

## **Análisis operacional y el impacto gaseoso del ciclo LTO en distintos aeropuertos europeos**

**Matías Julián Coppa, Juan Ignacio D'Iorio, Alejandro di Bernardi**

UIDET GTA, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

[Matias.coppa@ing.unlp.edu.ar](mailto:Matias.coppa@ing.unlp.edu.ar), [juanignacio.diorio@ing.unlp.edu.ar](mailto:juanignacio.diorio@ing.unlp.edu.ar),  
[cadibern@ing.unlp.edu.ar](mailto:cadibern@ing.unlp.edu.ar)

### **Abstract**

Para la certificación de las emisiones de los motores, la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO) ha estandarizado los tiempos y potencias durante el ciclo Landing Take-Off (LTO); dichos parámetros de operación, así como lo establece el Documento 9889 "Airport Air Quality Manual" (ICAO, 2011), se diseñaron como un ciclo de referencia, reflejando operaciones en condiciones adversas.

Mediante un estudio comparativo de 10 aeropuertos de Europa, el presente trabajo tiene como objetivo obtener los tiempos mínimos y máximos de cada etapa del ciclo, para luego determinar un tiempo promedio definido como: Time in mode – TIM. Asociado a una flota tipo de operación de un día promedio, se busca cuantificar la diferencia en las emisiones gaseosas asociadas a dichos tiempos. Se utiliza un software de simulación para la caracterización de las etapas de aproximación y despegue, y mediante un modelo matemático desarrollado a partir de los flight data recorder (Khadilkar & Balakrishnan, 2012) se ajustan los tiempos en la etapa de taxeo, hacia y desde plataforma.

A partir de los consumos de combustible calculados, se utiliza la base de datos de emisiones de ICAO (2015) para la cuantificación de las emisiones gaseosas contaminantes de hidrocarburos no quemados (HC), óxidos de nitrógeno (NOX) y monóxido de carbono (CO).

El estudio efectuado se encuentra encolumnado con los objetivos del comité de protección ambiental aeronáutica (CAEP) conformado por la Organización de aviación civil internacional (ICAO), particularmente con los del Grupo de Trabajo 2 (WG2 - Airports and Operations) y Grupo de Trabajo 3 (WG3 - Emissions).

**Palabras clave:** aeropuerto, gases, contaminantes, simulación, operaciones

## 1. Introducción

Actualmente, el transporte aéreo desempeña un papel importante en el desarrollo económico y social del mundo. En forma directa e indirecta sostiene el empleo de 56,6 millones de personas, contribuye con más de \$2,2 billones al producto interno bruto (PIB), transporta más de 2.900 millones de pasajeros y el equivalente a \$5,3 billones anuales en carga (ICAO, 2013a).

En el futuro se prevé un crecimiento constante, dependiendo primordialmente del desarrollo económico, del comercio mundial y de la evolución de los costos de las líneas aéreas (el cual depende a su vez, en gran medida, del precio del combustible) (IPCC, 2006). El volumen del tráfico aéreo mundial se ha venido duplicando una vez cada 15 años desde 1977, se espera que este crecimiento continúe a pesar de ciclos de recesión cada vez mayores (ICAO, 2013a). El consumo de combustible asociado a este crecimiento tendrá como consecuencia una mayor concentración de gases contaminantes emitidos.

Actualmente se le atribuye el 2% de las emisiones de CO<sub>2</sub> mundiales a la actividad aeronáutica, y teniendo en cuenta la interacción con la atmosfera, el efecto producido es del orden del 3,5% en el forzamiento radiativo antropogénico mundial (IPCC, 2006).

La caracterización de aportes contaminantes gaseosos se realiza en diferentes escalas, desde la local (entorno aeroportuario inmediato: 30 km de radio a partir de un punto de referencia) hasta la global (a través de la circulación atmosférica: miles de kilómetros). En este contexto, el estudio se concentra en la escala local inmediata, ya que busca caracterizar el entorno para definir las servidumbres gaseosas, que junto a las acústicas y a las superficies limitadoras de obstáculos, definen los usos del suelo en el entorno aeroportuario.

## 2. Desarrollo

Para la determinación del impacto ambiental en el entorno aeroportuario, independientemente del aeropuerto y del tipo de aeronave, OACI ha estandarizado los tiempos de operación de las aeronaves comerciales en la aproximación al aeropuerto, el taxeo y el despegue.

Los reglajes de empuje y el tiempo en cada etapa dependen de condiciones específicas como el peso de la aeronave, temperatura exterior, viento, altitud del aeropuerto, condiciones de las pistas y procedimientos de la línea aérea, entre otros. Aunque no se tienen en cuenta los detalles y las variaciones que ocurren en las operaciones reales, el ciclo fue diseñado como referencia para fines de comparación de tecnologías y certificación respecto a las emisiones de hidrocarburos no quemados (HC), óxidos de nitrógeno (NOX) y monóxido de carbono (CO).

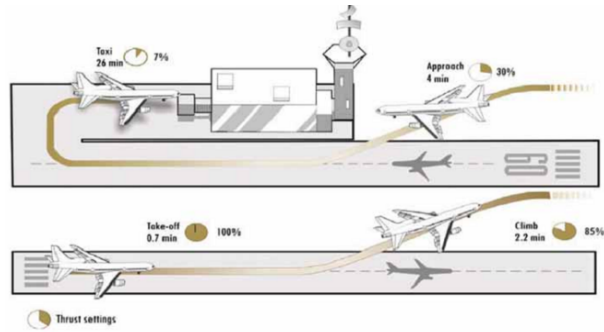


Figura 1. Ciclo Landing Take Off (ICAO, 2013b)

Etapa	Duración (min)	Porcentaje de potencia (%)
Approach	4	30
Taxi	26	7
Take – off	0,7	100
Climb	2,2	85

Tabla 1. Tiempos y porcentajes de potencia en el Ciclo LTO

Para la caracterización y cuantificación de las emisiones gaseosas, de acuerdo a la información disponible del aeropuerto a analizar, OACI plantea tres metodologías (ICAO, 2011), donde los gases emitidos dependen principalmente de: Time in Mode (TIM) (segundos), los Índices de emisión del motor principal; EI, por sus siglas en inglés Emission Index (kg de gas / kg de combustible), y flujo de combustible del motor principal (FF) (kg/s), por sus siglas en inglés Fuel Flow.

- TIM: es el periodo de tiempo real donde los motores de las aeronaves operan en un reglaje de potencia identificado, normalmente correspondiente a uno de los modos de operación del ciclo LTO.
- EI y FF: el índice de emisión se define como la masa de contaminante emitida por unidad de masa de combustible consumido para un determinado motor. El Banco de datos sobre emisiones de motores (EEDB) (Fuglestvedt, Shine, Berntsen, Cook, Lee, Stenke et al., 2010) de OACI proporciona el EI para más de 500 motores certificados.

La siguiente fórmula representa la metodología más específica para el cálculo de las emisiones de NO<sub>x</sub>, CO o HC para una única combinación de aeronave y motor, (ICAO, 2011):

$$E_{ij} = \sum (TIM_{jk} * 60) * (FF_{jk}) * (E_{ijk}) * (Ne_j) \quad (1)$$

Ecuación 1. Descripción

Donde:

$Ei_j$ = emisiones totales de contaminantes  $i$  (p. ej.,  $NO_x$ , CO o HC), en gramos, producidas por el tipo de aeronave  $j$  para un ciclo LTO;

$Ei_{ijk}$ = índice de emisión para el contaminante  $i$  (p. ej.,  $NO_x$ , CO o HC), en gramos por contaminante por kilogramo de combustible (g/kg de combustible), en el modo  $k$  (p. ej., despegue, ascenso, marcha lenta y aproximación) para cada motor empleado en el tipo de aeronave  $j$ ;

$FF_{jk}$ = flujo de combustible para el modo  $k$  (p. ej., despegue, ascenso, marcha lenta y aproximación), en kilogramos por segundo (kg/s), para cada motor empleado en el tipo de aeronave  $j$ ;

$TIM_{jk}$  = tiempo en el modo para el modo  $k$  (p. ej., marcha lenta, aproximación, ascenso y despegue), en minutos, para el tipo de aeronave  $j$ ;

$Ne_j$ = número de motores empleados en el tipo de aeronave  $j$ .

Como se puede observar, en la metodología descrita en la Ecuación 1, el TIM es un parámetro de entrada para el cálculo de las emisiones, pero para aquellos estudios donde no se disponga del TIM deben aplicarse los estandarizados por OACI. A su vez, para la cuantificación de las emisiones gaseosas en el ciclo, existen distintas metodologías que utilizan El propios, así como distintas combinaciones de aeronave – planta poder. Si bien cada metodología tiene sus ventajas, de un estudio comparativo (Yoder, 2007) se concluye que todas ellas hacen referencia a alguna de las metodologías de OACI y que ésta ha probado ser la más confiable y utilizada por países y organizaciones.

## 2.1 Metodología

Para la caracterización de las emisiones gaseosas en los distintos aeropuertos de la región europea el proceso metodológico aplicado fue el siguiente:



Figura 2. Proceso metodológico aplicado

Los parámetros, ajustados a la configuración real y operativa de la aeronave y al aeropuerto específicamente analizado, calculados para la obtención de los tiempos y consumos relativos fueron los siguientes:

- Aproximación (*Approach*): velocidad de referencia ( $V_{reff}$ ), velocidad de aproximación ( $V_{app}$ ), longitud de campo de referencia (LCR), ángulo de descenso, y velocidad de carreteo en pista.
- Despegue y ascenso (*Take Off – Climb out*): velocidad de ascenso, ángulo de ascenso, velocidad de rotación, y margen (distancia remanente hasta el final de la pista o stopway).
- Taxi (*Taxi in – Taxi out*): distancias mínimas y máximas a plataforma, velocidades de carreteo (mínima y máxima), número de paradas y número de giros.

Tanto los giros como las paradas asociadas al taxeo implican una modificación del empuje, lo cual se ve reflejado en el consumo de combustible; a su vez el consumo específico es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura ambiente (Yoder, 2007), por lo que se aplicó un método (Khadilkar, 2011) que ajusta el consumo teniendo en cuenta dichos parámetros a partir de los *flight data recorder* de distintas aeronaves. El algoritmo aplicado es el siguiente:

$$\frac{f}{\sqrt{T_{amb}}} = a_1 + b_1 \cdot t + c_1 \cdot n_s + d_1 \cdot n_t \quad (2)$$

Ecuación 2. Descripción

F = consumo total de combustible.

t = TIM .

$n_s$  = número de paradas realizados durante el taxeo.

$n_t$  = número de giros realizados durante el taxeo.

$a_1, b_1, c_1, d_1$  = parámetros estimados por aeronave.

En la Figura 3 se pueden observar las distancias mínimas y máximas de taxeo que puede realizar un tipo de aeronave, desde o hacia plataforma.

A partir del estudio de los operadores aéreos con mayor frecuencia y participación en el transporte aéreo de la región, se analizó la flota de cada uno para obtener las aeronaves características; se presentan a su vez los coeficientes utilizados para la corrección de consumo de combustible por giros y paradas durante el taxeo.



Figura 3. Distancias mínimas y máximas de taxeo

Aeronave	Planta poder	$a_1 \left( \frac{kg}{K^{0,5}} \right)$	$b_1 \left( \frac{kg}{s * K^{0,5}} \right)$	$c_1 \left( \frac{kg}{K^{0,5}} \right)$	$d_1 \left( \frac{kg}{K^{0,5}} \right)$
Boeing 737-700	CFM56-5B1-2	-0,19	0,013300	0,15	-0,05
Boeing 737-800	CFM56-5B1-2	-0,19	0,013300	0,15	-0,05
Boeing 767-300	P&W 4060	-0,22	0,0178	0,73	0,15
Airbus A320-200	CFM56-5B4-2	-0,26	0,0125	0,1	-0,02

Tabla 2. Aeronaves y plantas de poder analizadas

Se muestran a continuación los aeropuertos bajo análisis:

Nombre	Ciudad a la que sirve	Código IATA /OACI	$T_{amb}$ adoptada (C)
Aeropuerto Internacional de Dublín	Dublín, Irlanda	DUB/EIDW	19,7
Aeropuerto Internacional de Orio al Serio	Bergamo, Italia	BGY/LIME	28,8
Aeropuerto Internacional de Shanon	Shanon, Irlanda	SNN/EINN	20,2
Aeropuerto Internacional East-Midland	Midlands Orientales, Inglaterra	EMA/EGNX	21
Aeropuerto Internacional London Luton	Luton, Inglaterra	LTN/EGGW	19
Aeropuerto de Roma-Ciampino	Roma, Italia	CIA/LIRA	30,7
Aeropuerto Internacional de Frankfurt-Hann	Lautzenhausen Alemania	HHN/EDFH	25
Aeropuerto Internacional Girona-Costa Brava	Gerona, España	GRO/LEGE	30
Aeropuerto internacional John Lennon	Liverpool, Inglaterra	LPL/EGGP	18
Aeropuerto de Londres Stansted	Bishop's Stortford, Inglaterra	STN/EGSS	19

Tabla 3. Aeropuertos analizados

### 3. Resultados

Se muestran a continuación los resultados obtenidos:

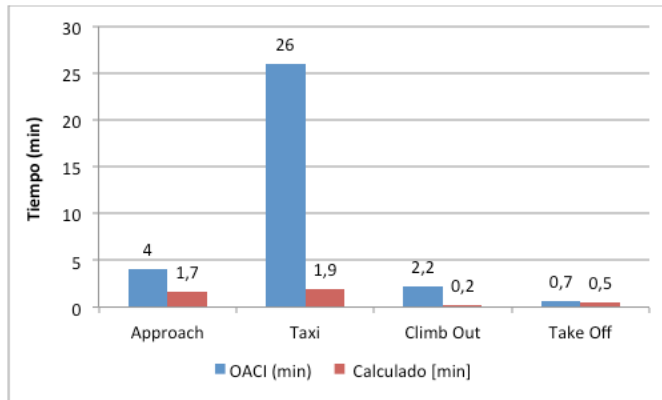


Figura 5. Tiempos promedios totales calculados y tiempos de OACI

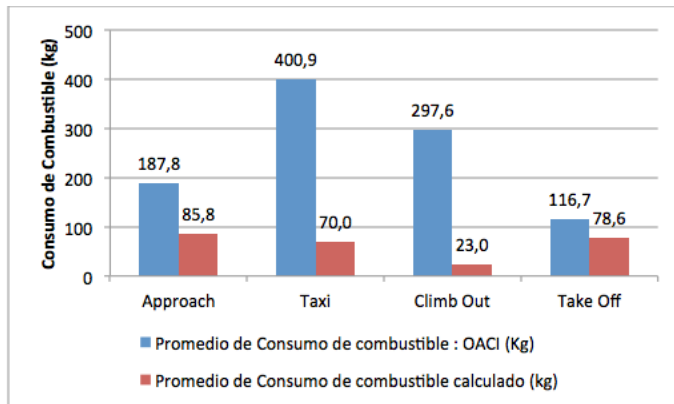


Figura 6. Consumo de combustible según los tiempos calculados y los brindados por OACI.

Como se mencionó anteriormente, el consumo de combustible durante cada etapa del ciclo genera emisiones contaminantes, siendo tres los gases principales: HC, CO y NOX. Se muestra a continuación el promedio de emisiones según los tiempos asociados al ciclo LTO.

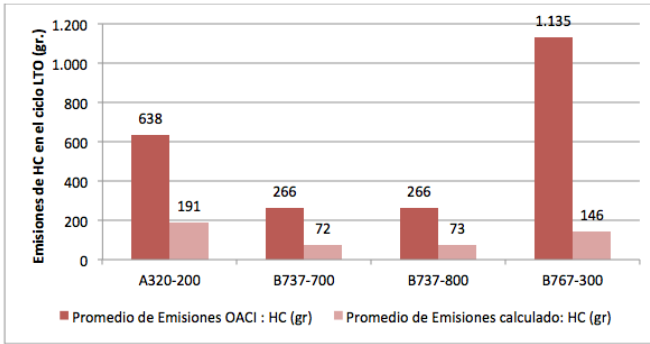


Figura 7. Promedio de emisiones totales de HC en el ciclo LTO

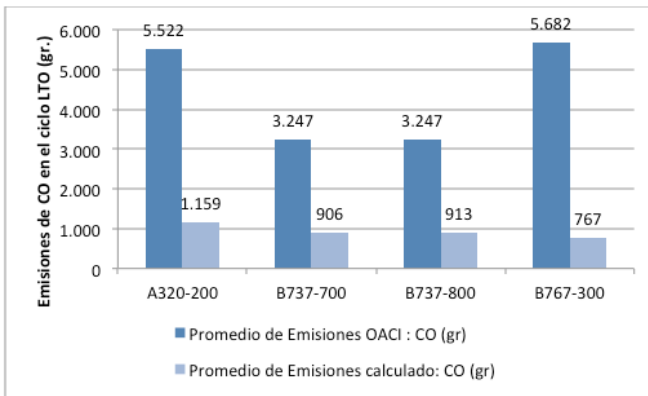


Figura 8. Promedio de emisiones totales de CO en el ciclo LTO

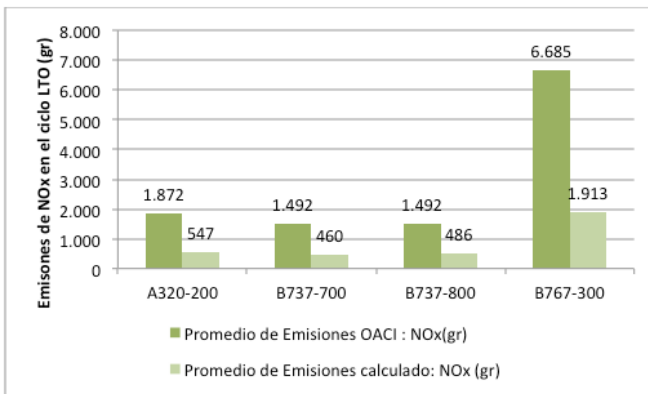


Figura 9. Promedio de emisiones totales de NOX en el ciclo LTO



## 4. Conclusiones

Se puede concluir que los tiempos empleados para las distintas fases en el ciclo LTO, dependiendo de las aeronaves y aeropuertos intervinientes, presentan diferencias, en algunos casos importantes, con respecto a los establecidos por ICAO y asumidos por otros organismos. Si bien no se tuvieron en cuenta las posibles esperas dentro del método de cálculo, se evidencian las diferencias. En un futuro trabajo incluiremos las demoras típicas en los aeropuertos analizados, así como también aeropuertos importantes de otras regiones y diferentes flotas.

Este trabajo tuvo la intención de poner en evidencia la diferencia del impacto ambiental producto de las operaciones en el ciclo; es por ello que se hicieron valores promedio de emisiones. El fin último es desarrollar un método de cálculo que sea dependiente de parámetros específicos, tanto del aeropuerto como de la flota en cuestión.

El inventario de emisiones proporciona la masa total de las mismas liberadas al medio ambiente y constituye la base para la notificación, el cumplimiento y la planificación de la mitigación. Para relacionar las emisiones con las concentraciones de contaminantes, debe evaluarse también la distribución espacial y temporal de las mismas. Este enfoque mixto de utilizar inventarios de emisiones y modelos de dispersión permite evaluar las concentraciones históricas, existentes y futuras de contaminantes en las zonas cercanas a los aeropuertos, debido a las condiciones meteorológicas específicas.

## 5. Referencias

- Airbus (2014). *Flying on demand: 2014 - 2033*.
- ICAO (2011). *Doc 9889: Airport air quality manual*.
- ICAO (2013a). *Global Air Navigation Plan - Capacity and Efficiency*.
- ICAO (2013b). *2013 Environmental Report: Destination Green*.
- ICAO (2015). *Aircraft Engine Emissions Databank*.
- IPCC (2006). *IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas*.
- Khadiilkar, H. (2011). Analysis and Modeling of Airport Surface Operations, p. 99.
- Khadiilkar, H., Balakrishnan, H. (2012). Estimation of aircraft taxi fuel burn using flight data recorder archives. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, 17(7), 532-537.
- Kurniawan, J.S., Khardi, S. (2011). Comparison of methodologies estimating emissions of aircraft pollutants, environmental impact assessment around airports. *Environ. Impact Assess. Rev.*, 31(3), 240-252.
- Yoder, T. (2007). *Development of Aircraft Fuel Burn Modeling Techniques with Applications to Global Emissions Modeling and Assessment of the Benefits of Reduced Vertical Separation Minimums*. Massachusetts Institute of Technology.