

## **Generación de empuje en aeroreactores utilizando biocombustible**

Pablo Arizpe, Pedro Argumedo, Oscar Serrano, Enrique Olivares y Merari Loera

P. Arizpe, P. Argumedo, O. Serrano, E. Olivares y M. Loera  
Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo (UPMH), Boulevard Acceso a Tolcayuca 1009, Ex Hacienda San Javier, 43860 Tolcayuca, Hidalgo, Departamento de Ingeniería en Aeronáutica  
parizpe@upmh.edu.mx

M. Ramos.,V.Aguilera.,(eds.). Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, 2013.

## Abstract

This paper focuses on the propulsion of jet engines and the measurement of thermodynamics parameters (pressure, temperature, mass flow, etc.) using specialized lab thermal equipment to get sustained nominal thrust with biofuels instead of fossil fuels, decreasing the specific fuel consumption of fossil fuels and the exhaust gas emissions.

## 11 Introducción

Un motor de combustión interna es una máquina térmica que transforma la energía proporcionada por un combustible en energía mecánica o cinética mediante un proceso llamado combustión, para ello utiliza diversos combustibles. Las aplicaciones de esta tecnología son diversas, entre ellas se puede mencionar a la generación de energía eléctrica, bombeo de agua y aceite, gasoductos, propulsión de vehículos terrestres, marítimos y aeroespaciales. En su mayoría dicha tecnología emplea combustibles fósiles derivados del petróleo como es el caso de la gasolina, el diesel, keroseno, turbosina (familias JET-A, JP4, JP5, etc). Lo anterior ha ocasionado que en las últimas 3 décadas del siglo XX y primera del siglo XXI, se incrementen las cantidades de emisiones contaminantes a la atmósfera, sumado a ello el alza de precios en este tipo de combustible debido a la demanda del mismo, lo que en los últimos años ha orillado a la industria de los países industrializados a buscar diferentes tipos de combustible que tengan un origen diferente al de los combustibles fósiles, dicha iniciativa fue apoyada por diferentes tratados entre ellos la firma de la ratificación del protocolo de Kyoto celebrado en Japón en 2009 por varios países del mundo.

En base a estos esfuerzos se propusieron diferentes tipos de biocombustibles tanto líquidos como gaseosos, entre los combustibles líquidos se pueden encontrar el etanol, metanol, biodiesel, combustibles sintéticos entre otros, en cuanto a los combustibles gaseosos se puede encontrar el gas metano o gas natural. Los biocombustibles son una alternativa de energía renovable, que se mezclan en un cierto porcentaje (del 5 al 30% usualmente) con los combustibles fósiles reduciendo el consumo del mismo eliminando desechos productos de la combustión (NOx, CO, CO2, etc.) con ahorro en el gasto de combustibles fósiles. Los biocombustibles se pueden obtener del maíz, girasol, piñón, palmas, caña de azúcar, etc. que se producen a partir de cultivos agrícolas. Ya que no contienen azufre, no generan lluvias ácidas y ayudan a proteger el medio ambiente así como su transporte y almacenamiento es más seguro que los combustibles fósiles. Los biocombustibles, para ser implementados en un Motor de Combustión Interna, deben producir una misma cantidad de empuje o potencia necesaria para la propulsión, con el beneficio de reducir el consumo de combustible derivado del petróleo y la emisión de gases, para ello se necesita comprobar que esto ocurra por medio de bancos de pruebas al certificar el funcionamiento de los motores. El equipo mínimo que debe contar un banco de pruebas para medición de parámetros en turbina de gas de uso aeronáutico es:

- Tacómetros, mide las revoluciones por minuto de la turbo maquinaria

- Flujo metros, calibrados de acuerdo a la altitud de operación y corregido de acuerdo a la rotación y fricción,
- Unidad de control de combustible, censa y regula la cantidad de combustible a suministrar.
- Sistema de anti fuego.
- Boroscopios, ayudan a visualizar partes internas del motor.
- Termopares, miden la temperatura en cada estación de la turbina, propiedad básica para calcular energías aprovechables y transferencia de calor.
- Barómetros y termómetros ambientales, miden las condiciones de entrada del motor.
- Dinamómetros, ayuda a medir la potencia en los ejes del motor.
- Programa de computo digital, arroja toda la información de los instrumentos de medición y el entorno se base de acuerdo al banco de pruebas que pueden ser.
- Medidores de presión, ayuda a medir la presión en cada etapa del motor y se verifica cuanto se comprime o se expande.
- Soportes principales y secundarios para el montaje del motor.
- Sistema de encendido, generalmente se inflama la mezcla aire y combustible por medio de una bujía.
- Sistema de lubricación, ayuda a evitar fricción en las partes móviles.

La tecnología antes mencionada, sirve para la medición de diversos parámetros en un motor, sin embargo, dichas pruebas se enfocan a la integridad del motor, más que al cuidado del medio ambiente, empleando combustibles alternativos que reduzcan la emisión de contaminantes. En este contexto, diferentes países industrializados (Alemania, Austria, Japón, Estados Unidos de América, Suecia, etc.) se han involucrado en la producción de biocombustibles para generar propulsión en transporte aéreo, terrestre y marítimo ayudando a eliminar emisiones contaminantes que constituyen un serio problema de normatividad y salud mundial. En México, ninguna universidad cuenta con el equipo necesario para la realización de pruebas de turbinas de gas, lo que representa un nicho de oportunidad en investigación aplicada y desarrollo tecnológico en esta área. En esta etapa del proyecto se han realizado cálculos analíticos de los parámetros termodinámicos de un aeroreactor específicamente de un J34D, funcionando con combustible fósil y comparando sus ventajas y desventajas con el mismo motor funcionando con biocombustible en diferentes porcentajes de producto natural, posteriormente se realizó una comparación del de consumo de combustible fósil (SFC) en base al poder calorífico teórico del biocombustible, mostrando sus resultados en la sección de resultados y discusiones de este mismo documento.

Se menciona un estudio completo para un dispositivo de destilación (alambique) que sirve para la producción de biocombustible, de esta forma se realizara una mezcla correcta con aceite y combustible para aeronaves en motores térmicos que funcionen con combustible fósil. Una vez teniendo la base teórica del alambique se inició una investigación detallada de empresas generadoras de biocombustibles, en dicho estudio se encontraron varias empresas en el país como SOLVEN.

Como un antecedente se puede mencionar que en 2011 la aerolínea española Iberia lleva a cabo el primer vuelo utilizando biocombustible con un Airbus A320, de Madrid a Barcelona con un ahorro de 1500 Kg de emisiones de CO<sub>2</sub> y disminuyendo así, el efecto invernadero, el empuje nunca se vio afectado por lo cual asegura que el uso de este combustible orgánico es seguro. También en 2011 la aerolínea mexicana Aeroméxico realizó el primer vuelo intercontinental con un Boeing 777-200ER de la ciudad de México con destino a Madrid, lo cual ayudo a ahorrar una tonelada y media de combustible Jet A o Turbosina a la aerolínea mexicana sin que el empuje se viera afectado de alguna forma. “Autoridades mexicanas y españolas afirman que el vuelo es un paso importante para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en la aviación comercial, además que ayuda a diversificar las fuentes de energía” (BBC International).

### 11.1 Método

Método Analítico: En el método analítico ya se tiene calculado, en base al ciclo termodinámico Joule Brayton enfocado a turbinas de uso en aviación utilizando diferentes tipos de biocombustibles con su Poder Calorífico Inferior (PCI). Se realizó un estudio comparativo con ayuda de la teoría termodinámica desde el 10% de componentes naturales mezclados con hidrocarburos.

Como se sabe la constante del aire es  $R=286.9\text{J/KgK}$ , el calor específico a presión y a volumen constante es de  $1005\text{J/KgK}$  y  $717\text{J/KgK}$ , se aproximaron las constantes de los gases productos de la combustión para poder cuantificar el ciclo y mediante tablas ya elaboradas se pudo leer el poder calorífico inferior.

**Tabla 11** Poder calorífico de los biocombustibles (Biodiesel) y el JET A o turbosina, el numero indica el porcentaje de esencia natural, ejemplo B10- 90% fósil y 10% natural

Denominación	PCI (KJ/Kg)
B10	42390.4
B30	41240.0
B40	40605.4
B50	40089.1
B100	37517.4
JET A	43400

Se comprobó la rentabilidad para la obtención de biodiesel con el producto agrícola (Jatropha), comparando el peso después de la obtención, se midió la proporción óptima de la mezcla diesel-biodiesel en base al poder calorífico. Se eligió la semilla de Jatropha (producción agrícola) por su alto contenido de aceites en comparación con otras semillas, además de su buena adaptación en diferentes zonas geográficas.

De acuerdo a la ley de promoción y desarrollo de bioenergéticos (artículo 2) citada en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos artículos 25 y 27 fracción XX, se cumple con la especificación de no poner en riesgo la seguridad y soberanía alimentaria del país. Eligiendo así la planta de *Jatropha* ya que esta no es comestible y no afecta la alimentación de la población. Esta semilla se puede obtener a través de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimenticia (SAGARPA).

Como se sabe la elaboración de un biocombustible es relativamente sencilla, en cualquier enciclopedia científica se puede encontrar la metodología para elaborar un biocombustible casero, el problema es la calidad con la que se genera este biocombustible, si la calidad es baja esto dañara a mediano y largo plazo la integridad estructural del motor además de que es necesario adaptar la cámara de combustión de un motor que funciona en base a un combustible fósil y hacerlo funcionar con una eficiencia sino mayor por lo menos igual que cuando funcionaba con un combustible fósil, por lo tanto se ha hecho estudios acerca de las normas de calidad para la producción de biocombustible.

**Tabla 11.1** Propiedades para cumplir con la norma ASTM D6751

Propiedad	Limites	Unidad
Punto de inflamación	130.0 min	°C
Agua y sedimentos	0.050 máx.	% vol.
Viscosidad cinemática	1.9-6.0	mm <sup>2</sup> /seg
Cenizas	0.02 máx.	% masa
Azufre	0.0015 máx.	ppm
Corrosión	N° 3 máx.	-
Índice de cetano	47 min.	-
Punto de enturbiamiento	A informar por cliente	°C
Residuo carbonoso	0.05 máx.	% masa
Acidez	0.8 máx.	mg KOH/g
Glicerina total	0.240 máx.	% masa
Contenido de fósforo	0.001 máx.	% masa
Temperatura de destilación	360 máx.	°C

NORMA ASTM D6751

**Tabla 11.2** Propiedades para cumplir con la norma ASTM D7467

Propiedad	Unidad	Mínimo	Máximo
punto de inflamación	°C	52	-
Agua o humedad	% vol.	-	0.05
ceniza	% (m/m)	-	0.01
azufre	ppm	-	0.0015
Corrosión en lamina de cobre	clasificación	-	No 3
Índice de cetano	-	40	-
acido	mg KOH/g	-	0.3
Contenido de biodiesel	% volumen	6	20

NORMA ASTM D7467

**Método Práctico:**Una vez elegida la materia prima a utilizarse, es necesario construir un invernadero para producir constantemente el biocombustible, se propuso primeramente un terreno de 100m<sup>2</sup> debido a que es un proyecto para fines de investigación continuo, se realizó un estudio completo para un dispositivo de destilación (alambique) que sirve para la generación de biocombustible. Con lo anterior se genera el biocombustible en base a normas estándares de calidad antes mencionadas en el método analítico y con ayuda de visitas industriales se asesora al punto de producir el biocombustible con alta calidad.

Después se debe adquirir una turbina con un banco de pruebas y hacer modificaciones a los inyectores para que se pueda ingresar el combustible con la relación combustible-aire en base al estudio analítico, con esto se hace funcionar a la turbina en el banco de pruebas, se mide las emisiones contaminantes y se predice la integridad estructural del motor para una vida útil igual a los que marcan los manuales de operación y mantenimiento de la turbina, reduciendo las emisiones contaminantes. De acuerdo a estudios realizados de proveedores de compra y venta de motores de uso aeronáutico se decidió en primera instancia adquirir un modelo de turbina J34D.

## 11.2 Resultados

Características del alambique que se diseñó

**Tabla 11.3** Ficha técnica alambique

Alambique		
Capacidad	60	litros
Tamaño	110X115A	cm
Largo	56	cm
Espesor	1.1	mm
Peso Neto	18.9	Kg
Accesorios	Decantador, Criba: Cobre, Concentrador de azúcar, termómetro, Embudo.	

Motor Propuesto, Westinghouse J34 en la aeronave Douglas F3D SkyNight

**Tabla 11.4** Ficha Técnica Motor

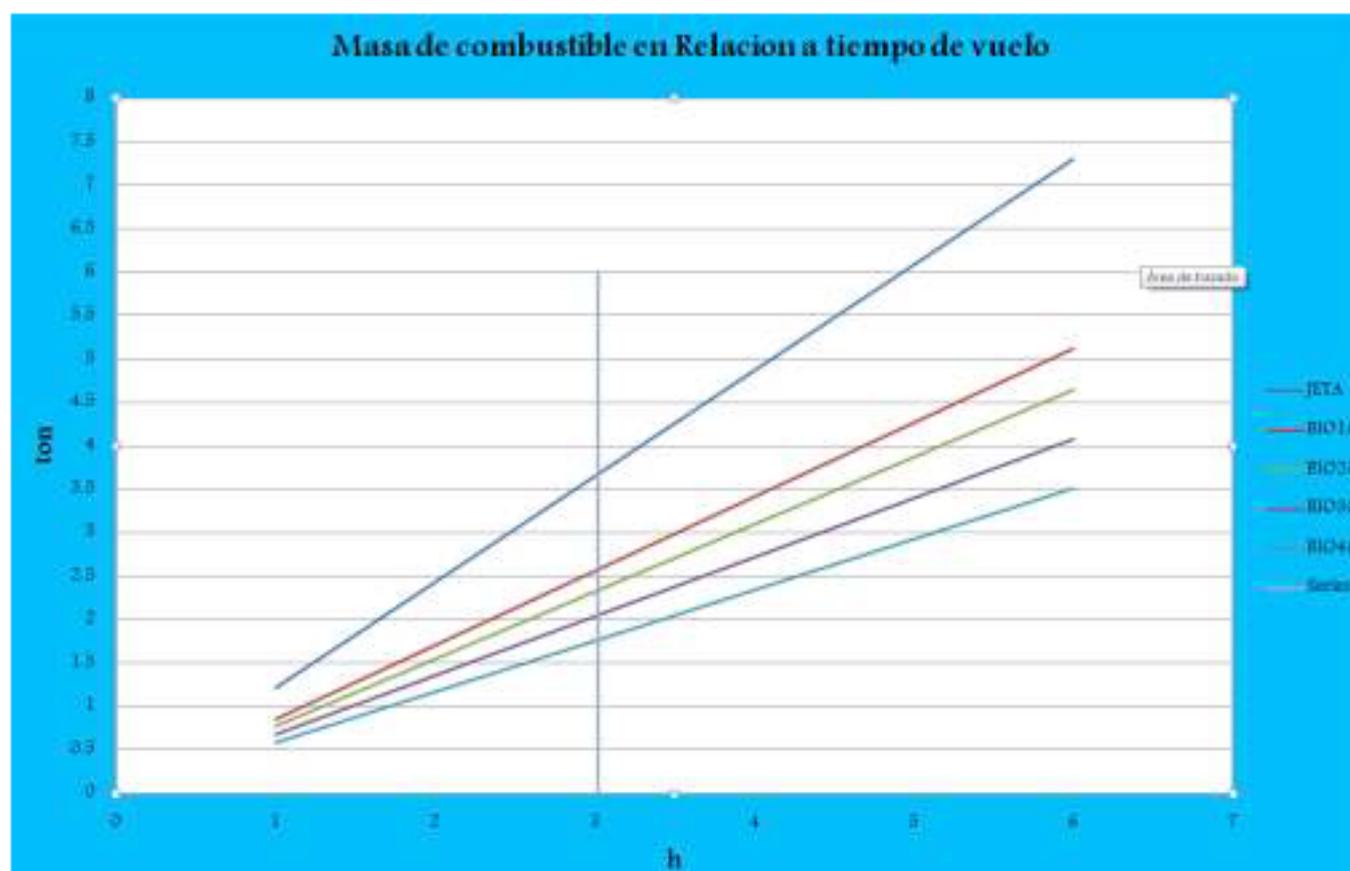
Ficha Técnica del Motor		
Tipo de motor	Turbo Jet	
Largo	112	in
Diámetro	27	in
Peso seco	1207	Lb
Compresor	Axial	11 Etapas
Tipo de cámara de combustión	Anular	
Empuje	3400	Lb
Relación de presiones	4.35:1	
Consumo específico de combustible	1.04	Lbm/Lb-hr

Cálculos analíticos del ciclo Joule Brayton para un aeroreactor con dos altitudes de operación (NM y Techo operativo de la aeronave).

**Tabla 11.5** Calculo del ciclo para obtener diámetro y fijar las características de diseño

Calculo Joule Brayton para turbo jet con características del motor propuesto										
h	$\pi$	C	P0	T0	den0	MACH	PT0	TT0	PT1	TT1
m		m/s	KPa	K	Kg/m <sup>3</sup>		KPa	K	KPa	K
NM	4.35	0	101.32	288.15	1.22	0	101.32	288.15	101.32	288.15
11200	4.35	203.20	21.90	215.35	0.35	0.69	30.13	235.91	29.97	235.91
PT2	TT2	WC	TT3	PCI	Cpg	kg	Rg	f	PT3	WT
KPa	K	KJ/Kg	K	KJ/Kg	J/KgK		J/KgK		KPa	KJ/Kg
440.76	440.76	177.85	700	43200	1140	1.33	284.5	0.00807	431.94	177.85
131.08	131.08	145.61	700	43200	1140	1.33	284.5	0.0101	128.46	145.61
PT4	TT4	$\pi_{exp}$	TT5	PT5	T5	P5	T5real	C5	DP	den
KPa	K		K	KPa	K	KPa	K	m/s	KPa	Kg/m <sup>3</sup>
158.89	546.18	2.71	546.18	158.89	488.48	101.32	490.21	358.30	0	0.72
57.86	574.32	2.22	574.32	57.86	451.29	21.90	454.98	523.21	0	0.16
TS	m	Diámetro								
N.s/Kg	kg/s	m								
361.19	41.86	0.69								
325.30	46.47	0.90								

**Grafico 11** Masa de combustible (Ton) fósil en relación a tiempo de operación con el motor (h)



**Tabla 11.6** Consumo específico de combustible para cada tipo de biocombustible y turbosina

Consumo de combustible Fossil							
	m	T	T	f	mf	mf	Consumo
	Kg/s	N	Kgf		Kg/s	kg/s	Kg/Nh
JETA	41.86	15120.00	1541.28	0.008077	0.3381	0.3381	0.08050
BIO10		15120.93	1541.38	0.006295	0.2635	0.2371	0.05646
BIO20		15119.97	1541.28	0.006423	0.2689	0.2151	0.05121
BIO30		15121.48	1541.44	0.006394	0.2676	0.1873	0.04460
BIO40		15124.66	1541.76	0.006478	0.2712	0.1627	0.03873
BIO100		15117.85	1541.06	0.006961	0.2914	0.0000	0.00000

**Tabla 11.7** Perdida de empuje al usar biocombustibles

Perdida de empuje	
	%
JETA	0.00
BIO10	4.32
BIO20	4.48
BIO30	4.56
BIO40	4.61
BIO100	4.73

**Tabla 11.8** Ahorro en pesos mexicanos por cada 3 horas de vuelo

Ahorro en un vuelo en pesos mexicanos					
Tiempo (h)	JETA	BIO10	BIO20	BIO30	BIO40
3	0.0000	33610.7483	32957.2683	32849.7631	32676.7272

### 11.3 Discusión

Un dato proporcionado por la SAGARPA es el peso del producto agrícola que nos produce un litro de biocombustible y poder observar la rentabilidad, es decir el número kilogramos que se necesita producir de materia agrícola para obtener un litro de biocombustible es de 4.1 Kg por litro. 1.5 toneladas de semilla por hectárea (en zonas marginada) y 5 toneladas de semilla por hectárea (en zonas de riego).

Como se puede observar en la tabla 11 el poder calorífico en los biocombustibles va disminuyendo conforme se agrega sustancia natural, por lo que la masa del combustible total puede aumentar para el tiempo de operación del motor, pero el porcentaje de combustible fósil disminuye y es el objetivo que se persigue ya que reduce emisiones contaminantes.

Hay que hacer mención que el empleo de mezclas con más de 30% de biodiésel puede presentar problemas de solidificación en frío, lo que obstruiría el sistema de alimentación de combustible del motor.

La tabla 11.5 muestra el cálculo analítico del ciclo Joule Brayton aplicado para turborreactores, en el cual se obtuvo un diámetro de 69cm para un diseño a Nivel del Mar, comparando este resultado con el de la ficha técnica del motor (Tabla 11.4, 27in o 68.58cm) se puede observar que el resultado arrojado en los cálculos es preciso por lo que únicamente se cambia el combustible y se puede determinar la pérdida de empuje.

En el gráfico 11 se puede observar que mientras más porcentaje de producto natural tenga la mezcla menos masa de combustible fósil se necesita, la línea vertical indica la autonomía (el tiempo de vuelo operativo) de la aeronave propuesta para el motor (3.02h).

Por supuesto que el biocombustible únicamente se probara en bancos de prueba en tierra pero se realizó un cálculo preciso del ahorro en combustible fósil.

Como se puede observar en la tabla 11.6 el consumo de combustible fósil decrece desde 0.08050Kg/Nh hasta 0.05646Kg/Nh con un B10 y así sucesivamente, lo que implica un ahorro considerable pero esto provoca una pérdida de empuje de 4% (Tabla 11.7) debido a las constantes de los gases y al poder calorífico de cada combustible y va disminuyendo gradualmente conforme se incrementa la cantidad de esencia natural en la mezcla con combustible fósil. Con lo anterior se debe incrementar la relación biocombustible-aire para mantener el empuje invariable.

Analizando también la Tabla 11.8 del tiempo de 3h como autonomía normal, se ahorra cerca 33000 pesos mexicanos por cada operación de 3h de la aeronave o por cada tres horas de funcionamiento del motor en base a los precios de la turbosina y al biodiesel.

Realizando un cálculo similar en un motor Diesel se visualiza en la siguiente Tabla la pérdida de potencia del motor con los diferentes tipos de biocombustible.

**Tabla 11.9** Pérdida de potencia al usar biocombustibles en motores diésel

	POT (HP)	%pérdida
Diesel	300.294862	0.0
B10	297.769529	0.8
B20	291.078736	3.1
B30	289.235045	3.7
B40	287.387865	4.3

## 11.4 Conclusiones

El cuidado del ambiente es un tema que preocupa y ocupa a todos los países. Las consecuencias de modelos de desarrollo, pasados y actuales, que no han tomado en cuenta al medio ambiente, se manifiestan inequívocamente en problemas de orden mundial como el cambio climático.

En relación con el cambio climático, el impacto de los gases de efecto invernadero es cada vez más evidente. En México, el consumo de combustibles fósiles es el factor que genera en mayor medida dichos gases, lo cual se ve agravado por la falta de un sistema de transporte eficiente que reduzca su generación.

El uso de biocombustibles para la propulsión de aeronaves, vehículos terrestres y marítimos es un claro ejemplo de reducir emisiones contaminantes ayudando a mantener limpio el medio ambiente sin tener alguna limitante en la generación de propulsión, así mismo, coadyuva a nivel regional al producir en mayor cantidad cultivos agrícolas y ahorrar en el consumo de combustible fósil en cada MCI.

En este sentido, el viejo Plan Nacional de Desarrollo, tiene como uno de sus objetivos la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), teniendo como estrategia el Impulsar la adopción de estándares internacionales de emisiones vehiculares, para lograrlo considera necesario contar con combustibles más limpios y limitar así las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Por otro lado, si bien es cierto, es sumamente importante la reducción de emisiones contaminantes y el uso de combustibles fósiles, la potencia o empuje generados en un motor, independientemente a la aplicación, no debe verse afectada, pues si así fuera, se tendrían también algunas consecuencias en los motores, como reducción de la vida útil del mismo, e incremento en las acciones de mantenimiento del mismo, elevando con ello costos a los propietarios de estos en sus diversas aplicaciones.

En este contexto, el proyecto busca la generación de propulsión en motores de combustión interna alternativos y rotativos, empleando un biocombustible que proporcione una potencia o empuje similar al producido por un combustible fósil, teniendo como consecuencia la reducción de emisiones contaminantes y reducción del uso de combustibles fósiles, pero sin afectar la integridad estructural de los motores que utilicen esta tecnología.

Se concluye que la utilización del biocombustible reduce enormemente las emisiones de los gases contaminantes y se demuestra que el empuje se reduce para unas características similares de operación en el motor por lo que la cantidad de biocombustible aumenta pero se reduce la cantidad de combustible fósil y restaría analizar de forma practica el efecto estructural a mediano y largo plazo del motor por supuesto cumpliendo las normas de calidad del biocombustible.

## 11.5 Referencias

Giacosa d. (2000). Motores endotérmicos. España. Ediciones Omega S. A

Álvarez Cuesta M. (2001). Motores de reacción. España. Ediciones T. Thomson Saravanamutto H., Rogers G., Cohen H., Stranznicky P. (2009) Gas turbine theory. Inglaterra. Ediciones Prentice hall.

Mataix C. (1982). Mecánica de fluidos y maquinas térmicas. USA Ediciones Alfaomega.

White M.F. (2008). Mecánica de fluidos. España. Ediciones Mc Graw-Hill.

Bathie W. (1987). Fundamentos de turbinas de gas. USA. Ediciones Limusa.

