MUJERES EN INGENIERÍA: EMPODERAMIENTO, LIDERAZGO Y COMPROMISO
21 - 24 DE SEPTIEMBRE | 2021 | CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA
Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI
https://acofi.edu.co/eiei2021

ANÁLISIS DE LAS PRESTACIONES Y NIVELES DE EMISIONES CONTAMINANTES AL USAR BIOCOMBUSTIBLES EN EL MOTOR PT6-A

Luisa Fernanda Mónico Muñoz, Richard Avella, Francisco González

Fundación Universitaria Los Libertadores
Bogotá, Colombia

Resumen

Las aeronaves utilizan motores a reacción, los cuales se han optimizado con el paso de los años para ser más eficientes, silenciosos, generar mayores prestaciones y emitir menos niveles de emisiones contaminantes. Sin embargo, aún hay una alta dependencia de los combustibles fósiles, por lo cual es necesario potencializar el estudio de combustibles alternativos como el hidrogeno y los biocombustibles.

Para investigar las bondades de algunos biocombustibles, se estudiaron teóricamente las diferentes prestaciones y emisiones del biodiesel en uno de los motores más utilizados en Colombia, el PT6. Los resultados indican que el uso de este biocombustible, reduce los niveles de NOx y mantiene en niveles aceptables las prestaciones del motor. Los estudios analíticos también indican que el comportamiento de los niveles de NO_X es aproximadamente cuadrático en el intervalo estudiado y la producción de CO_2 es directamente proporcional al porcentaje de biocombustible en la mezcla.

Palabras clave: PT6; prestaciones; emisiones contaminantes; motor a reacción

Abstract

The Aircraft use jet engines, which have been optimized over the years to be more efficient, silent, generate higher performance and emit lower levels of polluting emissions. However, there is still a high dependence on fossil fuels, for which it is necessary to strengthen the study of alternative fuels such as hydrogen and biofuels.

To investigate the benefits of some biofuels, the different performances and emissions of biodiesel were theoretically studied in one of the most widely used engines in Colombia, the PT6-A. The results indicate that the use of this biofuel reduces NOx levels and maintains engine performance at acceptable levels. Analytical studies also indicate that the behavior of NOX levels is approximately quadratic in the studied interval and CO2 production is directly proportional to the percentage of biofuel in the mixture.

***Keywords**: PT6; performance; pollutant emissions; reaction engine*

1. Introducción

En Colombia el sector aéreo ha venido creciendo en oferta y demanda tanto en el transporte de pasajeros como en el trasporte de carga, debido a la implementación de nuevas aerolíneas comerciales y de bajo coste (Mónico, Rincón, & Manrique, 2020). Un informe de Estudios Sectoriales de la Aeronáutica Civil, reportó que en el 2019 Colombia incrementó en un 9,1 % la movilización de pasajeros por vía aérea en relación al 2018 (MinTransporte, 2020). Adicionalmente, gracias a datos de la Aeronáutica Civil se tiene que en los últimos diez años el país ha duplicado el número de rutas a destinos internacionales y ha mostrado un incremento de 168,4 % en el número de pasajeros movilizados (Portafolio, 2018). Según la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (UAEAC) el incremento de la aviación en Colombia, trae consigo un aumento tanto del tráfico aéreo como de las emisiones contaminantes, sin políticas que promuevan el uso y la producción de combustibles alternativos para la aviación.

Las aeronaves que operan actualmente las diferentes aerolíneas nacionales, utilizan combustible de tipo AVGAS y JET-A1 suministrados por Terpel, que diariamente transporta 455 mil galones para abastecer las diferentes aeronaves (Terpel, 2016). Esto combustibles tienen un gran impacto ambiental, pues pueden llegar a producir hasta 676 millones de toneladas de CO_2 (Amezcua, 2016).

En los últimos 20 años, se ha venido creando, implementando y fortaleciendo las normativas medio ambientales en diversos sectores, para el control de la emisión de contaminantes como: material particulado, dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_X), monóxido de carbono (CO), plomo, hidrocarburos (HC), entre otros. Uno de los sectores que genera mayor cantidad de emisiones contaminantes, es el sector del transporte aéreo, debido al empleo, entre otros de motores a reacción y a la gran cantidad de aeronaves que operan diariamente en todo el mundo. En el 2010 se estimaba que el consumo de keroseno de las aerolíneas a nivel mundial por año era de 26000 millones de galones y que se duplicaría para el 2030 (García, 2010); Estas cifras contrasta con los 22 billones de galones tipo JET que se producen anualmente en Estados Unidos según reporte de 2014 (Carolyn, Emily, Amy, & and Laura, 2014)

Una posible solución a las emisiones contaminantes se está buscando en el sector automotriz, por medio del desarrollo de nuevas fuentes de energía para afrontar y reducir el uso masivo de combustibles de origen fósil. Entre las fuentes de energía alternativa sobresalen el hidrogeno y los biocombustibles que provienen de materiales biológicos como plantas, desechos agrícolas, aguas

residuales, pulpa de madera, grasas animales, basura, etc. Los biocombustibles no solo contribuyen a disminuir el uso de combustibles derivados del petróleo, sino que además emiten menos gases de efecto invernadero; se caracterizan por su facilidad de producción, utilización, almacenamiento y potencial para reducir los niveles de CO, CO_2 e HC. Por su parte, los combustibles sintéticos como el Fischer Tropsch (Muhammad, 2017), además de disminuir las emisiones contaminantes, también reduce el consumo específico de combustible, debido a su mayor poder calorífico. Sin embargo, tiene la desventaja de ser más costoso.

A diferencia de muchas otras industrias, el sector de la aviación no ha tenido tantos avances en la implementación y uso de combustibles alternativos. Es por ello que, para reducir la contaminación, los fabricantes de aviones se han puesto en la tarea de crear materiales más livianos, que reduzcan el consumo de combustible y de forma paralela incursionar en el uso de biocombustibles para disminuir la contaminación atmosférica, por la emisión de gases de efecto invernadero (Jorge, 2016).

A nivel internacional se registran muy pocos ensayos y pruebas, por ejemplo, el vuelo de Toulouse a París en un Airbus A321 realizado por la compañía Air France, que utilizó una mezcla de B50 en ambos motores, reduciendo 54g de emisiones por pasajero y kilómetro recorrido (Fedebiocombustibles, 2011). Por su parte Boeing, Etihad Airways, Honeywell UOP y el SRBC, han desarrollado y comercializado biocombustibles de aviación sostenibles, a partir de plantas en el desierto regadas con agua de mar, las cuales reducen las emisiones de carbono entre un 50 y un 80% con respecto a los combustibles convencionales (Republica, 2014). Boeing ha trabajado en equipo con la empresa South African Airways, para producir biocombustibles a base de plantas de tabaco (Boeing, 2011). La Corporación Petroquímica de China, prevé en un futuro cercano que el 30 % del combustible para la aviación sea biocombustible (China, 2015). En España, Iberia y Repsol, en un vuelo entre Madrid y Barcelona en un A320 emplearon 75% de queroseno tradicional y 25% de biocombustible a base de carmelina, la cual es una planta oleaginosa no comestible. En Estados Unidos, el primer vuelo comercial en utilizar biocombustible, fue un avión B737 de Continental Airlines para desarrollar un vuelo de prueba de dos horas (Analytic, s.f.). Los informes indican que se logró una reducción en las emisiones de CO_2 de 1.500 kg (Redsol, 2015).

En América Latina, México tiene como propósito reducir el CO_2 que genera el transporte aéreo, para esto planea aumentar su producción de biocombustibles desde un 15% en el 2020 a un 50% en el 2040 (Mañana, 2015). Así mismo, Argentina firmó un convenio para el desarrollo de biocombustible aeronáutico entre la Subsecretaría de Transporte Aerocomercial, la Administración Nacional de Aviación Civil, aerolíneas argentinas, YPF, el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación y la Cámara Argentina de Biocombustibles, con el propósito de potencializar el uso y desarrollo de combustibles aeronáuticos (InfoCampo, 2013).

Por su parte, los tres grandes constructores de aviones, Airbus, Boeing y Embraer, firmaron un acuerdo de intensión y colaboración para trabajar conjuntamente en el desarrollo de biocombustibles de aviación, en espera que para este año se utilice un 4 % de biocombustible en los aviones (Martín-Crespo, 2016). En cuanto a normativas, se ha desarrollado el método ASTM, el cual se emplea para el análisis de biocombustibles de aviación, sirve como herramienta de

verificación para comprobar la precisión de la cantidad de combustible alternativo en la mezcla (Analytic, s.f.). En el 2017 se realizó el primer vuelo internacional desde Beijing hasta Chicago, ocasión en que la aerolínea Hainan Airlines empleó biocombustible a base de residuos de aceite de cocina (Mucino, 2017).

Colombia incursionó en el sector de los biocombustibles a inicios del siglo XXI, concretando normativas para la producción y comercialización de etanol y Biodiesel en el país contribuyendo a diversificar la canasta energética, gracias a la generación de empleo, desarrollo agroindustrial, sostenibilidad ambiental y mejoramiento de la calidad de los combustibles. En el 2013 la aerolínea LAN Colombia, hoy en día conocida como Latam Colombia, realizó el primer vuelo nacional de corto alcance en la ruta Bogotá-Cali en una aeronave A320-200, abastecida con una mezcla de 69 % JET-A1 y 31% de biocombustible a base de aceite de camelina, con el fin de poder reducir CO_2 y otros componentes químicos que afectan al medio ambiente. El vuelo fue un éxito y la aerolínea está en el proceso de implementar dicha mezcla de biocombustible en sus aeronaves (Restrepo, 2013). Sin embargo, hasta el 2020 no se registran evidencias del uso de biocombustibles en la flota actual de las aerolíneas que operan en el país. En la actualidad, las aerolíneas nacionales que operan en el país tienen una variedad de aeronaves de diferentes fabricantes como Airbus, Boeing, Embraer y ATR. Todas las compañías de aviación utilizan como combustible JET-A1 en todas sus aeronaves.

Teniendo en cuenta lo anterior, los ensayos desarrollados hasta el momento posicionan a los biocombustibles como buenos sustitutos de los combustibles fósiles de aviación (Mahammadsalman, Azami, & Mark, 2019), (Stephen, Aravind, & John, 2020). Una de las ventajas del uso de este tipo de combustibles en aeronaves, es que no se requiere una mayor adaptación de los motores ni en su respectiva red de distribución. La International Air Transport Association (IATA), ha establecido que a corto plazo se debería estar usando un 6 % de biojet, es decir, lo equivalente a 8 mil millones de litros de biocombustible para aviones (Digital, 2012).

Pese a que Colombia es actualmente un país altamente productor de combustibles alternativos, aún no se han desarrollado proyectos rigurosos, en los cuales se comparen las prestaciones y niveles de emisiones contaminantes de un motor a reacción que funcione con diversos tipos y mezclas de combustibles tanto alternativos como tradicionales. Es por esto que surge la necesidad de potencializar proyectos, en los cuales se evalué el funcionamiento de estos sistemas de propulsión con combustibles alternativos, con el fin de conocer los parámetros de operación de dichos motores. Estos deben ser instalados en bancos de prueba, para obtener curvas características bajo distintos niveles de carga y regímenes de giro empleando diversos tipos de combustibles.

Uno de los motores a reacción más importantes del mundo por su alta confiabilidad y de mayor demanda en Colombia, es el PT6 del fabricante canadiense Pratt & Whitney (P&W), Es un sistema de propulsión empleado en una amplia gama de aeronaves destinadas a la aviación general, ejecutiva, actividades militares y tareas agrícolas. El principal target de AvioTechnology, son más de 400 motores turbohélice PT6, que operan en Centroamérica y Panamá (Negocios, 2021). A Nivel nacional, este motor es empleado por la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) en aeronaves de entrenamiento como el T-6C Texan II, en aviones de ataque como el Embraer EMB 312 y 314 Tucano, en aeronaves de inteligencia como el King Air 300, y de transporte como el Embraer 110

Bandeirante, el IAI Arava y el Beechcraft King Air. En total unas 63 aeronaves emplean para su funcionamiento motores PT6 en Colombia (Colombiana, 2021).

Por todo lo discutido se plantea evaluar la influencia del uso de combustibles alternativos en el motor a reacción PT-6 de forma teórica, con proyecto a verificación experimental, permitiendo así obtener conocimiento de los parámetros operacionales del motor y niveles contaminantes que produce.

2. Metodología

De acuerdo al tipo de investigación que se pretende desarrollar, la propuesta metodológica planteada es de carácter netamente teórico, con proyecto a verificación experimental. Para la correcta ejecución del proyecto, se establecen 3 fases. En la primera fase, se realizará una revisión bibliográfica, acerca de ensayos en los cuales se hayan empleado mezclas de combustibles alternativos y combustible convencional en motores a reacción, tanto a nivel nacional como internacional, y los diversos modelos matemáticos para conocer las prestaciones y emisiones producidas por un motor a reacción PT6. En la segunda fase, se establecen las herramientas que se utilizaran para desarrollar los cálculos necesarios de acuerdo a las características del motor.

En la última fase, se establecerán tres mezclas de biocombustible y combustible tradicional (JET-A1), con el objetivo de conocer las propiedades físicas y químicas de estas. Posteriormente, se realizarán los cálculos del motor, evaluando los datos de prestaciones y niveles de emisiones contaminantes, para posteriormente emitir las principales conclusiones del estudio.

3. Análisis y Discusión de Resultados

Como punto de partida es necesario conocer la composición y calcular el balance estequiométrico de cada uno de los combustibles y mezclas, por lo cual se toma como fórmula del JET A1 el $C_{11}H_{21}$.

$$C_{11}H_{21} + A(O_2 + 79/21N_2) \rightarrow BCO_2 + DH_2O + EN_2.$$

A partir de la formula anterior se realiza el balance estequiometrico (CHON) y se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$C: 11 = BH: 21 = 2DO: 2A = 2B + DN: (79/21)A \cdot 2 = 2E,$$

Cuya solución es:

$$B = 11\ kmol, D = 10.5\ kmol, A = 16.25\ kmol, E = 61.13\ kmol$$

Por su parte, la composición típica del Biodiesel a base de Palma se presenta en la Tabla 1 (Fernandez, 2018):

Tabla 1. Composición típica de Biodiesel de Palma.

Éster de ácido graso	Fórmula molecular	Composición masa (%)
Metil palmitato	$C_{17}H_{34}O_2$	37.5
Metil estearato	$C_{19}H_{38}O_2$	7.2
Metil oleato	$C_{19}H_{36}O_2$	46.4
Metil linoleato	$C_{19}H_{34}O_2$	8.6
Metil linolenato	$C_{17}H_{32}O_2$	0.3

y su fórmula es:

$$0.375(C_{17}H_{34}O_2) + 0.072(C_{19}H_{38}O_2) + 0.464(C_{19}H_{36}O_2) + 0.086(C_{19}H_{34}O_2) + 0.003(C_{17}H_{32}O_2) + A(O_2 + 79/21N_2) \rightarrow BCO_2 + DH_2O + EN_2$$

Realizando el balance (CHON) se obtiene el sistema de ecuaciones:

$$C: 11 = BH: 21 = 2DO: 2A = 2B + DN: (79/21)A \cdot 2 = 2E,$$

cuya solución es:

$$B = 18.25\ kmol D = 17.65\ kmol A = 26.06\ kmol E = 98.04\ kmol$$

Como mezclas de Biodiesel y combustible convencional se establecieron tres concentraciones distintas: B10, B30 y B50. Para cada una de estas mezclas, se realizó también el balance de acuerdo con la proporción de cada uno de los combustibles. El balance estequiométrico permitió conocer los niveles de CO_2 producidos, los cuales se presentan en la Figura 1. Así mismo por medio de la ecuación 1 (Pearce, 1993), se calcularon los niveles de NO_x producidos a partir de la temperatura adiabática, cuyos valores son de 2578K para el JET A1 y 2564K para el Biodiesel (Glaude, 210).

$$EI\ NO_X = 2x10^{-83} T_f^{24.696} \quad (1)$$

En la Figura 1 se presentan los resultados encontrados para el NO_X y el CO_2. En la Figura 1a se observa que, al aumentar la concentración de Biodiesel en la mezcla, los niveles de NO_x disminuyen. Dicha reducción se puede deber a la menor temperatura alcanzada durante el proceso de combustión, que como es sabido, contribuye a la reducción de este contaminante. En la Figura 1b se observa un comportamiento diferente para los niveles de CO_2, pues para este caso al aumentar la concentración del Biodiesel, también aumenta dicho contaminante. Este comportamiento se debe a que para producir el mismo empuje que desarrolla el motor al emplear el combustible convencional, es necesario un mayor consumo de Biodisel ya que tienen un menor poder calorífico.

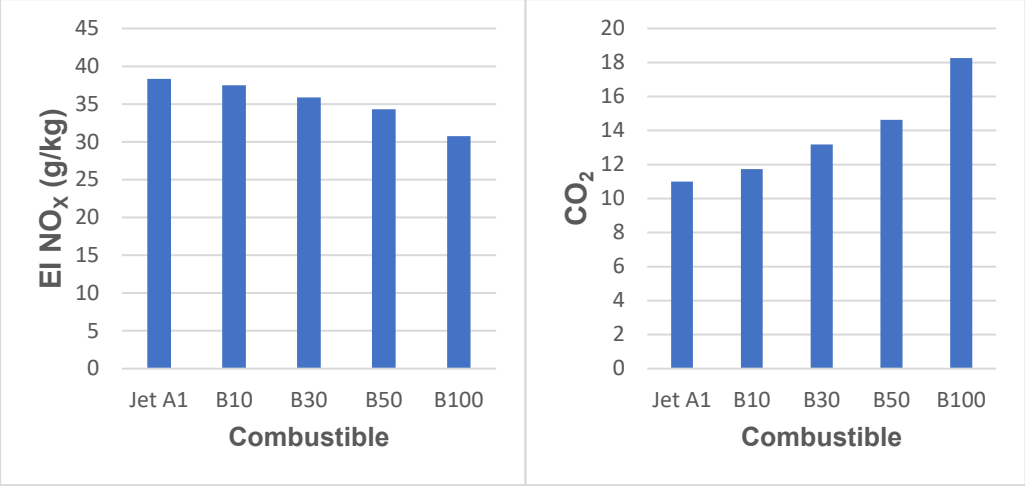

***Figura 1**. Niveles de NO_X y CO_2*

Los resultados mostrados en la Figura 1a se pueden explorar de forma más general, al usar la ecuación 1 para estudiar el comportamiento de la producción de NO_X para diferentes mezclas de biocombustible como se ilustra en la Figura 2. En esta figura se observa un crecimiento exponencial (línea roja continua) *de* los niveles NO_X como función de la temperatura adiabática; también nos indica que, a menor temperatura, mayor es el porcentaje de biocombustible en la mezcla y menor es el nivel de NO_X complementando la información de la Figura 1.

En la Figura 2 también se observa que el comportamiento de los niveles de NO_X como función de la temperatura en la ventana de inspección, no necesariamente sigue un comportamiento de tipo exponencial, sino que presenta un comportamiento aproximadamente cuadrático (línea azul discontinua) para valores entre 2564.0 K y 2587.0 K. y cuya ecuación es $0.00151546T^2 - 7.47657T + 9237.89$.

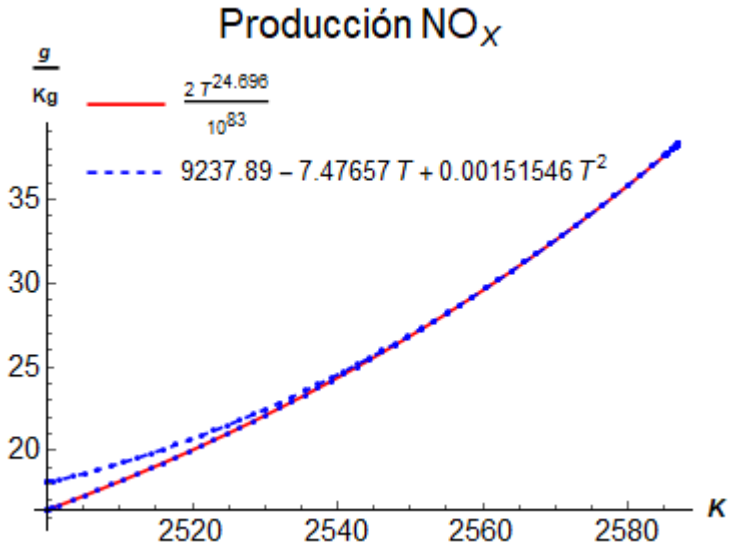

***Figura 2**. Niveles de NO_X . La línea roja muestra un crecimiento exponencial de NO_X como función de la temperatura, mientras que la línea azul discontinua muestra un comportamiento aproximadamente cuadrático.*

Para el caso de la producción de CO_2 se encontró que su comportamiento es lineal como se observa en la Figura 3 indicando de esta manera que el crecimiento del número de moles del CO_2, es directamente proporcional al porcentaje de biocombustible en la mezcla. La función que rige este comportamiento es $11 + 7.253B$, donde B es el porcentaje de biocombustible en la mezcla y se muestra en la figura por medio de la línea roja.

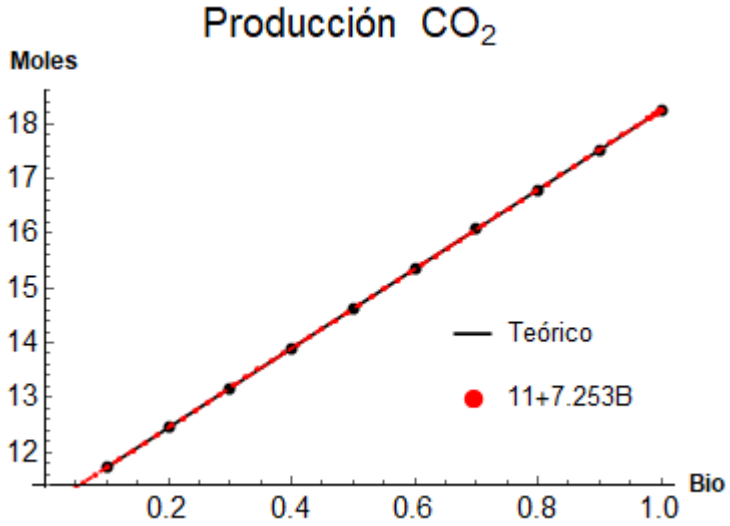

Figura 3. *Niveles de CO_2 en función lineal del porcentaje de biocombustible.*

En cuanto a las prestaciones, las propiedades físicas del combustible influyen en los resultados. Como es sabido, las mezclas de Biodiesel tienen un poder calorífico inferior al combustible convencional y este poder disminuye a medida que su concentración aumenta, como se muestra en la Tabla 2, donde se evidencia un incremento en los niveles de CO_2 para mantener constantes las prestaciones, como se mostró en la Figura 1.

Combustible	***Poder Calorífico kJ/kg***	***Densidad (kg/m³) a 15°C***	***Viscosidad cinemática (cSt 40°C)***
Jet A1	46890,0	0,840	2,000
B10	46103,5	0,844	2,245
B30	44530,5	0,852	2,735
B50	42957,5	0,860	3,225
B100	39025,0	0,876	4,448

Tabla 2. *Propiedades de los Combustibles*

La Tabla 2 se toma como referencia en cuanto a los poderes caloríficos del combustible Jet A1 y las mezclas de Biodiesel, esto para calcular las potencias del motor, el consumo específico de combustible y flujo másico de combustible inyectado.

Para el análisis de las prestaciones se tiene como referencia valores de las eficiencias estandarizadas de los componentes, dentro del punto de diseño de los motores turbohélice (El-Sayed, 2017) (Canada., 2007).

En la Figura 4 se muestra que la potencia de la turbina de baja presión (LPT), conocida como potencia al eje (SHP); tiene un leve incremento en los biocombustibles casi despreciable comparados con el Jet A1. Esto indica que utilizar dichas mezclas no influye en el comportamiento de la potencia SHP, manteniendo los valores dentro de los rangos de funcionamiento según el manual del fabricante del motor, que son entre 700 a 1650 SHP.

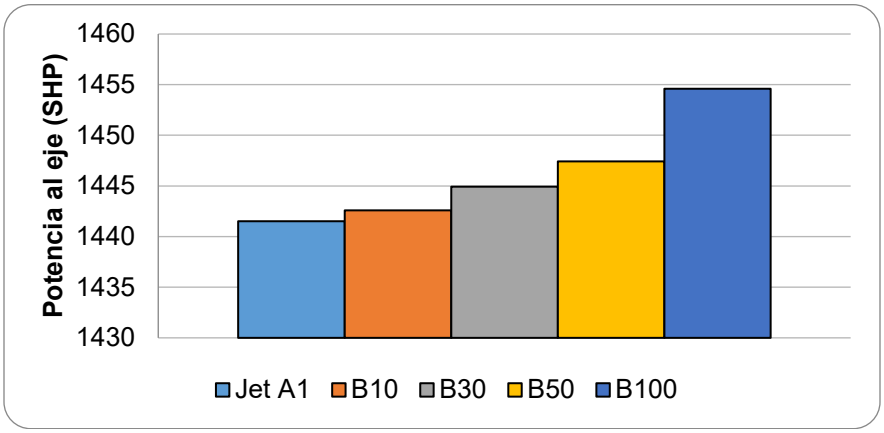

Figura 4. *Comparación de la Potencia al eje del motor.*

La Figura 5 muestra un comportamiento similar al anterior, ya que la potencia de la hélice es la potencia SHP multiplicada por las eficiencias mecánicas de la caja reductora del motor y de la turbina de baja presión (LPT), estos valores son los mismos para las mezclas. Las mezclas muestran también un leve incremento de esta potencia, en donde la potencia para la mezcla B100 es la mayor de todas, pero sin ser significativo dicho incremento. Los valores dentro de los rangos de funcionamiento establecidos se mantienen.

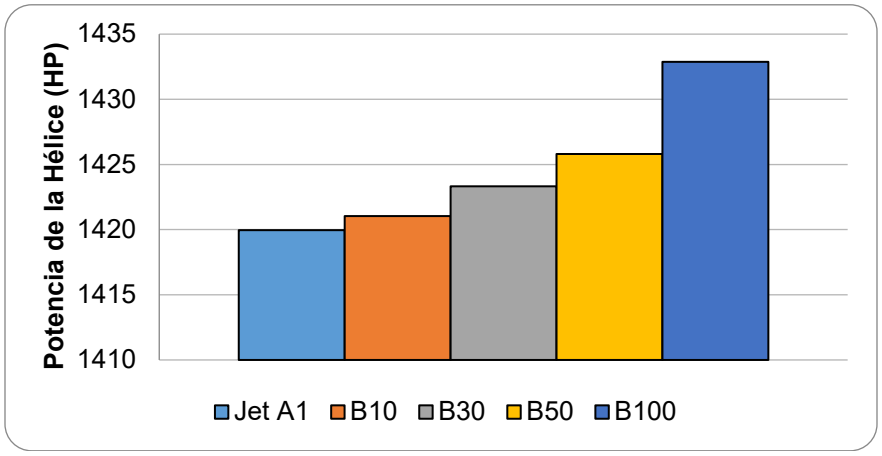

Figura 5. *Comparación de la Potencia de la hélice del motor.*

La Figura 6 muestra el comportamiento del motor en cuanto al consumo específico de combustible (SFC), según las mezclas. Es posible apreciar un incremento del SFC dentro de los rangos establecidos por el fabricante del motor, que son entre 0.509 a 0.680 LB/Hp·h. Se evidencia que los biocombustibles tienen un mayor consumo específico frente al Jet A1, pero si salirse de los rangos.

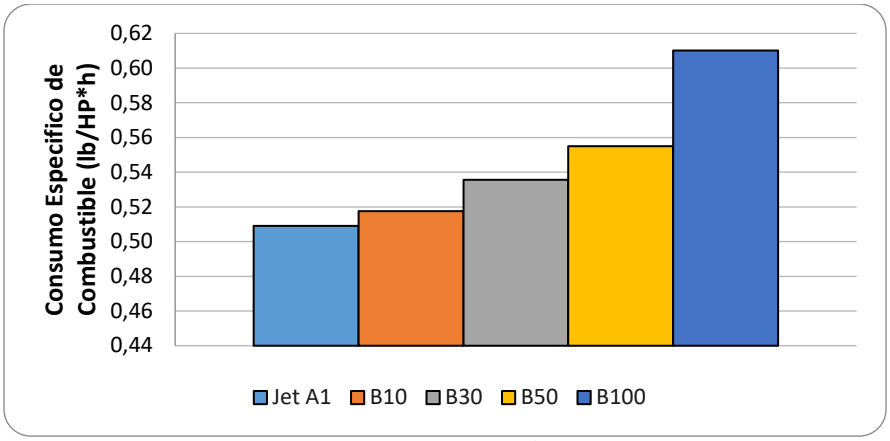

***Figura 6**. Comparación del Consumo específico de combustible del motor.*

En la Figura 7 se compara el flujo másico de combustible inyectado de las diferentes mezclas de biocombustible con respecto al Jet A1; en esta se observa que existe un incremento de la cantidad utilizada de combustible por hora de las mezclas frente al Jet A1; mostrando por ejemplo que la mezcla B100 consume 68.66 Kg de combustible más que el Jet A1 en una hora.

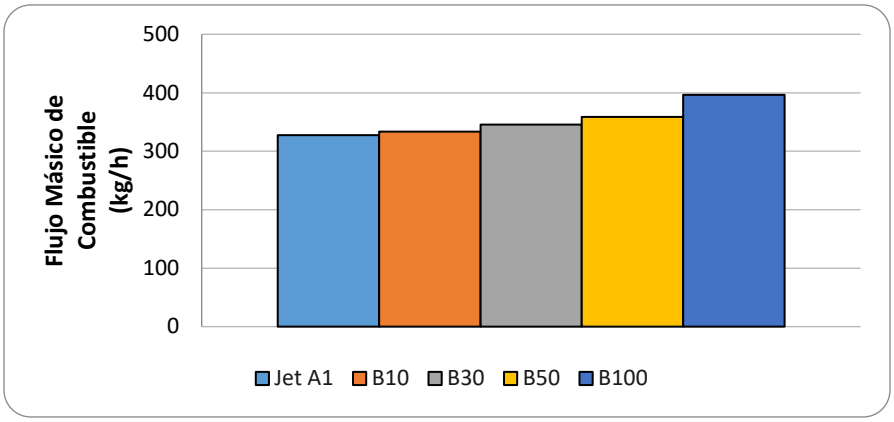

***Figura 7**. Comparación del Flujo másico de combustible del motor.*

4. Conclusiones

- El Biodiesel tiene un poder calorífico menor que el JET A1 comercial, lo cual puede llegar a afectar la potencia entregada por el motor y/o el consumo de combustible.

- En términos de la densidad y la viscosidad, la variación es acorde a la literatura. La densidad y viscosidad del Biodiesel son superiores en relación con el combustible comercial. Estas pequeñas diferencias pueden llegar a afectar el proceso de atomización.

- La reducción de NO_X se hace evidente a medida que el contenido de Biodiesel en la mezcla de combustible aumenta. Por su parte, los niveles de CO_2 aumentan debido que para mantener las prestaciones del combustible convencional se requiere mayor cantidad de combustible ya que las mezclas de Biodiesel tienen un menor poder calorífico.

- Los estudios realizados indican que, a menor temperatura, mayor es el porcentaje de biocombustible en la mezcla y menor es el nivel de NO_X.

- Se encontró que el comportamiento de los niveles de NO_X como función de la temperatura en el intervalo [2564.0 K, 2587.0 K], es aproximadamente cuadrático.

- Se encontró que la producción de CO_2 es lineal indicando de esta manera que el crecimiento del número de moles del CO_2, es directamente proporcional al porcentaje de biocombustible en la mezcla.

- Las potencias y el consumo específico de combustible calculadas con las mezclas de Biodiesel, no afectan los valores nominales dados por el fabricante del motor, además de encontrarse dentro de los rangos establecidos por el mismo; lo que indica que las mezclas son óptimas para su uso en cuanto a estos parámetros.

- Existe un aumento del flujo másico de combustible del motor con las mezclas de Biodiesel comparadas con el Jet A1, lo que indica también un aumento de la cantidad del combustible utilizado en una hora de funcionamiento, esto se vería reflejado en un incremento de costos en el momento de su uso.

5. Referencias

- Amezcua, M. (2016). *Combustibles Avanzados de Aviación*. Obtenido de http://rtbioenergia.org.mx/wp-content/uploads/2016/12/Divulgacion_Biojetfuel-booklet-vf.pdf
- Analytic. (s.f.). *Biocombustibles para la aviación: el futuro de los combustibles para aviones*.
- Boeing. (2011). *Boeing se asocia con South African Airways para obtener combustible de una nueva planta de tabaco*. Obtenido de www.boeing.es
- Carolyn, D., Emily, N., Amy, S., & and Laura, V. (2014). An Overview of Aviation Fuel Markets for Biofuels Stakeholders. *National Renewable Energy Laboratory*.
- China, S. (2015). *China permite uso comercial de biocombustible para aviación*. Obtenido de http://spanish.china.org.cn
- Colombiana, F. A. (18 de 05 de 2021). *Fuerza Aerea Colombiana*. Obtenido de Fuerza Aerea Colombiana: https://www.fac.mil.co/cultura-aerea/aeronaves-fuerza-a%C3%A9rea-colombiana
- Digital, C. N. (20 de 02 de 2012). *Biocombustibles para la aviación podrían ser competitivos en menos de una década*. Obtenido de www.caribbeannewsdigital.com
- El-Sayed, A. F. (2017). *Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines* (Segunda ed.). CRC Press.
- Fedebiocombustibles. (2011). *Fedebiocombustibles*. Obtenido de Fedebiocombustibles: https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-908.htm
- Fernandez, K. C. (Julio de 2018). Caracterización Teórica de Párametros del Biodiesel y Estudio de Algunas de sus Emisiones. Madrid, España.
- García, P. A. (2010). Uso de biocombustibles en la aviación comercial. *García P. A. (2010). Uso de bihttps://www.acta.es/medios/articulos/automocion_y_transporte/058105.pdf*.
- Glaude, R. F. (210). Adiabatic flame temperature from biofuels and fossil fuels and derived effect on NOx emissions. *Fuel Proc. Technol*, 229-235.

- InfoCampo. (01 de 01 de 2013). *Firman convenio para el desarrollo de biocombustible aeronáutico [en Argentina]*. Obtenido de http://infocampo.com.ar
- Jorge, O. (2016). BIOCOMBUSTIBLES EN AVIACION. *https://www.hispaviacion.es/biocombustibles-en-aviacion/*.
- Mahammadsalman, W., Azami, M., & Mark, S. (2019). Investigation of aircraft engine performance utilizing various alternative fuels. *IOP Conference Series: Materials Science and engineering*, 642.
- Mañana, E. (2015). *México apuesta por biocombustible en aviación*. Obtenido de www.elmanana.com.mx
- MinTransporte. (8 de 2020). *En 9,1% aumentó el tráfico de pasajeros movilizados vía aérea en 2019*. Obtenido de https://mintransporte.gov.co/publicaciones/8143/en-91-aumento-el-trafico-de-pasajeros-movilizados-via-aerea-en-2019/#:~:text=Un%20crecimiento%20del%209%2C1,de%20los%20cuales%20389%20mil
- Mónico, L., Rincón, E., & Manrique, C. (2020). Combustibles alternativos en el transporte aéreo nacional. *Ciencia y Poder Áereo*, 9.
- Mucino, F. (20 de 12 de 2017). *Así avanzan los biocombustibles en la aviación*. Obtenido de https://a21.com.mx/aeronautica/2017/12/20/asi-avanzan-los-biocombustibles-en-la-aviacion
- Muhammad, H. A. (2017). Comparative study of alternative biofuels on aircraft engine performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 1509-1521.
- Negocios, E. y. (18 de 05 de 2021). *Estrategia y Negocios*. Obtenido de Estrategia y Negocios: https://www.estrategiaynegocios.net/inicio/998090-330/aviotechnology-apuesta-por-mantenimiento-aeron%C3%A1utico
- Pratt & Whitney Canada. (2007). *PT6A-60 series training manual*. Quebec: Pratt & Whitney Canada.
- Pearce, G. K. (1993). The prediction of thermal NOx in gas turbine exhausts. *Eleventh International Symposium on Air Breathing Engines*, 1-9.
- Portafolio. (28 de 02 de 2018). *En 10 años, Colombia duplicó su conexión aérea con el mundo*. Obtenido de https://www.portafolio.co/negocios/en-10-anos-colombia-duplico-su-conexion-aerea-con-el-mundo-514765
- Redsol. (2015). *Biocombustibles para volar más limpio*. Obtenido de https://www.repsol.com/imagenes/global/es/Biocombustibles%20para%20volar%20m%C3%A1s%20limpio_tcm13-15270.pdf
- Republica, L. (22 de 01 de 2014). *Boeing estudia producir en Medio Oriente nuevos biocombustibles con plantas del desierto*. Obtenido de https://www.larepublica.co/globoeconomia/boeing-estudia-producir-en-medio-oriente-nuevos-biocombustibles-con-plantas-del-desierto-2099810
- Restrepo, L. V. (21 de 08 de 2013). *LAN realiza primer vuelo con biocombustible en Colombia*. Obtenido de https://www.elcolombiano.com/historico/lan_realiza_primer_vuelo_con_biocombustible_en_colombia-NCec_256568
- Stephen, S. D., Aravind, N., & John, F. D. (2020). Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of Supply chain components. *Frontiers in energy research*.
- Terpel. (2016). *Aviación Terpel*. Obtenido de https://www.terpel.com/en/home-Productos Servicios/Aviacion/Aviacion-Terpel/
- González, F., Baquero, L. (2017). *Metodología para la Medición del Impacto, Control y Disminución de las Emisiones de Gases de los Motores a Reacción en Aeropuertos*. 15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Global Partnerships for Development and Engineering Education"
- Mattingly, J. D. (2005). *Elements of Gas Turbine Propulsion*. New York: McGraw Hill Education.
- Wild, T. W. (2018). *Aircraft Powerplants*. New York: McGraw-Hill Education.
- Farokhi, S. (2009). *Aircraft Propulsion*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons.

Sobre los autores

- **L. F. Mónico**, es profesora asociada II del Programa de Ingeniería Aeronáutica de la Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, D.C. Colombia. Email: luisa.monico@libertadores.edu.co
- **R. Avella**, es profesor asociado del Programa de Ingeniería Aeronáutica de la Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, D.C. Colombia. Email: rgavellas@libertadores.edu.co
- **F. J. González**, es profesor asociado I del Programa de Ingeniería Aeronáutica de la Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, D.C. Colombia. Email: fjgonzalezc@libertadores.edu.co

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2021 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)