualmente para motores a reacción se emplean querosenos modificados y para motores a pistón, gasolinas adaptadas. De esa forma se pueden mencionar tres tipos de combustibles para motores de aeronave:

- Combustible JET: utilizados en motores a reacción y están compuestos fundamentalmente de queroseno. Debido a que este es un aceite destilado del petróleo, existen variaciones en su composición y en las mezclas que se realizan del mismo. El combustible JET A1 el más usado a nivel mundial, hecho a base de queroseno sin plomo y con un punto de inflamación de 40°C y temperatura de congelación de -47°C. El JET B suele emplearse en áreas de climas muy fríos y en su composición contiene naftas, lo cual lo hace ligero y a la vez incrementa su riesgo durante su manipulación. Dichos combustibles se suele añadir diferentes tipos de aditivos como antioxidantes, anticorrosivos y anti estático, con el fin de mejorar su operación a las condiciones de vuelo de crucero de diferentes aeronaves, así como para proteger las diferentes partes del motor.
- El combustible JP utilizado en aviación militar, presenta variaciones en su composición. El JP1 es un queroseno de alta pureza con alta volatilidad, bajo punto de congelación (alrededor de los -60°C), y con procesos complejos de producción, por lo que se emplean derivaciones como el JP2, JP3 y JP4, que se han producido regularmente a partir de queroseno y gasolina. Otras especificaciones desarrolladas son el JP7 que permite vuelos a grandes altitudes sin presencia de congelamiento o de evaporación debido a la baja presión atmosférica presente. En la actualidad se utiliza el JP8 empleado en la mayoría de aviones militares alrededor del mundo, compuesto de queroseno con aditivos como inhibidores de corrosión, anti estáticos y un grado de volatilidad mucho menor que los demás combustibles JP mencionados anteriormente (Repsol, 2014B).
- Para motores recíprocos existen tres grados comunes de AvGas: 80, 100/130 y 100 LL, los cuales son determinados de acuerdo al octanaje o número de rendimiento. El AvGas 100LL posee naftas dentro de su composición, parafinas y compuestos aromáticos. Se

caracteriza por tener un grado de octanaje mayor, es decir un poder antidetonante elevado en donde la mezcla combustible/aire es mayor para evitar su auto-detonación. Este tipo de combustible en su nombre indica el grado de octanaje, para este caso es de 100 y las siglas LL sugieren un bajo contenido de plomo, es decir, 0.5 gramos por litro de combustible, mucho menor que el presentado en las demás variaciones de AvGas. Este compuesto alquilado obtenido del iso-butano presenta una densidad aproximada de 770 kg/m³, punto de inflamación de -40°C, temperatura de auto-ignición aproximada de 400°C. Para el combustible AvGas 100/130 se muestran sus especificaciones de acuerdo con la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del AvGas 100/130

Grado	100/130
Color	Verde
Composición	0.05
Volatilidad	170
Fluidez	-58°C
Índice de octano	100
Índice de octano	130
Aditivos	1.12
Densidad (kg/m³)	750

Tomado de: Shell España, S.A Ficha de datos de seguridad.

Esta gasolina de aviación para motores a pistón posee además hidrocarburos ciclo-parafínicos y oleofínicos, por lo que su número de carbonos varía en un intervalo de C₄ hasta C₁₂. Contiene además n-hexano en un 5% y tolueno en hasta 15%. Para predecir la evaporación de este combustible se aplica la ecuación 2, en donde %Ev hace referencia al

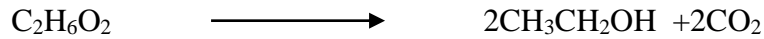
porcentaje del peso evaporado, T es la temperatura de la superficie en grados Celsius y t es el tiempo en minutos:

$$\ln(\%Ev) = (0.5 + 0.045T)\ln(t) \quad [2]$$

Combustibles alternativos

De acuerdo con los programas de reducción de emisiones contaminantes y de mitigación del cambio climático, a nivel mundial se desarrollan políticas en torno a la producción de combustibles provenientes de otras fuentes diferentes a los depósitos fósiles. De esta manera, a partir de combustibles sintéticos, así como empleando aceites y alcoholes destilados de procesos de fermentación de biomasa, se crean alternativas a la gasolina y al Diésel comúnmente empleados en automóviles y otros medios de transporte. Para combustibles similares a las gasolinas, se emplean alcoholes que disminuyen el nivel de contaminación en las emisiones al aplicarlos en motores a pistón de ignición por chispa.

El etanol es un ejemplo de estos combustibles alternativos, caracterizado como un líquido transparente con olor débil, puro y con un elevado calor latente de vaporización. Es conocido también como alcohol etílico y su vapor es más pesado que el aire. Se puede obtener mediante diferentes procesos, tales como el tratamiento de etileno de manera sintética con ácido sulfúrico (mediante hidrólisis), hidratación directa de etileno a temperaturas y presiones elevadas (empleando el método de Fischer-Tropsch) o naturalmente a través de la fermentación a base de caña de azúcar, maíz, cebada, etc. El etanol es utilizado industrialmente como disolvente, vinagre, mezcla anticongelante, combustible para maquinaria o acondicionamiento del entorno, antiséptico, entre otros. La reacción de producción del etanol por fermentación se muestra a continuación:



En los Estados Unidos, por regulación federal, alrededor del 95% de los combustibles contienen etanol. Existen variaciones en el tipo de etanol como E85 y E15, las cuales se adaptan a vehículos nuevos. El etanol contiene un grado de octanaje mayor al de otros combustibles, sin embargo una mezcla de 10% de etanol con otros combustibles posee menor energía por galón (Abengoa, 2013).

Algunas propiedades del etanol deshidratado, empleado en mezclas de combustible, se muestran en la Tabla 3, con referencia a desempeño y agresividad química.

Tabla 3. Propiedades del Bioetanol

Parámetro	Etanol
Poder calorífico inferior	22.350 kJ/kg
Densidad	792 kg/m ³
Octanaje	102-130
Calor latente de vaporización	842-930 kJ/kg
Relación aire/combustible	9
Presión de vapor	15-17
Temperatura de ignición	420°C
Solubilidad en agua	100%

Tomado de Carvalho. Bioetanol de caña de azúcar: Energía para el desarrollo sostenible.

2.3.2. Motores

Tras abordar el tema del estudio, aplicación y propiedades de los combustibles involucrados en este proyecto, es necesario especificar algunos aspectos básicos relacionados con las máquinas que convierten la energía calórica de dichas sustancias en energía mecánica aprovechable. Es así como, en esta subsección, se describen los aspectos básicos sobre los

diferentes tipos de motores y se especifican planteamientos de la teoría ligada a las máquinas aplicables a este proyecto, es decir, a los MCIAs de aviación.

Generalidades

De acuerdo con las necesidades presentadas en diversas tareas del hombre a lo largo de la historia, se han desarrollado diferentes tipos de máquinas que optimizan la realización de las mismas. Los motores son máquinas que transforman diferentes tipos de energía en energía mecánica, aplicada a un trabajo específico. Existen motores térmicos, eléctricos, neumáticos, de energía elástica, entre otros; sin embargo, los motores térmicos son los más aplicados actualmente en diferentes campos de la industria, y generalmente aprovechan la energía de enlaces químicos y las reacciones exotérmicas en la obtención de trabajo de torque sobre un eje de salida (Heywood, 1988). Los motores de combustión interna emplean un oxidante (generalmente aire de ambiente) y un carburante, que al reaccionar en el interior de una cámara de combustión expanden el gas resultante de la reacción con alta temperatura y presión hacia un componente específico del motor. Dependiendo del tipo de motor, este gas puede impulsar pistones, álabes de turbina o redirigirse a través de toberas (Penninger, 1995).

Según su configuración y el ciclo termodinámico a partir del cual están diseñados, los motores de combustión interna pueden ser recíprocos, rotativos o de combustión continua. Los motores rotativos emplean la presión obtenida en los espaciamentos de sus rotores excéntricos para generar movimiento en un eje, mientras que los motores de combustión continua se basan en el ciclo termodinámico de George Brayton, donde a través de diferentes secciones de un mismo motor se logra mantener una entrega de trabajo continua (Guanipa, 2009). Los motores recíprocos empleados en diferentes aplicaciones industriales y de transporte, se basan generalmente en el ciclo termodinámico de Nikolaus Otto o de Rudolf

Diésel, aunque existen otros ciclos termodinámicos aplicables a este tipo de máquinas. Para la obtención de trabajo a partir de estos ciclos, se emplea un pistón en el interior de un cilindro, unido a un cigüeñal a través de una biela, donde se transforma el movimiento lineal de la carrera del pistón en movimiento rotativo del eje principal. Las diferencias entre los ciclos de operación de los motores recíprocos radican en las condiciones de entrada de calor al ciclo, donde en el ciclo Otto, la admisión de calor se realiza a volumen constante, mientras que en el ciclo Diésel se emplean condiciones de presión constante. En aplicaciones reales, los motores diseñados bajo estos dos modelos buscan aproximar sus condiciones de operación al ciclo ideal, sin embargo las pérdidas de calor, junto con las impurezas en las mezclas de combustible, generan una entrega de trabajo inferior a la máxima estimada, estableciendo diferentes valores de eficiencia del ciclo, tanto a nivel térmico como mecánico.

Ciclo Otto ideal

Con el fin de diseñar máquinas térmicas óptimas para la obtención de trabajo a través de ciclos termodinámicos, se omiten las irreversibilidades y pérdidas de un ciclo real, y se establecen ciclos ideales reversibles, a partir de los cuales se realizan los cálculos iniciales de los parámetros de operación del diseño de un motor. Algunas de las condiciones asumidas en el análisis de un ciclo ideal involucran la eliminación de los efectos de fricción entre los componentes de la máquina térmica, los procesos de expansión y compresión ocurren de manera isentrópica, no existe transferencia de calor a través de los componentes como tuberías y los gases involucrados en el ciclo son idealizados, manteniendo algunas de sus propiedades constantes a pesar de los cambios de temperatura.

En el ciclo Otto, se establecen 4 etapas a partir de las cuales se plantean diseños de motores de cuatro y dos tiempos. Este ciclo se analiza como un sistema cerrado, donde la

masa en el interior permanece constante y únicamente se realizan adiciones y salidas de calor para la obtención de un trabajo neto. Previo al inicio del ciclo se incluye una etapa cero conocida como admisión, donde ingresa una cantidad de aire y combustible al sistema cerrado. El ciclo inicia con la primera etapa, conocida como compresión isentrópica. Esta es seguida de una entrada de calor a volumen constante que corresponde a la combustión. Posteriormente, la tercera etapa corresponde a una expansión isentrópica del gas seguida de una salida de calor a volumen constante o escape. Tras completar esta secuencia, se reanuda el ciclo nuevamente. En la Figura 3 se muestra el diagrama de presión contra volumen específico, estableciendo los puntos 1, 2, 3 y 4 para el desarrollo del análisis termodinámico. Los puntos TDC y BDC indican el punto muerto superior e inferior de la carrera de un pistón en el interior de un cilindro. Estos puntos de referencia se describen a fondo posteriormente en la sección de aplicaciones del ciclo Otto.

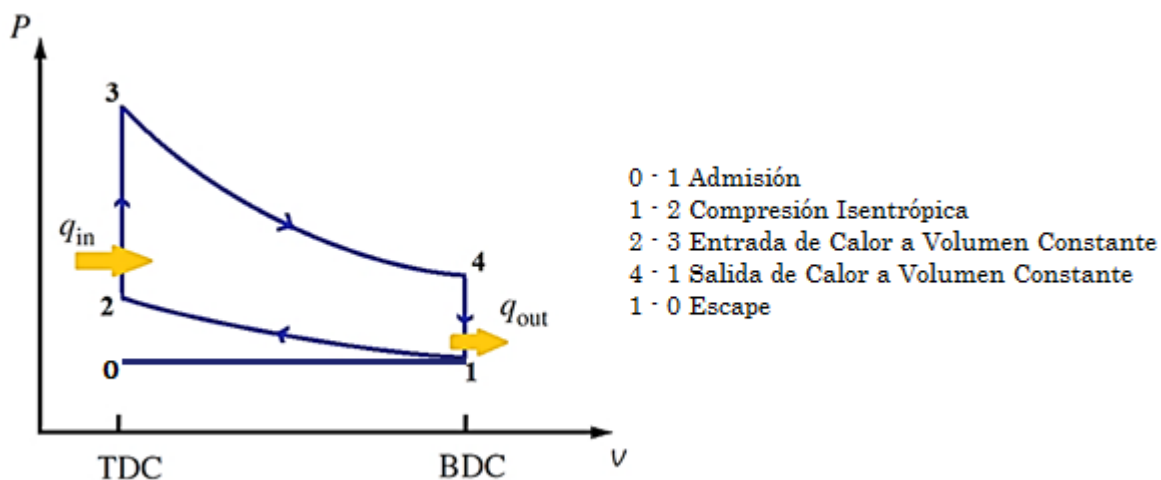


Figura 3- Diagrama P-v del Ciclo Otto Ideal

Tomado de Cengel & Boles. Thermodynamics. An engineering approach

Bajo este planteamiento, los cambios en energía cinética y potencial del fluido son despreciables, por lo que el balance energético por unidad de masa solo tiene en cuenta las adiciones, salidas de trabajo y calor, tal como se muestra en la ecuación 3.

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = \Delta u \quad [3]$$

En este caso, q_{in} y q_{out} hacen referencia al calor de entrada y salida por unidad de masa, respectivamente, y w_{in} y w_{out} representan el trabajo de entrada y salida por unidad de masa en el sistema. Estas diferencias entre calor y trabajo se convierten finalmente en Δu , es decir, cambios de energía interna del fluido presente en el ciclo. Se debe destacar que debido al planteamiento del ciclo, las fases de compresión y expansión se realizan de manera isentrópica, por lo que para el modelamiento del fluido se puede emplear la ecuación 4.

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3} \quad [4]$$

Donde T hace referencia a la temperatura en un punto del ciclo, v es el volumen específico y k es el coeficiente de dilatación adiabático del gas empleado. Este coeficiente de dilatación varía con la temperatura, sin embargo el modelamiento de su comportamiento únicamente se encuentra determinado para ciertos gases comúnmente analizados, como el aire, por lo que muchas veces se asume como constante durante la mayor parte del ciclo. Los puntos de referencia de los subíndices 1, 2, 3 y 4 están tomados de acuerdo con la Figura 3. La relación entre el volumen específico de los puntos 2 y 1, en etapa de compresión, así como el volumen entre los puntos 3 y 4, en etapa de expansión, se conoce como relación de compresión, y representa la razón de volúmenes que determina el potencial de trabajo en la máquina. Esta relación se describe en la ecuación 5 (Cengel, 2006).

$$r_c = \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_3}{v_4} \quad [5]$$

Cuando la relación de compresión r_c es mayor, el trabajo neto obtenido en el ciclo aumenta, sin embargo, debido a las restricciones de tamaño y peso en los motores diseñados bajo estos parámetros, las relaciones de compresión típicas varían entre 8 y 12.

En la etapa de compresión, el ciclo Otto ideal se simplifica debido a la naturaleza isentrópica de este análisis, de modo que en esta etapa, el trabajo que se requiere para comprimir la masa desde su volumen máximo hasta su volumen mínimo, depende de la variación en la temperatura del proceso, así como del calor específico a volumen constante del fluido. Este trabajo requerido para la compresión (W_c) se describe en la ecuación 6.

$$W_c = \frac{mR(T_1 - T_2)}{1 - k} \quad [6]$$

En esta ecuación, m hace referencia a la masa de fluido en el interior del sistema y k al coeficiente de dilatación adiabático del mismo. Posteriormente, en la etapa de adición de calor, usualmente se emplea la combustión de un carburante para incrementar la temperatura del fluido en el ciclo, de manera que el incremento en la temperatura depende de la masa de carburante introducida m_f y el poder calorífico del mismo; esta relación se muestra en la ecuación 7.

$$mc_v(T_3 - T_2) = m_f Q_{HHV} \eta_c \quad [7]$$

En este desarrollo, se utiliza el poder calorífico superior (Q_{HHV}), ya que este representa el calor aprovechable emitido en la combustión. Es necesario resaltar que en esta etapa se evidencian las suposiciones de condición del ciclo ideal, ya que el sistema deja de ser en realidad cerrado, y adicionalmente se puede incluir una eficiencia de combustión η_c . Posteriormente, la etapa de expansión isentrópica, de manera similar a la compresión, genera

un trabajo dependiente de las temperaturas del fluido. La ecuación 8 muestra el trabajo de expansión en el ciclo ideal (W_E).

$$W_E = mc_v(T_3 - T_4) \quad [8]$$

La diferencia entre el trabajo de expansión y el trabajo de compresión en el ciclo determina el trabajo total obtenido, el cual puede ser analizado matemáticamente como el área en el interior de las curvas presentes en el diagrama P-v. En la Figura 4 se muestra además, el diagrama de temperatura en función de la entropía (T-s), mediante el cual se determina la variación de temperatura en los procesos isentrópicos del ciclo, y cuya área integrada representa el trabajo aprovechable del ciclo (Heywood, 1988 B).

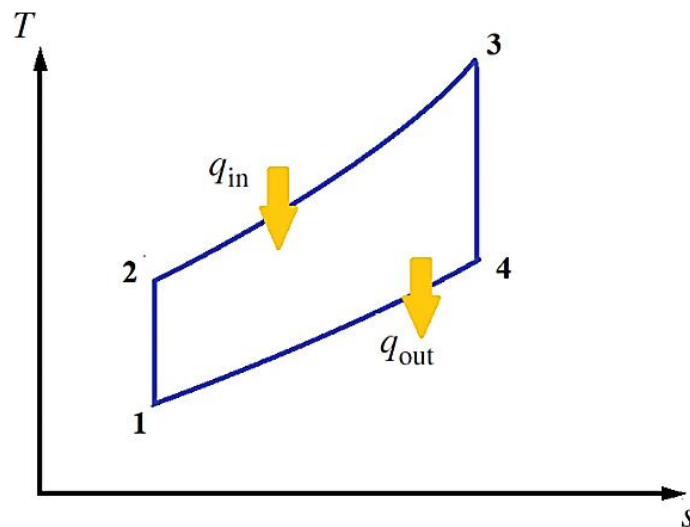


Figura 4. Diagrama T-s del Ciclo Otto Ideal

Tomado de Cengel & Boles. Thermodynamics. An engineering approach.

Ciclo real

Bajo las restricciones de la tercera ley de la termodinámica, el trabajo máximo disponible en el ciclo Otto ideal no puede ser obtenido en modelos reales, ya que los procesos de compresión y expansión no son isentrópicos, las propiedades del gas varían con la

temperatura de operación y existen diferentes tipos de pérdidas térmicas ocasionadas por la transferencia de calor entre los elementos del modelo, así como debido a la fricción de los componentes y el ruido generado. Es así como el desempeño de las máquinas varía con respecto al diseño ideal de las mismas, y se hace necesario establecer valores de eficiencia que determinen la efectividad del modelo real con respecto a su contraparte teórica.

Los diferentes tipos de eficiencia que se pueden hallar en torno al ciclo Otto ideal están determinados por su aplicación en la industria; en el caso de los motores de ignición por chispa de 4 tiempos, usados comúnmente en el sector automotor y en otras aplicaciones de transporte, la eficiencia puede medirse con respecto a la potencia obtenida en cada cilindro. Los diferentes componentes de este tipo de motores se explican con detalle en la sección de *Aplicaciones del ciclo Otto* de este documento.

Cuando se toma la potencia como referencia, esta se puede describir de acuerdo a la ecuación 9, donde P es la potencia real, N es el número de revoluciones por segundo del motor y T es el torque medido del motor, generalmente a través de un dinamómetro.

$$P = 2\pi NT \quad [9]$$

La potencia ideal del diseño del motor proviene de la gráfica de presión en función del volumen específico del ciclo Otto. De esta gráfica se obtiene el valor del trabajo indicado por ciclo, tanto en valor bruto ($W_{c,ig}$), como neto ($W_{c,in}$). El trabajo bruto indicado por ciclo representa el trabajo de compresión y expansión de un pistón, mientras que el trabajo neto hace referencia al trabajo del ciclo de 4 tiempos completo. A partir del trabajo indicado se puede establecer la potencia indicada por cilindro (P_i), descrita por la ecuación 10.

$$P_i = \frac{W_{c,i} N}{n_R} \quad [10]$$

El término n_R hace referencia al número de revoluciones por ciclo, que para motores de 4 tiempos es de dos revoluciones por ciclo (Soruşbay, 2012). Al comparar la potencia real (o de frenado) con la teórica (o indicada), se tiene una relación de eficiencia conocida como eficiencia mecánica, tal como se muestra en la ecuación 11.

$$\eta_m = \frac{P_b}{P_{ig}} \quad [11]$$

En este caso, la potencia de frenado (P_b) corresponde al valor experimentalmente determinado de la potencia de un motor medido bajo la norma SAE correspondiente, y el valor de potencia indicada corresponde al cálculo realizado a partir del trabajo bruto indicado. Generalmente, los valores de eficiencia mecánica de los motores de 4 tiempos de ignición por chispa oscilan entre el 80% y 90% en operaciones entre los 1800 y 2400 revoluciones por minuto, sin embargo esta eficiencia puede llegar al 75% al incrementar la velocidad rotacional del eje hasta su máximo de operación.

Otro valor que determina la eficiencia del ciclo Otto en un motor de combustión interna es la presión media indicada (mep), que resulta de la razón del trabajo indicado por ciclo entre el volumen desplazado por el pistón en el cilindro (V_d). Esta relación se muestra en la ecuación 12,

$$mep = \frac{P n_R}{V_d N} \quad [12]$$

Este parámetro permite establecer la efectividad del diseño de un motor sin tener en cuenta su tamaño, así como permite establecer modelos de motor de mayor o menor cilindraje a partir de un diseño previo estándar. Así mismo, permite comparar diferentes tipos de motor sin tener en cuenta el número de cilindros o el ciclo de operación, por lo que resulta muy útil en procesos de selección y optimización de este tipo de máquinas. En motores de admisión

natural de aire, la presión media efectiva de frenado (bmep) es oscila entre los 850 y 1050 kPa, mientras que para motores turbocargados esta presión aumenta desde los 1250 hasta los 1700 kPa. Al llevar el motor a máxima velocidad de operación, esta presión cae aproximadamente un 15% (UST, 2011).

Adicionalmente, otros valores de eficiencia útiles en la determinación de la efectividad del ciclo Otto real incluyen la eficiencia térmica y volumétrica. La eficiencia térmica está relacionada a la cantidad de calor introducida en el ciclo, por lo que para motores recíprocos está dada por el flujo másico de combustible (\dot{m}_f) y su poder calorífico. Esta eficiencia térmica se conoce como eficiencia de conversión de combustible (η_f) y su obtención se muestra en la ecuación 13.

$$\eta_f = \frac{P}{\dot{m}_f Q_{LHV}} \quad [13]$$

Teniendo en cuenta que el consumo específico de combustible (sfc) en este tipo de motores corresponde el flujo de combustible por unidad de potencia, se puede reescribir la eficiencia de conversión de combustible de acuerdo a la ecuación 14.

$$\eta_f = \frac{1}{(sfc) Q_{LHV}} \quad [14]$$

Por otro lado, la eficiencia volumétrica permite establecer la efectividad del proceso de inducción de aire en el ciclo, con respecto al motor, de modo que relaciona el flujo másico de aire por ciclo (\dot{m}_a) con las condiciones de operación en el cilindro. La ecuación 15 describe la eficiencia volumétrica de un motor de 4 tiempos de ignición por chispa.

$$\eta_v = \frac{2 \dot{m}_a}{\rho_{a,i} V_d N} \quad [15]$$

En esta ecuación, $\rho_{a,i}$ hace referencia a la densidad del aire en la entrada del colector del motor; esta eficiencia oscila entre el 80% y 90% (Heywood, 1988C). Estos parámetros previamente mencionados permiten establecer la viabilidad de un diseño de motor de ignición por chispa de 4 tiempos; sin embargo, se deben tener en cuenta las variaciones de las condiciones de operación en el banco de pruebas, ya que de acuerdo con las diferencias en la presión atmosférica y temperatura de ambiente, los valores de eficiencia estimados pueden estar por debajo de los mencionados anteriormente.

Aplicaciones y Descripción de un Motor de Ignición por Chispa

Diferentes campos de la industria poseen máquinas que operan bajo los ciclos termodinámicos de Otto y Diésel. El transporte es uno de los sectores con más aplicaciones de estas máquinas, aunque la generación de energía eléctrica y los sistemas en torno a operaciones agrícolas también emplean motores diseñados bajo estos ciclos. Los motores, diseñados bajo cualquier ciclo termodinámico, aprovechan la energía química de un combustible y la convierten en movimiento mecánico rotativo, que en el área del transporte puede impulsar las ruedas de un automóvil, la hélice de un barco o de una aeronave. Adicionalmente, este torque obtenido puede accionar los demás sistemas auxiliares como generadores de corriente alterna, mecanismos como árboles de leva, bombas, entre otros. En el caso específico de los motores a pistón de ignición por chispa, la cantidad de ciclos por tiempo determina la aplicación y el tamaño de la máquina. Los motores de ignición por chispa (SI) de dos tiempos, con menor peso, menor eficiencia de combustión y mayores emisiones de gases contaminantes (EPA, 2011) suelen ser usados en pequeños artefactos como motosierras, motores fuera de borda y en motocicletas de baja cilindrada (actualmente con

operación restringida en diferentes países debido a sus altos índices de contaminación provocados por la combustión de productos de expulsión en el ciclo consecuente).

Los motores SI de 4 tiempos son más comúnmente empleados en automóviles, así como en motocicletas de alta cilindrada y aeronaves de Categoría FAR 23 (de acuerdo con la clasificación FAA). De manera general, sus diseños incluyen varios cilindros, localizados en una posición específica de acuerdo con su aplicación. En motores de automóvil es común encontrar cilindros en V, así como cilindros en línea e incluso en W, mientras que en aeronaves es común encontrar configuraciones de cilindros opuestos o diseños radiales en aviones antiguos. Estas configuraciones se muestran en detalle en la Figura 5. Cada cilindro posee un diámetro B (Bore) y una carrera S (Stroke). La carrera corresponde a la distancia entre el punto más alto que alcanza el pistón en el cilindro (TDC) y el punto más bajo (BDC). En los motores SI, el TDC se ubica generalmente por debajo del área superior del cilindro, dejando un espacio para la mezcla comprimida entre el pistón y la sección superior; este espacio se conoce como volumen de la cámara de combustión, V_c , e impide que la mezcla se auto-encienda por exceso de presión y se genere el fenómeno de “cascabeleo” que podría deteriorar las válvulas de admisión y salida. Este fenómeno puede ser también generado por un bajo octanaje del combustible que, tras un aumento en la presión, genere una ignición indeseada en el interior de la cámara de combustión. El volumen (V_d) desplazado por el pistón en el cilindro durante la compresión o expulsión, sumado al volumen libre constituye el volumen total del cilindro. La suma de volúmenes en cada cilindro determina también el tipo de motor y se emplea comúnmente para denotarlos. El pistón se conecta a un cigüeñal a través de una biela que transmite el movimiento lineal del pistón hacia el eje del cigüeñal, convirtiéndolo en movimiento rotacional.

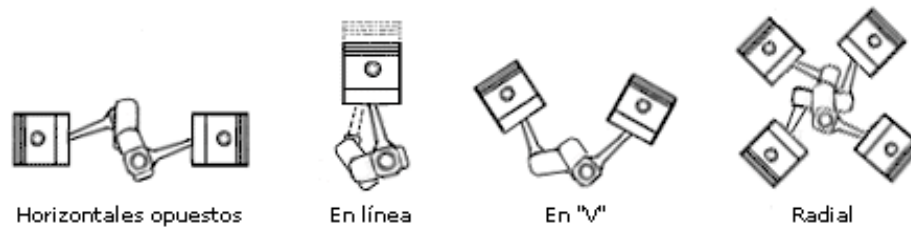


Figura 5. Configuraciones Comunes de Posición de Cilindro

Tomado de: www.manualvuelo.com/SIF/SIF31.html

A diferencia de los motores de 2 tiempos, una vuelta de cigüeñal indica medio ciclo termodinámico en los motores SI de 4 tiempos, de modo que se requieren 2 vueltas completas del cigüeñal para generar un ciclo. Durante la primera vuelta el pistón realiza el proceso de entrada de aire, con la válvula de admisión abierta, dejando ingresar aire con combustible al cilindro para posteriormente, con la válvula de admisión cerrada, realizar la compresión de la mezcla. Durante la segunda vuelta del cigüeñal, tras realizarse la combustión, se realiza una expansión del gas con ambas válvulas cerradas, para posteriormente, con la válvula de expulsión abierta, extraer los productos de la combustión del cilindro y reiniciar el ciclo.

Entre la finalización de un ciclo y el inicio del otro, la válvula de escape se cierra y la válvula de admisión se abre, por lo que en un instante de tiempo ambas válvulas se encuentran abiertas. Este fenómeno se conoce como Superposición u “Overlap”, y es la principal causa de generación de productos de combustión altamente nocivos para el medio ambiente, como óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono, de modo que la optimización del proceso de apertura y cerrado de válvulas permite reducir las tasas de emisión de productos de combustión peligrosos (Hacısevki, 2013).

El mecanismo de control de dichas válvulas es un árbol de levas, impulsado desde el cigüeñal a través de algún método de transmisión (correas, engranes, etc). Las levas impulsan

barras de transmisión que accionan las válvulas, y estas son retraídas mediante sistemas de resorte, accionando el cierre y apertura de las mismas. Este proceso está sincronizado para abrir cada válvula una vez por cada dos vueltas del cigüeñal, una al inicio del ciclo (admisión) y otra al final (escape). Otros sistemas como generadores eléctricos están añadidos mecánicamente al eje del cigüeñal, con el fin de proveer al sistema con energía eléctrica adicional.

Otro elemento importante en este tipo de motores es la bujía, que determina el tipo de operación del motor. La bujía genera una chispa en la mezcla comprimida con el fin de iniciar la combustión en el cilindro. Esta chispa proviene del accionamiento de un sistema de magnetos que producen energía alterna suficiente para crear un arco eléctrico que inicia la ignición. En aviación se suele utilizar sistemas de magnetos cruzados y dos bujías por cilindro, no solo con el fin de generar una combustión más homogénea, sino con el propósito de proveer un sistema seguro ante la falla de un magneto que pudiera desencadenar en la inoperatividad del motor en vuelo.

De acuerdo con los diseños del fabricante, los motores emplean diferentes sistemas de refrigeración, distribución y lubricación. La refrigeración con aceites refrigerantes o agua no es empleada en aviación por su aporte al peso total del motor, por lo que el bloque o Carter de potencia tiende a ser más liviano en estos vehículos que aquellos bloques empleados en motores de automóvil. Por otro lado, los colectores de entrada y salida se asemejan en ambas aplicaciones, únicamente varían en su localización y secciones de aspiración y expulsión de productos de combustión (Pulkrabek, 1993). En la Figura 6 se muestra la configuración general de un motor con cilindros en posición lineal de 4 tiempos, refrigerado por agua.

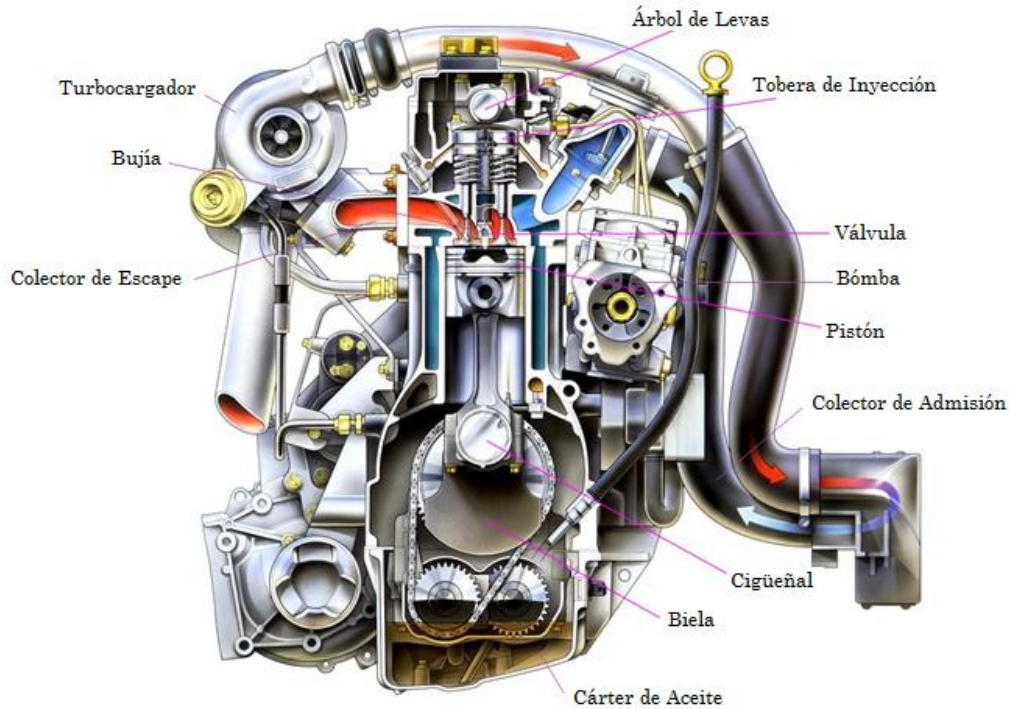


Figura 6. Partes principales de un motor SI 4 tiempos

Tomado de www.automotriz.net/tecnica/images/conocimientos-basicos/mot-turbo-2.jpg

Generalmente, para ciertas aeronaves y automóviles, la inclusión de un Turbocargador permite aumentar los rangos de operación del motor en diferentes alturas sobre el nivel del mar, provocando un incremento en la densidad del aire a la entrada del cilindro y por ende, en la potencia obtenida. Para aeronaves que operan por encima de los 8000 pies, la variación en la densidad es apreciable y la potencia el motor sin Turbocargador se reduce drásticamente. A 18000 pies de altura, la presión del aire es cercana a la mitad de la presente a nivel del mar, por lo que la potencia brindada por el motor se reduce a menos de un tercio de la máxima en condiciones óptimas y es imposible mantener el vuelo sin Turbocargador (Knuteson, 1999).

El Turbocargador consiste en un sistema compresor-turbina, donde la turbina aprovecha la energía de los gases de salida de los cilindros para generar un torque suficiente

que acciona un compresor centrífugo. Dicho compresor toma el aire de ambiente y aumenta su presión y temperatura, generando un incremento en la densidad del aire que se mezcla con el combustible antes de ingresar al cilindro. El diagrama de presión contra volumen de un motor turbocargado se muestra en la Figura 7, donde se aprecia un aumento en el área total encerrada, es decir un incremento en el trabajo total entregado entre los puntos 6 y 6', donde la presión aumenta, así como la densidad y temperatura del aire previo a la adición de combustible.

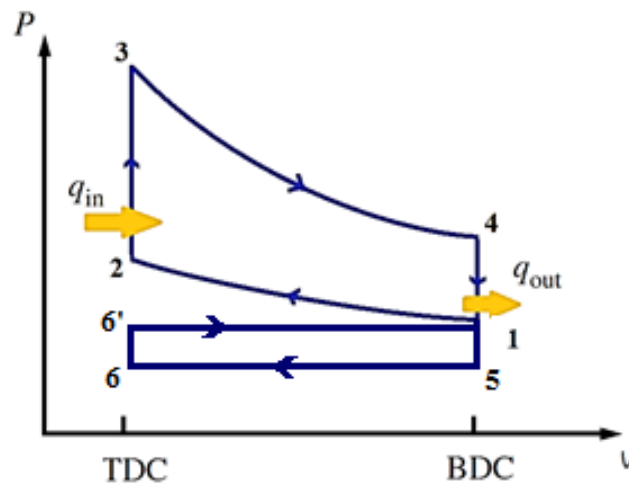


Figura 7. Diagrama P-v del Ciclo Otto Ideal con Turbocargador

Tomado de Cengel & Boles- Thermodynamics. An engineering approach.

2.4. Alternativas de solución previstas

Teniendo en cuenta la consulta previa en torno a investigaciones sobre la eficiencia de mezclas de combustible de origen fósil con Bioetanol, se pueden establecer diferentes soluciones previstas para el problema planteado. Siendo el eje central de investigación la influencia de los combustibles alternativos en los motores a pistón de aviación, y teniendo en cuenta las pruebas realizadas en Brasil por Embraer, descritas en la sección 2.1; se estima que el uso de etanol puro como combustible en un motor a pistón sin modificar no es viable

debido a que sus propiedades físicas distan de las propiedades presentadas por el AvGas usualmente empleado. De manera similar, se estima que de acuerdo con el incremento en la altitud de vuelo, el rendimiento del motor impulsado por etanol puede verse reducido, así como la potencia neta generada, ya que, según la consulta descrita en la Sección 2.1, el poder calorífico del biocombustible tiende a ser menor que el usualmente encontrado en combustibles fósiles.

Sin embargo, tomando en consideración las investigaciones realizadas con Bioetanol en mezclas de 10% y 20% en volumen de biocombustible sobre una base de gasolina de automóvil, y analizando la normatividad legal vigente en la República de Colombia, se podría esperar que las mezclas tipo E10 y E20, realizadas con gasolina de aviación, brinden un rendimiento aceptable en ciertos tipos de motor a pistón certificados para aeronaves en categoría FAR 23; sin realizar modificaciones sobre el motor seleccionado. Igualmente, se espera que la potencia entregada no disminuya por debajo de un 10%, tomando como referencia los datos emitidos por el fabricante del motor en los documentos oficiales del producto aeronáutico.

3. METODOLOGÍA

Con el fin de brindar una respuesta a la pregunta de investigación planteada, se desarrollará un estudio analítico sobre biocombustibles aplicados a motores de pistón de aviación, tomando mezclas de AvGas con Bioetanol y evaluando algunas de sus propiedades físico-químicas. De esa manera, empleando las normas de estandarización ASTM, y bajo las condiciones ambientales requeridas, se procede a realizar las pruebas necesarias para una caracterización básica de cada muestra. Estas pruebas se describen en el numeral 3.5 de este documento a partir de las mezclas seleccionadas en el numeral 3.4.

De manera consecuente, tras obtener los resultados del análisis experimental, se evalúa el rendimiento teórico de cada mezcla en el ciclo termodinámico correspondiente, es decir, el ciclo Otto. Esto se realiza mediante el diseño de un algoritmo que incluye ecuaciones en torno a la dinámica de gases y al cálculo de emisiones contaminantes (principalmente en términos de cantidad de dióxido de carbono - CO₂ - emitido a la atmósfera).

Finalmente se establecerá qué tipo de mezclas no reducen considerablemente el rendimiento teórico de un motor de estudio previamente seleccionado, y podrían entrar a una fase posterior de estudio en condiciones reales. El motor de estudio se selecciona de acuerdo a su aplicabilidad en la mayor cantidad de aeronaves que operan a nivel nacional; este proceso es descrito en numeral 3.3.

3.1. Enfoque de la investigación

Para el desarrollo de esta investigación se ha seleccionado un enfoque empírico-analítico a través del cual se toman datos experimentales obtenidos en diferentes pruebas de laboratorio, y se aplican sobre un modelo matemático descrito a través de un algoritmo que

permite realizar una búsqueda de resultados con respecto al problema planteado, que en este caso se relaciona con los índices de emisiones contaminantes entregadas a la atmósfera y los efectos del biocombustible en el rendimiento teórico de un motor específico.

3.2.Línea de investigación/Núcleo problémico

La línea de investigación a la cual pertenece este estudio corresponde a Energía y Vehículos de la Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, enfocado en el núcleo problémico de Propulsión y Energía Renovables.

3.3.Selección del motor

A pesar de las restricciones de operación de aeronaves a pistón en el aeropuerto El Dorado de Bogotá (AIS Colombia, 2013), diferentes tipos de operación requieren de este tipo de vehículos. La mayor parte de las escuelas de aviación, empresas de Ambulancia Aérea, Aerotaxis, entre otras, emplean aviones monomotor y bimotor impulsados por motores a pistón. Adicionalmente, la aviación privada también tiene una gran acogida con este tipo de aeronaves en diversos sectores del país, así como los vehículos de fumigación. Es así como a nivel nacional se destacan las aeronaves Cessna 172, Cessna 182, Cessna 414, Cessna 421, Piper PA34-200T Seneca II y III, entre otras (Rodado, 2014). Los motores generalmente empleados en estas aeronaves son los Lycoming IO-540 y Continental IO-520, aunque en algunos modelos se encuentran motores tipo Lycoming O-360.

Para el estudio inicial del comportamiento teórico de las mezclas de combustible, debido a su amplia aplicación en diferentes tipos de aeronaves, no solo a nivel nacional, sino a nivel mundial, se toma el motor Lycoming IO-540 como referencia para los análisis planteados, y a partir de sus manuales de operación y certificados emitidos por la autoridad correspondiente, se establecen las condiciones de evaluación de efectividad de las mezclas.

En la Tabla 4 se muestran las especificaciones para el motor Lycoming IO-540 de acuerdo a su manual de operación y en la Figura 8 se muestra el modelo del motor con una hélice adaptada.

Tabla 4. Especificaciones del Motor Lycoming IO-540

	A,-B,-E,-G,-P	-D,-N,-R,-T,-V	-C,-J
Certificado tipo FAA	1E4	1E4	1E4
Caballos de fuerza	290	260	250
Velocidad RPM	2575	2700	2575
Diámetro (in)	5.125	5.125	5.125
Carrera (in)	4.375	4.375	4.375
Volumen desplazado (in³)	541.5	541.5	541.5
Relación de compresión	8.7:1	8.5:1	8.5:1
Orden de encendido	1-4-5-2-3-6	1-4-5-2-3-6	1-4-5-2-3-6
Grados en donde ocurre la chispa BTC	20°	25°	25°
Relación de reducción de hélice	1:1	1:1	1:1

Tomado de Avco Lycoming Williamsport división. Operator´s Manual.

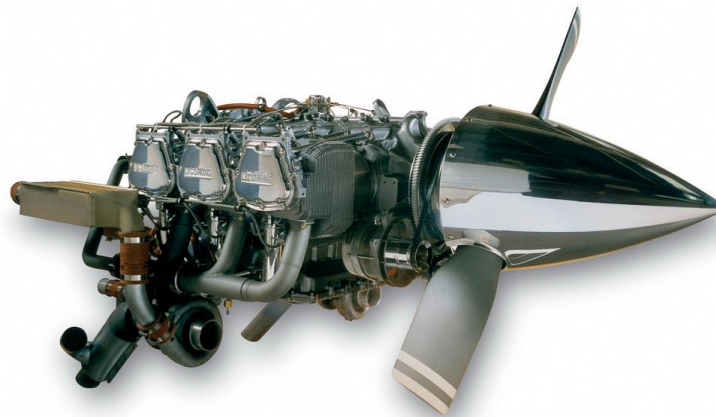


Figura 8. Motor Lycoming IO-540 con Hélice Adaptada

Tomado de Reaa.Ru en: www.reaa.ru/yabbfiles/Attachments/540turbo2.jpg

3.4. Selección de mezcla

De acuerdo con la Resolución 90932 de 2013, las mezclas de etanol con gasolina en motores a pistón de automóviles en Colombia se componen por un 10% de Etanol y un 90% de combustible fósil. Esta mezcla ha sido probada en diferentes casos, tal como se enuncia en la sección 2.1 de este documento; sin embargo, en combustibles de aviación no se han encontrado pruebas concluyentes sobre los resultados de una posible mezcla. De esa manera, tomando como base los estudios previos realizados con combustibles E10, E20 y similares, se proponen 3 tipos de mezcla diferentes, así como un análisis de los dos combustibles puros (etanol Y AvGas 100/130). La primera mezcla consiste en la sustancia E10 determinada por la ley, con 10% en volumen de etanol en un 90% de AvGas. También se toman mezclas de 35% de volumen en etanol y 65% de combustible de aviación (E35) y otra variación con un 50% de volumen de cada sustancia (E50). La nomenclatura empleada para estas definiciones se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Nomenclatura de Mezclas

Nombre de Mezcla	Porcentaje de Etanol	Porcentaje de AvGas
AvGas / E0	0	100
E10	10	90
E20	20	80
E35	35	65
E50	50	50
E100	100	0

Nomenclatura “E” usada de acuerdo con la nomenclatura internacional de mezclas de combustible con etanol.

De esa manera, se tienen 6 referencias a partir de las cuales se pueden comparar los resultados teóricos a introducir en el algoritmo de análisis descrito en la sección 4.1. Estas corresponden a las mezclas seleccionadas y las 2 sustancias puras. Las mezclas por encima

del 50% de etanol no se analizan, ya que de acuerdo con los estudios realizados previamente, resultan ineficiente o presentan problemas de miscibilidad.

3.5. Propiedades de las mezclas

Con el fin de realizar una caracterización adecuada de cada una de las mezclas propuestas, se deben establecer algunas propiedades físico-químicas que determinen las condiciones de operación teórica en el motor propuesto. Dentro de estas pruebas se debe establecer la densidad, el índice de viscosidad y la curva de destilación de las muestras. Debido a la disponibilidad de equipos y a las restricciones descritas en la sección 1.4.2 sobre las limitaciones, no se seleccionan otras pruebas físico-químicas adicionales.

Para el análisis termodinámico se incluyen además dos pruebas de determinación de poder calorífico sobre las mezclas que presenten resultados favorables con respecto a los valores de operación del AvGas 100/130 comercial. Estas pruebas desarrolladas empleando una bomba calorimétrica, así como las demás pruebas seleccionadas se describen en la sección 4.2.

A través de estas 4 pruebas seleccionadas y de los resultados obtenidos en el algoritmo del análisis de dinámica de gases y termodinámica, se evalúa el desempeño teórico de cada sustancia propuesta (E10, E35, E50) y se establecerán las condiciones de viabilidad teórica del uso de las mismas.

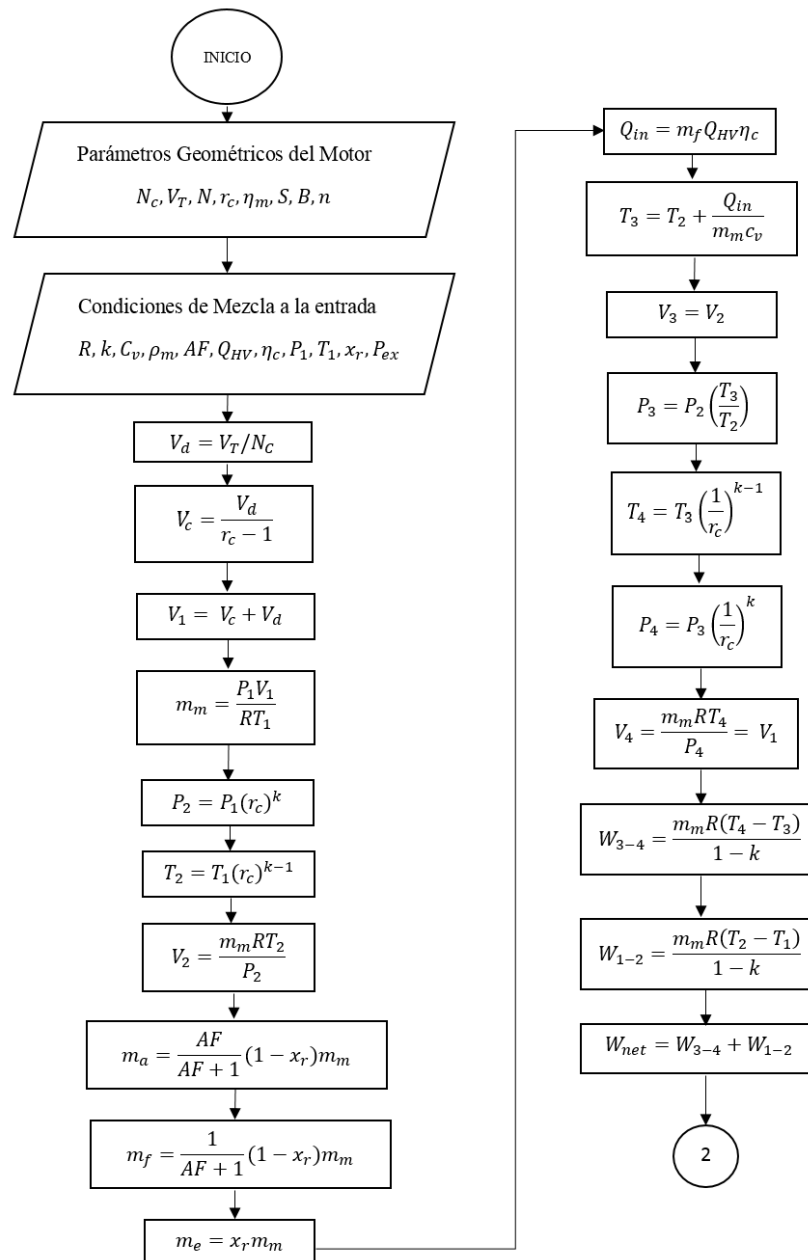
4. DESARROLLO INGENIERIL

Como parte del desarrollo de ingeniería realizado, se ha dividido este proyecto en dos etapas principales: la primera etapa consiste en el desarrollo de un algoritmo que reúna las ecuaciones necesarias para establecer un modelo teórico de evaluación de los combustibles alternativos en cualquier motor a pistón de aviación, a partir de una serie de condiciones iniciales básicas. La segunda etapa consiste en la realización de las pruebas físico-químicas descritas en la sección 3.5, que permiten caracterizar las mezclas propuestas e introducir sus valores en el algoritmo descrito.

4.1. Análisis teórico del ciclo en el motor

Con el fin de establecer un modelo teórico que permita establecer las condiciones de viabilidad del uso de los biocombustibles en un motor a pistón de aviación específico, se propone un algoritmo de análisis teórico que mediante una serie de datos ingresados, permite conocer el comportamiento teórico del ciclo termodinámico, determinando además eficiencias y emisiones estimadas. Los datos ingresados corresponden a valores geométricos de un motor específico, que inicialmente corresponden a los parámetros del motor seleccionados en la sección 3.3; así como a valores obtenidos experimentalmente en las diferentes mezclas de combustible propuestas, tales como poder calorífico y densidad. En la estructura del algoritmo se encuentran las ecuaciones concernientes al Ciclo Otto, tanto a nivel isentrópico, como bajo una estimación de parámetros politrópicos. Para el desarrollo inicial de la fase isentrópica del algoritmo se emplean las ecuaciones propuestas por Willard Pulkrabek en los capítulos tres, cuatro y nueve de su libro *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine* (Pulkrabek, 1993). La Figura 9 muestra el esquema del

algoritmo planteado para el análisis del Ciclo Otto isentrópico en un motor de 4 tiempos con ignición por chispa. La nomenclatura empleada se detalla en la lista de símbolos del presente documento y el desarrollo del algoritmo se subdivide en 6 secciones: la etapa 1 corresponde a la admisión en el cilindro, la etapa 2 a la compresión, la etapa 3 a la combustión y la etapa 4 a la expansión seguida del escape. Posteriormente se desarrollan los cálculos de potencia y condiciones de operación, así como se realizan las correcciones por estimación de residuos.



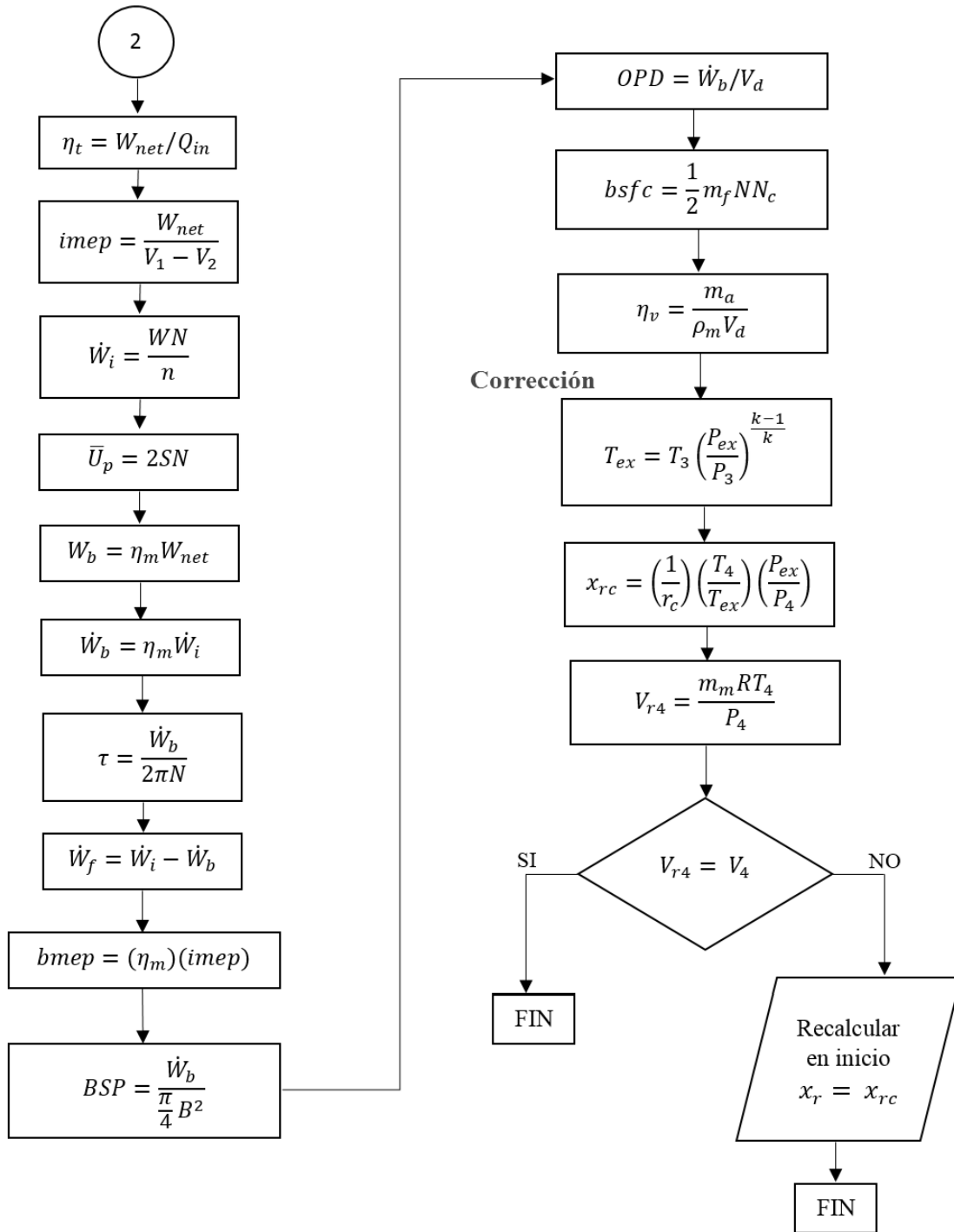


Figura 9. Esquema del Algoritmo de Ciclo Otto Isentrópico

Desarrollado por los Autores a partir de Pulkrabek

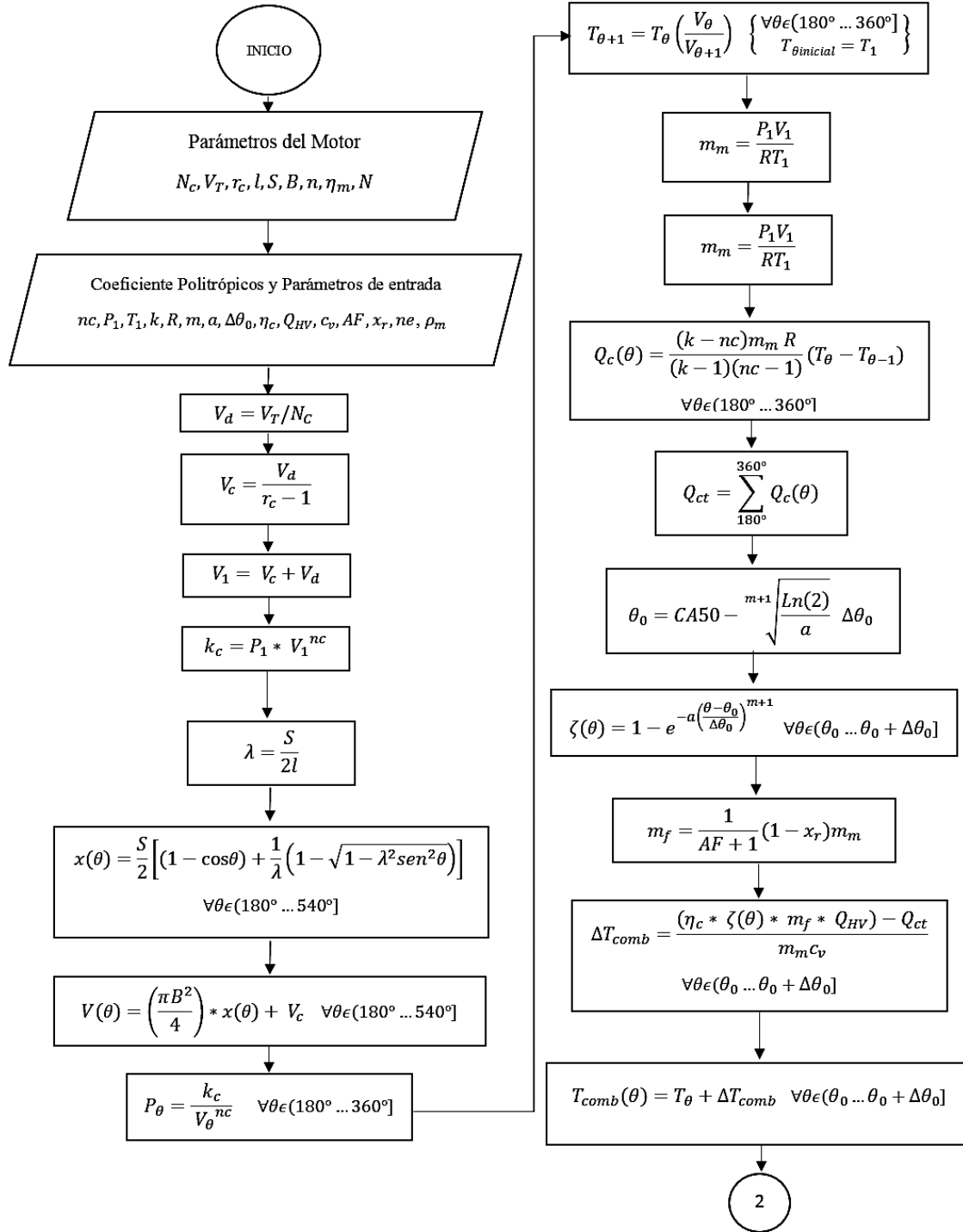
Este algoritmo de ciclo isentrópico permite determinar la potencia teóricamente obtenida en la operación del motor, así como los valores de presión efectiva media de frenado, torque y otros parámetros que permiten comparar la operación de la máquina, tomando como referente los valores brindados por el fabricante en los manuales de operación oficiales. Algunos valores, tales como la eficiencia mecánica del sistema, son asumidos de acuerdo a estimaciones plateadas en la bibliografía, donde se tienen en cuenta parámetros de operación de motores similares.

El análisis del ciclo politrópico se realiza con el fin de obtener valores más cercanos al comportamiento real del motor en términos de eficiencia y potencia obtenida. Para este análisis se emplea el modelo desarrollado por Ferrer y Viscarro en la Universidad Politécnica de Cataluña (Ferrer, 2007), a partir del cual se realiza el cálculo de las condiciones de cada etapa del ciclo, de acuerdo con los ángulos de giro del cigüeñal. De esa manera, la fase de admisión se toma con ángulos de cigüeñal de 0° a 180° , iniciando con el pistón en el TDC; la fase de compresión corresponde a ángulos de 180° a 360° , la expansión se inicia en 360° hasta 540° y la salida de gases finaliza el ciclo de 540° a 720° , completando la segunda vuelta de cigüeñal.

La combustión se estima en un periodo equivalente a 60° de rotación y ocurre entre las fases de compresión y expansión, con un inicio aproximado en los 340° de rotación del cigüeñal, hasta los 400° comprendidos durante la fase de expansión. Esta estimación se realiza de acuerdo con los valores descritos por Ferrer y Viscarro en motores a pistón similares a los empleados en aviación.

El algoritmo correspondiente al análisis politrópico se muestra en la Figura 10. Las fases de admisión y escape no son detalladas de acuerdo con el tipo de análisis escogido, ya

que la teoría planteada se centra en la sección cerrada del ciclo, donde las válvulas de admisión y escape no se encuentran abiertas. La nomenclatura empleada coincide con los elementos descritos en la Figura 9, listados al inicio de este documento.



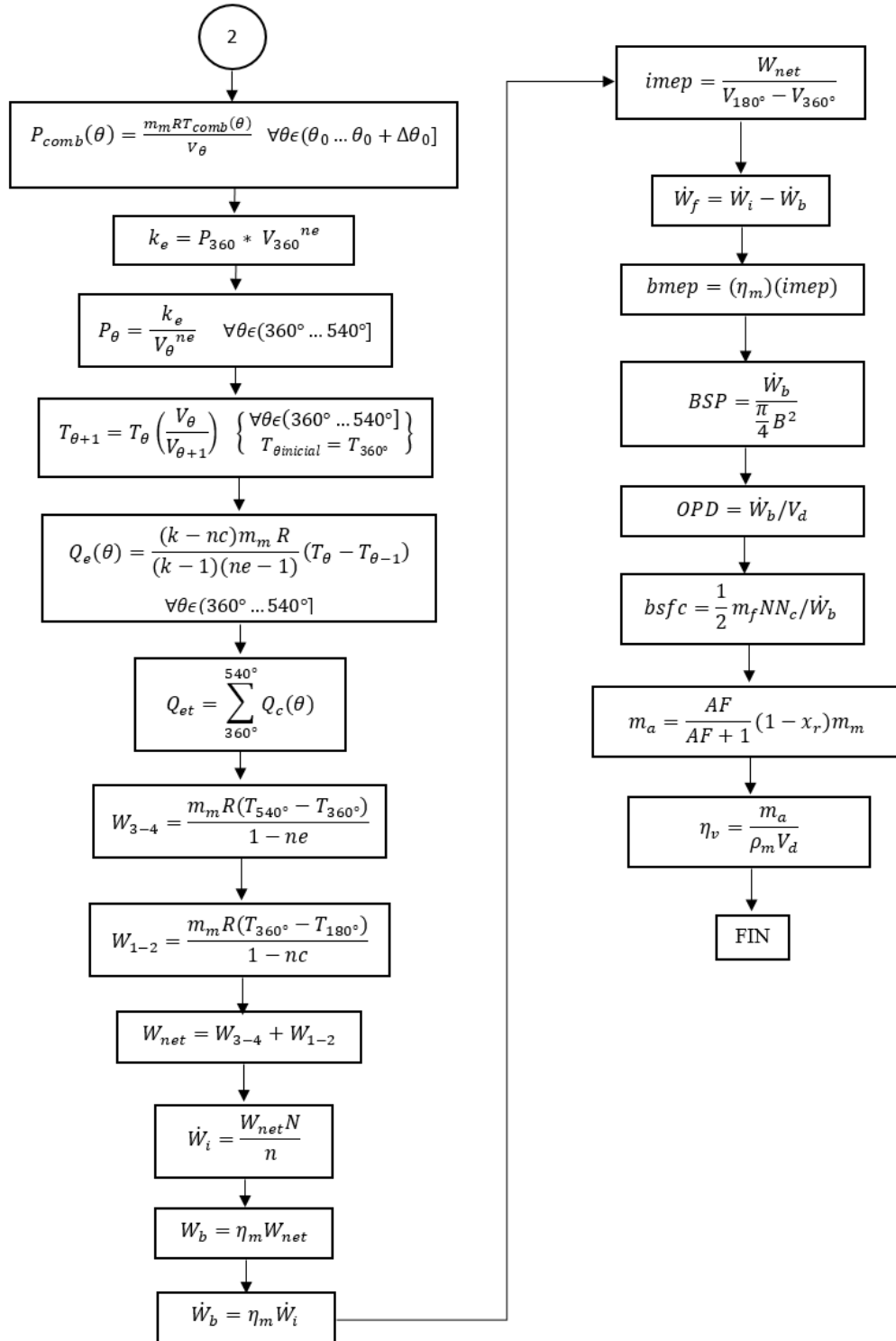


Figura 10. Esquema de Algoritmo de Ciclo Otto Politrópico

Desarrollado por los Autores a partir de Ferrer y Viscarro

A diferencia del algoritmo de ciclo isentrópico, el análisis politrópico realiza un cálculo detallado de las variaciones de las condiciones de la mezcla en el cilindro durante intervalos de tiempo muy cortos. Para este caso, se toman intervalos de rotación del cigüeñal de 1° , con el fin de conocer los valores de presión y temperatura de manera precisa, así como obtener una estimación adecuada de las pérdidas generadas. El incremento en la temperatura generado por la combustión (ΔT_{comb}) se añade a los valores de temperatura en compresión y expansión, iniciando en el ángulo de inicio de combustión calculado θ_0 , hasta completar el intervalo escogido, que en este caso es de 60° de rotación.

Los parámetros estimados en el ciclo politrópico se toman de acuerdo con valores indicados en la referencia, donde nc vale 1,25; a tiene un valor de 7; ne vale 1,3; m es equivalente a 1 y $CA50$ se localiza aproximadamente a 367° de rotación del cigüeñal. El significado termodinámico de estos parámetros politrópicos, en el caso de nc , ne , a y m no se detalla en el desarrollo de esta etapa; sin embargo, se establece su validez a través de la aplicación de la Ley de Vibe para motores SI, la cual describe el comportamiento del proceso de combustión de acuerdo con las variaciones del ángulo de cigüeñal, basándose en resultados experimentales y aproximaciones numéricas. En procesos politrópicos detallados se toman los coeficientes nc y ne para cada valor de incremento de temperatura, sin embargo, en el proceso desarrollado se asumen constantes durante la fase que describen, al igual que el c_v empleado.

Los parámetros de potencia y rendimiento obtenidos al final de ambos algoritmos se comparan con el fin de conocer las variaciones de potencia. Este proceso de análisis se detalla en la sección 5, donde se establecen los resultados estimados a diferentes condiciones

ambientales, empleando las diferentes mezclas bajo la caracterización realizada en la sección 4.2 sobre Pruebas y Propiedades del combustible.

4.2.Pruebas y propiedades

De acuerdo con las condiciones establecidas en la sección 1.4 de este documento, las pruebas químicas desarrolladas en torno a las mezclas de combustible seleccionadas son llevadas a cabo de acuerdo con los parámetros requeridos por el algoritmo de análisis teórico, priorizando de esa manera la obtención del poder calorífico en cada mezcla y la densidad de las mismas. La obtención de las curvas de destilación y de la viscosidad permite además estimar el comportamiento de las muestras en estudios posteriores, además de generar una idea de los efectos causados en el proceso de atomización del combustible. A continuación se describe la realización de las pruebas realizadas, así como los resultados obtenidos:

- **Poder Calorífico:**

El poder calorífico de una sustancia hace referencia a la cantidad de energía disponible en un valor de masa especificado, que para el caso de los combustibles, hace referencia a la cantidad de calor que se puede obtener en un proceso de oxidación completa. El poder calorífico determinado puede ser superior (HHV) o inferior (LHV), siendo el poder calorífico superior aquel que se obtiene asumiendo que el vapor de agua generado en la combustión se encuentra totalmente condensado al final de la misma. El poder calorífico inferior hace referencia al valor obtenido cuando el vapor de agua de la combustión no se condensa, por lo que no existe un aporte adicional de calor por parte de dicho vapor. La determinación del poder calorífico se efectúa mediante la norma ASTM D240, donde a través de una bomba calorimétrica se realiza la combustión de una cantidad específica de combustible a volumen constante, y el calor obtenido en el proceso se calcula a través de los cambios en la

temperatura, con la adición de efectos correctivos por condiciones termoquímicas y transferencia de calor. En el Anexo 1 se detallan las condiciones, equipos y el proceso llevado a cabo bajo la norma ASTM D240.

De acuerdo con la disponibilidad de los laboratorios autorizados en Colombia para realizar esta prueba en condiciones estandarizadas, se seleccionó el laboratorio de ingeniería química de la Universidad Nacional de Colombia para efectuar la prueba correspondiente a la determinación del poder calorífico, de la viscosidad y del contenido de azufre. Los resultados obtenidos por el laboratorio de ingeniería química se detallan en el informe emitido por dicha institución, adjunto en el Anexo 5, junto con la cotización relacionada. Las pruebas llevadas a cabo por la institución pública se realizaron sobre dos mezclas E10 y E35. Los valores de poder calorífico para E0 y E100 son tomados directamente de las hojas de datos del distribuidor de combustible de aviación y de Bioetanol. La Tabla 6 muestra los valores de poder calorífico superior de cada sustancia seleccionada.

Tabla 6. Poder Calorífico Superior de Cada Mezcla

Nombre de la Mezcla	QHV [kJ/kg]
AvGas 100/130	44700
E10	43785
E35	39600
Bioetanol	29720

Tomado de 3 Fuentes: Cadascu.wordpress; Liasch y Pruebas detalladas en Anexo 5

La medición del poder calorífico superior para la mezcla E50 no se realizó, de acuerdo con las limitaciones detalladas previamente, asumiendo que los resultados mostrados en las posteriores pruebas de destilación validarían la selección de las mezclas escogidas. Sin

embargo, el valor de Poder Calorífico para diferentes mezclas puede estimarse a partir de la gráfica mostrada en la Figura 11, donde, de acuerdo con el comportamiento de los datos, se pueden aproximar los valores de poder calorífico superior empleando la ecuación 16. Esta ecuación relaciona el porcentaje de etanol (x) con la variación en el poder calorífico en kJ/kg (y) a través de una curva polinómica, con un coeficiente de correlación de 0,9987.

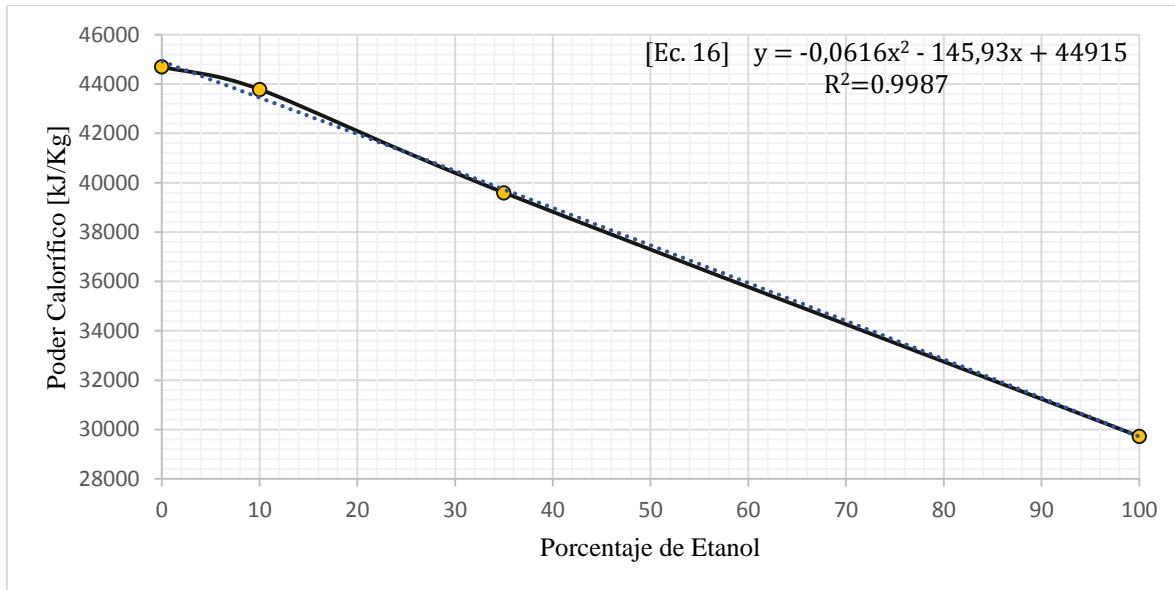


Figura 11. Variación Estimada en el Poder Calorífico

Gráfica realizada por los autores

Los resultados de esta sección sugieren que el incremento en el porcentaje de etanol en el combustible puede reducir notablemente el poder calorífico superior de la mezcla, desde aproximadamente 44 MJ hasta un valor cercano a los 30MJ. El efecto de esta variación en el rendimiento del motor se describe de acuerdo con los resultados obtenidos del algoritmo de análisis planteado en la sección 4,1; estableciendo qué porcentaje varía la potencia entregada por el motor, su consumo específico y las relaciones de eficiencia. La Tabla 7 muestra los resultados calculados a partir de la aproximación realizada en la Figura 11. Dichos valores

pueden ser empleados en ausencia de valores experimentales durante las diferentes fases de cálculo requeridas.

Tabla 7. Poder Calorífico Superior Estimado

Mezcla	QHV Estimado [kJ/Kg]	Porcentaje de Error
AvGas	44915	0,48%
E10	43449	0,76%
E35	39731	0,33%
E50	37464	-----
E75	33623	-----
E90	31282	-----
E100	29706	0,04%

Tomado de: Aproximación por ecuación 16.

- **Densidad:**

La densidad es una propiedad física fundamental que puede ser usada para caracterizar hidrocarburos puros y sus mezclas, definida como el cociente entre la masa y el volumen. Se caracteriza por depender de la temperatura, es decir que su proceso de medición se ve influenciado por la temperatura ambiente. La densidad relativa es la relación de la densidad de una sustancia con respecto a la densidad del agua en condiciones estandarizadas. Para determinar con mayor precisión dicha propiedad en diferentes líquidos se emplea un picnómetro, el cual es un instrumento cuya funcionalidad es mantener un volumen fijo durante la medición de la masa de diferentes líquidos en su interior. La metodología de medición de densidad para diferentes mezclas de combustibles y productos derivados del petróleo es tomada de la norma ASMT D1217, cuyo proceso se detalla en el Anexo 2. A partir de esta norma, es posible además realizar la conversión de la densidad en densidad relativa, también conocida como gravedad específica. En la Figura 12 se observa el montaje

de la prueba de medición de densidad, cuyo proceso inicia con la medición de la masa de los picnómetros vacíos. Posteriormente es agregada la sustancia a caracterizar en cada uno, realizando el registro del valor de masa medido bajo condiciones de temperatura específicas. Las condiciones ambientales de esta prueba corresponden a las presentadas en la ciudad de Bogotá, con una temperatura de ambiente de 20°C y una presión estimada de 746 milibares.



Figura 12. Montaje de Densidad para Mezclas de AvGas y Bioetanol

Fotografía tomada por los autores en el Edificio Fray Roger Bacon de la Universidad de San Buenaventura

Tabla 8. Parámetros de Cálculo de Densidad de las Mezclas

Sustancia	Densidad (Kg/m ³)	Masa del picnómetro (g)	Masa total (g)	Volumen (ml)	Gravedad Específica
AvGas	689	17,30	24,25	10,07	0,689
E10	700	18,00	24,96	9,94	0,700
E35	719	17,31	24,56	10,07	0,719
E50	738	16,81	24,33	10,18	0,738
E100	782	17,29	25,36	10,32	0,782

Desarrollado por los Autores a partir Resultados del Anexo 2

En la Tabla 8 se observan los valores obtenidos en el cálculo de la densidad, así como la masa del picnómetro, la masa total y volumen contenido. Dentro del comportamiento de la variación de esta propiedad se observa que la densidad para AvGas puro es menor que la del E100, por lo que las mezclas seleccionadas poseen valores limitados por estos dos parámetros. En la Figura 13 se observa el comportamiento de la curva de densidad para las diferentes sustancias analizadas, iniciando en el punto inferior de la curva con el valor de densidad del AvGas puro y aumentando su densidad progresivamente hasta alcanzar un valor de 0,782 g/ml en E100, con tendencia a mostrar una relación lineal entre el aumento de la densidad con la adición de etanol.

Consecuentemente, se debe destacar que la adición de etanol al combustible de aviación genera un aumento en la densidad de la mezcla, lo que a su vez conlleva a un aumento en el peso total presente en los tanques de almacenamiento, por lo que podría afectar diferentes aspectos de rendimiento en vuelo de una aeronave o limitar la capacidad de carga de la misma. Estos efectos encontrados se discuten en la sección 5 de este documento.

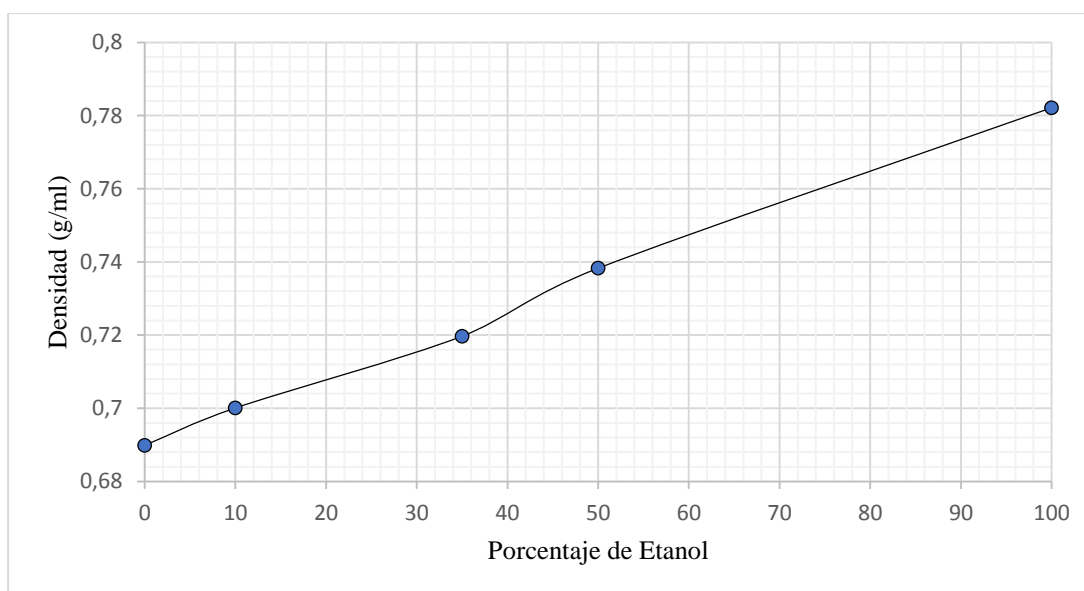


Figura 13. Curva de Variación de Densidad

Gráfica realizada por los autores

- **Curva de Destilación:**

Los productos derivados del petróleo, así como otras sustancias empleadas como combustible, suelen estar compuestas por una serie indeterminada de hidrocarburos, que en el caso de las gasolinas poseen desde moléculas con 6 hasta 12 carbonos, en diferentes configuraciones. Sin embargo, todos los componentes poseen diferentes temperaturas de ebullición entre los 50 y 200°C (Shell, 2006).

La curva de destilación de un combustible permite establecer el comportamiento de los componentes en el interior de la sustancia, a través de las diferencias en los puntos de ebullición de cada componente, siendo los elementos livianos los primeros en ser evaporados y separados de la sustancia; y dejando los componentes más pesados al final del proceso. Esta curva relaciona el porcentaje destilado con la temperatura del vapor, mostrando además la volatilidad de los vapores presentes al calentar la mezcla y estableciendo la tendencia a producir vapores explosivos o tapones de vapor “Vapor Lock” dentro de un motor operando a alta temperatura o gran altitud.

La determinación de la curva de destilación para productos derivados de petróleo está regulada por la norma ASTM D86, donde, a partir de un matraz de 100 mL, un calentador, un condensador, un enfriador, un termómetro y una probeta, se realiza la medición de los puntos significativos de la curva. La Figura 14 muestra el montaje de la muestra en el equipo de destilado y en el Anexo 3 se detalla el proceso efectuado bajo las disposiciones de la norma, así como los equipos y condiciones de la prueba.



Figura 14. Montaje de destilación para Mezclas de AvGas

Fotografía tomada por los autores en el Edificio Fray Roger Bacon de la Universidad de San Buenaventura

Bajo condiciones de temperatura de 20°C y 744 milibares de presión, se realizó la prueba a 4 muestras diferentes, siendo la muestra 1 una sustancia compuesta en su totalidad por AvGas 100/130. Las muestras 2, 3 y 4 corresponden a mezclas tipo E10, E35 y E50, respectivamente. Todos los porcentajes de mezcla se realizaron con respecto al volumen y la temperatura ambiental presentó variaciones no controladas dentro del rango de $\pm 3^\circ\text{C}$. La Figura 15 muestra el comportamiento de las curvas de destilación para las diferentes muestras empleadas, donde se observa que la mezcla de AvGas puro registra la temperatura de ebullición más alta, así como se aprecia que al agregar diferentes porcentajes de Etanol al combustible fósil, la temperatura de ebullición máxima disminuye notablemente, afectando así la volatilidad del combustible mixto.

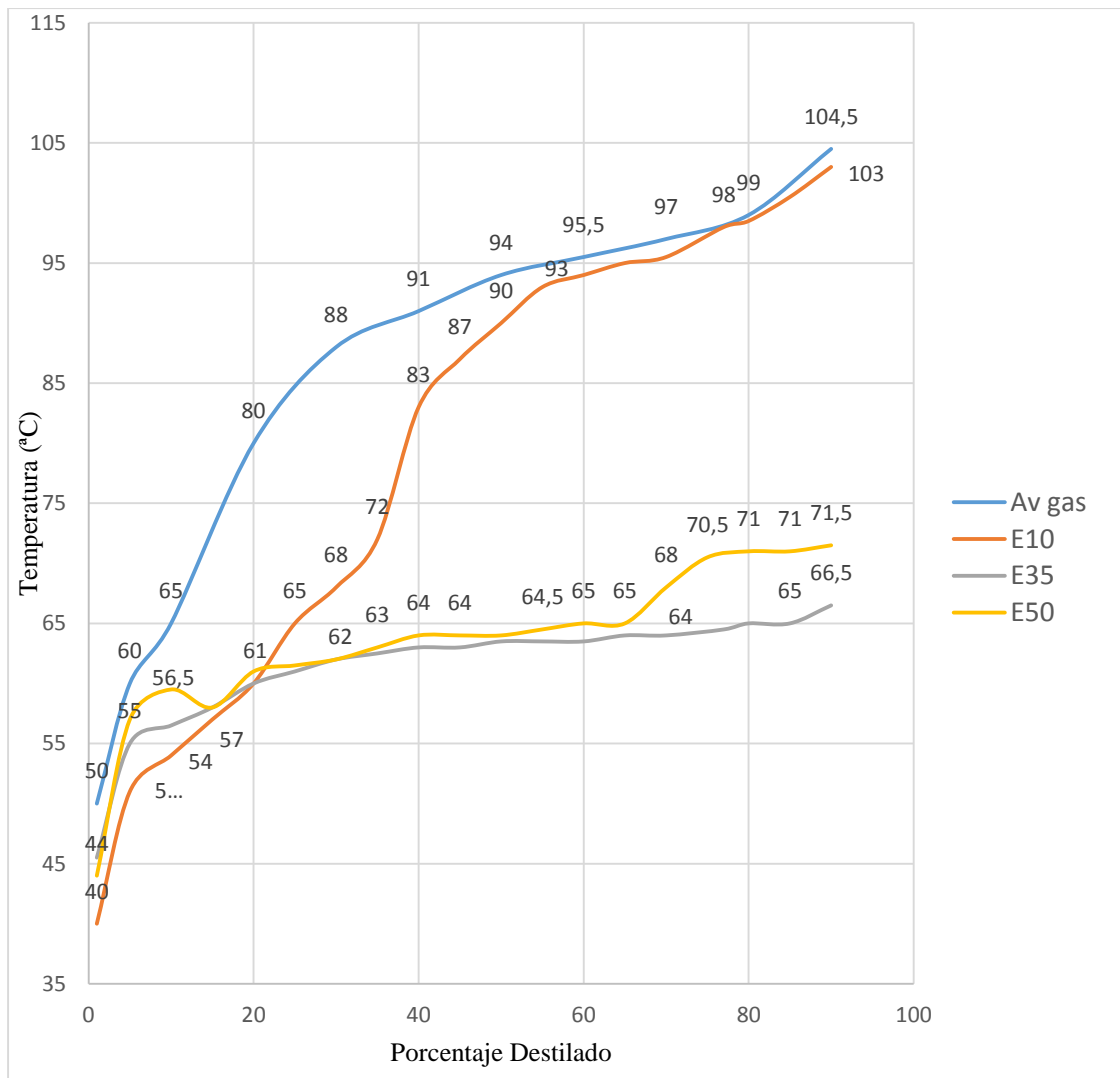


Figura 15. Curvas de Destilación

Gráfica realizada por los autores

Se destaca a además, que la mezcla de E10 posee un punto de ebullición final cercano al del AvGas puro, aunque su punto de inicio de destilación es el menor presentado en todas las muestras. También se aprecia que las muestras de E50 y E35 poseen propiedades de volatilidad similares, y pueden generar una disminución del punto de ebullición de hasta un 36,4% por debajo del valor máximo, tomando como referencia el valor del punto de ebullición del combustible de aviación usado. De ese modo, se puede afirmar que los

resultados de esta prueba indican que el uso de mezclas de Biocombustible con Etanol, por encima de E35, puede generar variaciones severas en el valor de la presión de vapor promedio, con tendencia a la disminución del mismo, por lo que se hace necesario verificar las condiciones de operación a gran altitud, donde la presión ambiental disminuye y el riesgo de Vapor Locking aumenta.

Otros riesgos específicos ligados al aumento de la volatilidad del combustible por la adición de etanol se describen en la sección 5. Se destaca además que el punto de ebullición máximo encontrado en las mezclas no presenta una relación consecuente con el aumento de etanol en la sustancia, ya que inicialmente la temperatura máxima registrada disminuye con el aumento de Bioetanol, pero en las mezclas de E35 y E50 dicha relación se torna inversa, obteniendo una temperatura máxima registrada mayor sobre el E50 que aquella encontrada en E35. La posible razón de este efecto corresponde a la variación de la presión de saturación de los componentes en la mezcla, de acuerdo con la miscibilidad de los mismos y el efecto del alcohol mezclado con otros hidrocarburos en diferentes porcentajes.

Esta prueba se realizó dos veces sobre cada mezcla seleccionada, replicando las condiciones planteadas en la norma ASTM correspondiente y obteniendo resultados similares en un 97%. La Figura 15 muestra los resultados obtenidos en la prueba inicial, los cuales se consideran concluyentes a pesar de no mostrar una tendencia específica. En todos los casos mencionados se realizó la destilación hasta alcanzar un porcentaje de 90% en volumen destilado y registrando la temperatura hallada en dicho punto como máxima.

- **Viscosidad:**

La viscosidad es la propiedad física que mide la resistencia interna de un fluido a desplazarse, bajo unas condiciones de temperatura específicas. Existen diferentes maneras

de determinar la viscosidad de un fluido, dentro de las que se destacan las pruebas de viscosidad dinámica (absoluta) y viscosidad cinemática. La viscosidad dinámica se define como la medida de resistencia de un fluido a desplazarse, teniendo en cuenta el efecto de la fuerza gravitacional; sus unidades generalmente son Pascales por segundo ($Pa \cdot s$) o Poise (P), con una equivalencia de $0,1 Pa \cdot s$ por cada P . Complementariamente, la viscosidad cinemática se entiende como la resistencia del fluido al desplazamiento por escurrimiento; sus unidades corresponden a metros cuadrados sobre segundo (m^2/s) o Stokes (St), con una equivalencia de $0,0001 m^2/s$ por cada St . Generalmente, las unidades de viscosidad, de acuerdo con los valores presentes en diferentes sustancias comunes, suelen emplear el submúltiplo *centi*, especialmente en el caso de los centipoise (cP) y centistokes (cSt). La relación entre estas dos propiedades establece que la viscosidad cinemática corresponde al cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido.

De manera estandarizada, el método de medición de esta propiedad se realiza mediante la norma ASTM D445-65, la cual determina la viscosidad cinemática de productos derivados del petróleo de color transparente y opaco. En esta prueba se registra el tiempo en el que el fluido confinado en un volumen fijo se desplaza bajo ciertas condiciones de temperatura, a través de un orificio calibrado. Posteriormente, el cálculo de la viscosidad dinámica del fluido se puede realizar a partir de los resultados obtenidos de la viscosidad cinemática y empleando los valores de densidad descritos previamente. En el Anexo 4 se detallan las condiciones y el proceso llevado a cabo por la norma ASTM D445 -65.

La realización de dicha prueba fue efectuada por contratación del Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia. Los resultados emitidos por el laboratorio de la entidad pública se muestran en el informe presente en el Anexo 5, junto con

los resultados de medición de poder calorífico y contenido de azufre. Para las sustancias puras, tales como el AvGas y el Bioetanol, los valores de viscosidad se toman a partir de las condiciones descritas en las hojas informativas de los distribuidores.

Tabla 9. Valores de Viscosidad en las Diferentes Mezclas a 25°C

Nombre de la Mezcla	Viscosidad Cinemática (cSt)	Viscosidad Dinámica (cP)
AvGas 100/130	0,591	0,407
E10	0,665	0,465
E35	0,860	0,618
Bioetanol	1,373	1,074

Tomado de: SAE-Aviation Fuel Properties y Pruebas detalladas en Anexo 5

La Tabla 9 muestra los valores de viscosidad de las sustancias seleccionadas, donde se evidencia que el Bioetanol puro posee la viscosidad más alta, con 1,373 cSt, que en producto con la densidad registrada en las tablas mostradas anteriormente da como resultado una viscosidad dinámica de 1,074 cP. La variación de la viscosidad, de acuerdo con la curva descrita en la Figura 16, presenta un comportamiento lineal creciente, donde el aumento en la cantidad de etanol en la mezcla es proporcional al incremento en la viscosidad cinemática.

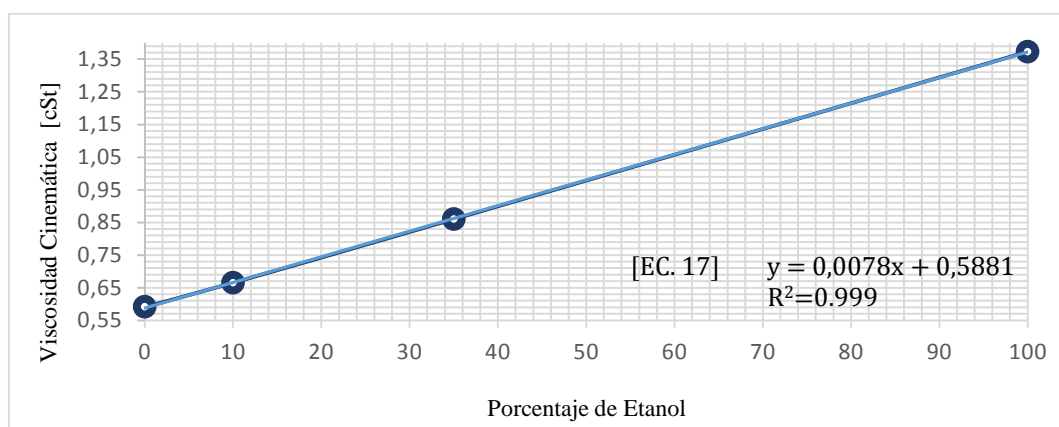


Figura 16. Variación Estimada de la Viscosidad de las mezclas

Realizado a partir de resultados experimentales

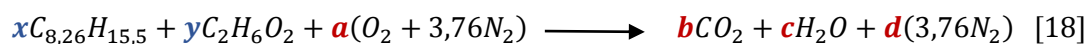
La ecuación 17 permite obtener además valores aproximados para otras mezclas con Etanol, diferentes a las planteadas en el desarrollo de esta etapa, donde (x) indica el porcentaje de etanol y (y) la viscosidad cinemática en cSt. El coeficiente de correlación entre la curva descrita por la ecuación 17 y los datos experimentales es de 0,999. Su valor se debe a la cantidad de datos empleados y a la cantidad de números decimales registrados, sin embargo es una ecuación aplicable a diferentes condiciones que se requieran en el análisis posterior.

4.3. Proceso de Combustión

Tras obtener los valores experimentales requeridos para el análisis del ciclo termodinámico, se establecen las condiciones básicas que interfieren en el proceso de combustión de cada mezcla. Esto se desarrolla teniendo en cuenta las condiciones de combustión en motores recíprocos, permitiendo cuantificar el aprovechamiento de la energía empleada. El estudio teórico de la combustión permite también establecer parámetros fundamentales como el rendimiento de la combustión, que a su vez determina la máxima potencia del motor bajo condiciones de trabajo cercanas a las reales.

En el estudio de esta fase se deben predecir parámetros de temperatura y presión en cada cilindro durante diferentes condiciones de operación previstas, sin embargo, al analizar la variación en las mezclas de combustible, se deben determinar principalmente los cambios en la relación de AF presentes. Estas variaciones afectan la temperatura máxima presente en el interior del cilindro, es decir, la temperatura de llama adiabática, de tal modo que un incremento en dicho parámetro por encima de los valores usualmente encontrados en la operación del motor con combustible fósil, podría desencadenar una falla estructural por fatiga térmica no prevista.

Inicialmente en este análisis, se requiere de las condiciones de análisis estequiométrico de cada una de las mezclas, que permite determinar las diferentes relaciones AF y las temperaturas de llama adiabática estimadas para cada caso. La ecuación de balance estequiométrico general para todos los casos se muestra en la ecuación 18.



Los factores de balance (x) y (y), mostrados en la ecuación 18, permiten variar el tipo de mezcla empleada en el análisis, teniendo en cuenta que 1 mol de combustible posee una fracción molar determinada de etanol y de AvGas. Dicha fracción molar se determina para cada componente dividiendo el porcentaje de la sustancia entre su peso molecular. Seguidamente, se realiza la suma de las moles encontradas en todos los productos. La fracción molar de cada sustancia corresponde a la razón del valor en moles de cada una sobre el total hallado en la suma. Este proceso se detalla para la mezcla E10 en la Tabla 10, teniendo en cuenta la fórmula aproximada del AvGas ($\text{C}_{8,26}\text{H}_{15,5}$) y la fórmula teórica del etanol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$).

Tabla 10. Calculo de Fracción Molar para E10

Sustancia	Porcentaje en Masa	Peso molecular (kg/mol)	Moles	Fracción molar
$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	10%	62	0,001612	0,17
$\text{C}_{8,26}\text{H}_{15,5}$	90%	114,62	0,007852	0,82

Realizado de acuerdo al proceso descrito.

Seguidamente, se realiza un balance de la ecuación entre los valores de entrada (reactivos) y los valores de salida (productos), con el fin de identificar la cantidad en moles

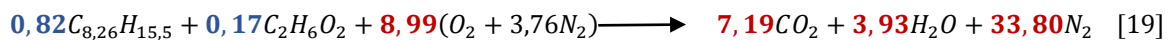
de cada una de las sustancias que participan en la reacción. Las variables y valores involucrados en el balance de la mezcla E10 se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Variables e incógnitas del Balance Estequiométrico

Sustancia	Reactivo	Producto
C	7,19	b
H	6,94	c
O	a	10,49
N	39,45	d

Realizado de acuerdo al proceso descrito

Posteriormente, estableciendo las ecuaciones de cada elemento y despejando las incógnitas planteadas, se establece la condición estequiométrica de la reacción de oxidación de E10 con aire. La ecuación 19 muestra los resultados encontrados para este caso específico.



La relación de AF teórica se obtiene a partir de la relación de masa de aire y de mezcla obtenida en la ecuación balanceada, dividiendo la masa de aire entre la masa total de mezcla. Para el caso analizado de E10 se obtiene una relación de **13,63**. A partir de este valor se puede determinar la temperatura de llama adiabática, tomando los valores de entalpia de los reactivos y productos. Esta temperatura determina el valor máximo encontrado en el interior del cilindro y permite evaluar la aparición de efectos generados por fatiga térmica. En la Figura 17 se esquematiza el flujo de reactivos y productos, asumiendo condiciones iniciales de 1 atmósfera y 25°C para el combustible, así como se predice la presencia de agua (H₂O), Nitrógeno (N₂) y Dióxido de carbono (CO₂) como productos. Los valores de entalpia a temperaturas específicas y entalpía de formación son asumidos de acuerdo con las propiedades del n-octano y del alcohol etílico en su fase líquida.

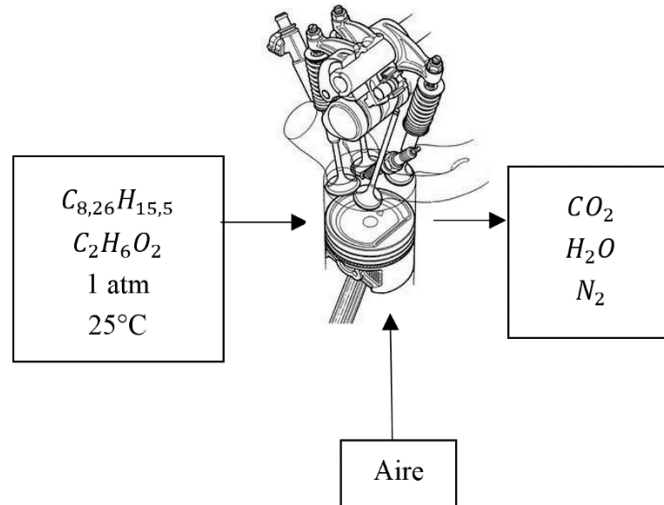


Figura 17. Reactivos y Productos en la combustión

Tomado a partir de la teoría de llama adiabática

Tabla 12. Entalpía de las sustancias

Sustancia	$\bar{h}^{\circ}_f \left[\frac{kJ}{kmol} \right]$	$\bar{h}^{\circ}_{(298)K}$
C_8H_{18}	-249950	-
C_2H_5OH	-277690	-
O_2	0	8682
N_2	0	8667
CO_2	-393520	9364
H_2O	-241820	9904

Tomado de Cengel & Boles. Thermodynamics. An engineering approach

Después de esto, empleando la ley de conservación de la energía, se realiza el balance entre la energía de los reactivos y de los productos, de acuerdo con los valores de entalpía de cada una de las sustancias descritas en la Tabla 12. De esa forma, se iguala la suma de la entalpía de los reactivos por la cantidad de moles, con la suma de las entalpias de las sustancias generadas por sus moles correspondientes. De acuerdo con la ecuación 20, las sustancias generadas no poseen entalpías de referencia, ya que se desconoce la temperatura de llama adiabática, por lo que esta se estima a partir de la sustancia con mayor concentración

en la reacción, que para este caso corresponde al Nitrógeno (N_2). A partir de este valor inicial se realiza un proceso iterativo, donde se establece un valor aproximado de la temperatura de llama adiabática para cada sustancia.

$$-4732224,01 [KJ] = 7,19\bar{h}^{\circ}_{CO_2} + 6,94\bar{h}^{\circ}_{H_2O} + 39,45\bar{h}^{\circ}_{N_2} \quad [20]$$

La iteración planteada propone tomar el valor de temperatura hallado en el balance, asumiendo que todas las entalpías de referencia de los productos son iguales a la del Nitrógeno y determinando la temperatura correspondiente a dicha condición mediante tablas de valores de cada sustancia.

Tabla 13. Proceso Iterativo de la temperatura de llama adiabática

Temperatura inicial: 2600			Iteraciones
Sustancia	Caso 1: \bar{h}°_{2600K}	Caso 2: \bar{h}°_{2350K}	
N_2	86650	77496	Caso 1: -4732224,01 = -5178085,43
CO_2	13749	122091	
H_2O	114273	100846	Caso 2: -4732224,01 = -4634922,73

Realizado de acuerdo al proceso descrito

En la Tabla 13 se muestran los casos contemplados en el proceso iterativo, donde se toma una temperatura inicial de 2600K para cada uno de los productos y se establece el valor de la suma de entalpías por moles. El valor de esta sumatoria debería ser igual al de la suma de entalpías por mol de los reactivos, sin embargo presenta una variación considerable. Es así como se toma una segunda temperatura estimada de 2350K y se repite el proceso. Teniendo en cuenta que el valor de referencia de $-4732224,01$ kJ se encuentra entre los valores hallados para las temperaturas estimadas, se realiza un proceso de interpolación

donde se obtiene el valor de temperatura de llama adiabática aproximado, que para este caso desarrollado sobre la mezcla E10 corresponde a **2394,78 K**.

Tabla 14. Relaciones AF y Llama adiabática en las mezclas

Tipo de Mezcla	Relación Aire-Combustible	Temperatura de llama adiabática (K)
AvGas	14,53	2387,92
E10	13,63	2394,78
E20	12,74	2364,07
E35	11,41	2398,24
E50	10,04	2420,54
E100	7,74	2435,64

Realizado de acuerdo al proceso descrito

Finalmente, teniendo en cuenta el procedimiento previamente descrito, se obtiene la variación de la relación de Aire-Combustible y temperatura de llama adiabática para cada una de mezclas seleccionadas. En la Tabla 14 se observa que la relación AF para el AvGas puro es de **14,63** mientras que para el Etanol puro es tan solo de **7,74**. Para la temperatura de llama adiabática se observa una variación no proporcional en todas las mezclas, con un valor mínimo en E20 de **2364,07 K**, y un máximo en E100, que presenta un valor de **2435,54 K**. De acuerdo con estos datos, no se pueden determinar efectos directos ligados a la inclusión de Bioetanol en la aparición de fatiga térmica u otros fenómenos relacionados, dada la variación mínima y el cambio no proporcional de los valores descritos. Este comportamiento puede darse debido al cambio relativo en los valores de entalpía de las sustancias de acuerdo con el análisis planteado. Los posibles efectos de estas variaciones se describen en la sección 5, vinculando además la repercusión de otras condiciones adicionales propuestas en los demás análisis realizados.

4.4.Efectos en el proceso de Atomización

En algunas versiones de motores de aviación de los fabricantes Lycoming y Continental, tales como el Lycoming O540 y Continental O550, se incluyen sistemas de inyección con el fin de aumentar la eficiencia del proceso de combustión. Es así como se pueden encontrar modelos identificados con la letra “I”, como el Lycoming IO540 o el Continental IO550. Los inyectores empleados para estos motores se encuentran regulados para su operación con combustible de aviación, sin embargo, al incluir mezclas de combustible con etanol, pueden generarse diferentes efectos sobre el proceso de atomización que se lleva a cabo en la tobera de los inyectores, de acuerdo con las variaciones en la viscosidad de la mezcla.

Dentro de los efectos negativos que se pueden contemplar al establecer variaciones en la densidad y viscosidad del combustible, se encuentran la presencia de chorros continuos de mezcla a la salida de la tobera de inyección, gotas de tamaño no regular, atomización incompleta e incluso flujos de Rayleigh. Cuando estos fenómenos se desarrollan a la salida del inyector, la eficiencia de combustión disminuye notablemente, ya que la superficie efectiva de contacto entre el aire y el combustible disminuye y no provee las condiciones físicas que condicionan una correcta formación de la mezcla entre el componente líquido y gaseoso. La relación superficie-masa de la mezcla de aire y combustible que llega al interior de cada cilindro alcanza su valor máximo cuando el diámetro de las gotas de combustible se reduce al mínimo, favoreciendo a demás el proceso de evaporación del componente líquido (Zapata, 2010).

En el caso específico de los inyectores presentes en motores de aviación, los principales factores que afectan la variación del proceso de atomización son el área de salida de la tobera

de inyección, la velocidad de salida del combustible a través de la tobera, la densidad y viscosidad de las mezclas de combustible fósil con Biocombustible, y el número de Reynolds correspondiente al flujo de inyección. El área de salida de la tobera en la punta del inyector puede tomarse de acuerdo con las especificaciones del fabricante que se desee.

Para este caso particular, sobre el motor Lycoming IO540 se emplean toberas creadas por el mismo fabricante con Parte Número P/N LW-18265 en motores con aspiración natural y P/N LW-14540, -18853, -18854 o -18855 en motores Turbocargados - TIO y Turbocargados con engranaje de reducción - TIGO (Lycoming, 2008). El ensamble explosionado de los inyectores se muestra en la Figuras 18 y 19 para los P/N LW-18265 y P/N LW-14540.

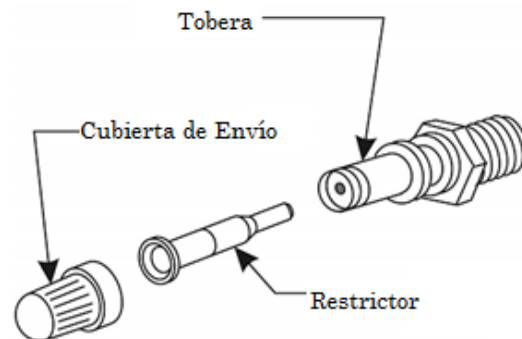


Figura 18. Inyector de Combustible P/N LW-18265

Tomado de Lycoming. Service Instruction No. 1275C

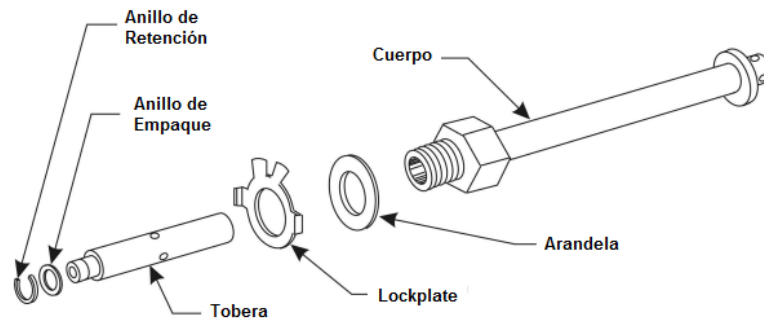


Figura 19. Inyector de Combustible P/N LW-14540

Tomado de Lycoming. Service Instruction No. 1275C

Tomando los valores geométricos de los inyectores empleados en el proceso de inyección directa, se estiman diferentes valores de diámetro de salida de tobera, desde 80 hasta 500 μm , con un área circular de 0,005 mm^2 hasta 0,196 mm^2 . La velocidad de salida del combustible a través del orificio de la tobera varía de acuerdo con la presión en los ductos de alimentación, donde se pueden hallar presiones cercanas a los 340 psi o 2344 kPa por encima de la presión de la cámara, de acuerdo con el modelo de motor analizado. Estimando la velocidad de salida a través de la ecuación simplificada de Bernoulli, se plantea el análisis de la ecuación 21.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_f u_n^2 \quad [21]$$

Tomando ΔP como el diferencial de presión entre la cámara de combustión y la sección interna del inyector, se puede establecer, según con la densidad de cada mezcla (ρ_f), las velocidades u_n máximas y mínimas presentes en el flujo. Para el AvGas 100/130, con una densidad de 689 kg/m^3 , la velocidad de salida es cercana a los 83 m/s; mientras que con etanol puro, cuya densidad aproximada es de 782 kg/m^3 , la velocidad en la punta del inyector decrece hasta 75 m/s.

Seguidamente, al conocer la viscosidad de las diferentes mezclas de combustible aplicables en el proyecto bajo las pruebas realizadas en la sección 4.2 de este documento, se puede encontrar el rango de número de Reynolds presente a la salida del inyector, empleando la ecuación 22.

$$Re = \frac{\rho_f u_n D_n}{\mu_f} \quad [22]$$

Tomando la densidad del combustible ρ_f , la viscosidad dinámica del mismo μ_f y el rango de diámetros encontrados en la tobera D_n , se logra establecer el tipo de régimen de

turbulencia del chorro de inyección. Posteriormente, mediante la ecuación 23, se determina el rango de aplicación del número de Ohnesorge, mediante el cual se logra realizar una caracterización preliminar del tipo de atomización desarrollada por el fluido tras atravesar la tobera, siendo el régimen de Rayleigh un flujo no atomizado de chorro discontinuo opuesto a un régimen atomizado con diámetro de gota adecuado. En las secciones intermedias entre los regímenes de Rayleigh y atomización, se encuentran el primer y segundo régimen aerodinámico.

$$Oh = \frac{\mu_f}{\sqrt{\rho_f \sigma D_n}} \quad [23]$$

En este caso σ simboliza la tensión superficial del combustible. La Figura 20 muestra el comportamiento de los diferentes regímenes de atomización mencionados y la Figura 21 determina la relación entre el número de Reynolds y el Número de Ohnesorge, indicando la localización de cada uno de los regímenes de atomización posiblemente encontrado. Al conocer experimentalmente los parámetros de viscosidad y densidad, así como tomando un valor estimado de la tensión superficial del combustible, es posible establecer si la inclusión de mezclas con etanol en los inyectores seleccionados podrían generar un proceso de atomización incompleta o un régimen de flujo indeseado.

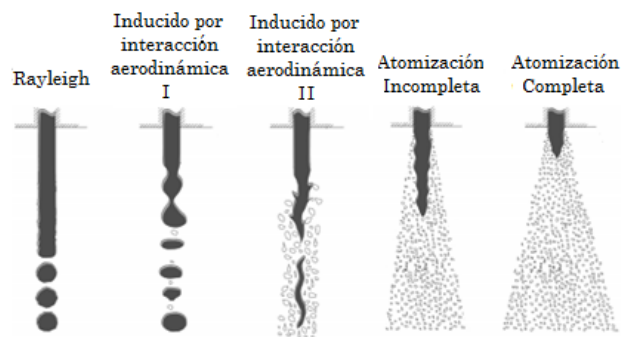


Figura 20. Regímenes de Atomización en un inyector

Tomado de Venegas P. Fenómeno de la cavitación en la inyección

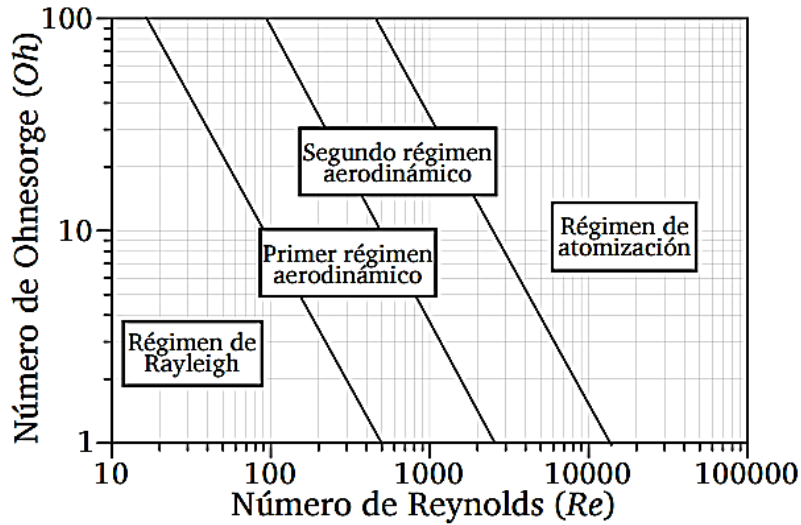


Figura 21. Relación entre Números de Reynolds y Ohnesorge

Tomado de Venegas P. Fenómeno de la cavitación en la inyección

Conociendo la tensión superficial promedio de la gasolina de aviación a 25°C con 18 dinas/cm (Ecosmep, 2006); y la tensión superficial del etanol a la misma temperatura, con 22,3 dinas/cm (Serway, 2009), se puede estimar la tensión superficial de las diferentes mezclas E10, E35 y E50 a partir de relaciones porcentuales de cada componente, estimando un valor de dicha propiedad para cada mezcla de acuerdo con el producto entre la fracción de cada sustancia involucrada y su tensión superficial. La Tabla 15 describe los regímenes de atomización presentes en cada mezcla, a partir de las ecuaciones 21 y 22, y de acuerdo con las propiedades determinadas experimentalmente, aplicadas a un valor de velocidad de 75 m/s, según los valores de presión definidos previamente y un diámetro de agujero de atomización dado por el fabricante de 120 μm en condiciones de temperatura y presión estandarizadas a nivel del mar.

Tabla 15. Regímenes de Atomización Encontrados

Mezcla Analizada	Tensión Superficial (N/m)	Número de Reynolds	Número de Ohnesorge	Régimen
E100	0,0223	6553,07	0,0234	Segundo Régimen Aerodinámico
E50	0,0215	8856,00	0,0171	Segundo Régimen Aerodinámico
E35	0,0195	10470,87	0,0150	Atomización
E10	0,0184	11916,66	0,01344	Atomización
AvGas	0,018	13548,38	0,01182	Atomización

Realizada a partir de Figuras 20 y 21

En este caso se observa que el caso más crítico que podría afectar las condiciones de atomización del combustible se presenta en las mezclas con concentración de alcohol superior a E35, ya que debido a su viscosidad y densidad, generan números de Reynolds por debajo de los valores considerados adecuados para la atomización. El etanol puro, con un número de Reynolds de 6553,07, se considera no apto para este tipo de inyectores a la presión estimada de 340 psi, al igual que la mezcla E50. La mezcla E35 se considera en un régimen de transición desde el segundo régimen aerodinámico hacia un estado de atomización adecuado, sin embargo no se sugiere su uso sin realizar alteraciones en los orificios de inyección o aumentar la presión de línea de combustible. Las condiciones críticas de análisis se encuentran cuando la velocidad de salida disminuye por debajo de 70 m/s en un orificio de inyección de diámetro constante, por lo que se requiere generalmente de un aumento en la presión del combustible por encima de los valores nominales, o un cambio en los inyectores con el fin de reducir el diámetro presente en la tobera.

5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tomando los resultados obtenidos en la sección 4 y realizando la comparación respectiva entre las condiciones de operación previstas para el motor seleccionado, se determinan los valores de potencia teórica obtenida del ciclo termodinámico isentrópico y politrópico, así como los efectos previstos sobre la operación normal del motor de acuerdo con los resultados hallados en las pruebas realizadas sobre las mezclas.

5.1. Rendimiento de cada mezcla en el ciclo termodinámico isentrópico

A partir del algoritmo mostrado en la Figura 9 se establecen los parámetros principales de funcionamiento teórico del motor Lycoming IO540-A en diferentes condiciones de vuelo, con diferentes porcentajes de mezcla de AvGas y Bioetanol. Para este análisis, se estimaron condiciones ambientales a nivel del mar, a 8612 pies (elevación promedio de la ciudad de Bogotá) y a 10500 pies sobre el nivel del mar, bajo condiciones ISA+15. Adicionalmente se estima un porcentaje de reciclado de residuos de 3% y eficiencia mecánica de 86% según lo planteado en la sección de selección de motor y antecedentes.

Las Figuras 22 y 23 muestran la variación de la presión media efectiva, indicada y de frenado, para las diferentes mezclas. En ambos casos se nota un aumento de la misma con la inclusión de Bioetanol. En el caso específico de la IMEP, la presión media efectiva aumenta a nivel del mar desde 1776 kPa hasta 2088 kPa al variar el porcentaje de Etanol de 0 a 100%. Este aumento del 17.56% indica que la presión promedio actuando sobre el pistón durante el ciclo, así como la capacidad de trabajo teórico, se incrementan y el tiempo de servicio de los componentes podría verse afectado, reduciendo el periodo entre cada revisión y/o mantenimiento preventivo sugerido por el fabricante.

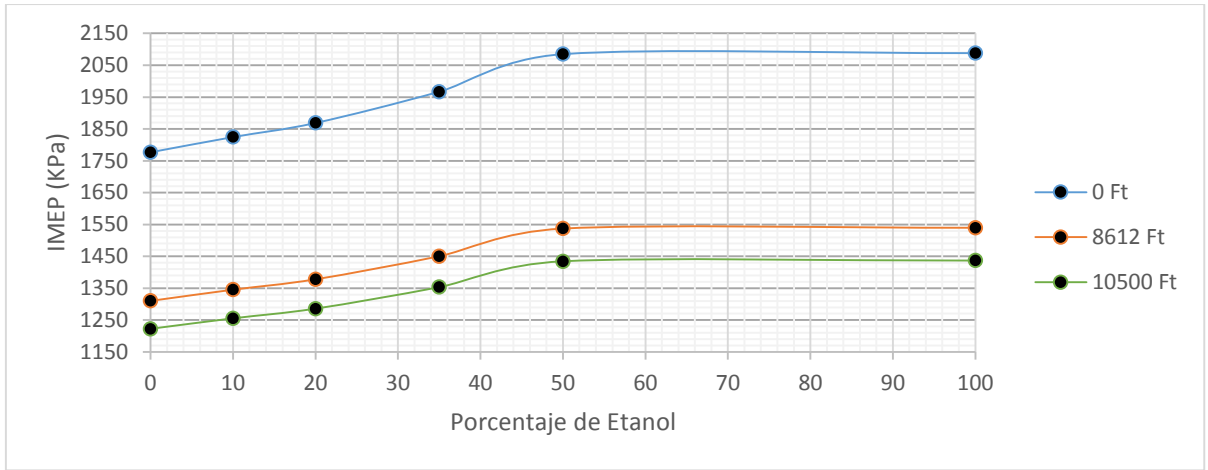


Figura 22. Variación del IMEP en Condiciones Isentrópicas

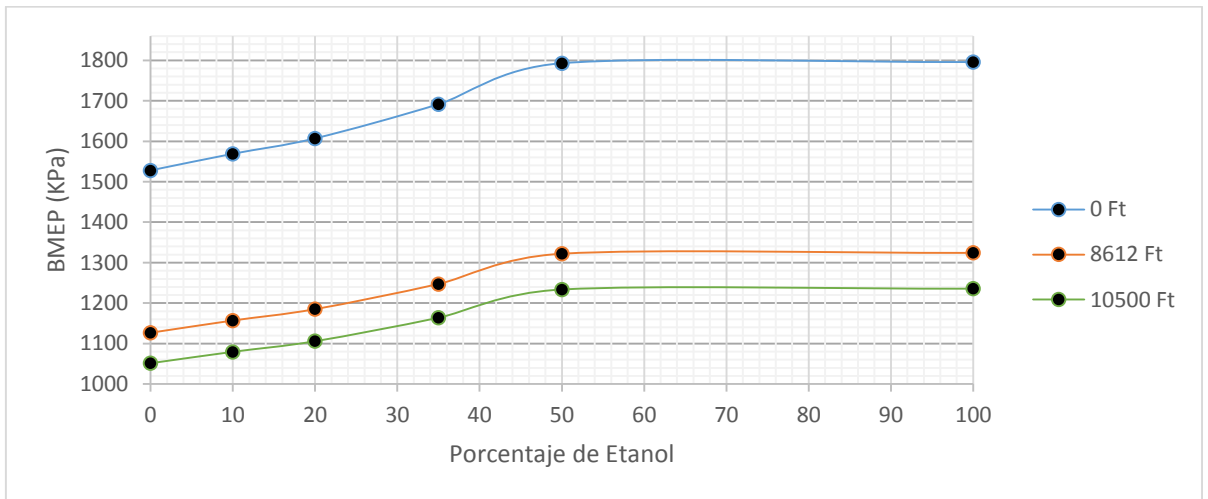


Figura 23. Variación del BMEP en Condiciones Isentrópicas

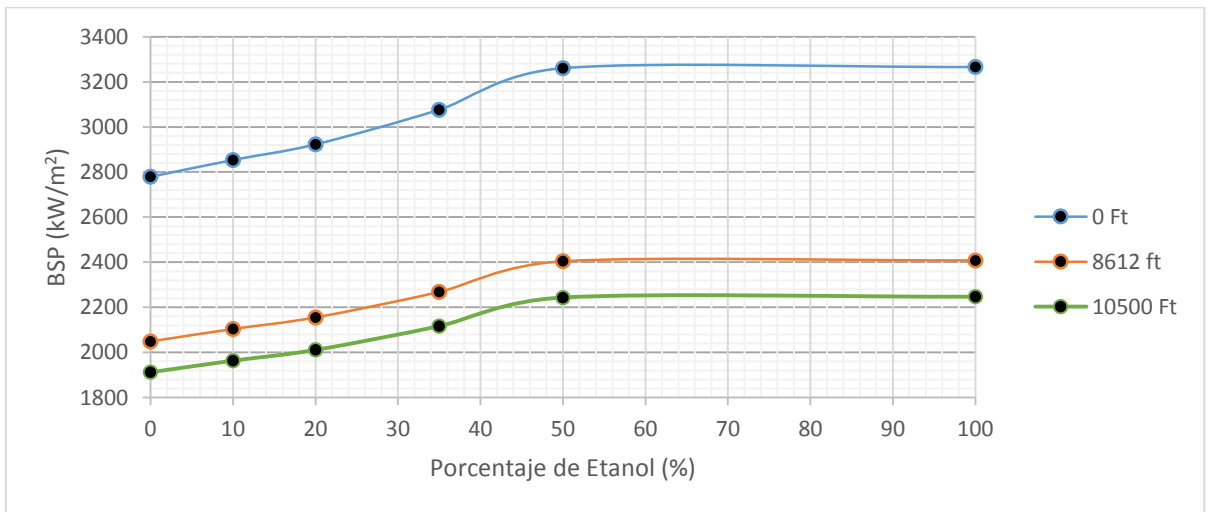


Figura 24. Potencia Específica de Frenado en Condiciones Isentrópicas

En las Figuras 22 y 23 se puede apreciar también el efecto del cambio de altitud en la presión media efectiva, que para el caso del BMEP se reduce desde 1528 kPa con AvGas a nivel del mar, hasta 1051 kPa con el mismo combustible a 10500 pies de altitud. Esta disminución del 31% de la presión promedio sobre el pistón limita la altura de operación de estos motores cuando no se posee un sistema de Turbocargador, a pesar el aumento de presión presentado en mezclas de alta concentración de etanol.

La Potencia específica de frenado o BSP indica la potencia disponible por unidad de área, en referencia al diámetro del pistón. La Figura 24 muestra un comportamiento similar de este parámetro con respecto a la IMEP y a la BMEP, donde el trabajo por unidad de área, a condiciones ISA+15 y 0 MSNM, aumenta desde 4168 a 4898 kW/m². El incremento del 17,5%, similar al de la presión media efectiva, indica que el etanol brinda más potencia al motor y le brinda una mayor capacidad de trabajo, sin embargo se debe establecer el efecto de este incremento en los componentes del motor, especialmente relacionando las causas de fatiga adicional sobre los materiales cuando se emplean mezclas con concentraciones de etanol superiores a E35.

En el caso específico de E10, el incremento en los tres parámetros mencionados es únicamente del 2%, por lo que se considera como despreciable para este análisis. Bajo los porcentajes planteados, el efecto en aumento de potencia del motor o disminución de la vida útil de los componentes por fatiga, permite validar el uso de Etanol en el combustible en porcentajes inferiores al 35%. Sin embargo, se requiere de un análisis del valor de consumo específico de combustible y de porcentaje de reducción de emisiones que declare la utilidad de la inclusión del Biocombustible en la mezcla.

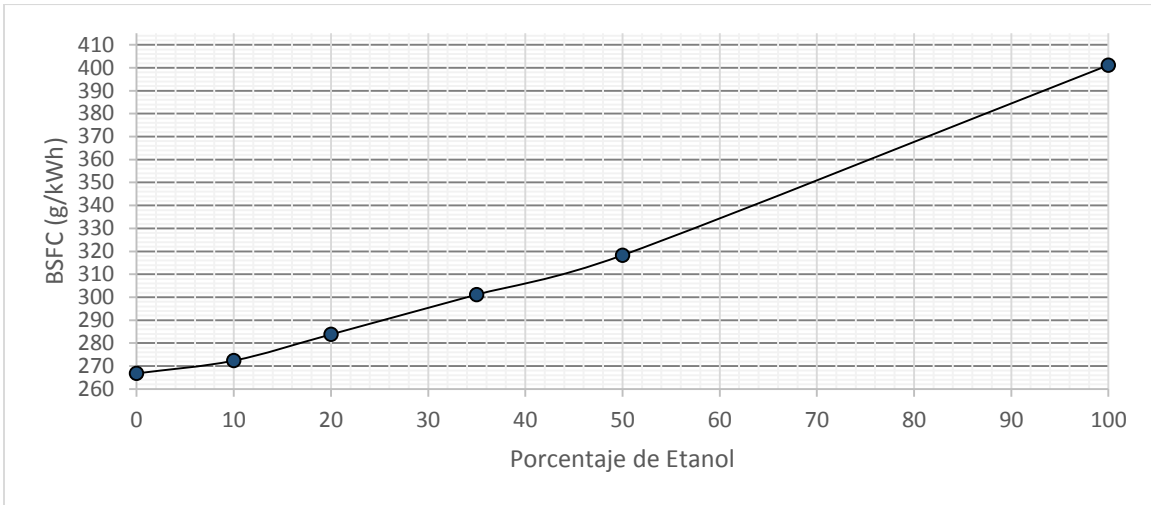


Figura 25. Consumo Específico de Combustible en Condiciones Isentrópicas

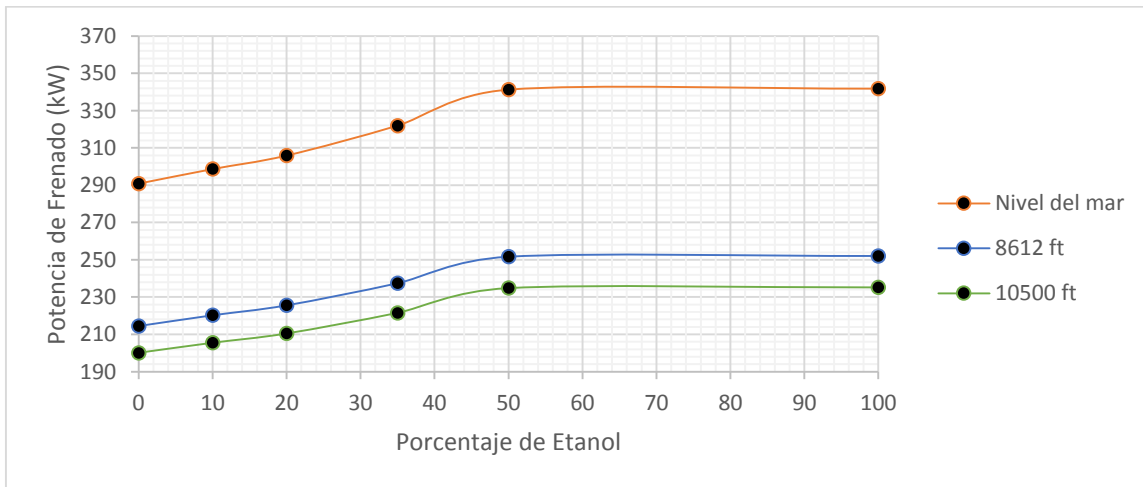


Figura 26. Potencia de Frenado en Condiciones Isentrópicas

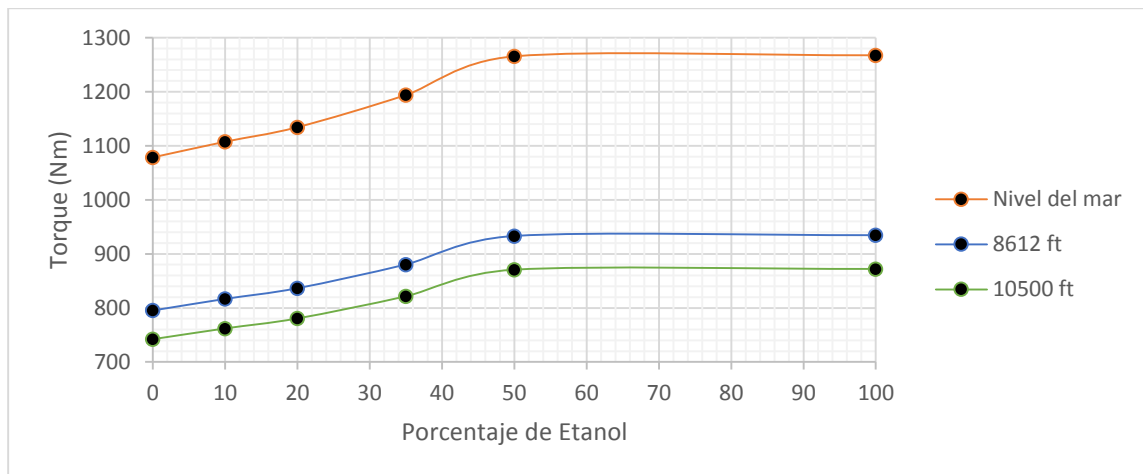


Figura 27. Torque Teórico Producido en Condiciones Isentrópicas

El consumo específico de combustible en condiciones de frenado indica la cantidad de masa de combustible que se requiere por unidad de potencia en un tiempo determinado. En la Figura 25, este parámetro indica los valores de masa de mezcla requeridos por cada Watt en una hora de operación continua del motor. Cuando se emplea AvGas, el BSFC teórico a cualquier altitud es de 266,78 g/kWh, sin embargo para mezclas de E10 y E35, este aumenta a 272,36 g/kWh y 283,79 g/kWh, respectivamente. Este aumento corresponde al 2% y al 6%, sin embargo, al calcular el valor de consumo para etanol puro, se presenta un incremento de hasta 50,3%, por lo que se considera poco práctico en términos de costo de operación.

Este incremento se debe a la disminución del poder calorífico en las mezclas al aplicar Bioetanol, así como a la reducción de la relación AF. Ambos factores indican que se quema una mayor cantidad de combustible para generar la misma potencia en comparación con el combustible fósil, sin embargo, de acuerdo con las Figuras 26 y 27, la potencia máxima que se alcanza es mayor al emplear el combustible alternativo. De esa manera, para combustibles con porcentajes de mezcla superiores a E35, teniendo en cuenta el incremento en el consumo específico de combustible, la cantidad de mezcla requerida en una aeronave para recorrer una misma distancia es mayor, al igual que el peso en los tanques de reserva, por lo que la autonomía de la aeronave puede presentar una reducción.

Adicionalmente, se debe resaltar que el incremento en la potencia de frenado a nivel del mar es del 18% al comparar AvGas 100/130 con Etanol puro. En el cálculo del torque máximo alcanzado a 2575 RPM se obtiene el mismo incremento al comparar ambos combustibles.

En resumen, el análisis de las condiciones isentrópicas demuestra que la inclusión de biocombustibles con base en etanol puede presentar un aumento en la IMEP, la BMEP, la BSP, la Potencia de Frenado y el Torque de hasta un 18%, al operar el motor Lycoming IO-540 a 2575 RPM, bajo condiciones ISA+15 a nivel del mar; sin embargo el aumento del BSFC indica que los costos de operación pueden aumentar o la autonomía de la aeronave puede verse reducida al emplear concentraciones de Bioetanol superiores al 35%. Es así como el análisis isentrópico sugiere el uso de E10, E20 o E35 como mezclas de combustible fósil y alternativo viables en la operación del motor seleccionado. La comparación y selección de mezcla óptima para operación se realiza a través de la matriz de decisión de la sección 5.4.

5.2.Rendimiento de cada mezcla en el ciclo termodinámico Politrópico

El análisis bajo condiciones politrópicas presenta una variación significativa de los parámetros de calor específico empleados en el ciclo termodinámico. De acuerdo con el algoritmo descrito en la Figura 10, para este análisis se toma un valor estimado de las condiciones en cada grado de rotación del cigüeñal, hasta completar un ciclo en 2 revoluciones. Este análisis incluye además, valores de pérdida estimados, de acuerdo con la eficiencia mecánica encontradas en análisis similares descritos en la sección 4.1. Los valores de exponentes y coeficientes politrópicos empleados corresponden a la teoría de Ferrer y Viscarro, mencionada previamente, donde se emplean valores tomados de la ley de Vibe.

Los resultados obtenidos en este caso se muestran en las Figuras 28, 29 y 30; donde se analizan las condiciones de operación a nivel del mar, a 8612 pies y 10500 pies de altitud, de acuerdo con el entorno de operación previsto para este motor.

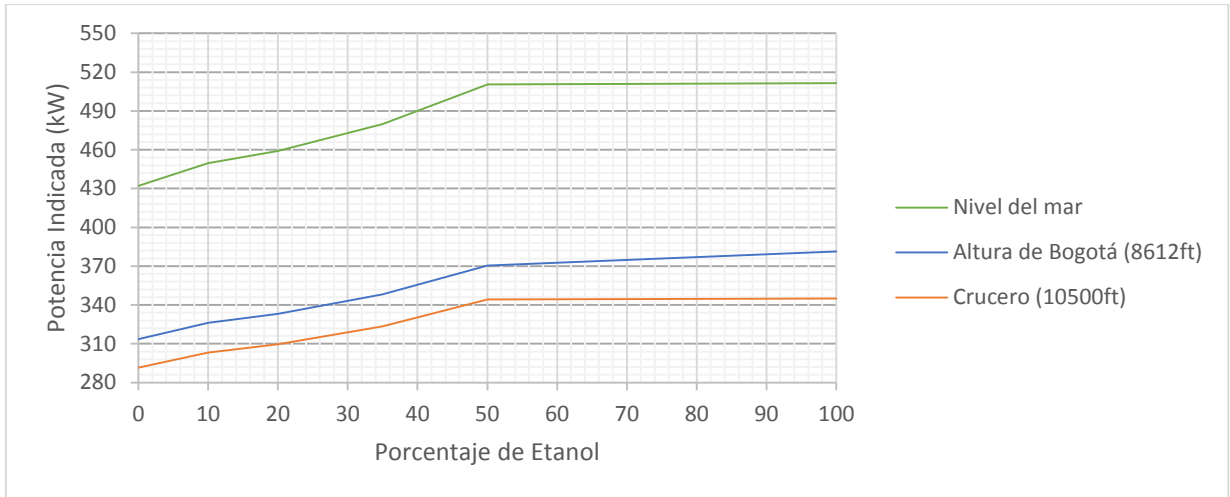


Figura 28. Potencia Indicada en Condiciones Politrópicas

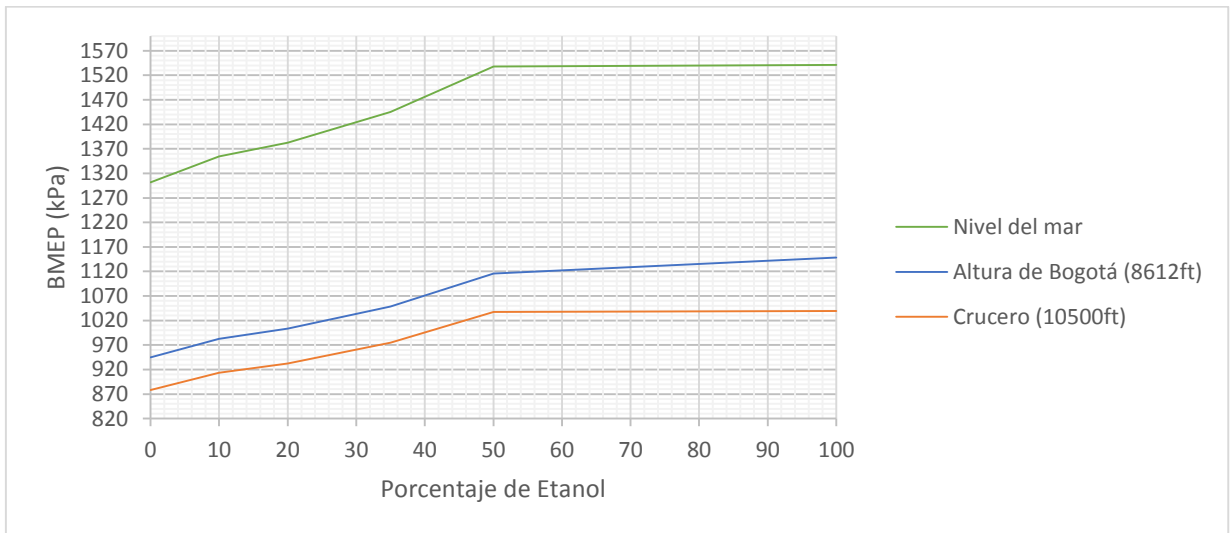


Figura 29. BMEP en Condiciones Isentrópicas

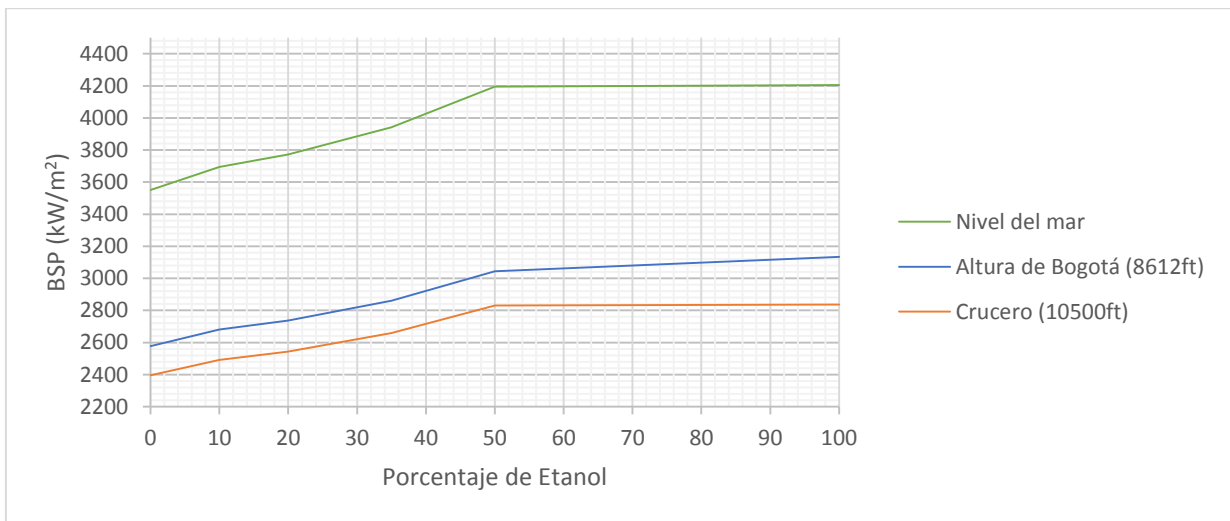


Figura 30. Potencia Específica de Frenado en Condiciones Politrópicas

La potencia indicada máxima en condiciones ISA+15, de acuerdo con la Figura 28, presenta un incremento proporcional a la cantidad de Etanol agregado a la mezcla, iniciando en 432,22 W a nivel del mar, hasta los 511,54 W con E100. Este incremento en la potencia máxima del 18,35%, similar al encontrado en el análisis isentrópico, ratifica el efecto de incremento en el trabajo máximo disponible que se consigue al emplear combustibles alternativos. Sin embargo, como se establece en el análisis previo, este incremento podría provocar efectos relacionados con la reducción de los tiempos de mantenimiento o reparación de los componentes presentes en el motor. La presión media efectiva en condiciones politrópicas, así como la BSP, mostradas en las Figuras 29 y 30, presentan un aumento máximo equivalente del 18,35%, el cual se considera proporcional al aumento en la potencia indicada.

La validación de estos resultados se analiza teniendo en cuenta que la potencia de operación en crucero del motor Lycoming IO540-A, según el manual de operador del fabricante, es de 290 HP (Lycoming, 2006), equivalente a 216 kW. Para el análisis politrópico, dicho valor, calculado para el AvGas 100/130 a 10500 pies de altitud, es de 291,5 kW indicados, que equivalen a una potencia de frenado de 250 kW al asumir una eficiencia mecánica de 86%.

La diferencia de 34 kW entre el valor de potencia de frenado politrópico y el valor de potencia brindado por el fabricante se debe a las pérdidas adicionales generadas en el motor real, donde la energía se disipa a través de transferencia de calor al entorno, ruido, etc. A partir de esto, para este planteamiento teórico, se considera que los resultados del análisis del ciclo politrópico son viables y concluyentes de acuerdo con las limitaciones planteadas.

Otros parámetros tenidos en cuenta en el algoritmo planteado son el BSFC, o consumo específico de combustible de frenado en condición politrópica y la OPD, o Salida de potencia por desplazamiento.

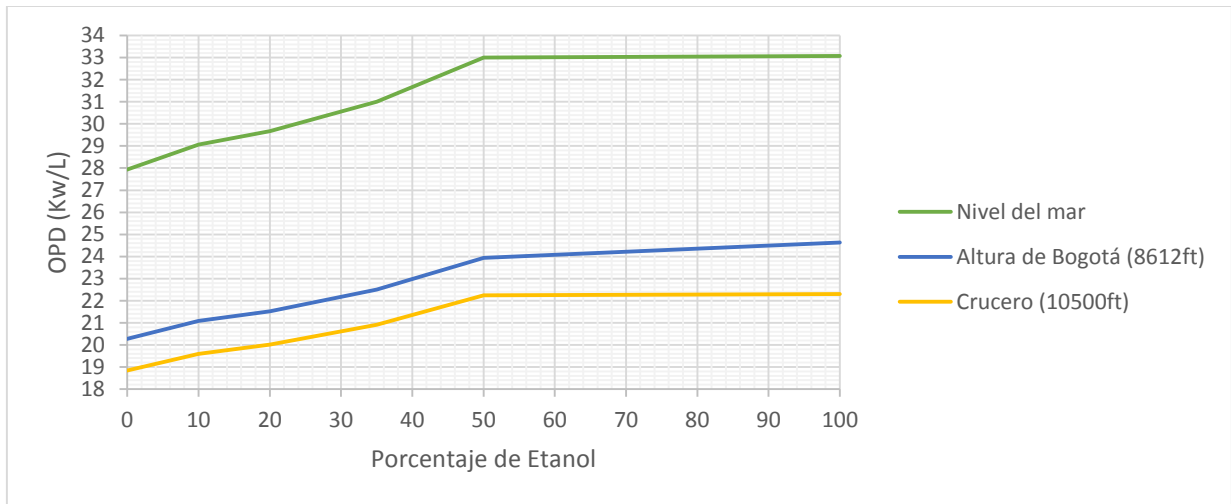


Figura 31. OPD en Condiciones Politrópicas

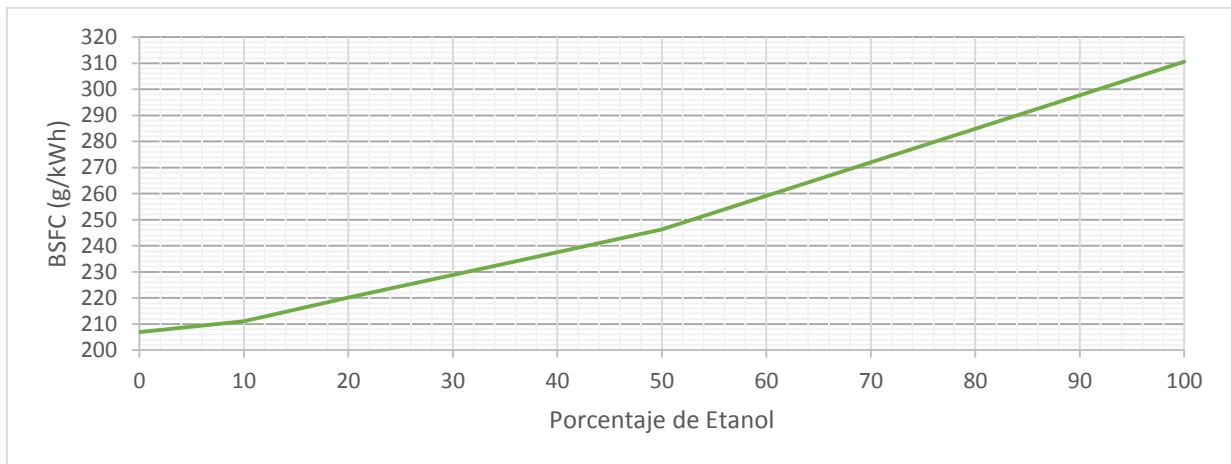


Figura 32. BSFC en Condiciones Politrópicas

La Figura 31 muestra la OPD calculada para las diferentes etapas de análisis planteadas del ciclo Otto. De acuerdo con la curva hallada, el incremento del porcentaje de etanol en la mezcla genera que se produzca una mayor salida de potencia por cada litro desplazado por el pistón en el interior del cilindro. Al emplear AvGas 100/130, la OPD en condiciones ISA+15 a cero MSNM es de 27,93 kW/L; al emplear E10 y E35, este valor

aumenta en un 4% y 11% respectivamente. Cuando se analiza el ciclo completamente con Etanol puro, el aumento de la OPD es del 19%. Este incremento de la potencia por litro desplazado concuerda con los resultados previos, y a través del parámetro de salida de potencia por unidad de desplazamiento, se puede realizar la comparación del motor seleccionado con otros similares en análisis posteriores.

El BSFC en la Figura 32, bajo condiciones politrópicas, presenta un comportamiento similar al encontrado en el ciclo isentrópico, sin embargo las condiciones politrópicas indican que el gasto de combustible por unidad de potencia en un periodo de tiempo determinado es menor al calculado previamente. En el análisis isentrópico, el consumo de combustible fósil a nivel del mar fue de 266 g/kW.h mientras que el ciclo politrópico sugiere que es de 207 g/kWh. A pesar de esto, la variación entre el valor máximo y mínimo encontrado para una misma condición de operación en ambos casos se encuentra cercano al 50%, siendo el Etanol puro la sustancia que presenta el mayor consumo específico. Para E10 y E35, el incremento del BSFC es del 2% y 11%, respectivamente. El análisis conjunto de todos los efectos mencionados se enuncia en la sección 5.4, a través de la matriz de decisión que establece la viabilidad de aplicación de cada mezcla.

5.3.Emisiones contaminantes

La determinación de la cantidad de emisiones contaminantes depositadas en la atmosfera toma relevancia de acuerdo con las medidas impuestas por la normatividad internacional con el fin de mitigar el deterioro ambiental presentado a lo largo de las últimas décadas. La preocupación por la contaminación atmosférica durante los años cincuenta no era de gran importancia, sin embargo hacia los años setenta, este aspecto se convirtió en una problemática de acuerdo con el incremento en el número de operaciones de aeronaves, siendo

esta una de las causas contribuyentes al desarrollo del efecto invernadero. En el caso específico de los MCIAs de aviación, se presentan diferentes tipos de emisiones contaminantes, dentro de las que se encuentran CO₂, CO y NO_x. Para este estudio, se analiza únicamente la cantidad de CO₂ emitida al ambiente en el proceso de combustión y el efecto que tiene la inclusión de etanol en el mismo, asumiendo una combustión completa de los componentes. Sin embargo, para estudios posteriores, es necesario incluir estimaciones en la generación de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, otros hidrocarburos y material particulado mediante cálculos teóricos o caracterización experimental de los gases de salida.

De ese modo, a partir de los resultados obtenidos en los balances estequiométricos de la sección 4.3, se obtiene la cantidad de CO₂ emitido por kmol de combustible quemado. En la Tabla 16 se muestra la cantidad de kmoles de gas contaminante generadas y su equivalencia en kg, donde se evidencia que la inclusión de etanol puede reducir las emisiones de CO₂ hasta un 76%, desde 363,44 kg a 88 kg por kmol de mezcla.

Tabla 16. Emisiones Contaminantes de Dióxido de Carbono por Mol de Combustible

Nombre de la Mezcla	Emisiones contaminantes (kmol de CO₂)	Emisiones contaminantes CO₂ (kg)	Porcentaje de Reducción
AvGas 100/130	8,26	363,44	0%
E10	7,19	316,36	13%
E20	6,23	274,12	24%
E35	5,22	229,68	36%
E50	4,17	183,48	49%
E100	2	88	76%

Datos tomados de análisis estequiométrico

La Figura 33 muestra el comportamiento exponencial decreciente de acuerdo con el aumento de Etanol agregado. Este comportamiento coincide con el detallado en la sección de antecedentes y, a pesar de que corresponde a una aproximación teórica, sugiere un comportamiento similar en la realidad, justificando la aplicación de biocombustibles en diferentes tipos de vehículo a nivel internacional. Sin embargo, los demás parámetros de rendimiento encontrados permiten validar los resultados descritos y verificar su aplicación en diferentes MCIA de aviación.

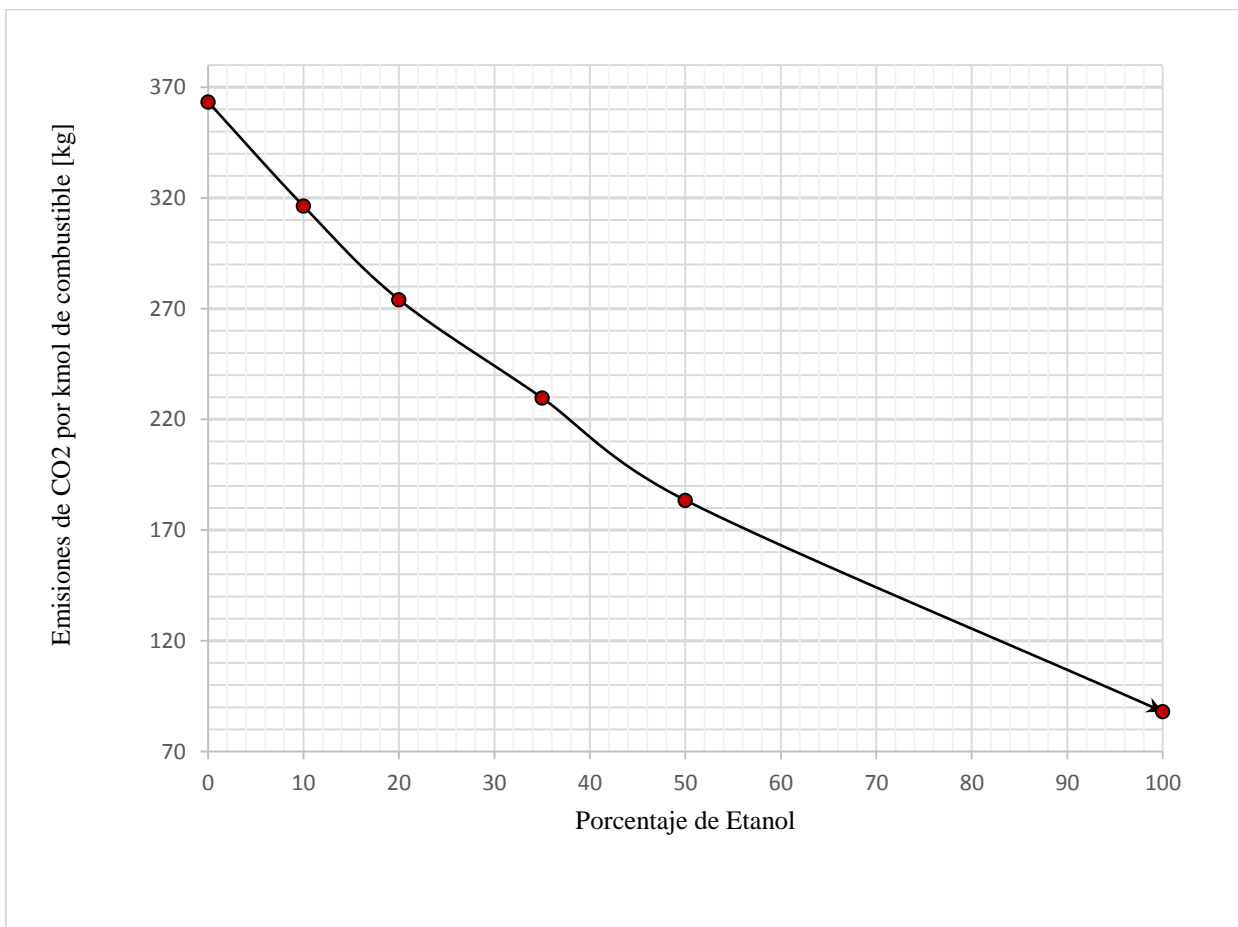


Figura 33. Reducción de emisiones de CO2

Realizada a partir de Tabla16

5.4.Adaptabilidad en motores a pistón de aviación

Con el fin de evaluar la aplicación de las diferentes mezclas planteadas en el motor seleccionado, se resumen todos los parámetros analizados y se comparan sus resultados a través de un esquema de matriz de decisión. La etapa inicial contempla los efectos encontrados de acuerdo con los resultados de las pruebas realizadas a cada mezcla.

La prueba de determinación del poder calorífico demostró que el HHV de cada mezcla disminuye con la inclusión de Bioetanol; sin embargo, el efecto directo de esta variación se analiza en los resultados generados por los algoritmos de desarrollo del ciclo. De manera general, el poder calorífico puede disminuir hasta un 33% al comparar el combustible fósil con el etanol puro.

Para la prueba de determinación de densidad y gravedad específica, se estableció que la cantidad de masa por unidad de volumen de cada mezcla presenta un aumento que puede afectar diferentes parámetros de operación de vuelo de una aeronave. Al comparar el AvGas con Etanol, el aumento máximo de la densidad es del 14%. Este incremento afecta directamente el peso de combustible en los tanques de almacenamiento de la aeronave, reduciendo la carga paga permisible en vuelo. Este efecto es cuantificable para diferentes aeronaves, tal como el Cessna 172N con 250 Litros de capacidad de combustibles en las alas, cuyo peso de combustible con AvGas 100/130 es de 172,2 kg, mientras que con E10 y E35 es de 175 kg y 179,7 kg, respectivamente. Este aumento en el peso de combustible es de 1,5% para E10 y 4,5% para E35, y corresponden a la reducción de la capacidad de carga neta.

La curva de destilación obtenida representa en este análisis un factor decisivo que sugiere un análisis posterior de los efectos reales del biocombustible en el motor. A pesar de que este análisis corresponde a una aproximación teórica, los valores de temperatura final en

el proceso de destilación disminuyen drásticamente en las mezclas de E35 y E50, por lo que la creación de tapones de vapor en los conductos del combustible podría generar fallas en el funcionamiento del motor y apagados del mismo en vuelo. Este parámetro debe ser estudiado a fondo de acuerdo con los trabajos futuros propuestos en la sección 6, aunque, según el comportamiento de las curvas, no se sugiere el uso de combustible con concentración superior a E35 en motores a pistón de aviación. Para mezclas con porcentaje de etanol entre 10% y 35%, se deben realizar estudios experimentales bajo diferentes condiciones de operación con el fin de establecer la presencia de bloqueos por vaporización.

Los efectos del aumento de la viscosidad podrían afectar el proceso de atomización a la salida de los inyectores en los motores tipo IO, ya que este parámetro sugiere que al incrementar la viscosidad cinemática, el régimen de atomización puede cambiar, desde una sección de atomización adecuada hacia un régimen aerodinámico inadecuado, con presencia de gotas o chorros. El estudio sugiere que específicamente se podría presentar un cambio de régimen de atomización hacia uno inadecuado en mezclas con concentración de etanol superior a E35, por lo que se sugiere una alteración en los inyectores o en la presión del combustible cuando se emplea etanol. Estas alteraciones no aplican al emplear mezclas de E10 y E20 según los valores de número de Reynolds hallados.

Los resultados encontrados en el estudio de la relación AF sugieren además que la presencia de Biocombustible en la mezcla requiere de una menor cantidad de aire para quemar una cantidad específica de combustible. Esto implica que para realizar la oxidación estequiométrica del reactivo se requiere de más combustible en el mismo volumen del cilindro, por lo que el consumo de combustible tiende a incrementar. La verificación de este

efecto se realiza a partir del comportamiento de las gráficas de consumo específico de combustible, que presenta una tangente a la curva con pendiente positiva.

La potencia entregada, IMPE, BMEP, BSP y OPD, en condiciones isentrópicas y politrópicas tienden a aumentar de 17% a 18% al agregar el combustible alternativo, por lo que se puede obtener un mejor desempeño del motor, aunque el tiempo de vida de los componentes, así como los periodos de mantenimiento, podrían reducirse según las restricciones de esfuerzo del material de los mismos.

Tomando estos efectos mencionados en cuenta, se establece la matriz de decisión de acuerdo con los porcentajes de aumento o disminución de cada parámetro. La valoración cualitativa de los resultados se realiza a partir de una escala cromática de tres tonos, donde el tono verde indica que el efecto de la mezcla es positivo, el tono amarillo indica que no existe un efecto directo relacionado con el uso de la mezcla, y el tono rojo indica que la mezcla relacionada presenta efectos negativos que pueden ser potencialmente peligrosos para el funcionamiento normal del motor. El incremento superior al 10% de los parámetros ligados a la potencia de salida se asume como un efecto negativo, ya que se desconocen los efectos que se podrían presentar en los componentes en términos estructurales. Se debe tener en cuenta que este análisis corresponde a una estimación teórica que forma parte de un proceso de verificación de adaptabilidad de los Biocombustibles en motores a pistón de aviación, por lo que los resultados planteados no validan el uso directo de ningún tipo de combustible sobre los modelos de motor mencionados en este documento, sino que sugieren el desarrollo de estudios posteriores sobre mezclas especificadas como viables. Los porcentajes referidos en la Figura 34 se realizan en comparación con los valores de cada parámetro hallado en el análisis de AvGas en condiciones ambientales a nivel del mar con ISA+15. La disminución

de temperatura de llama adiabática se asume como positiva hasta 10%, de acuerdo con la disminución de la fatiga térmica sobre los materiales del motor, mientras que los valores superiores al 10% en el incremento de este valor se asumen como negativos. Es necesario resaltar que estas estimaciones en los efectos de la variación de temperatura de llama adiabática forman parte de un proceso teórico que requiere de una validación experimental. También se resalta que el proceso de selección y adaptabilidad se realiza descartando cualquier mezcla con efectos negativos estimados durante la operación normal del motor.

Tabla 17. Matriz de Decisión de Adaptabilidad

Mezcla Parámetro	E10	E20	E35	E50	E100
Variación en el peso del Combustible	+1,5%	+2,7%	+4,3%	+7,1%	+13,4%
Probabilidad de Vapor Locking	Muy Baja	Baja	Alta	Muy Alta	No Determinada
Variación de Temperatura de Llama Adiabática	+0,2%	-0,9%	+0,4%	+1,3%	1,9%
Régimen de Atomización	Atomizado	Atomizado	Atomizado	Segundo Régimen Aerodinámico	Segundo Régimen Aerodinámico
IMEP (Isentrópico)	+2,6%	+5,1%	+10,6%	+17,3%	+17,6%
BMEP (Politrópico)	+4%	+6,2%	+11%	+18,1%	+18,3%
BSP (Politrópico)	+4,3%	+6,1%	+11,1%	+18%	+18,8%
BSFC (Politrópico)	+2%	+6,4%	+12,7%	+19%	+50,1%
Potencia de Frenado (Isentrópico)	+2,7%	+5,2%	+10,7%	+17,4%	+17,6%
OPD	+4,1%	+6,5%	+11%	+18%	+18,7%
Emisiones de CO₂	-13%	-24%	-36%	-49%	-76%

Es así como, empleando la Tabla 17, se puede establecer que las mezclas E10 y E20 se consideran teóricamente viables para su operación en motores Lycoming IO540-A, hasta una

altura máxima de operación de 10500 pies. La mezcla E35 no se consideraría adaptable debido a la posible formación de tapones de vapor en los conductos de combustible, además del posible cambio en las condiciones de atomización en los inyectores, y según los parámetros de selección descritos previamente.

Es necesario destacar que el uso de E10 y E20 permite reducir las emisiones de CO₂ en un 13% y 24%, con un aumento mínimo en el consumo específico de combustible. Para el caso del E10 este aumento corresponde al 2%, mientras que para E20 es del 6,4%. Adicionalmente, el uso de estos combustibles puede incrementar la potencia máxima obtenida en el motor hasta un 6%, sin afectar en gran medida la integridad de los componentes tales como el cilindro, pistón o culatas. Ninguna de estas dos mezclas presenta efectos negativos relacionados con el proceso de atomización a pesar del incremento en la viscosidad. También se establece que el efecto de incremento en el peso del combustible en los tanques y reducción de la carga paga es solamente del 2,7%, basado en el incremento de la densidad de combustible.

Finalmente, para la implementación de este tipo de combustibles se sugiere el desarrollo de un estudio sobre las mezclas mencionadas en un motor real bajo diferentes condiciones de operación. Esta fase se menciona en la sección 6 de trabajos futuros.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Los motores a pistón empleados en aviación comercial, tales como el Lycoming IO540-A, emplean generalmente AvGas para su operación normal, sin embargo, la implementación de combustibles alternativos puede reducir las emisiones de dióxido de carbono hasta en un 76%. Según los resultados encontrados, se establece que las mezclas con concentraciones de etanol superiores al 20% (E20) podrían resultar peligrosas para la operación del motor en condiciones atmosféricas de vuelo en crucero, debido a la posible generación de “Vapor Lock” o tapones de vapor, derivada de la disminución de la presión de vapor promedio sobre la mezcla, así como de la temperatura del punto de ebullición de acuerdo con la curva de destilación hallada.

De esa forma, el estudio teórico establece que las mezclas E10 y E20 son aplicables a motores a pistón de aviación sin generar posibles inconvenientes en la operación del ciclo. La mezcla E10 presenta un aumento de la IMPE, BMEP y BSP del 2,6% al 4%, según la fase de vuelo. El motor analizado posee un valor de potencia máxima de frenado de hasta 256 kW con esta mezcla, superior a los 250kW estimados en condiciones politrópicas con atmosfera ISA +15 a 10500 pies al emplear AvGas 100/130. El aumento del consumo específico de combustible es del 2,03% con una reducción de emisión de CO₂ del 13%.

La mezcla E20 presenta un aumento del 5% al 6% en la IMEP, BMEP y BSP. Para el motor Lycoming IO540-A, la potencia de frenado en condiciones politrópicas puede llegar hasta 266 kW en condiciones de vuelo a 10500 pies sobre el nivel del mar, con un aumento del consumo específico de combustible del 6,4% y una reducción de emisión de dióxido de Carbono del 24%.

Este proyecto desarrollado corresponde a un análisis teórico, por lo que se proponen como trabajo futuro un estudio del efecto real de las mezclas E10 y E20 en la operación experimental de un motor a pistón empleado en aviación, preferiblemente de alta aplicabilidad a las aeronaves que operan en la actualidad sobre el territorio nacional.

De esta forma se pueden verificar los resultados teóricos obtenidos y continuar con el proceso de implementación de combustibles alternativos en este sector específico de la aviación. Los análisis realizados deben contemplar diferentes fases de vuelo, simuladas inicialmente en tierra mediante algún método de variación de la presión de entrada, o realizando la prueba en diferentes ciudades con variación en su elevación.

Además es importante determinar los efectos en el almacenamiento del combustible alternativo, específicamente en términos de flamabilidad y volatilidad, ya que la disminución de la presión de saturación de la mezcla podría inducir pérdidas en los tanques de combustible y requerir de una posible modificación de las válvulas de regulación de presión en las aeronaves. También las medidas de seguridad en tierra deben ser estudiadas y modificadas de acuerdo con los resultados encontrados y con las exigencias descritas por las normas vigentes de almacenamiento de sustancias inflamables y/o peligrosas.

También, para estudios posteriores, se pueden analizar experimentalmente los residuos presentados en la combustión, con el fin de caracterizar el flujo de gases de salida e identificar otras sustancias contaminantes que deterioran la calidad del ambiente, tales como CO, NO_x material particulado e hidrocarburos restantes.

Finalmente, tras concluir los estudios requeridos, la implementación práctica de mezclas de AvGas con etanol conlleva a un proceso de certificación de operación con combustibles alternativos en motores a pistón de aviación. Esto permitiría generar en Colombia un sector

industrial competitivo en la producción de combustibles alternativos como fuente energética para la región, aplicada directamente al sector aeronáutico, además de contribuir a la reducción de las emisiones contaminantes que actualmente deterioran el equilibrio natural del planeta y las condiciones de vida en el mismo.

7. BIBLIOGRAFÍA

PERCZYK, D. (2007A) Biocombustibles y Bonos de Carbono: Una sociedad viable. *CEO Argentina. Hot Topics*. Año 3, N°5, 2007. Pag. 17.

PERCZYK, D. (2007B) Biocombustibles y Bonos de Carbono: Una sociedad viable. *CEO Argentina. Hot Topics*. Año 3, N°5, 2007. Pag. 18.

CORPOICA, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (2008). *Biblioteca Agropecuaria de Colombia: Bibliografía sobre Biocombustibles*. Colombia

UPME, Unidad de Planeación Minero Energética. Ministerio de Minas y Energía (2009), *Biocombustibles en Colombia*, Bogotá, Pag. 5.

MINMINAS, Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia (2007). *El programa de Biocombustibles en Colombia*. Pag. 7.

GARCÍA, H. CALDERON, (2012) L. *Evaluación de la política de biocombustibles en Colombia*. Pag. 18.

DUFEY, A. (2010). *Estudio regional sobre la economía de los biocombustibles para los países de América Latina y el Caribe (Documento para discusión)*. Cepal.

SANJID, A. MASJUKI, H.H., KALAM, M.A. (2013A). Impact of palm, mustard, waste cooking oil and Callophyllum inophyllum on performance and emissions of CI engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27, 664-682, Pag. 669.

SANJID, A. MASJUKI, H.H., KALAM, M.A. (2013B) Impact of palm, mustard, waste cooking oil and Callophyllum inophyllum on performance and emissions of CI engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27, 664-682, Pag. 677.

IICA, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2007) Preguntas y Respuestas más frecuentes sobre biocombustibles. *I-Bioenergía – Combustibles*. San José. Pag 18.

CAMARILLO M, Antonio Jesús (2001). *Estudio de la combustión de un motor monocilindrico de ignición alimentado con mezclas Gasolina-Etanol Anhidro e Hidratado a distintas concentraciones*. Tesis de Maestría en Ingeniería Energética. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Universidad Veracruzana. Pag. 105.

HORTA N. Luis Augusto (2006). *Costos y Precios para Etanol Combustible en América Central. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL*. ONU. Mexico, Pag 16.

YÜCESU H., Topgül T. (2006) Effect of ethanol-gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in different compression ratios. *Applied Thermal Engineering* 26 2272-2278.

HE B., Wang J., Hao J., Yan X., Xiao J. (2003A). A study on emissions characteristics of an EFI engine with ethanol blended gasoline fuels. *Atmospheric Environment* 37 949-957.

HE B., Wang J., Hao J., Yan X., Xiao J. (2003B). A study on emissions characteristics of an EFI engine with ethanol blended gasoline fuels. *Atmospheric Environment* 37 949-957.

CARVALHO, Mariante Armando, (2008) *Bioetanol de caña de azúcar: Eenergía para el desarrollo sostenible*, BNDES-CGEE-FAO-CEPAL. Pag. 42.

MANTILLA G., Juan Miguel (2010). *Modelado de la combustión de mezclas gasolina-etanol en motores de combustión interna*. Tesis de doctorado en Ingeniería y sistemas energéticos. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Pág. 126.

REPSOL, *Aviación, Atención al cliente, Preguntas frecuentes, Gasolina de automoción en vez de gasolina AvGas 100LL*. España, 2014. Recuperado de http://www.repsol.com/es_es/productos-servicios/aviacion/atencion-al-cliente/preguntas-frecuentes

NEIVA EMBRAER (2008). Perez Jarvis B. Avance en el Etanol. Brasil. Recuperado de: <http://www.ingenierosinc.com/avance-en-el-etanol/>

SAE (1983). Society of Automotive Engineers, Inc. AVIATION FUEL PROPERTIES. General Publications Department. Pag 2-53.

D.A. Reay (1981). APPLIED THERMAL ENGINEERING. Elsevier. Pag 37-49.

RAC, Reglamento Aeronáutico Colombiano (2015). Parte 11. Normas Ambientales para la Aviación. UAEAC, Oficina de Transporte Aéreo, Grupo de Normas Aeronáuticas.

GARCIA R. (2001). COMBUSTION Y COMBUSTIBLES. Teoría de la combustión. Pag 12-14.

ESPARZA F. Combustibles Sólidos, Líquidos y Gaseosos. Bomberos de Navarra Nafarroako Suhiltzaileak. Pag. 27-29.

E.T.S. de Ingenieros Industriales. TECNOLOGIA DE LA COMBUSTIÓN. Dpto. Ingeniería Energética y Fluidomecánica. Pag. 2-6.

Shell España, S.A (Agosto 1999). Ficha de datos de seguridad AVGAS 100. Primera edición. Pag 2-4.

Aviación ULM. (2013) Motor alternativo combustibles. Recuperado de: www.aviacionulm.com/gasolinas.html.

CARVALHO, Mariante Armando, (2008B). Bioetanol de caña de azúcar: Energía para el desarrollo sostenible, BNDES-CGEE-FAO-CEPAL. Pag. 42.

REPSOL (2014B), Tipos de Combustible. JP. Tomado de: www.aprendeavolar.info/?page_ID=514

ABENGOA, Bioingeniería (2013). The global biotech ethanol company. Informe de Actividades. Páginas 17,18,19.

HEYWOOD, John B. (1988) Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw Hill series in Mechanical Engineering. Capítulo 1. Pag 1- 7.

PENNINGER, Antal. (1995). Internal Combustion Engines (Heat Engines II). Technical University of Budapest. Faculty of Mechanical Engineering. Lecture notes.

GUANIPA Gelys, (2009). Ciclo Brayton. Guía de estudio N°4. UNEFM. Programa de Ingeniería Mecánica. Termodinámica Aplicada. Pag 2.

CENGEL Yunus, BOLES Michael. (2006) Thermodynamics. An engineering approach. 5th Edition. Editorial McGraw Hill. Capítulo 9. Pag. 494-498.

HEYWOOD John. (1988 B). Internal Combustión Engine Fundamentals. McGraw Hill Series in Mechanical Engineering. Capítulo 5. Pag. 169-172.

SORUŞBAY Cem, (2012). Engine Characteristics. Internal Combustion Engines. Class Notes. Istanbul Technical University. Pag 4-6.

UST, Y; SAHIN B; SAFA A. (2011) The effects of cycle temperature and cycle pressure ratios on the performance of and Irreversible Otto cycle. Acta Physica Polonica A. Vol. 120. N 3. Pag 414-415.

HEYWOOD, John B. (1988 C) Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw Hill series in Mechanical Engineering. Capítulo 1. Pag 52- 53.

EPA Environmental Protection Agency (2011), “Final Report of the small Business Adocacy Review Panel on Control of emissions from nonroad Large spark ignition engines, recreational engines and Highway motorcycles”. EPA420-R-01-049. Air and Radiation. Unites States. Pag. 13

HACIŞEVKİ, Hasan. (2013). Valves and Valve Mechanism. Class Lecture. Eatern Mediterranean University. Mechanical Engineering. Pag. 4-5

PULKRABEK, Willar. (1993). “Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine”. Prentice Hall Editorial. Capítulo 1. Pág. 1-35.

FERRER, M. Viscarro J. B. (2007). Modelo de Cálculo y Aplicación Informática para la Fase Cerrada de un Motor Alternativo de Combustión Interna Ciclo Otto. Tesis de Especialización. Universidad Politécnica de Cataluña, Pág 21 -47.

KNUTESON, Randy. (1999). “Boosting your Knowledge of turbocharging” Aircraft Maintenance Technology. The leading Publication for the Professional Maintenance Team. Parte 1 de 2. Pág. 2-3

AIS COLOMBIA, 2013. Reglamento Especial-Despegues Aeropuerto El Dorado Bogotá-C25/13. A20/13. 19 de Noviembre de 2013. Dirección de Servicios a la Navegación Aérea. Grupo de Información Aeronáutica. CNA Bogotá.

RODADO, Onalis Isabel. (2014). “Análisis de consecuencias por la prohibición de operar aeronaves a pistón en el Aeropuerto El Dorado”. Trabajo de Análisis Aplicado. Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ciencias Económicas. Trabajo bajo opción de grado en seminario de grado. Bogotá. Pág. 21 – 22.

MCDONALD, Sandy; PEPLER, Isabel L. (2004). "Chapter 10. Airmanship".From The Ground Up (Millennium ed.). Ottawa, Ontario, Canada: Aviation Publishers Co. Limited. Pág. 265.

SHELL, Statics (2006). Safety Data Sheet. AVGAS 100LL. Version 2.1. Regulation 1907/2006/EC.

ZAPATA, Luis Daniel. PASTOR, José Vicente (2010). Caracterización de los proceso de Inyección-Combustión Diésel Mediante Visualización y Procesado Digital de Imágenes. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de máquinas y motores térmicos. Valencia, Pág. 44.

LYCOMING, A Textron Company (2008). Service Instruction No.1275C. Cleaning Fuel Injector Nozzles. General Aviation Manufacturers Association. Revision C. Williamsport, PA. U.S.A. Pág 3-6.

MITROGLOU, N. NOURI J. GAVAISES M. (2006). Spray Characteristics of a multi-hole injector for direct- injection gasoline engines. School of engineering and mathematical science. City University London UK. Pag. 16.

ECOSMEP, 2006. Ficha de datos de seguridad. Reglamento CE N 1907/2006-REACH. AvGas 100LL. Revisión 1. Pág 4.

SERWAY Z&Y, 2009. Física para ciencias e ingeniería. Física Universitaria. Edición 7. Tabla de propiedades de tensión superficial. Capítulo 1. Pág 27.

VENEGAS PEREIRA, O. H (2014); “Estudio del fenómeno de la Cavitación en la Inyección Diesel Mediante la Visualización del Flujo Interno en Orificios Transparentes”. Tesis Doctoral. Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Universidad Politécnica de Valencia. Páginas 60 - 61.

LYCOMING, A Textron Company (2006). Lycoming IO-540 Series. Operator´s Manual. 4th edition. Part No.60297-10. Section 2-2.

FULL MECÁNICA (2014). Para todos los amantes de la tecnología mecánica. Tomado de: <http://www.fullmecanica.com/definiciones/p/1393-presion-media-efectiva-al-freno>.

GARRO. Roberto (2007). Purgado de motores diésel. Para náuticos. Tomado de: <http://www.paranauticos.com/Notas/Tecnicas/Motores/motores-indice.htm>.

BANISH. Greg. CAR TECK. (2007). Engine Management Advanced Tuning.

MEGANEBOY. Dani (2014). El estudio del motor. Aficionados a la mecánica. Tomado de: www.aficionadosalamecanica.net/cur_mec_cilindrada.htm.

DAWLAK. Wladslaw Roman (1984). Funcionamiento de Motores de Combustión Interna. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey Linares, N.L. Pág. 16-20.

GLOSARIO

- *Biela*: Es un elemento mecánico del motor que une el pistón con el cigüeñal. Su función es transmitir la energía de la presión de los gases que actúan sobre el pistón hacia cigüeñal, transformando el movimiento lineal en rotatorio.
- *Calor ingresado al ciclo (Q_{in})*: Hace referencia al calor que se determina a partir del poder calorífico superior y la masa de la combustible, teniendo en cuenta la eficiencia de combustión.
- *Cámara de combustión*: Es el espacio en el interior del cilindro que se encuentra cuando el pistón está en BDC y las válvulas se encuentran en posición cerrada. En ella se realiza la reacción de oxidación de la mezcla de aire-combustible.
- *Carrera*: Es la distancia que recorre el pistón desde el punto muerto inferior hasta el punto muerto superior.
- *Cigüeñal*: Hace referencia al eje acodado que se conecta a la biela y que restringe el movimiento alterno, transformándolo en una rotación uniforme. Adicionalmente, brinda el eje principal de salida de potencia del motor y se conecta a otros mecanismos relacionados, tales como el árbol de levas.
- *Consumo específico de combustible de frenado (BSFC)*: Se define como la cantidad de combustible consumida por el motor para producir potencia de frenado durante un periodo de tiempo determinado. Para que la operación de un motor sea más rentable se requiere de un menor consumo específico de combustible.
- *Eficiencia térmica (η_t)*: Es el cociente entre el trabajo del ciclo termodinámico (W_{net}) y el calor inducido (Q_{in}). Determina que parte de la energía calórica se convierte en trabajo.

- *Eficiencia volumétrica (η_v):* Es la relación del peso real de aire inducido entre el peso teórico de aire con el aire a temperatura y presión atmosféricas.
- *Motor alternativo de combustión interna:* Es un motor endotérmico volumétrico, el cual funciona a partir del volumen variable que es generado en la cámara de combustión. Este tipo de motor transforma el movimiento lineal alternativo en rotativo continuo.
- *Pistón:* Es un componente de los motores alternativos que se desplaza a través de las paredes de un cilindro. Este transmite la energía a los gases de la combustión hacia la biela mediante un movimiento alternativo dentro del cilindro.
- *Potencia indicada (\dot{W}_i):* Se define como la potencia total desarrollada por el motor sobre los émbolos, sus unidades pueden estar dadas en HP o kW.
- *Presión media efectiva (mep):* Hace referencia a la presión promedio que ejercen los gases durante la carrera de expansión en el motor.
- *Presión media efectiva de frenado (bmp):* Se define como la presión promedio que actúa sobre el pistón para que se pueda producir la potencia necesaria para frenar el motor. Este parámetro es de gran relevancia ya que permite evidenciar la eficiencia de la salida de potencia de un motor en relación al peso y desplazamiento volumétrico.
- *Presión media efectiva indicada ($imep$):* Es la presión teórica constante que se ejerce durante cada carrera de potencia del motor para producir una potencia igual a la indicada.
- *Punto muerto inferior (BDC):* Es la posición en la que el pistón se encuentra en su parte más alejada de la culata, o en el punto más bajo de la carrera dentro del cilindro.
- *Punto muerto superior (TDC):* Es el punto más cercano a la culata que alcanza el pistón. En este punto se genera el volumen mínimo en el recinto de la combustión.

- *Relación de compresión:* Es el cociente que determina la proporción de volumen que se ha comprimido dentro del cilindro, es decir, el volumen máximo entre el volumen mínimo.
- *Sistema de inyección:* Es el sistema que permite el ingreso del combustible al cilindro cuando no se posee un carburador. Se emplea cuando la mezcla Aire-Combustible se realiza en el interior del cilindro, y no previamente. Los efectos de atomización generados por el sistema de inyección incrementan la eficiencia de combustión al generar una mayor área de quemado en las gotas de combustible.
- *Torque (τ):* Es la medida de la tendencia de una fuerza a rotar sobre un eje de salida. Es el producto cruz de la distancia de un brazo de palanca y una fuerza excéntrica.
- *Trabajo de frenado (W_b):* Corresponde al trabajo del motor obtenido a partir del efecto de una eficiencia mecánica. Generalmente se obtiene experimentalmente a través de un dispositivo de frenado del motor que determina el trabajo y potencia realizados por la máquina.
- *Trabajo neto del ciclo (W_{net}):* Corresponde al trabajo total producido en la fase de expansión, menos el trabajo requerido para completar la fase de compresión. Este trabajo neto permite estimar la salida en el cigüeñal.
- *Velocidad media del pistón (\bar{U}_p):* Es la velocidad promedio de los motores a pistón, se encuentra en función de la carrera y de las RPM.
- *Volumen libre (V_c):* Es el volumen presente entre el pistón y el cilindro cuando el pistón se encuentra en el punto muerto superior (TDC).
- *Volumen máximo por cilindro (V_1):* Es el volumen existente dentro del recinto de combustión cuando el pistón se encuentra en el punto muerto inferior (BDC).

ANEXO 1

Procedimiento de Realización de la Prueba Estandarizada de Determinación de Poder Calorífico para Combustibles de Hidrocarburos Líquidos mediante Bomba Calorimétrica (Norma ASTM D240 -02)

Esta prueba estandarizada permite determinar el poder calorífico de combustibles líquidos compuestos por hidrocarburos. Todos los procedimientos, indicaciones, equipos sugeridos y referencias son tomados directamente de la Norma ASTM D240-02, revisada por el departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norteamérica. Dentro de la terminología empleada se utilizan los siguientes términos:

- *Poder Calorífico Bruto (Gross Heat of Combustion)*: Cantidad de energía liberada cuando una unidad de masa de combustible es quemada en un depósito a volumen constante, siendo sus productos gaseosos y condensando el agua resultante. Se toma como referencia 25°C de temperatura inicial del combustible y del oxígeno, así como se emplea esta misma temperatura como referencia final de los productos de combustión. En unidades SI se mide en *MJ/Kg*. Se representa como Q_g .
- *Poder Calorífico Neto (Gross Heat of Combustion)*: Cantidad de energía liberada cuando una unidad de masa de combustible es quemada a presión constante, siendo todos sus productos gaseosos, incluyendo el agua. En unidades SI se mide en *MJ/Kg*. Se representa como Q_n .

La relación entre el Q_g y el Q_n se expresa a través de la ecuación 1.A1, Siendo H el porcentaje de masa de hidrógeno en la muestra.

$$Q_n(\text{net}, 25^\circ\text{C}) = Q_g(\text{gross}, 25^\circ\text{C}) - 0.2122H \quad [1.A1]$$

Resumen del procedimiento

El poder calorífico se determina en este método quemando una muestra previamente pesada en una bomba calorimétrica oxigenada bajo condiciones controladas. El calor de combustión es

medido a través de la temperatura presentada antes, durante y después de la ignición, con la inclusión de correcciones termodinámicas y de transferencia de calor. Adicionalmente, se pueden emplear sistemas de aislamiento adiabático o isotérmico para bombas calorimétricas.

- La temperatura en la prueba se mide en grados Celsius.
- El tiempo durante la prueba se mide en minutos y segundos.
- La masa de combustible se mide en gramos.

Equipo y Elementos Necesarios

- Cuarto de pruebas con condiciones controlables.
- Bomba de Oxígeno de 350 o 400 mL y resistencia de presurización de 3000 psi.
- Calorímetro metálico.
- Chaqueta de aislamiento para Bomba Calorimétrica.
- Termómetros aprobados para prueba ASTM D240.
- Cronómetro.
- Circuito y Cable de Encendido.
- Purificador de Oxígeno.
- Cinta sensible a la presión.
- Gelatina de calorimetría o Aceite Vegetal.

Procedimiento

- *Determinación de masa:* Controle la masa de la muestra, de modo que el incremento de la temperatura durante su combustión sea igual al presentado en la combustión de 0,9 o 1,1 gramos de ácido benzoico. Si se tiene un valor aproximado del calor de combustión (Q_s), se puede determinar la masa en gramos (g) a partir de la ecuación 2.A1.

$$g = \frac{26,454}{Q_s} \quad [2.A1]$$

- *Encintado*: Ponga un trozo de cinta sensible a la presión a lo largo de la parte superior del recipiente para combustible. Tome el peso del recipiente y la cinta. Posteriormente llene una jeringa hipodérmica con la muestra en un volumen equivalente al mostrado en la ecuación 3.A1, donde V hace referencia al volumen de la muestra, W es la energía equivalente determinada en el calorímetro (de acuerdo con el calorímetro empleado) y D es la densidad de la muestra.

$$V = \frac{0,00032W}{DQ_s} \quad [3.A1]$$

Deposite la muestra en el recipiente, insertando la punta de la aguja de la jeringa a través del disco de cinta. Posteriormente cubra el agujero y selle bien la sección. Tome el peso del recipiente lleno.

- Agregue una capsula de *Gelatina* o *Aceite Mineral*. Si se espera una combustión pobre, agregue varias gotas de aceite mineral.
- *Agua en la bomba*: Agregue 1.0 mL de agua en la bomba.
- *Oxígeno*: Cargue la bomba con Oxígeno hasta 3.0 MPa manométricos, teniendo las precauciones denotadas en el manual de operación o en la norma ASTM.
- *Agua en el calorímetro*: Ajuste la temperatura del agua en el calorímetro antes de realizar la medición de peso. Para una chaqueta de agua isotérmica use de 1,6 a 2°C por debajo de la temperatura de la chaqueta de agua. Para una chaqueta de agua adiabática, use de 1 a 1,4°C por debajo de la temperatura de la habitación.
- Use la misma cantidad de agua destilada o des-ionizada en el recipiente del calorímetro en cada prueba. La cantidad de agua usada usualmente (2000g) puede ser determinada pesando el calorímetro lleno y realizado la sustracción de peso.
- *Observaciones con chaqueta de agua isotérmica*: Ensamble el calorímetro en la chaqueta de agua e inicie el agitador. Deje pasar 5 minutos y registre las temperaturas del calorímetro en intervalos de 1 minuto por 5 minutos. Encienda la carga al inicio del sexto minuto y registre la temperatura.

Sume a esta temperatura un 60% del incremento de temperatura esperado y registre el tiempo cuando se alcance esta temperatura mencionada. Después del periodo de incremento de temperatura (4 o 5 minutos), registre las temperaturas en intervalos de 1 minutos hasta que la resta de las lecturas sea constante por 5 minutos.

- *Observaciones con chaqueta de agua adiabática:* Ensamble el calorímetro en la chaqueta de agua e inicie el agitador. Ajuste la temperatura de la chaqueta de agua un poco por debajo de la del calorímetro. Deje transcurrir 5 minutos. Registre la temperatura inicial y encienda la carga. Ajuste la temperatura de la chaqueta de agua para que sea igual a la del calorímetro durante la el incremento de la temperatura, manteniendo estas dos temperaturas iguales. Tome las medidas de temperatura del calorímetro con intervalos de 1 minuto hasta que la temperatura sea constante en tres lecturas consecutivas. Registre dicho valor como temperatura final.
- *Análisis de los contenidos de la bomba:* Remueva la bomba y libere la presión a una tasa uniforme, de modo que tarde no menos de 1 minuto. Examine el interior para determinar la presencia de residuos por combustión incompleta. Descarte la prueba si encuentra residuos de combustible sin quemar o depósitos.
- Registre la cantidad de cable quemado de los electrodos del calorímetro.

Cálculos Consecuentes

- *Incremento de la temperatura en chaqueta de agua isotérmica:* usando los datos obtenidos, determine el aumento de temperatura de acuerdo con la ecuación 4.A1.

$$t = t_c - t_a - r_1(b - a) - r_2(c - b) \quad [4.A1]$$

Donde t es el incremento corregido de la temperatura, a es el tiempo al que ocurre la ignición, b es el tiempo donde la temperatura alcanza un 60% del total esperado, c es el tiempo al inicio del periodo en el que la tasa de cambio de la temperatura es constante, t_a hace referencia a la temperatura al tiempo de la ignición, t_c es la temperatura en el tiempo c , r_1 es la tasa de incremento de la temperatura después de la ignición (en °C por minuto) y r_2 es la tasa de temperatura ala que

incrementa la temperatura después de c , siendo negativa presentarse un descenso. Se deben hacer las correcciones consecuentes de acuerdo con los termómetros empleados.

- *Incremento de la temperatura en chaqueta de agua adiabática* Usando los datos registrados, determine el aumento en la temperatura en la chaqueta, de acuerdo con la ecuación 5.A1.

$$t = t_f - t_a \quad [5.A1]$$

Donde t_f hace referencia a la temperatura final de equilibrio, corregida por termómetro. La nomenclatura empleada en la sección de cálculos para chaqueta de agua isotérmica se mantiene en la ecuación 5.A1.

- *Poder calorífico Bruto:* Determine el poder calorífico bruto empleando la ecuación 6.A1.

$$Q_g = \frac{tW - e_1 - e_2 - e_3 - e_4}{1000g} \quad [6.A1]$$

Donde t hace referencia a la temperatura corregida, W es la energía equivalente del calorímetro en MJ/°C, g es la masa de la muestra en gramos y e_i hace referencia a correcciones por formación de ácidos nítricos (1), formación de ácido sulfúrico (2), quemado de cableado (3) y quemado de cinta y gelatina (4). Estos factores de correcciones se encuentran detallados en la norma y en el manual de uso del calorímetro.

- *Poder calorífico Neto:* Calcule el poder calorífico neto a partir de la ecuación 1.A1. Si desconoce la cantidad de hidrógeno en las muestras, el poder calorífico neto debe hallarse de acuerdo con la ecuación 7.A1.

$$Q_n = 10,025 + (0,7195)Q_g \quad [7.A1]$$

ANEXO 2

Procedimiento de Realización de la Prueba Estandarizada de Densidad y Densidad Relativa (Gravedad Específica) de líquidos a través de Picnómetro Bingham (Norma ASTM D1217 -93)

Esta prueba estandarizada permite medir la densidad de productos derivados del petróleo o hidrocarburos puros. A demás proporciona un cálculo para la conversión de densidad en densidad relativa (gravedad específica). Los valores obtenidos son descritos en unidades de sistema internacional. Todos los procedimientos, indicaciones, equipos sugeridos y referencias son tomados directamente de la Norma ASTM D1217-93, revisada por el departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norteamérica. Dentro de la terminología utilizada se encuentra:

- *Densidad*: Es el peso en vacío de una unidad de volumen de cualquiera material a cierta temperatura.
- *Densidad relativa (gravedad específica)*: Es la relación entre la densidad de un material a t_1 con la densidad del agua a t_2 , donde la temperatura de referencia es 4.00°C.

Resumen del procedimiento

Como primera medida, el líquido o mezcla es introducido en el picnómetro. Este debe estar en condiciones ambientales controladas. Posteriormente se calcula la densidad o densidad relativa a partir de la masa registrada en una balanza analítica. Teniendo en cuenta la masa de agua que es necesaria para abastecer el picnómetro durante la calibración a una temperatura especificada, se determina la gravedad específica y opcionalmente se corrigen ambos pesos de acuerdo con el efecto de flotabilidad del aire circundante.

Equipos y Elementos Necesarios

- Picnómetro Tipo-Bingham, el cual no debe exceder los 30g (Ver Figura 1-A2).
- Baños a temperatura constante.
- Termómetro.
- Jeringa hipodérmica de 30 mL.

- Aguja de drenaje.
- Solvente para limpieza.
- Balanza.
- Pesa.

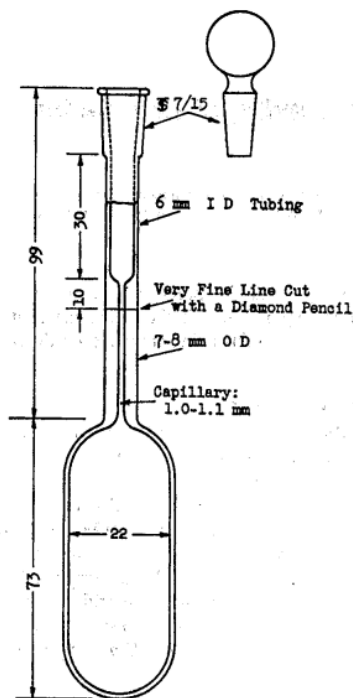


Figura 1-A2. Picnómetro tipo Bingham
 Tomado de la Norma ASTM D1217 -93. Sección 6.

Procedimiento

- Se toma el picnómetro limpio y se registra su masa. Posteriormente se deja enfriar la muestra de 5 a 10°C y se toman 30 ml de muestra, transferidos al picnómetro por medio de la boquilla. Se deben evitar burbujas sobre la mezcla y si se presenta alguna retirarlas haciendo uso de la jeringa.
- Cierre el picnómetro con la tapa de vidrio y sumérgalo en el baño a temperatura constante hasta el punto de referencia calibrado de la temperatura deseada, no dejar que el líquido se expanda más de 10 mm sobre la línea de calibración.
- Para obtener una mayor visibilidad de la muestra remueva cualquier líquido adherido a las paredes debajo de la marca de referencia.

- Retire la tapa de vidrio y remover el picnómetro del baño a temperatura constante, lavar la superficie con acetona y secarla con el solvente químico.
- Colocar el picnómetro sobre la balanza y tomar nota de la temperatura, presión barométrica y humedad relativa.

Cálculos consecuentes

Se calcula la densidad verdadera por medio de la ecuación 1.A2:

$$\text{Density, } \frac{g}{mL} \text{ at } ^\circ C = W_s \left(1 + \left(\frac{d_a}{d_s} \right) - \left(\frac{d_a}{d_{wt}} \right) \right) \frac{w}{W_w} \left(1 + \left(\frac{d_a}{d_w} \right) - \left(\frac{d_a}{d_{wt}} \right) \right) \quad [1.A2]$$

En donde W_s , es el peso de la muestra contenido en el picnómetro, W_w peso del agua contenido en el picómetro a la temperatura de calibración, d_w representa la densidad del agua a la temperatura de calibración, d_a densidad del aire, d_{wt} Densidad de los pesos usados en la muestra y d_s aproximadamente hace referencia a la densidad de la muestra. Si se llega a presentar algún cambio en la muestra, el cálculo del peso W_s debe ser corregido por la diferencia en la flotabilidad del aire por medio de la ecuación 2.A2:

$$W_s = W_{PS}^2 - \frac{W_{P'} \left(1 + \left(\frac{d'_a}{2.2} \right) - \left(\frac{d'_{wt}}{d'_{wt}} \right) \right)}{1 + \left(\frac{d_a^2}{2.2} \right) - \left(\frac{d_a^2}{d'_{wt}} \right)} \quad [2.A2]$$

En donde W_{PS}^2 es el peso del picnómetro contenido en la muestra en la segunda prueba, $W_{P'}$ peso del picnómetro de la primera muestra, d'_a densidad del aire cuando se tiene el picnómetro sin ningún contenido, d_a^2 densidad del aire con la muestra contenida en el picnómetro.

Para calcular la densidad o densidad relativa (gravedad específica) a cualquier temperatura, t , teniendo en cuenta la temperatura de calibración, t_c , se divide el valor obtenido en la ecuación 3.A2 entre 10.1 o 10.2.

$$1 + 9.6 \times 10^{-6}(t - t_c) \quad [3.A2]$$

ANEXO 3

Procedimiento de Realización de la Prueba Estandarizada de Destilación de Productos de Petróleo (Norma ASTM D86 -95)

Esta prueba estandarizada detalla el proceso de destilación para gasolinas de motor, gasolinas de aviación, combustibles de turbina, especies con puntos de ebullición especiales, naftas, querosenos, aceites, alcoholes y productos similares. Todos los procedimientos, indicaciones, equipos sugeridos y referencias son tomados directamente de la Norma ASTM D86-95, revisada por el departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norteamérica. Dentro de la terminología empleada se utilizan los siguientes términos:

- *Puntos de descomposición:* Lectura del termómetro que coincide con la primera indicación de descomposición térmica del líquido en el matraz.
- *Punto seco:* Lectura del termómetro que se observa en el instante que la última gota de líquido se evapora del punto más bajo del matraz. Las gotas presentes en las secciones laterales del matraz son despreciadas.
- *Punto final o punto de ebullición último:* Lectura máxima observada en el termómetro obtenido en la prueba. Esta ocurre generalmente después de la evaporación de todo el líquido en el fondo del matraz.
- *Temperatura de ebullición inicial:* Lectura del termómetro observada en el instante en que la primera gota condensada cae de la tubería de condensación.
- *Porcentaje evaporado:* Suma del porcentaje recuperado y del porcentaje perdido.
- *Porcentaje perdido:* Diferencia entre el cien por ciento y el porcentaje total recuperado.
- *Porcentaje recuperado:* Volumen en mililitros de la condensación observada en la probeta de recepción, en conexión con una lectura simultánea de la temperatura.
- *Porcentaje total recuperado:* Porcentaje combinado del condensado recuperado y del residuo en el frasco.

- *Lectura del termómetro:* Temperatura del vapor saturado medido en el cuello del matraz por debajo del tubo de vapor.

Resumen del procedimiento

Una muestra de 100 mL es destilada bajo condiciones prescritas apropiadas para su naturaleza. Se realizan observaciones sistemáticas de las lecturas del termómetro y del volumen condensado, y de estos datos se calculan y reportan los resultados de la prueba. Las características de volatilidad de los hidrocarburos tienen un efecto importante en la seguridad y desempeño de los mismos, especialmente en el caso de los combustibles. La volatilidad es el factor determinante de la tendencia a producir vapores potencialmente explosivos. También afecta el arranque, calentamiento y tendencia a generar tapones de vapor en los motores de pistón que operan a alta temperatura o altura. La presencia de componentes con un alto punto de ebullición puede afectar además el grado de formación de depósitos sólidos.

Equipo y Elementos Necesarios

- Matraz de 100 mL para gasolinas con salida de vapor lateral (Ver Figura 2-A3).
- Condensador y Baño refrigerante.
- Escudo de protección.
- Calentador.
- Soporte para matraz con borde de 32 mm.
- Cilindro o probeta graduada.
- Sensor de Temperatura (Termómetros 7C, 8C, 5C o 6C).
- Sellador de escape de vapor – Tapón agujerado.

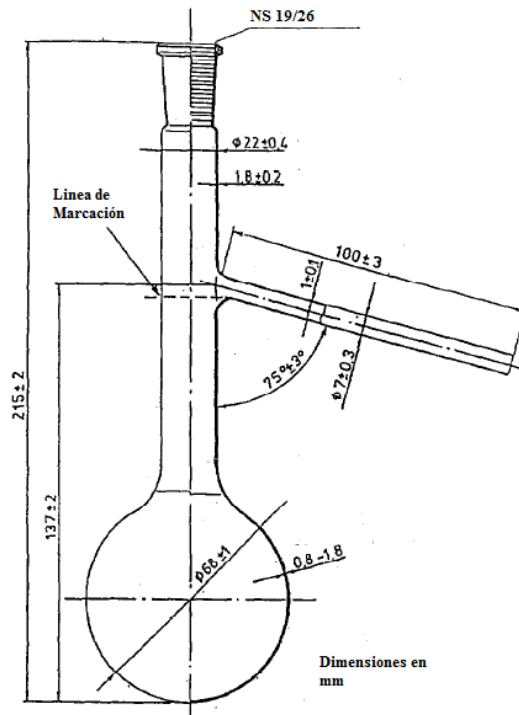


Figura 1-A3. Matraz de destilación.

Tomado de la Norma ASTM D86-95. Sección 6.

Procedimiento

- Con el equipo preparado, el termómetro localizado con el borde de medición en la salida de vapor y el sistema sellado y conectado el condensador, se aplica calor al matraz de destilación con el contenido en su interior; de modo que el tiempo entre la aplicación inicial de calor y el punto de ebullición inicial sea de 4 a 5 minutos.
- Observe y registre el punto de ebullición inicial.
- Regule la temperatura de modo que se presente una tasa promedio de condensación de 4 o 5 mL por minuto.
- Repita cualquier destilación que no cumpla con las condiciones establecidas en la norma.
- Si observa un punto de descomposición, no continúe con el procedimiento de calentamiento.

- En el intervalo entre el punto de ebullición inicial y el final de la destilación, observe y registre los datos necesarios. Los datos registrados deben incluir las lecturas de termómetro junto con los porcentajes de destilación recuperados.
- Observe y registre el punto seco y finalice el calentamiento de la muestra.
- Cuando el matraz se encuentre frío, deposite su contenido en una probeta graduada de 5 mL.

Cálculos Consecuentes

Para cada prueba calcule y reporte cualquier dato requerido por la especificación escogida. Reporte todos los porcentajes y lecturas de termómetro realizadas, así como la presión barométrica presentada. Las lecturas de termómetro pueden ser corregidas a valores de presión de 101,3 kPa; excepto cuando las especificaciones del producto lo indiquen. El reporte debe registrar la presión del ambiente y detallar si se realizan o no las correcciones relacionadas. Cuando se realicen correcciones de termómetro basado en 101,3 kPa, use la ecuación 1.A3:

$$C_c = 0,0009(101,3 - P_k)(273 + t_c) \quad [1.A3]$$

Donde se toma C_c como la corrección que debe ser agregada algebraicamente al valor observado de la temperatura t_c que se desea corregir, medida en grados Celsius. Para las ecuaciones de corrección por presión, P_k indica el valor de la presión ambiental en kPa.

De manera similar se pueden realizar correcciones sobre las pérdidas registradas, empleando la ecuación 2.A3:

$$L_c = \left(\frac{L - 0,499287}{13,65651 - 0,12492914P_k} \right) + 0,4997299 \quad [2.A3]$$

Teniendo L_c como el porcentaje de pérdida corregido y L como la pérdida registrada en la prueba. Al aplicar esta corrección sobre las pérdidas registradas, se presenta una variación en el porcentaje de destilado recuperado, de acuerdo con la ecuación 3.A3:

$$R_c = R + (L - L_c) \quad [3.A3]$$

Con R_c como el porcentaje de condensado recuperado y R como el porcentaje recuperado registrado durante la prueba.

Las correcciones mencionadas no deben ser necesariamente realizadas, mientras se realice la indicación de la presión ambiental predominante en la que se realizó la prueba. Se debe mencionar la realización u omisión de estas correcciones mencionadas en la Norma ASTM D86-95, con el fin de establecer las condiciones de uso de los resultados. Otras correcciones pueden ser incluidas en la prueba de acuerdo con el tipo de producto empleado en la destilación, las características del termómetro empleado y las pérdidas o fugas presentes en el sistema. Estas correcciones adicionales se detallan en el documento oficial de la norma emitido por la ASTM, junto con métodos gráficos de corrección permitidos.

ANEXO 4

Procedimiento de Realización de la Prueba Estandarizada de Viscosidad para Líquidos Transparentes y Opacos (Viscosidad cinemática y dinámica) (Norma ASTM D445 -65)

Por medio de este método se permite determinar la viscosidad cinemática de productos líquidos derivados del petróleo, de tipo transparente u opaco, tomando el tiempo de fluido de un volumen fijo de un líquido a una temperatura específica, a través de un instrumento de vidrio capilar calibrado y haciendo uso de la gravedad. Dentro de los cálculos relacionados se encuentra el procedimiento para medir la viscosidad dinámica en base a la viscosidad cinemática encontrada. Las definiciones, procedimientos y cálculos se encuentran descritos en su totalidad en la norma ASTM D445-56, revisada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norteamérica. La terminología utilizada incluye:

- *Viscosidad cinemática:* Es la medida que relaciona el tiempo de un líquido en un volumen fijo que fluye por efecto de gravedad a través de un instrumento capilar. Las unidades son los Stokes, las cuales tienen dimensiones de centímetros cuadrados por segundo. En la industria petrolera se trabaja principalmente con centistokes, cSt.
- *Viscosidad dinámica:* Llamada viscosidad absoluta, se define como el producto de la viscosidad cinemática con la densidad del líquido, para temperaturas iguales. Su unidad es poise, P, el cual tiene dimensiones de gramos-centímetros por segundo.

Resumen del procedimiento

Se toma el tiempo para un líquido de volumen fijo que fluye a través de un viscosímetro bajo efectos de calor y de una temperatura controlada. Luego la viscosidad cinemática es calculada de la medición del tiempo del flujo y de la calibración constante del viscosímetro.

Equipo y Elementos Necesarios

- Viscosímetro, calibrado de vidrio.
- Soportes o marcos para viscosímetros.
- Termostato, (15 a 100°C).
- Dispositivo medidor de temperatura apto para pruebas de viscosidad cinemática con líquidos dentro de vidrios, como termómetro.
- Cronometro, cualquier tipo de dispositivo que lleve control del tiempo.

Procedimiento para la viscosidad cinemática

- Comprobar que el termómetro haya sido estandarizado recientemente.
- Tener la sustancia en la temperatura dentro de los límites y si no se encuentra realizar las correcciones pertinentes a todos los termómetros.
- Seleccionar un viscosímetro calibrado que arroje el tiempo con una tolerancia al error mínima y que incluya hasta 200 segundos.
- Cargar el viscosímetro de acuerdo con el manual de operación del instrumento y permitir que el viscosímetro alcance la temperatura de la prueba.
- Cuando la temperatura se encuentre por debajo del punto de rocío de la sustancia, dejar los extremos del condensador abiertos para evitar condensación. Los tubos de ensayo se deben adaptar de acuerdo al diseño y no restringir el paso del flujo bajo pruebas con presión generada por el instrumento.
- Utilice la succión para ajustar el nivel de la prueba a la posición de la salida del instrumento, alrededor de 5 mm por encima del primero registro de tiempo.
- Medir los segundos dentro de los primero 0.2 s y realizar la primera marca dentro del primer tiempo registrado, así como en los registros posteriores.

Procedimiento para la viscosidad dinámica

- Determinar la viscosidad cinemática como se describió con anterioridad.

- Determinar la densidad de la muestra en gramos por mililitros, a la misma temperatura que la viscosidad, dependiendo del método que se desee emplear de acuerdo a las normas ASTM D941, D 1481, IP 189, D 1217, IP 190 y IP 733.

Cálculos Consecuentes

Calcular la viscosidad cinemática de la ecuación 1.A4:

$$v [cSt] = C * t \quad [1.A4]$$

En donde v corresponde a la viscosidad cinemática en cSt, C hace referencia a la constante de calibración del viscosímetro en cSt/s y t es el tiempo del fluido en segundos. Posteriormente se calcula la viscosidad dinámica μ a partir de la ecuación 2.A4:

$$\mu [cP] = \rho v \quad [2.A4]$$

En donde ρ , es la densidad en g/cm^3 a la misma temperatura que la viscosidad cinemática y v es la viscosidad cinemática en unidades de cSt.

ANEXO 5

**Cotización y Resultados Obtenidos sobre las pruebas de Poder Calorífico, Viscosidad
Cinemática y Contenido de Azufre
(Cotización: Consecutivo 042-mayo-2015)
(Informe: Consecutivo LQUI-025-2015)**

 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ FACULTAD DE INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL 9 LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA</p>	PROPUESTA TÉCNICO ECONÓMICA PARA LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS	Código: FA006011 Versión: 04 Vigencia: 24/02/14 Página 1 de 2
---	---	--

**Consecutivo No. 042-mayo-2015
Fecha 5 – mayo -2015**

DATOS DEL SOLICITANTE.	
Empresa	Universidad de San Buenaventura
Contacto	Jaime Alberto Leyton
Correo electrónico	javegam@academia.usbbog.edu.co

De acuerdo con la solicitud de ensayos del día 4 del mes de mayo del año 2015, los siguientes son los métodos de ensayo disponibles en nuestro laboratorio:

TIPO DE SERVICIO COTIZADO:

- Orden de trabajo con Informe (Recepción Muestra / Análisis / Informe)
- Orden de servicio (Recepción Muestra / Análisis).

MUESTRA	Ensayo	Norma Técnica	Costo (\$/muestra)
Mezclas de combustible	Poder Calorífico	ASTM D-240	\$163.000
	Viscosidad Cinemática 25°C	ASTM D-445	\$130.000

Nota: El laboratorio no realiza muestreo ni emite conceptos sobre resultados de los ensayos.

Valor total por muestra es de: DOSCIENTOS NOVENTA Y TRES MIL PESOS M/CTE (\$293.000)

Valor Total para 2 muestras: QUINIENTOS OCHENTA Y SEIS MIL PESOS M/CTE (\$586.000).

Tiempo de entrega de resultados: se notifica al momento de aceptación de la cotización. Aproximadamente 10 días hábiles después de recibida la muestra.

ACEPTACIÓN DE LA PROPUESTA:

Informar al correo electrónico del Laboratorio (labiq_fiqbog@unal.edu.co) la aceptación de la cotización mínimo un día hábil antes de entregar la muestra al Laboratorio, adjuntar en caso de ser persona jurídica, la copia vigente del RUT, para empresas de Bogotá copia del RUT y RIT; y en caso de ser persona natural la COPIA DE LA CÉDULA DE CIUDADANÍA.

ENTREGA DE LA MUESTRA.

La entrega debe realizarse en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Química (Edificio 412, Oficina 212) en el horario de lunes a jueves de 8:00 am a 12m y de 2pm a 4:00pm, viernes de 8:00 am a 12:00m. En caso que la muestra no cumpla los siguientes requisitos no se podrá realizar los ensayos cotizados:

Carrera 30 No. 45-03, LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA, Edificio 412, Oficina 212
Teléfono: (57-1) 316 5672 Fax: 316 5617 Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 14301 Fax: 14302
Correo electrónico: labiq_fiqbog@unal.edu.co
Bogotá, Colombia, Sur América

 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ FACULTAD DE INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA</p>	<p>PROPUESTA TÉCNICO ECONÓMICA PARA LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS</p>	<p>Código: FA006011 Versión: 04 Vigencia: 24/02/14 Página 2 de 2</p>
---	--	--

**Consecutivo No. 042-mayo-2015
Fecha 5 – mayo -2015**

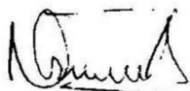
- ❖ Debe estar contenida en recipientes apropiados, no reutilizados, que no hayan contenido alimentos u otra sustancia que afecte los resultados.
- ❖ Debe estar debidamente identificada mediante rotulación que incluya: origen o tipo de muestra, nomenclatura o codificación y ensayos solicitados.
- ❖ Tamaño de la muestra requerido para los ensayos: 1 galón

FORMA DE PAGO

Realizar el pago consignando a través de transferencia electrónica o consignación en efectivo en la cuenta de ahorros del Banco Popular No. 01272007-4 (Código de recaudo No. 20182227) a nombre del Fondo Especial Facultad de Ingeniería.

ALMACENAMIENTO DE CONTRAMUESTRAS

El tiempo de almacenamiento de contra muestras se informará en el informe de entrega de resultados. Si requiere que no se almacene contra muestra en el Laboratorio por favor solicitarlo antes de la entrega de los resultados. Si las condiciones de la muestra no permiten su almacenamiento, el laboratorio no guardará contra muestra y será devuelta junto con los resultados de los ensayos.



NÉSTOR ALGECIRA ENCISO
Jefe LIQ

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA BOGOTÁ FACULTAD DE INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA	INFORME DE ENSAYO	Código: FA006001 Versión: 01 Vigencia: 16/07/2012 Página 1 de 3
--	--------------------------	--

Consecutivo No. 025-2015
Fecha 2015-08-11

Nombre	JAIME ALBERTO LEYTON MORENO
Dirección	Carrera 70 B No. 3 – 31 sur Apto 401
Correo electrónico	javegam@academia.usbbog.edu.co

Laboratorio	TERMODINAMICA
Ensayo	Poder calorífico y contenido de azufre, viscosidad cinemática @ 25°C.
Orden de trabajo	LQUI – 025– 2015

Muestra	
Consecutivo	LQUI- 025 -2015
Cantidad	2 muestras

Ejecución del ensayo	
Fecha inicio	04/08/2015
Fecha fin	21/08/2015

1. MÉTODO DE ENSAYO

Preparación de las muestras	Ninguna
Normas o especificación aplicable	ASTM D 240 -14 (Poder calorífico) ASTM D 516 -11 (Azufre)
Desviaciones, adiciones ó exclusiones de la norma o especificación	Ninguna


2. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS.

Muestra No.	Descripción.
025 - A	Muestra 1 y 3 E-10 Origen: Origen AVGAS + Etanol comercial Porcentaje: 90% AVGAS 10% Etanol
025 - B	Muestra 2 y 4 E-35 Origen: AVGAS+Etanol Comercial Porcentaje: 65% AVGAS 35% Etanol.

NOTA: Los resultados presentados a continuación corresponden a las muestras entregadas al laboratorio por el cliente.

3. DATOS DEL ENSAYO.

Poder Calorífico: Se utilizó una balanza analítica Mettler Toledo modelo AB 204 SNR 111660708 (Suiza) y un Calorímetro IKA C 2000 Basic S1 operando en modo Isoperibólico. Se usó oxígeno industrial extraseco grado 2.7, a una presión de 30 bar. La temperatura de la chaqueta del calorímetro fue controlada a 25°C con un baño termostatado Julabo F12, No. Serie 10126900.

 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ FACULTAD DE INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA</p>	INFORME DE ENSAYO	Código: FA006001 Versión: 01 Vigencia: 16/07/2012 Página 2 de 3
--	--------------------------	--

Consecutivo No. 025-2015
Fecha 2015-08-11

Azufre: Se utilizó espectrofotómetro Spectronic Genesys 5, No. Serie 3V87307003, No. Cat. 336008. Milton Roy Company.

El contenido de azufre fue determinado para realizar las correcciones exigidas por la norma ASTM D240 y está dentro de los límites establecidos por la norma ASTM D 516 (5-40 ppm). El valor reportado corresponde al promedio de 3 muestras y se determinó usando la linealidad del método espectrofotométrico. El método determina sulfatos, pero se reporta la conversión a azufre elemental usando los correspondientes pesos moleculares.

La determinación de la viscosidad se hizo utilizando viscosímetros capilares Cannon Fenske Routine No. 50 (número de serie Z949) y No. 25 (número de serie 8664). También se utilizó un baño KOEHLER modelo K23376-00000, serie R 71130092 (Sycamore, NY, USA), un termómetro PG ERTCO ASTM 120C (Vernon Hill, IL, USA) con certificado de calibración No 4795 del 10 de diciembre de 2011 y un cronómetro OAKTON (Ontario, Canadá) con certificado de calibración No 200899 del 11 de septiembre de 2011.

4. RESULTADOS


4.1 MUESTRA 025 A

4.1.1 RESULTADOS PODER CALORÍFICO Y AZUFRE, 3 RÉPLICAS

ENSAYO	1	2	3
Muestra, g	0,7111	0,7088	0,7090
Contenido de azufre, % p/p	<0,1	<0,1	<0,1
Poder calorífico corregido, J/g	44359	44430	42574

4.1.2 RESULTADO PODER CALORÍFICO Y AZUFRE, PROMEDIO Y VISCOSIDAD

Propiedad	Norma	Resultado
Poder calorífico superior corregido, J/g	ASTM D-240	43785
Contenido de azufre, % p/p	ASTM D-516	<0,1
Viscosidad cinemática (cSt @ 25 °C)0	ASTM - D-445	0,6651

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ FACULTAD DE INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA	INFORME DE ENSAYO	Código: FA006001 Versión: 01 Vigencia: 16/07/2012 Página 3 de 3
---	--------------------------	--

Consecutivo No. 025-2015
Fecha 2015-08-11

4.2 MUESTRA 025 B

4.2.1 RESULTADOS PODER CALORÍFICO Y AZUFRE, 3 RÉPLICAS MUESTRA 025 B

ENSAYO	1	2	3
Muestra, g	0,7121	0,714	0,7091
Contenido de azufre, % p/p	<0,1	<0,1	<0,1
Poder calorífico corregido, J/g	39733	39505	39569

4.2.2 RESULTADO PODER CALORÍFICO Y AZUFRE, PROMEDIO Y VISCOSIDAD

Propiedad	Norma	Resultado
Poder calorífico superior corregido, J/g	ASTM D-240	39600
Contenido de azufre, % p/p	ASTM D-516	<0,1
Viscosidad cinemática (cSt @ 25 °C)	ASTM - D-445	0,8608

4.3 NOTAS

- 4.3.1 Se usa coma (,) como separador decimal.
- 4.3.2 De acuerdo con la Norma ASTM D-240, el valor promedio se reporta como el promedio de los tres ensayos individuales aproximado al múltiplo más próximo a cinco (5).



NÉSTOR ALGECIRA ENCISO
Jefe LIQ