

## ENSAYO EN BANCO DE UNA MICROTURBINA JETCAT 120P PARA LA CARACTERIZACION DE LAS EMISIONES GASEOSAS CONTAMINANTES

Matías Coppa<sup>1</sup>, Fernando Cruz-Peragón<sup>2</sup>, Eloisa Torrez Jiménez<sup>3</sup>,  
Juan Ignacio D'lorio<sup>4</sup>, Alejandro Di Bernardi<sup>5</sup>

1-UIDET "GTA-GIAI", Dpto de Aeronáutica,

Facultad de Ingeniería, UNLP, Argentina.

matias.coppa@ing.unlp.edu.ar

2-Dpto. de Ingeniería Mecánica y Minera; EPS de Jaén;

Universidad de Jaén, España.

fcruz@ujaen.es

3-Dpto. de Ingeniería Mecánica y Minera; EPS de Jaén;

Universidad de Jaén, España.

etorres@ujaen.es

4-UIDET "GTA-GIAI", Dpto. de Aeronáutica,

Facultad de Ingeniería, UNLP, Argentina.

juan.ignacio.diorio@gmail.com

5-UIDET "GTA-GIAI", Dpto. de Aeronáutica,

Facultad de Ingeniería, UNLP, Argentina.

cadibern@ing.unlp.edu.ar

**Palabras clave:** Emisiones, Gaseosas, Turborreactor, Curvas Características.

### Resumen

Específicamente, las emisiones de los motores de los aviones incluyen el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SOX), hidrocarburos no quemados (HC), material particulado (PM), compuestos orgánicos volátiles (VOC<sub>s</sub>), y otros compuestos. De distinta forma, dichos gases afectan tanto de manera directa al medioambiente, con su cuota parte a la contaminación global y su aporte al calentamiento global a escala mundial, y al impacto sobre su entorno poblacional aeroportuario a escala local.

Las cantidades totales de gases emanados dependen de ciertos factores tales como el tipo de combustible utilizado, la riqueza de la mezcla, las condiciones atmosféricas de operación, y la etapa de vuelo analizada, entre otros. En un primer lugar, en el presente estudio se realiza una revisión bibliográfica, para la determinación de dichos parámetros de la combustión que influyen en la concentración de las emisiones gaseosas.

Para la validación de algunos de dichos factores, se procede al ensayo de una microturbina JetCat 120p donde mediante un banco de ensayos equipado se mide y se analiza las emisiones gaseosas contaminantes cuando ésta opera en distintos regímenes operacionales. Si bien dichos ensayos se han realizado con combustible keroseno (estructura molecular semejante al Jet A1) los procedimientos de medición y análisis de **resultados se han realizado en base a la normativa: A. N. Standard, "Laboratory Methods of Testinf Fans for Rating," 1999, y la normativa: International Civil Aviation Organization (ICAO), "Annex 16 Environmental Protection - Volume II: Aircraft Engine Emissions," 2008.**

El estudio efectuado se encuentra encolumnado con los objetivos del comité de protección ambiental aeronáutica (CAEP) conformado por la Organización de Aviación Civil

Internacional (OACI), particularmente con los del Grupo de Trabajo 3 (WG3) que se centra en la mitigación de las emisiones gaseosas.

## 1. Introducción

Uno de los objetivos estratégicos de protección ambiental de la Organización de Aviación Civil Internacional es limitar o reducir el impacto de las emisiones gaseosas de los motores de las aeronaves para lograr tanto una mejora en la calidad del aire local como la reducción en el cambio climático. Desde el año 1977, la OACI, mediante el organismo creado específicamente para la protección medioambiental el Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP), con la aplicación de distintas normativas ha logrado reducir notablemente las emisiones gaseosas de los motores aeronáuticos. En la siguiente imagen se muestra una evolución histórica de las emisiones gaseosas de dichos motores:

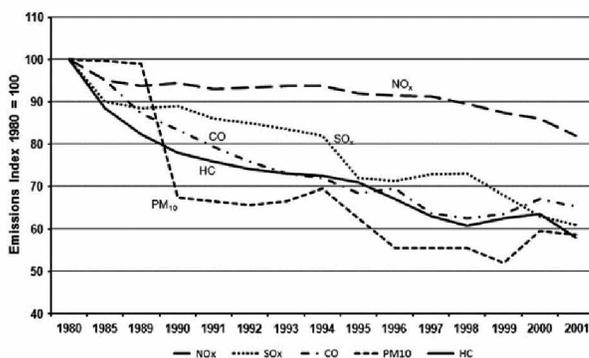


Figura 1. Evolución de las emisiones de los aviones, donde se observa que el mayor progreso fue realizado en el HC y CO. [1]

La principal normativa de carácter obligatoria que limita las emisiones gaseosas y deben cumplir los motores para salir al mercado es el **Anexo 16 "Volumen II — Emisiones de los motores de las aeronaves"** [2]. A su vez, mediante el manual Airport Air Quality Manual [3], se busca disminuir el impacto directa a la población que habita en el entorno urbano aeroportuario.

Se han realizado estudios comparativos de las mediciones en ambas etapas [4], y su aporte al impacto global [5][6]. A continuación se analizará por separado cada uno de ellas.

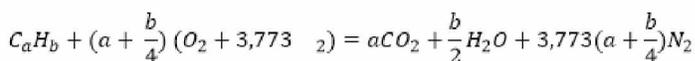
Cada una de dichas etapas posee asociado un porcentaje de potencia que dependerá del tipo de motor y el aeropuerto en cuestión, las distintas emisiones de acuerdo a la variación en el empuje será estudiada a lo largo del documento, pero a nivel global podemos afirmar que aproximadamente el 10% de las del total de las emisiones gaseosas de la actividad aeronáutica el 90% se emite en niveles de vuelo crucero y el restante 10% se emite a altitudes por debajo de los 1000 m [5]. Para evaluación de la afectación ambiental en el aeropuerto identificamos el ciclo Landing-Take Off (LTO) como [3]:

- Landing - (Aproximación): son todas aquellas operaciones que se realizan desde los 1.000 metros de altura sobre la cota del aeropuerto hasta que alcanza la superficie de la pista.
- Taxi - (Rodaje): son las maniobras que realiza el avión hasta llegar a su puesto de estacionamiento en plataforma en condición de Block-On (calzos colocados) y las maniobras que realiza el avión desde el Block-Off (calzos afuera) hasta llegar a la cabecera de pista.
- Take off - (Despegue): son las operaciones que realiza el avión en la pista para lograr el despegue.
- Climb out - (Ascenso): son las operaciones que realiza el avión hasta alcanzar los 1.000 metros de altura sobre la cota del aeropuerto.

Debido a la creciente cantidad de aeropuertos que se encuentran emplazados en entornos poblacionales [7], y el crecimiento continuo del transporte aéreo comercial, la contaminación del aire que rodea los aeropuertos se ha convertido en una preocupación importante para los gobiernos locales / regionales.

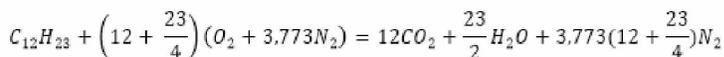
Específicamente, las emisiones de los motores de los aviones incluyen el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), hidrocarburos no quemados (HC), material particulado (PM), compuestos orgánicos volátiles (VOCs), y otros compuestos [17]. Aproximadamente, un 70% de dichas emisiones son CO<sub>2</sub> y un 30 % de H<sub>2</sub>O, donde el resto de los compuestos representan menos del 1%.

La ecuación que representa una combustión completa de un hidrocarburo de composición molecular promedio  $C_aH_b$  es [9]:



*Ecuación 1*

Para el caso del combustible aeronáutico utilizado en el transporte aéreo Jet A1, se obtiene:



*Ecuación 2*

Las cantidades totales de gases emanado dependerán de ciertos factores tales como el tipo de combustible utilizado, la riqueza de la mezcla, el mantenimiento de la cámara de combustión o del motor en general, las condiciones atmosféricas de operación, la etapa de vuelo analizada, entre otros. Por ejemplo, la composición química del aire húmedo difiere con la del aire seco principalmente en la cantidad de moles de Oxígeno, donde en el aire seco es aproximadamente 20,94%, en el aire con una humedad relativa de 0.03  $\left(\frac{\text{kg de vapor de agua}}{\text{kg aire seco}}\right)$  el valor es de 19,98% [10].

## 2. Análisis de los gases contaminantes

Los procesos fluidodinámicos que ocurren dentro de la cámara de combustión poseen un alto nivel de complejidad; los factores que afectan los niveles de concentración de las emisiones son numerosos, entre los más importantes podemos destacar:

- la temperatura de llama,
- la velocidad de combustión,
- el tiempo de los gases en la cámara de combustión,
- Inyección del combustible, y
- El diseño de la misma.

Es por ello que además de las condiciones de operación, la concentración de las emisiones varían de manera significativa de un motor a otro. La naturaleza de la formación de los gases contaminantes, en la mayoría de los casos, se puede observar en la siguiente figura donde el comportamiento del CO y el HC es contrario al del NO<sub>x</sub> y el índice de humos:

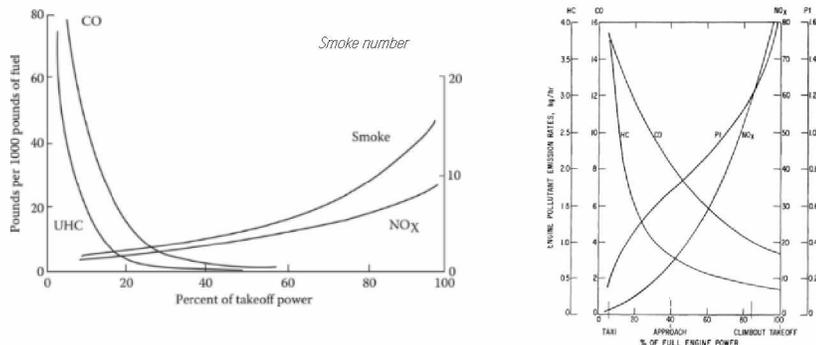


Figura 2. Izquierda: Representación de las emisiones de acuerdo a la riqueza de la mezcla y de la temperatura de llama [11]. Derecha: Emisiones de un motor JT8D en función del porcentaje máximo de potencia y asociado al Taxi, Approach, Climb out y Take Off. [12]

Para cualquier tipo de cámara de combustión, se observa una alta influencia en la concentración de las emisiones respecto al modo de inyección del combustible; la inyección controla el patrón del quemado y distribución de temperaturas de la zona primaria de la cámara e influye tanto en el tamaño de las microgotas, en el proceso de mezcla y la penetración del combustible [13]. Entendiendo como penetración del combustible como la distancia que puede alcanzar dicho fluido respecto del escape de la cámara [14].

## 2.1. Monóxido de Carbono (CO) e Hidrocarburos no quemados (HC)

En condiciones de mezcla rica el CO puede producirse debido a la falta del oxígeno necesario para la formación completa de CO<sub>2</sub>, en cambio en condiciones de mezcla pobre y relaciones estequiometrias bajas, las emisiones de CO se producen debido al efecto de la disociación. Como se mostró anteriormente, en la práctica, en condiciones de baja potencia, es cuando mayor concentración de monóxido de carbono aparece, este comportamiento se produce por [15]:

- Inadecuada (baja) velocidad de combustión en la zona primaria de la cámara, sumada a una mezcla pobre y un tiempo de residencia de la mezcla muy bajo.
- Inadecuada mezcla del aire y combustible, produciendo una falta de homogeneidad en la mezcla y en la distribución de la cámara.

- Enfriamiento rápido de los productos de la combustión, debido a los efectos de ventilación (principalmente en la zona primaria de la cámara) produciendo así una menor temperatura máxima y una mala distribución de ésta en la cámara.

Por lo que la concentración de las emisiones de CO dependerá principalmente de los siguientes factores [16]:

- Relación de mezcla, principalmente en la zona primaria de la cámara,
- Temperatura de entrada del aire,
- Presión de la combustión,
- Atomización del combustible, y
- Aire de enfriamiento en la zona primaria de la cámara.

#### Relación de mezcla y Presión de la combustión

A partir de ensayos realizados sobre distintos combustibles [17], se relaciona de forma directa la disminución de la concentración de CO al incrementar la relación de mezcla, siendo el valor óptimo para distintos combustibles de 0.8. Dicho comportamiento, se observa que es independiente de la presión en la cámara al momento de la combustión.

El alto nivel de emisiones para bajas relaciones de mezcla es producido debido a las bajas velocidades de oxidación, y asociadas bajas temperaturas obtenidas en la cámara. A su vez, a temperaturas mayores de 1800 K se comienza a producir CO debido al proceso de disociación del CO<sub>2</sub>, dicho efecto ser reducido cuando se trabaja con mayores presiones: [18].

#### Aire de enfriamiento en la zona primaria de la cámara

Otro de factor de importancia en las emisiones de CO es la temperatura de las paredes de la cámara, principalmente en la zona primaria. Dicha temperatura, está relacionada con el caudal de aire de enfriamiento, por lo que la disminución de la temperatura de la mezcla promueve la formación de CO pudiendo llegar hasta temperaturas tan bajas que paralizan la reacción química de combustión. Además, a pesar de la presión, el CO puede escaparse por los agujeros de refrigeración migrando hacia el aire de enfriamiento de la cámara [11]. Las emisiones de hidrocarburos no quemados se encuentran normalmente relacionadas con una baja atomización del combustible, velocidades de combustión inadecuadas y efectos del enfriado en la cámara de combustión. Las reacciones químicas de la formación del HC son más complicadas que las del CO pero los factores que influyen en su producción son los mismos, es por eso que su comportamiento tiende a ser parecido.

## 2.2. Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

La mayoría de los óxidos de nitrógeno formados (NO) son subsecuentemente oxidados a NO<sub>2</sub>. Es por ello que la distinta bibliografía suele agruparlos en términos de NO<sub>x</sub> [19]. Se diferencian distintos tipos de reacciones químicas que ocurren en las distintas etapas de la combustión que pueden llevar a la formación del NO<sub>x</sub>, dichas reacciones químicas no serán aquí estudiadas pero sí la influencia de los distintos parámetros.

### Atomización del combustible y Temperatura del aire de admisión

La influencia del tamaño de las microgotas en las emisiones del NO<sub>x</sub>, depende a su vez altamente de la relación de aire combustible (ER); se observa el comportamiento en la figura 3, donde la concentración de emisiones aumentan cuanto mayor es el tamaño de las partículas especialmente a relaciones de ratios baja [20]. A su vez, se observa la influencia directa de la temperatura del aire de admisión en la formación de NO<sub>x</sub> donde, el aumento en la temperatura del aire en la cámara supone un aumento directo en la concentración de NO<sub>x</sub>. [21]

Cabe destacar que para relaciones estequiométricas entre 1 y 1,1, el nivel de emisiones es casi independiente del tamaño de la microgota [22]., por lo que se deduce que solo en bajas relaciones de ER, y teóricamente bajas temperaturas de combustión, influye la forma de inyección del combustible [23].

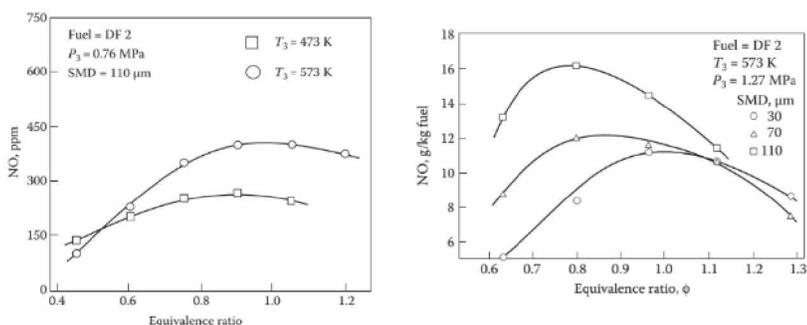


Figura 3. Influencia de la temperatura del aire en la entrada de la cámara y el tamaño de las microgotas, en las emisiones de NO<sub>x</sub> [11].

### Influencia del tiempo de residencia

El tiempo de residencia de la mezcla se encuentra altamente influenciada por la presión al momento de la combustión, si bien la influencia de la presión para distintos combustibles ha sido medida dicho parámetro posee distintos efectos difíciles de cuantificar y aun no estudiados por completo [24]. Pero estudiando únicamente el tiempo de residencia de la mezcla distintos autores concuerdan en que cuanto mayor es el tiempo de residencia del gas en la cámara mayor son las emisiones de NO<sub>x</sub>. [25]

El efecto ambiental del NO<sub>x</sub> como único gas es un forzamiento radiativo positivo, pero distintos estudios sobre su combinación con otros gases (O<sub>3</sub> and CH<sub>4</sub>) muestran lo contrario, variando siempre su impacto debido a la altura bajo estudio [26]. Aproximadamente aumentando 600 metros la altura de vuelo el impacto en el forzamiento radiativo aumenta  $2 \frac{mW}{m^2}$  debido a su interacción con el O<sub>3</sub>. [27]. Se han desarrollado modelos del impacto ambiental, en distintos niveles de la atmósfera y su relación con la actividad aeronáutica [28]–[30], así como mediciones en vuelo crucero [31]–[37].

### 2.3. Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

El dióxido de carbono, posee uno de los mayores efectos en el forzamiento radiativo, su nivel de afectación es global y posee un tiempo de vida estimado de 100 años [35]. A diferencia de otros gases, si bien la cantidad emitida depende de las distintas condiciones de operación, de acuerdo a la Ecuación 2, las emisiones de CO<sub>2</sub> representan más del 70% de las emisiones totales

El principal combustible utilizado en el transporte aéreo (Jet A1) está compuesto por 12 átomos de carbono y 23 de hidrógeno (C<sub>12</sub>H<sub>23</sub>). Por lo que su oxidación, con una mezcla estequiométrica produce 12 moléculas de CO<sub>2</sub>. Teniendo en cuenta el peso molecular del jet kerosene (167.311 g/mol) y el de CO<sub>2</sub> (528.114 g/mol) se obtiene un factor de emisión de 3.156 kg de CO<sub>2</sub> /kg de combustible [38].

## 3. Métodos de reducción de las emisiones

### 3.1. Control de la temperatura de llama

De todos los factores que influyen en la concentración de las emisiones uno de los más importantes es la temperatura de llama. Por lo general, de acuerdo a las condiciones de operación del motor, y por consiguiente de la cámara, debemos definir el rango de temperaturas en el cual el nivel de emisiones es menor. En los motores aeronáuticos de la aviación comercial el rango de temperaturas en la que éste puede operar se encuentra entre: 1000 K a bajo empuje y 2500 K a altas condiciones de operación. En la siguiente figura se muestra que el rango óptimo de trabajo está comprendido entre 1670 a 1900 K, por lo que todos los métodos de reducción deben actuar para mantenerse en dichas condiciones así como una relación de mezcla de 0.8 aproximadamente

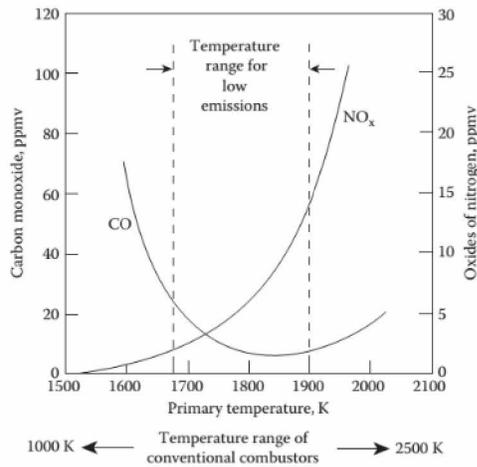


Figura 4. Influencia de la temperatura en la zona primaria de la cámara [79].

### 3.2. Control de la geometría de la cámara

Mediante la aplicación de una geometría variable que permita regular y controlar el flujo de aire de enfriamiento que circula por la camisa de la cámara, lo que se busca mantener la temperatura de la mezcla dentro del rango mencionado [40].

De esta manera, para situaciones de baja operación el aire es desviado a la zona de dilución de la cámara, o bien en las condiciones de máximo empuje se busca refrigerar la mezcla dentro de la zona primaria [39]. La desventaja de los dispositivos de geometría variable es que debe incluirse en el motor un sistema de control que incrementa el costo y el peso. La aplicación de esta tecnología ha sido utilizada en motores industriales, de pequeño y mediano tamaño, pero debido a los costos y de la confianza en la operación se observa que esta tecnología no ha sido totalmente desarrollada [41].

### 3.3. Proceso de combustión por etapas

El objetivo de este proceso es lograr un ER óptimo y mantener la temperatura en el rango previsto durante las etapas de baja operación (Taxeo); para ello debe subdividirse la cámara en subzonas, las cuales estarán asociadas a un control de selección de inyectores. Esta tecnología, donde logra mantener constante la temperatura de combustión de forma homogénea en toda la cámara, es actualmente utilizada en distintos motores aeronáuticos, habiendo desarrollado Pratt and Whitney un modelo de cámara de combustión aplicado en el motor P&W V2500-AS que ha demostrado tener buenos efectos en la disminución de emisiones gaseosas [42].

#### *Descripción de la microturbina*

Para la validación de algunos de dichos parámetros, se procede al ensayo de una microturbina JetCat 120p donde mediante un banco de ensayos equipado se mide y se analiza las emisiones gaseosas contaminantes cuando ésta opera en distintos regímenes operacionales. Se muestra a continuación los datos brindados por el fabricante y una imagen en corte del motor:

Tabla 1. Nombre de la Tabla.

Parámetro	Unidad	Valor
RPM en Ralenti	(1/min)	33.000
RPM Máxima	(1/min)	123.000
Empuje en Ralenti	(N)	5
Empuje en Max. RPM	(N)	120
Temperatura de los gases de escape	(°C)	500-710
Relación de presión	Adim.	2,9
Caudal másico	(kg / s)	0,32
Velocidad de los gases de escape	(Km / h)	1.350
Consumo de combustible en Ralenti	(kg / min)	0,079
SFC en Max. RPM	(kg / N*h)	0,15
Peso	(g)	1.420
Diámetro	(mm)	112
Longitud	(mm)	320



En primer lugar se procederá a calcular el flujo másico de aire de admisión y caracterización de las curvas características del mismo, para ello se diseñó un sistema de admisión en base a la normativa “Laboratory Methods of Testings Fans for Aerodynamic Performance Rating, ANSI/AMCA 210-99” [43]. Para la correcta medición y correlación de parámetros hizo falta construir específicamente dos elementos: laminador de flujo y una sección convergente.

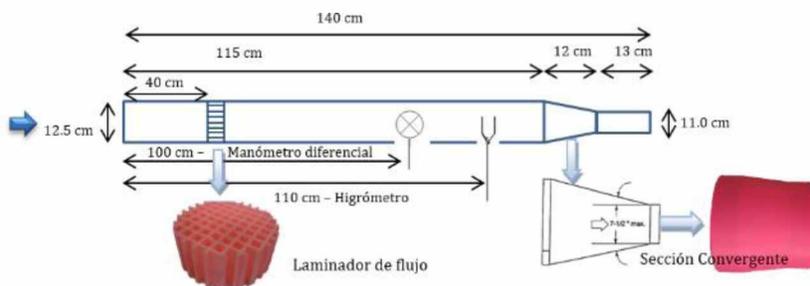


Figura 5. Características de laminador de flujo según normativa ANSI/AMCA 210-99 [43]. Derecha: Pieza en CAD a construir

El proceso metodológico seguido para la construcción de dichas piezas fue:

- Diseño geométrico de las piezas en Solid Works
- Utilización de Software CURA para la adaptación de la pieza a la impresora 3D
- Impresión de la pieza en una Impresora 3d : BQ Wiroos

La ubicación de los instrumentos y los elementos construidos para el sistema de admisión fueron ubicados de acuerdo a la normativa mencionada.

#### 4. Procedimiento de ensayos

En primer lugar, se realizó un primer barrido a distintas RPM para la determinación del flujo másico de admisión y su relación el empuje. Para dichas condiciones me midió a su vez las emisiones HC, CO, NO, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>.

Dado que la normativa nos recomienda utilizar un reglaje de empuje específico para la determinación de los Índices de Emisión (Kgs de gas contaminantes/Kg de combustible) de cada gas analizado se procedió a realizar mediciones en el ciclo LTO representado en la siguiente tabla:

Tabla 2. Reglaje de Empuje aplicado para la caracterización de emisiones en el ciclo LTO.

Modalidad de utilización LTO	Reglaje del empuje	RPM	Empuje (N)
Despegue	100 % Foo	123.000	107,0
Ascenso	85% Foo	116.000	93,1
Aproximación	30 % Foo	90.000	34,3
Rodaje/Marcha Lenta	7 % Foo	55.000	7,5

Para la emisión de gases contaminantes se utilizó el Analizador de gases de combustión Testo 350.

## 5. Resultados

Se muestra a continuación las curvas características medidas de la microtubina y la variación del empuje en función de la velocidad de giro y el flujo másico medido:

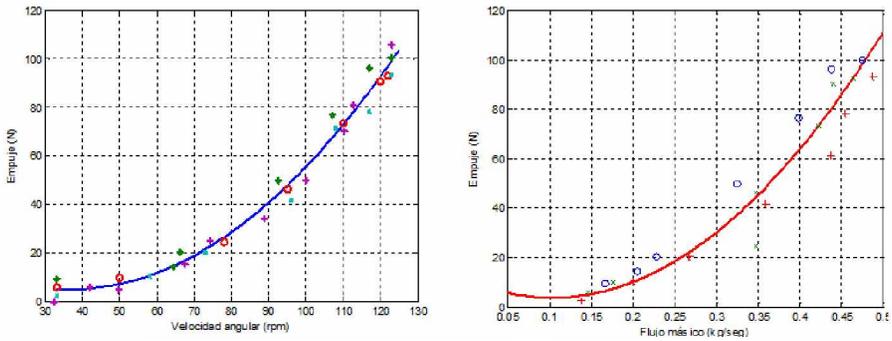


Figura 6. Izquierda: Velocidad Angular (RPM) vs Empuje (N).  
Derecha: Flujo másico (kg/s) vs Empuje (N).

Se muestra a continuación la variación de los gases contaminantes medidos en función de la velocidad de giro y el Empuje medido:

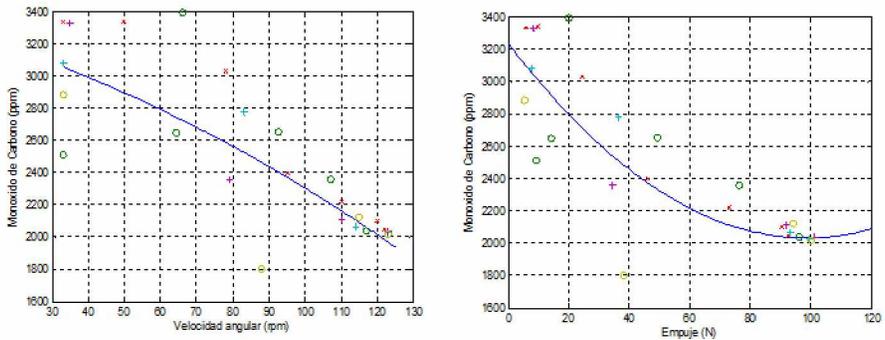


Figura 7. Izquierda: Velocidad Angular (RPM) vs Monóxido de carbono (ppm).  
Derecha: Empuje (N) vs Monóxido de carbono (ppm).

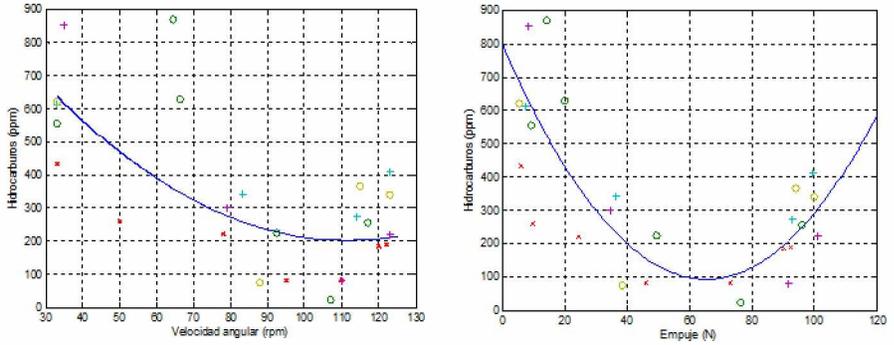


Figura 8. Izquierda: Velocidad Angular (RPM) vs Hidrocarburos (ppm). Derecha: Empuje (N) vs Hidrocarburos (ppm).

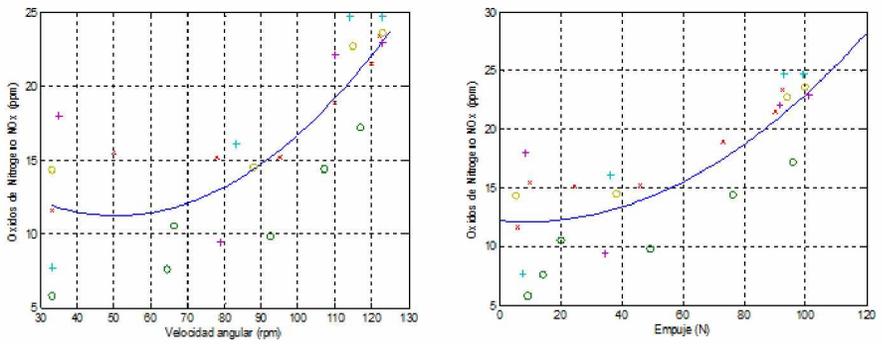


Figura 9. Izquierda: Velocidad Angular (RPM) vs Óxidos de nitrógeno (ppm). Derecha: Empuje (N) vs Óxidos de nitrógeno (ppm).

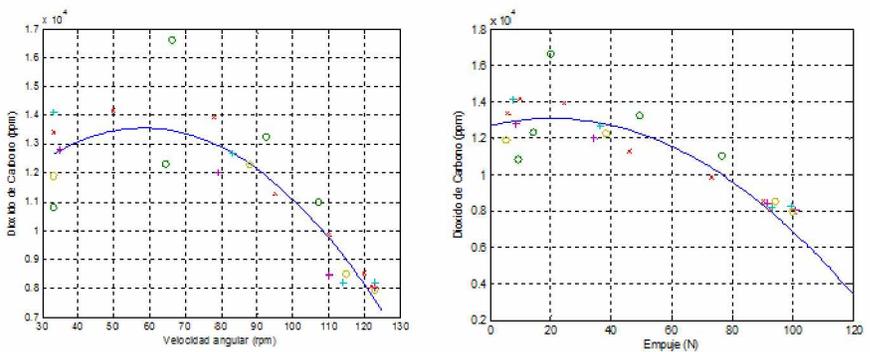


Figura 10. Izquierda: Velocidad Angular (RPM) vs Dióxido de Carbono (ppm). Derecha: Empuje (N) vs Dióxido de Carbono (ppm).

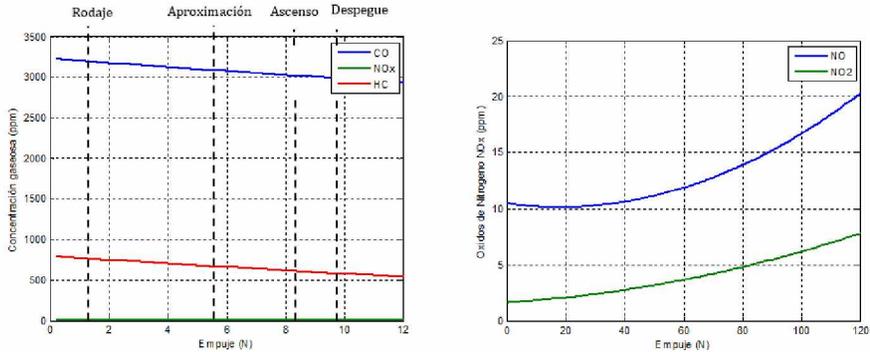


Figura 11. Izquierda, emisiones gaseosas en el ciclo LTO. Derecha, emisiones de óxido de nitró y dióxido de nitrógeno

## 6. Conclusiones

De acuerdo a las mediciones de emisiones gaseosas realizadas, se observa como el comportamiento del CO y NO<sub>x</sub> condice con los resultados esperados de acuerdo al empuje, no así en el análisis del HC donde éste disminuye hasta valores de 100 RPM (x1000 - 69 N) y luego comienza a aumentar su concentración. A su vez, se observa cómo los óxidos de nitrógeno no llegan a oxidarse por completo, siendo la concentración del NO<sub>2</sub> un orden menor que el de NO.

Si bien el comportamiento puede deducirse de dichas gráficas, para una correcta caracterización de los IE y de la desviación estándar debe realizarse los cálculos en función de los kilogramos de gas sobre los kilogramos de combustible.

Debido a la complejidad de los procesos fluidodinámicos que ocurren dentro de la cámara de combustión, y de la dependencia de la concentración de emisiones respecto a los distintos parámetros que caracterizan el proceso, resulta de gran dificultad el diseño de una cámara de combustión que logre reducir las emisiones de todos sus productos al mismo orden y en las distintas fases de operación. A su vez el diseño de una cámara de combustión se realiza en conjunto con el motor en sí, de acuerdo a las necesidades y requerimientos del mismo.

## 7. Agradecimiento

En especial agradecimiento a la Asociación Universitaria Iberoamericana de Postgrado (AUIP) gracias a la Beca de Movilidad brindada a uno de los autores del presente trabajo. Dichas becas buscan promover y favorecer la Movilidad Académica Internacional entre todas las instituciones asociadas a la AUIP.

## 8. Referencias

- [1] Federal Aviation Administration, "Aviation & Emissions A Primer," 2005.
- [2] International Civil Aviation Organization (ICAO), "Annex 16 Environmental Protection - Volume II: Aircraft Engine Emissions," 2008.
- [3] International Civil Aviation Organization (ICAO), "Doc 9889: Airport air quality manual," 2011.

- [4] E. T. Turgut, O. Usanmaz, and M. A. Rosen, "Estimation of commercial aircraft emission according to flight phase," *J. Environmental Sci.*, p. 6, 2014.
- [5] N. W. Simone, M. E. J. Stettler, and S. R. H. Barrett, "Rapid estimation of global civil aviation emissions with uncertainty quantification," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 25, pp. 33–41, 2013.
- [6] J. Graichen and B. Guegle, "Greenhouse Gas Emissions from Aviation," *ETC/ACC Technical Pap.*, no. December, 2006.
- [7] M. Coppa, E. M. Brito, G. Ramírez, N. Tomassini, and D. Pablo Gregorio., "Análisis y caracterización de aeropuertos emplazados en grandes urbes," in *IV Congreso de la Red Iberoamericana de Investigación en Transporte Aéreo*, 2013, p. 151.
- [8] International Civil Aviation Organization (ICAO), "A summary of research and perspectives presented at the ICAO Workshop on Aviation and Alternative Fuels," 2009.
- [9] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, 1998.
- [10] N. A. and S. Administration, "Thermodynamic and Transport Combustion Properties of Hydrocarbons With Air," 1982.
- [11] A. Lefebvre, D. Ballal, and D. Bahr, *Gas turbine combustion : alternative fuels and emissions*. Boca Raton: Taylor & Francis., 2010.
- [12] E. P. A. (EPA), "An evaluation of strategies for airport air pollution," 1975.
- [13] W. Patterson, A. Force, C. M. Reeves, W. Lafayette, and A. H. Lefebvre, "Fuel Effects on Aircraft Combustor Emissions," 2015.
- [14] A. Aghaie, M. Kayhani, and M. Razavi, "Investigation of Thermodynamics Properties Effects on Spray Tip Penetration," *Ijmse.Org*, no. 2004, 2012.
- [15] A. H. Lefebvre, "Fuel Effects on Gas Turbine Combustion," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 5, no. 4, 1983.
- [16] D. E. W. Gumz, *Gas producers and Blast Furnaces*. .
- [17] W. S. Y. Hung, C. Engineering, S. T. Incorporated, and S. Diego, "Carbon Monoxide Emissions From Gas Turbines as Influenced by Ambient Temperature and Turbine Load," no. 1981, 2015.
- [18] E. S. Cross, J. F. Hunter, a. J. Carrasquillo, J. P. Franklin, S. C. Herndon, J. T. Jayne, D. R. Worsnop, R. C. Miake-Lye, and J. H. Kroll, "Online measurements of the emissions of intermediate-volatility and semi-volatile organic compounds from aircraft," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 13, pp. 7845–7858, 2013.
- [19] D. L. Daggett, "Water Misting and Injection of Commercial Aircraft Engines to Reduce Airport NOx," no. x, 2004.
- [20] K. K. Rink and a. H. Lefebvre, "The Influences of Fuel Composition and Spray Characteristics on Nitric Oxide Formation," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 68, no. 1–3, pp. 1–14, 1989.
- [21] D. W. Bahr, "Aircraft Turbine Engine NOx Emission Limits Status and Trends," pp. 1–8, 2015.
- [22] A. Luts, "A DRY LOW NOx COMBUSTOR FOR THE MS3002 REGENERATIVE GAS TURBINE," 2015.

- [23] D. Nicol, P. C. Malte, J. Lai, N. N. Marinov, and D. T. Pratt, "{NOx} sensitivities for Gas Turbine Engines Operated on Lean-Premixed Combustion and Conventional Diffusion Flames," *ASME Int. Gas Turbine Aeroengine Congr. Expo.*, 1992.
- [24] R. Joklik, L. D. Eskin, M. S. Klassen, and R. J. Roby, "EXPERIMENTAL STUDY OF NOX FORMATION IN LEAN, PREMIXED, PREVAPORIZED COMBUSTION OF FUEL OILS AT ELEVATED PRESSURES," *Fuel*, no. X, pp. 1–9, 2007.
- [25] T. A. International and G. Turbine, "Effects Ratio and Dwell Time on Exhaustemissions From."
- [26] O. Wild, M. J. Prather, and H. Akimoto, "Indirect long-term global radiative cooling from NOx emissions," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 28, no. 9, pp. 1719–1722, 2001.
- [27] O. A. Søvde, S. Matthes, A. Skowron, D. Iachetti, L. Lim, B. Owen, Ø. Hodnebrog, G. Di Genova, G. Pitari, D. S. Lee, G. Myhre, and I. S. a. Isaksen, "Aircraft emission mitigation by changing route altitude: A multi-model estimate of aircraft NOx emission impact on O3 photochemistry," *Atmos. Environ.*, vol. 95, no. x, pp. 468–479, 2014.
- [28] D. S. Stevenson, R. M. Doherty, M. G. Sanderson, W. J. Collins, C. E. Johnson, and R. G. Derwent, "Radiative forcing from aircraft NOx emissions: Mechanisms and seasonal dependence," *J. Geophys. Res. D Atmos.*, vol. 109, no. x, 2004.
- [29] M. O. Köhler, G. Rädcl, O. Dessens, K. P. Shine, H. L. Rogers, O. Wild, and J. a. Pyle, "Impact of perturbations to nitrogen oxide emissions from global aviation," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 113, pp. 1–15, 2008.
- [30] T. M. L. Wigley, S. J. Smith, and M. J. Prather, "Radiative forcing due to reactive gas emissions," *J. Clim.*, vol. 15, pp. 2690–2696, 2002.
- [31] T. Jurkat, C. Voigt, F. Arnold, H. Schlager, J. Kleffmann, H. Aufmhoff, D. Schuble, M. Schaefer, and U. Schumann, "Measurements of HONO, NO, NOy and SO2 in aircraft exhaust plumes at cruise," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 38, pp. 1–5, 2011.
- [32] P. Schulte, H. Schlager, H. Ziereis, U. Schumann, S. L. Baughcum, and F. Deidewig, "emission indices of subsonic long-range jet aircraft at cruise altitude: In situ measurements and predictions," *J. Geophys. Res.*, vol. 102, p. 21431, 1997.
- [33] P. Schulte and H. Schlager, "In-flight measurements of cruise altitude nitric oxide oxide emission indices of commercial jet aircraft," vol. 23, no. 2, pp. 165–168, 1996.
- [34] R. M. Gardner, K. Adams, T. Cook, F. Deidewig, S. Ernedal, R. Falk, E. Fleuti, E. Herms, C. E. Johnson, M. Lecht, D. S. Lee, M. Leech, D. Lister, B. Massé, M. Metcalfe, P. Newton, a. Schmitt, C. Vandenberg, and R. Van Drimmelen, "The ANCAT/EC global inventory of NO(x) emissions from aircraft," *Atmos. Environ.*, vol. 31, no. 12, pp. 1751–1766, 1997.
- [35] E. Penner, D. H. Lister, D. J. Griggs, D. J. Dokken, and M. McFarland, "Aviation and the Global Atmosphere: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Working Groups I and II," *Cambridge Univ. Press. Cambridge, U.K.*, p. 373, 1999.
- [36] E. C. Wood, S. C. Herndon, M. T. Timko, P. E. Yelvington, and R. C. Miake-Lye, "Speciation and chemical evolution of nitrogen oxides in aircraft exhaust near airports," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 42, no. 2, pp. 1884–1891, 2008.

- [37] **P. Norman, D. Lister, and M. Lecht, "Development of the technical basis for a New Emissions Parameter covering the whole Aircraft operation: NEPAIR," ... Comm. Rept. G4RD- ..., 2003.**
- [38] B. P. Pundir, *Engine Emissions: Pollutant Formation and Advances in Control Technology*. Narosa Publishing House, 2007.
- [39] **S. M. Johnson, J. a. Biaglow, and J. M. Smith, "Experimental investigation of the low NOx vortex airblast annular combustor," no. X, 1984.**
- [40] **G. J. Micklow, S. Roychoudhury, H. L. Nguyen, and M. C. Cline, "Emissions reduction by varying the swirler airflow split in advanced gas turbine combustors," pp. 1–8, 1992.**
- [41] K. Bammert and H. Sandstede, *"Gas Turbines Burning Dirty Fuels," 2015.*
- [42] W. P. Beach, *"Oxides of Nitrogen Unburnt Hydrocarbons," 2015.*
- [43] A. N. Standard, *"Laboratory Methods of Testinf Fans for Rating," 1999.*