

## Investigación

**Estudio Teórico Sobre la Influencia del Uso de Mezclas de Biodiesel de Aceite de Palma con Jet A-1 en Motores a Reacción***Theoretical Study of the Influence in a Jet Engine Using Mixtures of Jet A-1 and Biodiesel of Oil Palm***Luisa Fernanda Mónico Muñoz<sup>1</sup> , Juan José Sandoval Sotelo<sup>1</sup> , Andrés Felipe Rodríguez Chaparro\*<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Programa de Ingeniería Aeronáutica - Universidad de San Buenaventura. Sede Bogotá - Colombia.

Recibido: 05-09-2016. Modificado: 15-01-2017. Aceptado: 20-01-2016

**Resumen**

**Contexto:** La industria aeronáutica, al igual que muchas otras, se ha visto obligada a implementar en la actualidad métodos para mitigar el daño producido al medio ambiente por la emisión de gases contaminantes y, de esta manera, hacerle frente a la problemática del calentamiento global. En este panorama, la investigación sobre la utilización de combustibles alternativos es de suma relevancia, en particular el estudio del rendimiento de motores al usar mezclas de biodiésel colombiano a base de aceite de palma con Jet A-1.

**Método:** Como punto de partida, se realiza una revisión al estado del arte para la selección del motor a estudiar y los combustibles alternativos a utilizar; paralelamente, se seleccionó el biodiésel colombiano a base de aceite de palma, ya que ha demostrado tener un buen comportamiento como combustible al ser mezclado en porcentajes de 10 %, 20 % y 50 %. A cada una de las mezclas realizadas se les hicieron pruebas en laboratorio para conocer su valor de viscosidad, densidad y poder calorífico; para la realización de los análisis, se desarrolló un programa sobre una hoja de cálculo que contempla propiedades físicas de las mezclas y parámetros del motor, así como emisiones de óxidos nitrosos (NOx), atomización y combustión producida por el uso de las mezclas. Los resultados se contrastaron contra el software de simulación Gas turbine.

**Resultados:** Se escogió el CFM56-5B como motor apropiado para realizar el estudio debido a que, en la actualidad, es el más empleado en la industria aeronáutica colombiana; por otra parte, ninguna de las mezclas de combustible alternativo genera el mismo rendimiento del motor al emplear Jet A-1. Las mezclas E10 y E20 tienen un comportamiento similar, con la novedad de generar menor cantidad de emisiones de NOx y mejorar la atomización del combustible.

**Conclusiones:** Si se compara el rendimiento del motor al usar combustible convencional y al emplear las mezclas de biodiésel, se observa una disminución del empuje conforme aumenta el porcentaje de biodiésel en la mezcla; debido a que las mezclas de combustible alternativo tienen un menor poder calorífico, el consumo de combustible en estos casos es siempre mayor. Por otro lado, al comparar los niveles de NOx producidos, se aprecia una disminución de este contaminante al usar las mezclas de biodiésel, vale la pena resaltar que es de gran interés para trabajos futuros evaluar otras emisiones contaminantes y, a su vez, el comportamiento de otros tipos de biodiésel en motores a reacción.

**Palabras clave:** Combustible alternativo , emisiones contaminantes, motor a reacción, prestaciones.

**Idioma:** Español



Citación: L. Mónico, J. Sandoval, A. Rodríguez. "Estudio Teórico Sobre la Influencia del Uso de Mezclas de Biodiesel de Aceite de Palma con Jet A-1 en Motores a Reacción". INGENIERÍA, vol. 22, no. 1, pp. 140-151, 2017.

©Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2017.1.a09>

### Abstract

**Context:** Like many others, today the aeronautical industry has been forced to implement methods to mitigate the damage produced to the environment due to the emission of polluting gases and in doing so, confront the problem of global warming. In this context, research on the use of alternative fuels is of paramount importance, in particular the study of engine performance when using blends of Colombian Biodiesel based on palm oil with Jet A1.

**Method:** As a starting point, we made a review of the state of the art so as to select which engine to study and then the alternative fuels to be used. Simultaneously, Colombian biodiesel based on palm oil was selected, as it has been shown to be a fuel with good performance when it is blended in percentages of 10 %, 20 % and 50 %. Each of the blends were tested in the laboratory to obtain their viscosity, density and calorific values. A spreadsheet program was developed to conduct the analysis, which contemplated the physical properties of mixtures and engine parameters, as well as emissions of nitrous oxides (NO<sub>x</sub>), atomization and combustion produced by the use of mixtures. The results were compared against those of the Gasturbine simulation software.

**Results:** CFM 56-5B was chosen as the appropriate engine for the study, because it is currently the most used in the Colombian aeronautical industry. On the other hand, none of the alternative fuel blends generates the same engine performance when using Jet A1. The blends E10 and E20 have a similar behavior, with the novelty of generating less amount of NO<sub>x</sub> emissions and improving the atomization of the fuel.

**Conclusions:** When the engine's performance with conventional fuel is comparing with Biodiesel mixtures, a decrease of the thrust is produced as the percentage of Biodiesel in the mixture increases. Because the mixtures of alternative fuel have a lower calorific value fuel consumption in these cases is always greater. However, when comparing the NO<sub>x</sub> levels produced, a decrease of this pollutant is observed when using Biodiesel blends. It is worth noting that it is of great interest for future work to evaluate other pollutant emissions and, in turn, the behavior of other types of Biodiesel in jet engines.

**Keywords:** Alternative fuel, engine, performance, pollutant emissions.

## 1. Introducción

En los últimos años se ha venido experimentando mayor evidencia de la problemática ambiental conocida como calentamiento global, la cual surge, principalmente, por las emisiones no controladas de gases efecto invernadero que son producidas en su mayoría por las industrias químicas y de transporte. La industria aeronáutica es la responsable del 2 % de las emisiones de CO<sub>2</sub>. [1], es por esto que la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) se comprometió a “mejorar la eficiencia del consumo de combustible un 1.5 % anual hasta 2020, estabilizar las emisiones de CO<sub>2</sub> con un crecimiento neutro a partir de 2020 y reducir las emisiones hasta el 50 % en 2050” [1].

De esta manera, mediante el trabajo conjunto entre universidades de todo el mundo y la industria aeronáutica, se han realizado diferentes investigaciones en temas de disminución de consumo específico de combustible (SFC) en motores a reacción, mejoras en los procesos de combustión, reducción de óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) mediante la implementación de combustibles alternativos [2]–[7].

Los primeros avances fueron realizados por Continental Airlines, quien en el año 2009 logró rea-

lizar el primer vuelo comercial en un avión Boeing 737 utilizando una mezcla de 50 % biocombustible a base de algas y 50 % de Jet A-1 en uno de sus motores [8]. Posterior a este vuelo, se siguieron realizando pruebas para determinar qué combustible alternativo podría llegar a suplir el combustible convencional, sin necesitar un cambio en la estructura y diseño del motor, ya que los motores no pueden ser fácilmente modificados en todas las flotas; pensando en esto, se determinó que los combustibles que se deseen emplear en la aviación deben cumplir con los requerimientos del motor, brindando prestaciones parecidas al motor al emplear un combustible convencional [1].

A raíz de lo anterior, entre los años 2009 y 2011 el estudio de mezclas con diferentes combustibles alternativos, al igual que las pruebas experimentales, se hicieron más frecuentemente en vuelos comerciales [8], [9]; además, en el 2011, la armada de los Estados Unidos realizó una demostración en motores turbo eje, utilizando una mezcla 50 % de combustible alternativo solazyne y 50 % de combustible convencional, en un helicóptero MH-60S Seahawk, marcando el inicio de las pruebas con biocombustibles en los motores a reacción de vehículos aéreos militares [9].

Por otro lado, enfocándose en la industria colombiana, hay un potencial para ser pioneros en la implementación de combustibles alternativos en motores de aviación, ya que el país produce combustibles como el biodiésel a partir del aceite de palma y el bioetanol derivado de la caña de azúcar [2], [3]; en estos, basándose en las pruebas realizadas en otros lugares del mundo y conociendo que gran parte de los ensayos se hicieron utilizando diferentes tipos de biodiésel, se busca aprovechar el auge y la disponibilidad de los combustibles alternativos en Colombia para estudiar cuál es su influencia en un motor a reacción, comúnmente usado en la industria, bajo la influencia de mezclas realizadas entre los combustibles alternativos disponibles (aptos para este tipo de motores) y el Jet A-1.

## 2. Metodología

Inicialmente, se realiza un estado del arte para la selección de los combustibles alternativos y el tipo de motor a utilizar, esto basado en resultados publicados en artículos de investigación; de esta manera, se determinan cuáles combustibles alternativos, al mezclarse con combustible tradicional, muestran buen desempeño en motores a reacción en términos de actuación, atomización, eficiencia en la combustión y reducción de las emisiones contaminantes.

Sin embargo, muchos de estos combustibles no se encontraban disponibles en la industria colombiana, un ejemplo es el combustible derivado de la *jatropha* o el biodiésel de algas [9]; el biodiésel de aceite de palma, por otro lado, demostró tener un buen comportamiento (relacionado con las prestaciones) como combustible en motores al ser mezclado en porcentajes de 10 %, 20 % y 50 % [9].

Posteriormente, mediante la prueba ASTM D240 realizada en la Universidad Nacional de Colombia, fue posible determinar el poder calorífico de las mezclas; así mismo, en los laboratorios de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, empleando la norma ASTM D1217 se halló la densidad y con la Ecuación 1 se determinó la viscosidad.

$$\mu_m = \mu_1^{x_1} * \mu_2^{x_2} \quad (1)$$

Los resultados de las pruebas (ver Figura 1) muestran que la viscosidad de la mezcla aumenta al tener mayor porcentaje de biodiésel, este comportamiento es lógico debido a que el biodiésel es más viscoso que el Jet A-1.

Así mismo, a partir de la Figura 2 se puede observar que la mezcla con mayor poder calorífico es la E10, seguida de la E20 y por última la mezcla E50; el comportamiento que se observa del poder calorífico de las mezclas es el resultado de agregar mayor porcentaje de biodiésel, el cual tiene menor poder calorífico. Esta disminución respecto al poder calorífico del Jet A-1

es tan solo del 2.1 % para el E10, 2.2 % para el E20 y 2.7 % para el E50.

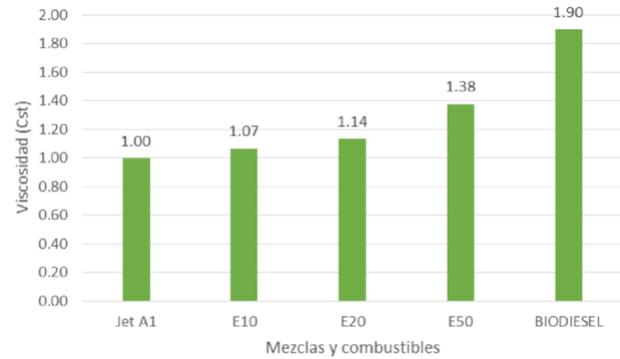


Figura 1. Viscosidad de las mezclas.

De igual forma, es importante observar que, en la Figura 3, hay un cambio lineal en las densidades, es decir, a medida que se va agregando mayor cantidad de biodiésel a la mezcla, esta adquiere un mayor valor de densidad y viceversa; este comportamiento es de esperarse, ya que el biodiésel es más denso y si se aumenta la cantidad que se usa en la mezcla se generará un aumento de esta propiedad.

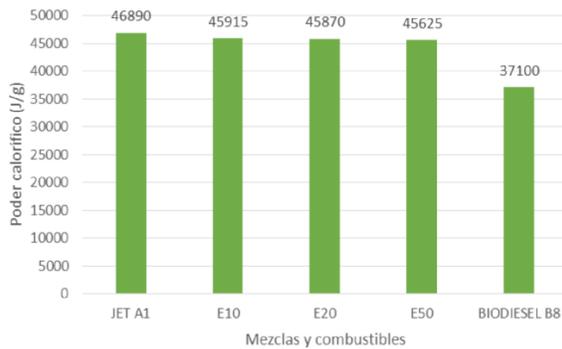


Figura 2. Poder calorífico de las mezclas.

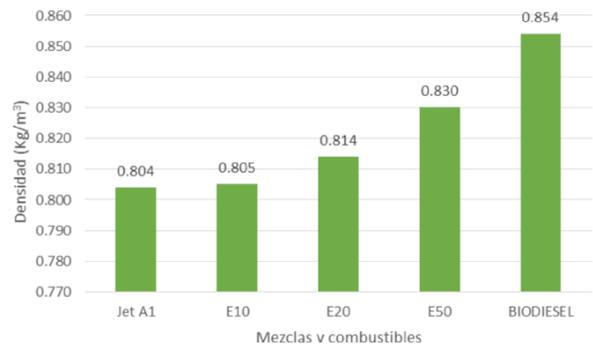


Figura 3. Densidad de las mezclas.

De forma paralela a la realización de las pruebas, se seleccionó el motor CFM56-5B debido a que en la industria colombiana existe una predominancia en la familia Airbus A320, los cuales usan este tipo de motores; además, los datos generales del diseño se encontraban disponibles para su uso en el estudio. Los parámetros generales del motor se pueden observar a continuación en la Tabla I [9].

Tras la selección del motor, el proceso se complementó con dos tareas: en primer lugar, se ingresaron los datos de las propiedades físicas de

Tabla I. Parámetros generales del motor

Especificaciones	Valor
Empuje	98 kN
Tipo de motor	Turbofan, flujo axial
Tipo de cámara de combustión	Anular
Tipo compresor	Doble eje, 13 etapas (4 baja y 9 alta)
Tipo de turbina	5 etapas (1 alta y 4 baja)
Peso del motor	1946 kg en seco
Largo del motor instalado	489.2 cm
Diámetro motor	224.5 cm
Sistema de ignición	2 por cada motor
Aceite lubricante	Mobil Jet Oil II
Combustible	JET-A1

las propiedades físicas de las mezclas y los parámetros del motor como la relación de compresión, temperatura de entrada, entre otros, a la programación realizada por los autores en una hoja de cálculo de Excel, basándose en la teoría del libro *Gas turbine theory* [10], para así determinar la afectación del motor a reacción seleccionado. Posteriormente se comprobaron dichos resultados mediante la utilización del *software* de simulación Gas turbine; para finalizar, se añadió a la programación hecha los cálculos de las emisiones de  $\text{NO}_x$ , el cambio en la atomización y en la combustión que produce el uso de las mezclas seleccionadas en este artículo.

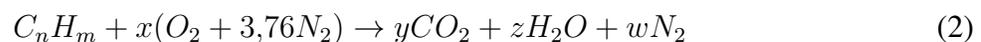
### 3. Resultados

#### 3.1. Rendimiento del motor

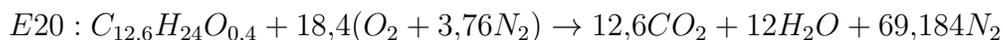
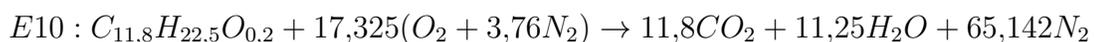
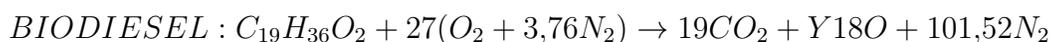
Para determinar la afectación del rendimiento del motor, se hizo un análisis suponiendo una entrada constante de flujo másico de combustible de 3 kg/s (flujo aproximado real del motor usando Jet A-1 brindado por la empresa International CFM).

Como punto de partida, fue necesario hallar la relación combustible/aire ( $C/A$ ) de cada una de las mezclas, se conoce que la fórmula aproximada del Jet A-1 es  $\text{C}_{11}\text{H}_{21}$  y del biodiésel es  $\text{C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2$  [11]; posteriormente, se hizo una interpolación para determinar la fórmula preliminar de cada mezcla, este procedimiento consiste en tomar el porcentaje de la mezcla del biodiésel en número decimal y multiplicarlo por el número correspondiente al subíndice de la molécula de la fórmula química del biodiésel. De igual forma se realizó con el Jet A-1.

Más adelante, se hizo el balanceo de ecuaciones mediante el método de coeficientes indeterminados, mostrado como ejemplo a continuación:



Se muestran a continuación las fórmulas químicas balanceadas para cada una de las mezclas:



Luego del balanceo de las ecuaciones químicas, se usa el peso atómico de cada componente del aire ( $O_2 + 3,76N_2$ ) multiplicado por el valor hallado de  $X$ , esto se divide por la multiplicación de los pesos atómicos del combustible con sus respectivos subíndices. De los resultados obtenidos, se puede observar en la Figura 4 que a medida que la mezcla contiene mayor cantidad de biodiésel, la relación combustible/aire aumenta; este comportamiento está directamente relacionado con los subíndices de la fórmula química del biodiésel, los cuales son mayores que los del Jet A-1, seguido por el E10, E20 y E50 [12].

Posteriormente, introduciendo los datos en la programación realizada y empleando información específica del Manual de mantenimiento del motor CFM56-5B, se calcula el empuje (Ecuación 3) y el consumo específico del combustible respecto al empuje (TSFC) (Ecuación 4).

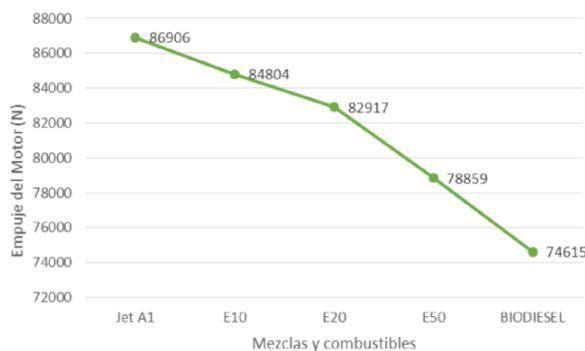
$$T = \dot{m}_e V_e - \dot{m}_0 V_0 + BPR \dot{m}_C V_F \dot{m} \quad (3)$$

$$TSFC = \frac{SFC}{T} \quad (4)$$

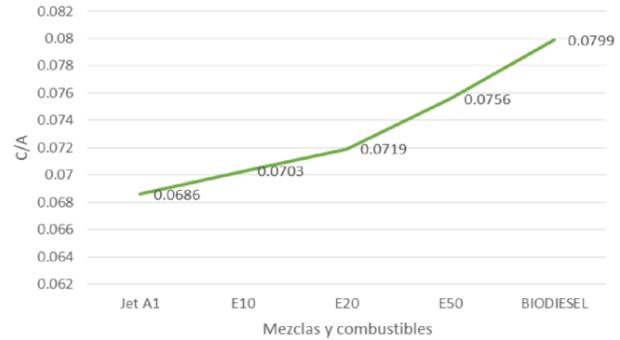
A partir de la Figura 5, es posible observar que el empuje del motor disminuye a medida que la mezcla contiene mayor cantidad de biodiésel; esta reducción en el empuje se debe a que la relación combustible/aire cambia, por lo tanto, respecto al empuje del motor con Jet A-1, se disminuye para el E10, E20, E50 y biodiésel en un 2.42 %, 4.6 %, 9.26 % y 14.14 % respectivamente.

Por otro lado, de acuerdo al consumo específico de combustible respecto al empuje, se obtiene que debido al aumento en la relación combustible/aire para cada mezcla hay un incremento en el consumo; este comportamiento se debe a que las mezclas, entre mayor cantidad de biodiésel contengan, requerirán de una mayor cantidad de combustible para igualar el empuje generado al emplear el combustible convencional.

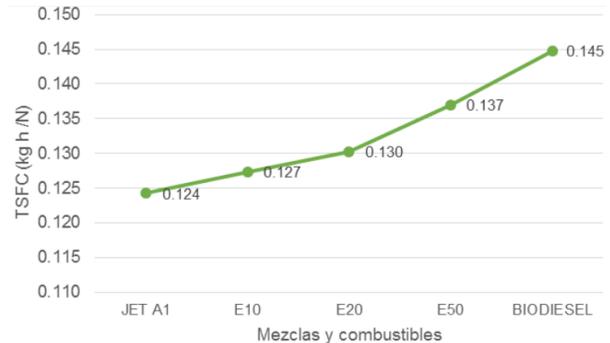
Así mismo, se puede observar en la Figura 6 que la mezcla con mayor aumento en el consumo específico de combustible respecto al empuje (TSFC) es la E50, la cual aumentó, respecto al valor calculado del Jet A-1, en 9.74 % su consumo; de igual manera, el aumento en este parámetro es del 4.69 % para el E20, y 2.48 % para el E10.



**Figura 5.** Empuje del motor usando mezclas de combustible.



**Figura 4.** Relación combustible/aire.



**Figura 6.** TSFC.

### 3.1.1. Comparación con los resultados de Gasturb

Después de ingresar todos los datos necesarios para la simulación en el programa Gasturb, lo ideal es que el empuje sea el mismo o se obtenga un margen de error bajo; en la Tabla II, se muestran los resultados de la comparación del empuje obtenido en la programación hecha por los autores y la

la calculada por el programa Gasturb, en dicha tabla se observa que el porcentaje de error en todos los casos es menor al 4 %, lo cual comprueba que la metodología usada es correcta.

**Tabla II.** Porcentaje de error.

Combustible	Empuje obtenido en programación (N)	Empuje obtenido en simulación Gasturb (N)	% error
Jet A-1	86.906	83.85	3.5
E10	84.804	81.84	3.4
E20	82.917	80.19	3.2
E50	78.859	76.15	3.4
Biodiésel	74.615	72.87	2.3

### 3.2. Influencia en la atomización

Para determinar la influencia de las mezclas en la atomización se hace uso de la Figura 7, la cual se caracteriza por clasificar los chorros de salida basándose en el número de Ohnesorge (Ecuación 5), el número de Reynolds (Ecuación 6), el número de Wobbe (Ecuación 7) y la densidad de energía (Ecuación 8), para determinar hasta qué punto es posible el intercambio de los combustibles.

$$Oh = \mu_L / (\rho_L \sigma D)^{0,5} \quad (5)$$

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (6)$$

$$We = \frac{Pc}{\sqrt{\frac{\rho_{comb}}{\rho_{aire}}}} \quad (7)$$

$$DE = P_c \rho \quad (8)$$

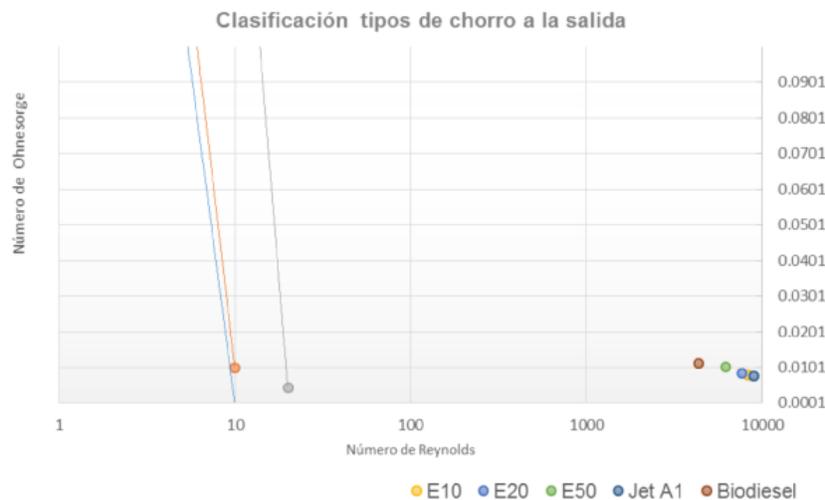
De esta manera, previamente se ingresan los datos de cada mezcla a la programación para obtener los resultados mostrados en la Tabla III.

**Tabla III.** Numero de Reynolds y número de Ohnesorge

Combustible	Número de Reynolds	Número de Ohnesorge
E10	8297398	0.0066
E20	7684056	0.0070
E50	6183537	0.0083
JET A-1	8907925	0.0062

Luego, al ubicar los valores de la Tabla III en la Figura 7, se puede observar bajo qué régimen de inyección está ubicada cada una de las mezclas para las configuraciones del motor.

De acuerdo a la Figura 7 y la Tabla III, se observa que, al agregar mayor cantidad de biodiésel a la mezcla, el número de Ohnesorge aumenta, ubicando las mezclas con mayor cantidad de biodiésel



**Figura 7.** Clasificación tipos de chorro a la salida utilizando E10, E20, E50 Y JET A1.

en las partes más altas de la gráfica; no obstante, todas las mezclas permanecen dentro de la zona de atomización.

Conforme a lo anterior, se encuentra que todas las mezclas se atomizan en forma de gotas diminutas, generando el comportamiento necesario para que se dé una combustión eficiente. Dicho comportamiento se debe a que el biodiésel tiene mayores valores de densidad y viscosidad.

Por otro lado, al calcular el índice de Wobbe y la densidad energética, se obtiene la Tabla IV.

**Tabla IV. Índice de Wobbe y Densidad energética**

<b>Índice de Wobbe (J)</b>				
<b>JET A-1</b>	<b>E10</b>	<b>E20</b>	<b>E50</b>	<b>BIODIESEL</b>
59459.04	58186.51	57807.24	56941.58	45646.83
-	2 %	3 %	4 %	23 %
<b>Densidad energética (J/m )</b>				
<b>Jet A-1</b>	<b>E10</b>	<b>E20</b>	<b>E50</b>	<b>BIODIESEL</b>
37699560	36961575	37338180	37868750	31683400
-	2 %	1 %	-0.4 %	16 %

En estos resultados se puede observar que la intercambiabilidad de combustible es posible para los combustibles E10, E20 y E50, ya que el porcentaje de disminución con respecto al Jet A-1 es menor al 5 % en ambos casos, e incluso en el caso del E50 se tiene un aumento en la densidad energética, lo cual significa que, si los combustibles son almacenados en un tanque de volumen determinado, será la que mayor energía podrá entregar, seguida del Jet A-1, E20 y E10; en el caso del biodiésel, como resulta evidente, la intercambiabilidad no es recomendada dada la alta disminución porcentual del índice de Wobbe y la disminución energética en un mismo contenedor.

### 3.3. Influencia en la combustión

Para hallar la eficiencia en la combustión de las mezclas se usa la Ecuación 9 [11].

$$\eta_{cc} = \frac{\xi * G_{Hora} * P_c}{V_{cc} * P_4} \quad (9)$$

Por lo tanto, al usar los valores presentados de poder calorífico para cada mezcla, y la presión a la entrada de la cámara de combustión de

3350000 Pa obtenida en la programación, se obtienen los valores presentados en la Tabla V.

**Tabla V. Rendimiento de la combustión**

<b>Combustible</b>	<b>Pc (J/g)</b>	$\eta_{cc}$	<b>Error relativo</b>
JET A-1	46890	0.99	
E10	45915	0.96	2.08 %
E20	45870	0.96	2.18 %
E50	45625	0.96	2.70 %
BIODIESEL B8	37100	0.78	20.88 %

Analizando los resultados obtenidos en esta tabla, se puede relacionar que a medida que el poder calorífico disminuye, el rendimiento en la combustión también; esto ocurre porque todos los valores usados en la Ecuación 2, a excepción del poder calorífico, permanecen constantes (la cámara de combustión no cambia y el flujo másico de combustible para este análisis tampoco).

Por lo tanto, como se indicó en las pruebas de poder calorífico, el biodiésel es el combustible

con menor poder calorífico, lo cual produce una reducción en la eficiencia de la combustión del 20.88 % respecto al Jet A-1, seguido del E50 con reducción en el 2.70 %, E20 con 2.18 % y E10 con reducción de tan solo 2.08 %.

### 3.4. Resultados emisiones de NO<sub>x</sub>

Inicialmente, es necesario calcular o usar datos experimentales de la temperatura de la llama, en este caso llama adiabática; sin embargo, si se hace de manera teórica, puede llevar a tener mayores errores debido a múltiples asunciones, como las entalpías de reacción no determinadas de manera experimental del biodiésel y de las mezclas.

Por lo tanto, de acuerdo a una investigación hecha por la Universidad de Cambridge, se determinó de manera experimental la temperatura de llama adiabática del biodiésel derivado de aceite de palma y del Jet A-1 [14]; de esta manera, extrayendo la información del documento nombrado, se sabe que la temperatura de llama adiabática del Jet A-1 es de 2587 K y del biodiésel es de 2564 K.

Posteriormente, haciendo una interpolación respecto al porcentaje de la mezcla, el cual consiste en tomar el porcentaje del combustible y multiplicarlo por el respectivo valor de la temperatura adiabática, se determina la temperatura de la llama adiabática para cada mezcla, como se muestra en la Figura 8.

La relación entre la temperatura de la llama y el índice de emisión de NO<sub>x</sub> para motores turbo-reactores es analizada empleando la Ecuación 10 [15].

$$EINO_x = 2 * 10^{-83} * T_{flama}^{24,696} \tag{10}$$

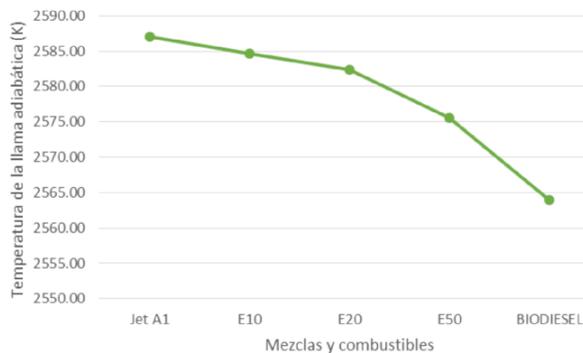


Figura 8. Temperatura de la llama adiabática.

En la Tabla VI, se muestran los resultados de la temperatura de llama adiabática e índice de emisiones de NO<sub>x</sub>, para cada uno de los combustibles y mezclas analizados.

Tabla VI. Comparación índice de NO<sub>x</sub>

	Jet A-1	E10	E20	E50	BIODIESEL
Temperatura adiabática (K)	2587	2584.7	2582.4	2575.5	2564
EI NO <sub>x</sub> (g/kg)	38.32	37.49	36.67	34.33	30.74
Porcentaje de disminución	-	2 %	4 %	10 %	20 %

A partir de los datos que se relacionan en la Tabla VI, se deduce que a medida que la mezcla contiene mayor cantidad de biodiésel, la temperatura de llama adiabática es menor, generando que las emisiones por NO X disminuyan en un 2 %, 4 %, 10 % y 20 % para las mezclas E10, E20, E50 y el combustible biodiésel B8, respectivamente. Este comportamiento es definido por la naturaleza de los componentes de los cuales está formado cada uno de los combustibles, relacionado por las entalpías de formación.

## 4. Conclusiones

Conforme se determinaron los valores de las propiedades físicas de la viscosidad, densidad y poder calorífico para cada una de las mezclas, se observa que a medida que se le agrega mayor cantidad de biodiésel a la mezcla el poder calorífico de esta disminuye, pero la viscosidad y la densidad aumentan; esto ocurre porque el biodiésel contiene menor poder calorífico pero mayor viscosidad y densidad. Por lo tanto, para cargar el mismo volumen de biodiésel que el Jet A-1 en un Airbus A320, el cual tiene tanques de combustible con capacidad de hasta 19287.607 m<sup>3</sup>, aumentaría el peso en 963.8 kg (aproximadamente 6 pasajeros con maletas), de igual manera para el E50, E20 y E10, el peso tendría un aumento de 500.192 m<sup>3</sup> y 19.2 kg respectivamente.

A partir del balanceo de las ecuaciones, se encuentran que la relación combustible/aire disminuye en 16 %, 10 %, 5 % y 3 % para el biodiésel, E50, E20 y E10 respectivamente, generando que se requiera mayor cantidad de combustible para mantener el balanceo estequiométrico; sin embargo, no afecta en porcentajes importantes las mezclas E10 y E20.

El mayor empuje del motor se obtiene al usar Jet A-1, debido a que tiene un mayor poder calorífico; por otro lado, para la mezcla E10, E20 y E50 el empuje se disminuye en 2.42 %, 4.6 % y 9.26 % respectivamente, es decir que, para la parte del rendimiento, continúa siendo mejor usar Jet A-1.

Por otro lado, de acuerdo al consumo específico de combustible respecto al empuje, se obtiene que debido al aumento en la relación combustible/aire para cada mezcla hay un incremento en el consumo; este comportamiento se debe a que entre mayor cantidad de biodiésel contengan las mezclas menor empuje generan, además requieren de mayor cantidad de combustible. Así, el aumento en el consumo de combustible aumenta en un 2.48 %, 4.69 %, 9.74 % y 14.95 %, para el E10, E20, E50 y el biodiésel respectivamente, comparados con el Jet A-1.

De acuerdo a los resultados de la sección de atomización, se puede concluir que todas las mezclas y los combustibles se mantienen en la zona denominada “atomización”, es decir, se vuelven gotas en zonas de la tobera de salida, siendo un comportamiento adecuado; sin embargo, el biodiésel sin mezclar es el que tiene mejor características de atomización, seguido del E50, E20 y E10, lo cual implica que a mayor cantidad de biodiésel que tenga la mezcla, tendrá mejor eficiencia en la atomización.

En el caso de la intercambiabilidad de combustibles se encuentra que las tres mezclas obtienen muy buenos resultados, ya que los porcentajes de disminución son por debajo del 4 %, e incluso en la mezcla E50 se tiene una mayor densidad energética, lo cual generaría que se conservase el buen rendimiento al usar estas mezclas.

Dado que la eficiencia en la combustión con una misma cámara de combustión varía de acuerdo al poder calorífico del combustible y este disminuye a medida que la mezcla contiene mayor cantidad de biodiesel, hay una reducción de la eficiencia de las mezclas respecto al Jet A-1 del 3 %.

Se determina que hay una disminución del 20 % del índice de NO<sub>x</sub> cuando se usa biodiésel en comparación al Jet A-1; de igual forma para las mezclas E50, E20 y E10, se disminuye este índice en 10 %, 4 % y 2 % respectivamente.

## Referencias

- [1] IATA. *Trabajando juntos en materia de combustible –los biocombustibles son una prioridad para la industria aeronáutica*. 2011. [En línea] Disponible en: <https://www.iata.org/pressroom/pr/Documents/Spanish-PR-2011-11-15-01.pdf> ↑141, 142
- [2] Barón, M., Huertas, I. y Orjuela, J., “Gestión de la cadena de abastecimiento del biodiésel: una revisión de la literatura”. *Revista de Ingeniería*, Vol 18, No 1., pp. 84-117, 2013. ↑141, 142
- [3] ARanda, J., Barón, M., Forero, I., Orjuela, J., “Modelo de programación matemática para la cadena productiva del biodiesel en Colombia”. *Revista de Ingeniería* Vol 19, No 1., pp. 19-49, 2014. ↑141, 142
- [4] Aranda, J., Orjuela, J., “Optimización multiobjetivo en la gestión de cadenas de suministro de biocombustibles. Una revisión de la literatura”. *Revista de Ingeniería* Vol. 20, No 1., pp. 37-63, 2015. ↑141
- [5] Ianjekar, R.D. Deshmukh, D. “A review of the effect of the composition of biodiesel on NO<sub>x</sub> emission, oxidative stability and cold flow properties”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54. pp. 1401-1411, 2016. ↑141
- [6] Badami, M. Nuccioa, P. Pastrone, D. Signorettoa, A., “Performance of a small-scale turbojet engine fed with traditional and alternative fuels”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 82. pp. 219-228, 2014. ↑141
- [7] Natelson, R. H. Wang, W. Roberts, W. L. Zering, K. D. “Technoeconomic analysis of jet fuel production from hydrolysis, decarboxylation, and reforming of camelina oil”. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 75. pp. 23-34, 2015. ↑141
- [8] Murrilo, J., *Producción de biodiesel a partir de aceite de palma*. Universidad Nacional de Manizales, pp. 13-16, 2003. ↑142
- [9] Allaboutalgae, *Renewable Aviation Fuel*, 2015. [En línea] Disponible en: <http://allaboutalgae.com/fuel-tests/> ↑142, 143
- [10] Saravanamuttoo, H.I.H. Rogers, G.F.C. Cohen, H. Straznycky, P. *Gas turbine Theory* [ed.] Cuarta, Pearson, Inglaterra, pp. 336-369, 1996. ↑144
- [11] Oñate, A. E. *Turborreactores teoría, sistemas y propulsión de aviones*, Ed. Sumaas, S.A / A., 1981. ↑144, 147
- [12] Martinez, I. *Combustion Kinetics*, 1995. [En línea] Disponible en: <http://webserver.dmt.upm.cs/isidoro/bk3/cis/Combustion%20Kinetics.pdf> ↑144
- [13] Tung, C. Hochgreb, S. *Measurements of laminar flame speeds of liquid fuels: Jet- A1, diesel, palm methyl esters and blends using particle imaging velocimetry (PIV)*, ed. 33), Combustion Institute, pp. 979–986, 2011. ↑
- [14] Glaude, R. Fournet, R. Bounaceur, And M. Molière, “Adiabatic flame temperature from biofuels and fossil fuels and derived effect on NO<sub>x</sub> emissions”. *Fuel Proc. Technol.*, vol. 91, pp. 229-235, 2010. ↑148
- [15] Pearce, G.F., Kretschmer, D., Odgers, J., Wang, G. “The prediction of thermal NO<sub>x</sub> in gas turbine exhausts”, in: *Eleventh International Symposium on Air Breathing Engines*, Tokyo, 1993, pp. 1–9. ↑148

---

### Luisa Fernanda Mónico Muñoz

Nació en Bogotá, Colombia. Es Ingeniera Aeronáutica de la Universidad San Buenaventura, de Bogotá, Colombia. En el 2010, obtuvo su título de Maestría en Motores de Combustión Interna Alternativos en la Universidad Politécnica de Valencia de Valencia, España. En el 2013 terminó su doctorado en Sistemas Propulsivos en Medios de Transporte en la Universidad Politécnica de Valencia de Valencia, España. Actualmente se desempeña como docente del Programa de Ingeniería Aeronáutica en la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, Colombia, y pertenece al grupo de investigación Aerotech donde realiza estudios en la línea de Energía y Propulsión. e-mail: [lmonico@usbog.edu.co](mailto:lmonico@usbog.edu.co)

---

### Andrés Felipe Rodríguez Chaparro

Nació en Bogotá, Colombia. Ingeniero Aeronáutico de la Universidad San Buenaventura, de Bogotá, Colombia. e-mail: [afrodriguez@academia.usbbog.edu.co](mailto:afrodriguez@academia.usbbog.edu.co)

---

### Juan José Sandoval Sotelo

Nació en Cartagena, Colombia. Ingeniero Aeronáutico de la Universidad San Buenaventura, de Bogotá, Colombia. e-mail: [jjssandoval@academia.usbbog.edu.co](mailto:jjssandoval@academia.usbbog.edu.co)

## Nomenclatura y símbolos

Nomenclatura	Significado	Unidad
BPR	By Pass Ratio	
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	
D	Diámetro de la gota	m
DE	Densidad energética	J/m <sup>3</sup>
EI	Índice de emisiones	g/Kg
FAA	Administración Federal de Aviación	-
E10	Mezcla de 10 % de aceite de palma y 90 % de Jet A1	
E20	Mezcla de 20 % de aceite de palma y 80 % de Jet A1	
E50	Mezcla de 50 % de aceite de palma y 50 % de Jet A1	
IATA	Asociación Internacional de Transporte Aéreo	-
NO <sub>x</sub>	Óxidos Nitrosos	-
Oh	Número de Ohnesorge	-
P	Presión	Pa
P <sub>c</sub>	Poder calorífico	J/g
Re	Numero de Reynolds	

Nomenclatura	Significado	Unidad
SFC	Consumo específico de combustible	Kg/h
T	Empuje	N
T flama	Temperatura de la flama	K
$W_e$	Índice de Wobbe	J
$\mu_m$	Viscosidad dinámica mezcla	Cst
$\dot{m}_e$	Flujo másico de aire de salida	Kg/s
$V_e$	Velocidad de salida	m/s
$\dot{m}_o$	Flujo másico de aire de entrada	Kg/s
$V_o$	Velocidad de entrada	m/s
$\dot{m}_c$	Flujo másico combinado	Kg/s
L	Longitud de la cámara de combustión	m
$\rho$	Densidad	kg/m <sup>3</sup>
$\eta_{cc}$	Eficiencia de la combustión	
$G_{hora}$	Gasto hora	Kg/h
$V_{cc}$	Velocidad cámara de combustión	m/s