

# Metodología para la Medición del Impacto, Control y Disminución de las Emisiones de Gases de los Motores a Reacción en Aeropuertos

Francisco J. González<sup>1</sup>, Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente,  
Luis E. Baquero<sup>2</sup>, Magíster en Seguridad Informática, [fjgonzalezc@libertadores.edu.co](mailto:fjgonzalezc@libertadores.edu.co),  
[lebaqueror@libertadores.edu.co](mailto:lebaqueror@libertadores.edu.co), Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia

*Abstract— This research shows the process for determining the environmental impact caused by pollution from jet engines, which contribute to the greenhouse effect of atmosphere of Bogotá, specifically in the area of El Dorado airport. It also shows the permissible levels to be had in these engines according to the application of national and international standards, which control the percentage levels of gaseous pollutant emissions. The research shows the methods followed for obtaining results such as the smoke index engine regulatory, calculations of allowed gas emissions by the International Civil Aviation Organization (ICAO), calculations of allowed gaseous emissions by the Occupational Safety and Health Administration (OSHA) environmental standards and the Ministry of Environment, Housing and Territorial Development. To process a study of the types of aircraft engine is carried and also an analysis of the number of aircraft operations generated daily in the airport, in order to determine the size of the sample according to the existing population; subsequently data collection of the percentage content of gases emitted by the engines were made using a gas analyzer.*

*The analysis of gaseous emissions were performed on the three types of jet engines that are widely used by commercial airlines and were made comparatives between the values obtained and regulatory values according to national and international standards. The results obtained in the engines of the study were the smoke index regulatory, grams/kilonewtons levels of gaseous emissions of carbon monoxides, unburned hydrocarbons and nitrogen oxides as well as percentage contents and per particle per million of these gases.*

*Keywords: Environmental impact, Jet engine, Smoke index, Gaseous emissions, Greenhouse effect, Radioactive forcing, Internal combustion.*

## I. INTRODUCCION

La calidad del aire se ha convertido en un tema de gran importancia en el mundo; la contaminación ambiental ha ocasionado alteraciones y efectos nocivos en la salud de los seres vivos y también en las propiedades físicas de algunos elementos materiales. Hoy en día los principales mecanismos de contaminación ambiental están dados por procesos industriales, automóviles, aviones, sistemas de calefacción entre otros; estos generan combustión y producen dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, los cuales son contaminantes con efectos altamente negativos como lo es el incrementar el efecto invernadero, destruir la capa de ozono y por supuesto afectar la salud de las personas.

En el contexto internacional los expertos de este tema (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), afirman que el 2% de CO<sub>2</sub> lo produce el sector aeronáutico y que la proyección para el 2050 será del 3% [IPCC, 2007]. Por tal motivo la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO) se ha comprometido para limitar o reducir la cantidad de personas afectadas por el ruido de las aeronaves, limitar o reducir el impacto

de las emisiones de las aeronaves en la calidad del aire local y limitar o reducir el impacto de las emisiones de gases con efecto invernadero en el clima mundial.

Existen estudios enfocados a los aumentos de la contaminación provocada por los aviones sobre el clima. Las emisiones de los gases de los motores han crecido un 85% entre 1994 y 2004; se estima que el sector aeronáutico podría causar el 15% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero a mitades de este siglo [IPCC, 1999]. Otros estudios como el que realiza la unión europea, afirman que el impacto ambiental por aeronaves en el 2030 será el causante de la cuarta parte de la contaminación atmosférica [Airportwatch 2013]; de la misma manera el departamento de Física e Ingeniería Civil y medioambiente del Imperial College de Londres, realizo un estudio de simulación de trafico aéreo para predecir la formación de nubes de vapor de agua y así reducir las [EPSRC,2011]. El instituto tecnológico de Georgia realizo un estudio en donde se fabricó una cámara de combustión que emite niveles muy bajos de óxido de nitrógeno y monóxido de carbono; esta cámara de combustión se diseñó para motores a reacción de aviones [ScienceDaily, 2006].

Actualmente en Colombia las aerolíneas han disminuido los precios de los tickets y han aumentado las frecuencias de los vuelos, lo que con lleva a la compra de aeronaves para suplir esta alta demanda; debido a esto aparece la problemática ambiental por la utilización a gran escala de las aeronaves y por ende de sus motores; generándose entonces la producción de CO<sub>2</sub> y ruido lo que con lleva a cambios climáticos creados por el efecto invernadero y molestias auditivas. En el reglamento aeronáutico colombiano (RAC), no se contemplan políticas claras para controlar la contaminación ambiental por emisión de gases de los motores, por lo anterior es importante realizar una investigación que analice y recomiende procedimientos a las aerolíneas y a la aerocivil colombiana. Esta investigación tiene como objetivo realizar una metodología para poder medir el impacto ambiental que generan las emisiones de gases de los motores a reacción en los aeropuertos, también identificar los procedimientos para el control de las emisiones de gases en las aeronaves de las aerolíneas con el fin de disminuir las emisiones nocivas para el medio ambiente.

## II. MÉTODOS

Se tomó como lugar del estudio el aeropuerto internacional El Dorado de la ciudad de Bogotá (COL), allí se realizó un análisis estadístico del número exacto de operaciones aeronáuticas, con el fin de determinar el tipo de funcionamiento y regímenes de trabajo de los motores, también se llevó a cabo un

análisis de los datos informativos que entregan los constructores de los motores en cuanto a la certificación de estos en el campo ambiental.

Las aeronaves que entran y salen del aeropuerto El Dorado, son en su mayoría aeronaves que utilizan motores de tipo Turbofan (80% aproximadamente), también existen aeronaves que utilizan motores Turbohélice (20% aproximadamente). Los aviones con motores recíprocos (a pistón), no son tomados en cuenta en el presente estudio ya que su área de funcionamiento es el aeropuerto de Guaymaral en Bogotá. La población está entonces limitada a las aeronaves que utilizan motores a reacción de tipo Turbofan y Turbohélice, fabricados después del 31-12-95, esto con el fin de aplicar las ecuaciones para el control de gases contaminantes emitido por la ICAO en su anexo 16. Cabe aclarar que la gran mayoría de las aeronaves que entran y salen del aeropuerto El Dorado, poseen motores de última generación los cuales están dentro de la norma aplicada.

Los sujetos o muestras a quienes se aplica el estudio son motores de los aviones de la compañía Avianca S.A y Satena S.A. Estos motores específicamente son Turbofan de alto By-pass CFM-56, RR-Trent 700 y Turbohélice Pratt & Whitney PW 127M.

Las operaciones aeronáuticas de los aeropuertos están definidas como las salidas y llegadas de los aviones. La Aeronáutica Civil de Colombia entrega estos reportes diariamente en donde se registran las respectivas aerolíneas que realizan vuelos nacionales e internacionales, con el número de vuelos programados de cada una de ellas y con las salidas y llegadas de los aviones. En la página de internet de esta entidad, se encuentran los reportes diarios de dichas operaciones aeronáuticas. La tabla 1 muestra un resumen de las operaciones efectuadas en el mes de febrero de 2014.

Aerolínea	Vuelos Programados	Salidas Reales	Llegadas Reales
Avianca	10688	-	-
Lan	3202	-	-
Copa	1650	-	-
Satena	879	-	-
Easy Fly	600	-	-
Viva Col	562	-	-
<b>Total</b>	<b>17581</b>	<b>11607</b>	<b>11538</b>

Tabla 1: Resumen de operaciones aeronáuticas nacionales efectuadas en el mes de febrero de 2014 emitido por Aerocivil.

Teniendo en cuenta el número de operaciones registradas en el Aeropuerto El Dorado, se puede realizar un promedio diario para el mes de Febrero de 2014 de 827 operaciones. Las operaciones registradas por Aerocivil, son las reales, es decir las operaciones que se dan en el transcurso del día, estas pueden ser mayores que las programadas ya que existen vuelos adicionales por demanda de pasajeros o por demanda de carga.

Los fabricantes certifican ante los organismos de aviación internacional como lo es la FAA (Federal Aviation Administration) y la EASA (European Aviation Safety Agency) sus motores; estos organismos son los que regulan las normas y directivas de aeronavegabilidad tanto en América como en Europa, los dos se ciñen a la normatividad internacional emitida por la ICAO desde el punto de vista ambiental. La ICAO reglamenta el control de emisiones y ruido en motores en su anexo 16 (Protección del medio ambiente-Vol II).

El equipo utilizado para el proceso de la medición de gases es el analizador portátil GAS ALERT MAX XT, este instrumento utiliza lo último en tecnología de sensores para proporcionar una detección de gases tóxicos, combustibles y los peligros de oxígeno. El equipo monitorea de forma fiable 4 gases, sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ ), monóxido de carbono (CO), oxígeno diatómico ( $O_2$ ) y gas combustible ( $CH_4$ ) con la ayuda de una bomba motorizada para un muestreo inteligente a distancia, ideal para espacios reducidos (Figura 1).



Figura 1: Equipo Gas Alert Max XT y sonda de muestreo

Para analizar los resultados se utilizaron dos métodos, uno de ellos fue el de emplear los modelos matemáticos que certifican las emisiones de los motores turborreactores y turbofan proyectados para propulsar aeronaves exclusivamente a velocidades subsónicas; este método es el recomendado internacionalmente por la ICAO en su anexo 16, denominado Protección del Medio Ambiente-Emisiones de los Motores de las Aeronaves. El otro método fue el analizar los contenidos porcentuales y por partículas por millón (ppm) de los gases contaminantes, utilizando un equipo analizador de gases (GAS ALERT MAX XT). La técnica utilizada para la recolección de la información fue inicialmente un muestreo de naturaleza continua, en donde se determinó el número de datos a tomar por motor con el analizador de gases.

Antes de realizar el proceso de medición en los motores anteriormente mencionados, se efectuó una prueba piloto en un motor turbohélice PT6-A el cual es propiedad de la Fundación Universitaria Los Libertadores (Figura 2); este motor es utilizado como equipo de laboratorio para realizar pruebas reales de funcionamiento e instrucción. En este motor se realizaron las tomas de datos preliminares con el fin de obtener los parámetros de funcionamiento gracias a los gases emitidos, los cuales son muy semejantes a los de los motores del estudio por tener el mismo combustible JET A.

El procedimiento que se efectuó en el motor para la realización de las pruebas con el equipo GAS ALERT MAX XT fue el siguiente.

- Encendido del motor según los procedimientos enunciados en el manual de operación del mismo.
- Inspección previa de los elementos tanto internos en la cabina como de los elementos externos.
- Conexión de la fuente de poder al motor y accionamiento de los switches en la cabina, según el manual de operación del motor.
- Regulación de la velocidad de la hélice a 2200 rpm, una vez encendido el motor y estabilización de la temperatura a 550°C según el manual de operación del mismo.
- Medición de los gases de escape del motor mediante la sonda del equipo, para esto la sonda fue colocada a una distancia de 80cm de la tobera del motor.
- Una vez tomados los datos con el equipo, se procedió al apagado del motor, según el manual de operación del mismo.

Se tomaron 2 lecturas durante 5 minutos cada una, este tiempo fue suficiente para que el equipo

registrara los datos en la memoria; con las lecturas registradas se determinó la muestra.



**Figura 2: Motor PT6-A de la Fundación Universitaria Los Libertadores**

### III. RESULTADOS

La ICAO en su anexo 16, capítulo 2 de la parte III (volumen II), el cual está dedicado al análisis de los motores turbo reactores y turbofan proyectados para propulsar aeronaves; enuncia las emisiones que deben ser tratadas para la certificación de los motores. Dichas emisiones gaseosas son: Humo, hidrocarburos sin quemar (HC), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Las emisiones de humo o smoke son medidas bajo el número de smoke. Las emisiones de los contaminantes gaseosos HC, CO y NO<sub>x</sub>, son medidas en gramos con respecto al empuje nominal del motor. Las condiciones atmosféricas de referencia se trabajaron según la atmosfera estándar internacional (ISA) al nivel del mar (Pa = 101.325 KPa, Ta= 288.16 °K).

El cálculo del índice de humo también es conocido como el número de smoke, este se define como un término adimensional que cuantifica el nivel de las emisiones de humo, guiándose por la mancha resultante en un filtro por la masa de referencia de la muestra de gases de escape, y graduados en una escala de 0 a 100 [anexo 16 volumen II, ICAO, 2008]; siendo 50 el valor máximo permitido.

El índice de humo reglamentario bajo las fases del ciclo despegue/aterrizaje (LTO), no podrá superar el nivel calculado bajo la [ecuación 1].

$$SN = 83.6(F_{00})^{-0.274} \quad (1)$$

Dónde, SN= Numero de Smoke o Índice de humo reglamentario; F<sub>00</sub>= Empuje Nominal del motor en Kilonewtons.

Para el caso del estudio se realizó la prueba en los 3 motores, a los cuales se les cálculo el Número de Smoke correspondiente, teniendo como referencia el empuje nominal para los motores turbofan. Para el motor turbohélice se utilizó la [ecuación 2].

$$SN = 187(rO)^{-0.168} \quad (2)$$

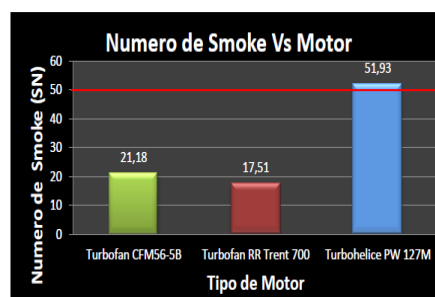
Dónde, SN = Numero de Smoke o Índice de humo reglamentario; rO = Rated Output (Salida Nominal) en Kilowatts.

Los valores de los empujes nominales y de la potencia para el motor turbohélice fueron tomados de la ficha técnica de los mismos. En la [tabla 2] se observan estos valores y el Número de Smoke calculado.

Motor	Fuerza de Empuje o Potencia	Número de Smoke (SN)
Turbofan CFM56-5B	142.336 KN	21.18
Turbofan RR Trent 700	300.300 KN	17.51
Turbohélice PW 127M	2050.67 KW	51.93

*Tabla 2: Motores a reacción utilizados en el estudio con sus respectivos empujes nominales y números de smoke.*

Con respecto a los valores calculados anteriormente para los tres motores, el motor Turbohélice Pratt&Whitney 127M, genera cantidades significativas de materias carbonosas, las cuales están contenidas en sus emisiones de gases de escape, estas emisiones obstaculizan la transmisión de la luz y ocasionan calentamiento global. Se debe tener en cuenta que el valor mínimo permitido por la ICAO es el 50% de la reflexión absoluta del filtro manchado en un reflectometro por el gas, designado como un Número de Smoke de 50. En la Figura 3 se observa el comportamiento de los motores con respecto al límite de la ICAO.



**Figura 3: Números de Smoke vs tipos de motor**

Para el cálculo de las emisiones gaseosas reglamentarias según la ICAO, los niveles que se determinen, no podrán superar los niveles reglamentarios estipulados en el anexo 16 volumen II, 2008, p III 2-3; los cuales son:

Monóxido de Carbono (CO): 118 grams/kilonewtons.  
 Hidrocarburos sin quemar (HC): 19.6 grams/kilonewtons.  
 Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>): Según la fecha de fabricación y el empuje nominal máximo del motor.

El cálculo de los niveles reglamentarios está definido como la relación existente entre la masa del gas contaminante emitido durante el ciclo de referencia de aterrizaje y despegue (LTO) para las emisiones, con respecto al empuje nominal del motor en su fase de despegue [ecuación 3].

$$D_p/F_{00} \quad (3)$$

Dónde, D<sub>p</sub>= Masa del gas contaminante en gramos; F<sub>00</sub>= Empuje Nominal del motor en la fase empleada en Kilonewtons. La fase empleada fue carreteo – salida, cuyo tiempo en la prueba es de 5 minutos y el porcentaje del empuje máximo es del 7%.

Los resultados de los cálculos de la relación D<sub>p</sub>/F<sub>00</sub> para el monóxido de carbono CO en los tres motores, se muestran en la [tabla 3].

Motor	Fuerza de Empuje o Potencia (F <sub>00</sub> )	Masa del Gas (D <sub>p</sub> )	D <sub>p</sub> /F <sub>00</sub> (gr/KN)
Turbofan CFM56-5B	9.96 KN	913.93 g	91.72
Turbofan RR Trent 700	21.02 KN	2310.2 g	109.8
Turbohélice PW 127M	1.22 KN	165.63 g	135.7



Tabla 3: Valores calculados de la relación  $D_p/F_{00}$  en gramos de CO por Kilonewton para los tres motores

Con respecto a los valores calculados anteriormente para los tres motores, el motor Turbohélice Pratt&Whitney 127M, genera cantidades significativas de Monóxido de Carbono (CO) ocasionando de esta manera contaminación ambiental en el aeropuerto El Dorado. La Figura 4 muestra los motores a analizar con respecto a los valores de la relación  $D_p/F_{00}$  para el Monóxido de Carbono (CO) que se obtuvieron para cada uno de ellos.

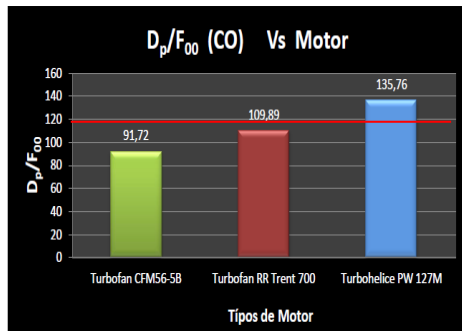


Figura 4: Valores de la relación  $D_p/F_{00}$  para el CO vs tipos de motor

Para el cálculo de la relación  $D_p/F_{00}$  para los hidrocarburos sin quemar, el equipo GAS ALERT MAX XT fue calibrado para que detectara emisiones de metano ( $CH_4$ ) LEL; dando como resultado en la toma de datos para los tres motores un valor de 0 % v/v. Esto indica que al generarse la combustión en la cámara de los motores, la combustión es completa y no aparecen hidrocarburos sin quemar del tipo  $CH_4$  en las toberas (salida de gases). Sin embargo debe resaltarse que el equipo, detecta emisiones de metano y que probablemente para estos motores se generen otros hidrocarburos sin quemar. Por tal motivo se utilizó la base de datos de la ICAO en cuanto a las emisiones de los motores de los aviones (ICAO Aircraft Engine Emissions Databank), la cual se puede obtener de la página de la Agencia de Seguridad Aérea Europea (EASA, 2014). En esta base de datos se encuentran las mediciones en cuanto a gases contaminantes realizadas a todos los tipos de motores Turbofan para Europa. Para los dos motores Turbofan se extrajeron los siguientes datos promedio de  $D_p/F_{00}$  de la base para las mediciones de Hidrocarburos sin quemar (HC) (Figura 5); la base no incluye mediciones en motores Turbohélice.

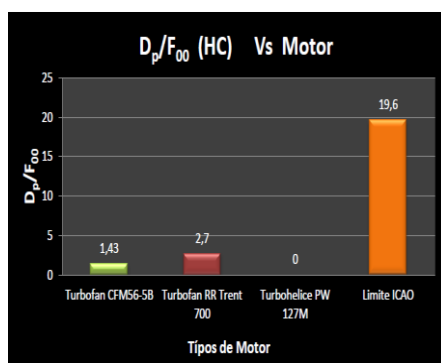


Figura 5: Valores de la relación  $D_p/F_{00}$  para el HC vs tipos de motor

En la Figura 5 se observa que las emisiones de HC se encuentran muy por debajo del límite reglamentario, se puede afirmar que todos cumplen con la norma.

Los valores totales obtenidos en la tabla 4, son las cantidades de gases contaminantes que se generan en el aeropuerto El Dorado, por funcionamiento de los motores de los aviones diariamente de acuerdo a la

frecuencia de las operaciones aéreas. Los valores son obtenidos, teniendo en cuenta la fase carreteo – salida durante los primeros 5 minutos a un régimen de marcha mínima o ralentí para un motor estándar ó promedio.

Motor	$D_p$ (CO)	$D_p$ (HC)	$D_p$ ( $NO_x$ )
Turbofan CFM56-5B	913.63 g	14.24 g	481.2 g
Turbofan RR Trent 700	2310.19 g	56.75 g	1097 g
Turbohélice PW 127M	165.63 g	0 g	50.75 g
<b>Promedio</b>	1129.81 g	23.66 g	543.1 g
<b><math>D_p</math> Total</b>	<b>0.935 T</b>	<b>0.0196T</b>	<b>0.45 T</b>

Tabla 4: Valores promedio y totales de las masas de los gases para los tres motores.

Realizando una proyección anual se estarían produciendo 341.27 Toneladas de CO, 7.15 Toneladas de HC y 164.25 Toneladas de  $NO_x$  durante la fase inicial de encendido de los motores a marcha mínima. Esto indica que el valor más representativo es el de las emisiones de Monóxido de Carbono, siendo este gas el que más se produce en la fase. Por otro lado se observa que las emisiones de los hidrocarburos sin quemar son mucho menores con respecto a los demás gases producidos.

#### IV. CONCLUSIONES

Los gases de efecto invernadero que producen los motores de las aeronaves son el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), los hidrocarburos sin quemar (HC), vapor de agua, óxido nitroso ( $N_2O$ ) y smoke. Con respecto al estudio realizado solo se pudieron medir directamente las concentraciones de los hidrocarburos sin quemar y el nivel de smoke de los motores, mediante el número de smoke enunciado por la ICAO.

Para el valor del  $CO_2$ , se tomó como referencia el valor descrito en el Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para la Región Bogotá – Cundinamarca [IDEAM, 2012]; este valor en el área del transporte aéreo fue de 230Gg de  $CO_2$ , representando solamente un 1.8% aproximado del total de gases de efecto invernadero producidos en Bogotá. Por otra parte el valor del  $N_2O$ , es de 2.3 Gg, representando el 0.018%.

De los tipos de motores analizados, el motor Turbohélice fue el que sobrepasa el límite reglamentario del número de smoke ( $SN = 50$ ); esto indica que las materias carbonosas las cuales se encuentran contenidas en los gases de escape, además de obstaculizar la transmisión de la luz también retienen parte de la energía que emite el suelo cuando este ha sido calentado por la radiación del sol; esta energía es transformada en el calor que ocasiona el calentamiento global. Las emisiones de los motores Turbohélice que operan en el aeropuerto El Dorado ocasionan calentamiento global en una escala baja, debido al número de motores existentes (84 aprox), a la capacidad de pasajeros de los aviones y a la altitud en que se desempeñan (7600 metros).

#### V. REFERENCIAS

Bradley T, H. (2007). Development and experimental characterization of a fuel-cell powered aircraft. Journal of Power Sources, (171), 793 – 801.

Graichen, J., Gugele, B. (2006). Greenhouse Gas Emissions from Aviation. UEA: ETC/ACC.

ICAO Aircraft Engine Emissions Databank.(s.f). Recuperado el 30 de Abril de 2014, de <<http://easa.europa.eu/document-library/icao-aircraft-engine-emissions-databank>>

Informe del Grupo de Trabajo III, IPCC. (2007). Documento Putting Aviation's Emissions in Context.

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2012). Inventario de Emisiones de Gases Efecto Invernadero Para la Región Bogotá-Cundinamarca. Bogotá: IDEAM.

Organización de Aviación Civil Internacional, ICAO. (2008). Anexo 16. Protección del medio ambiente. Volumen II Emisiones de los motores de las aeronaves. Montreal: ICAO.

Reglamentos Aeronáuticos de Colombia. (2014). RAC 11 Normas Ambientales para la Aviación Civil.