UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2017

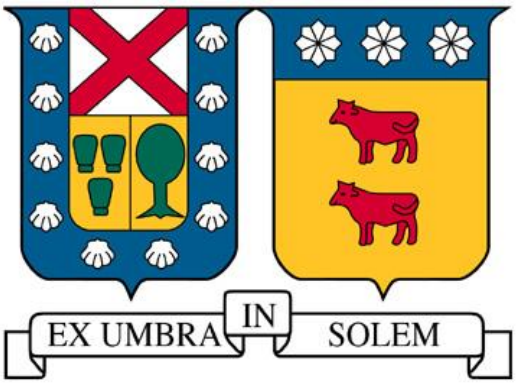
AVIACIÓN SUSTENTABLE. UNA PROPUESTA DE MODELO DE MANTENIMIENTO Y MEDICIÓN QUE BUSCA REDUCIR LOS NIVELES DE EMISIÓN DE GASES CONTAMINANTES EN CHILE PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA AERONÁUT

ÁLVAREZ BRIONES, IGNACIO ANDRÉS

http://hdl.handle.net/11673/40948

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
ACADEMIA DE CIENCIAS AERONÁUTICAS
SANTIAGO – CHILE



AVIACIÓN SUSTENTABLE: UNA PROPUESTA DE MODELOS DE MANTENIMIENTO Y MEDICIÓN PARA REDUCIR LOS NIVELES DE EMISIÓN DE GASES CONTAMINANTES DE LA INDUSTRIA AERONÁUTICA EN CHILE

Ignacio Andrés Alvarez Briones

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO EN AVIACIÓN COMERCIAL

PROFESOR GUIA : SR. MARTINUS POTTERS
PROFESOR CORREFERENTE : SRTA. JAVIERA ARTEAGA RIVERA

JUNIO 2017

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a mi madre, Renata; mi padre, Jorge; mi hermana, Rocío, y a Fernando que han sido el gran pilar de apoyo durante el proceso de desarrollo de mi memoria de título. A mi novia, Laura, que me ha apoyado y motivado a entregar mi trabajo con la mejor presentación y formato. A mi familia completa que siempre ha estado atenta y orgullosa de mis metas personales.

Muchas gracias a mis profesores y referentes que siempre me entregaron información útil para la elaboración de este trabajo. Agradezco su paciencia y cariño a lo largo de este proceso.

Mi familia siempre me ha entregado buenos valores, entre ellos, cuidar y respetar el medioambiente. Así, espero, con este trabajo, ayudar a despertar un interés social de mitigación del impacto medioambiental.

Ignacio Andrés Alvarez Briones.

Resumen ejecutivo

En la actualidad la aviación civil mundial está creciendo rápidamente en alrededor de un 5% cada año (M. Masiol, R.M. Harrison, Atmospheric Environment, 2014). Este crecimiento se asocia al desarrollo económico y a la globalización. El impacto de este crecimiento preocupa a las autoridades medioambientales. Se debate si los gases emitidos por la industria aeronáutica son o no representativos en el cambio climático, en el deterioro de la calidad del aire en las vecindades de aeropuertos y en la contaminación acústica, tanto en los cielos como en la tierra.

Este problema medioambiental es de gran interés para la comunidad científica y los organismos públicos reglamentarios puesto que no está clara la brecha entre los valores límites y objetivos de muchos contaminantes del aire, como son, los Nitrógenos de Oxido y el Material Particulado, que normalmente se encuentran en los aeropuertos más demandados del mundo y que pueden resultar en graves consecuencias de salud pública.

A raíz de la problemática mundial, se han tomado iniciativas para estudiar el impacto de los gases contaminantes generados por la industria aeronáutica en la salud de los seres vivos, en el cambio climático, en la calidad del aire local, etc. La comunidad científica y los organismos medio ambientales han logrado esclarecer distintos comportamientos de los gases contaminantes, que resultan relevantes para establecer si éstos pueden significar un riesgo de contaminación mayor.

Dada la necesidad de estudiar y cuantificar estos gases contaminantes en el mundo, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) busca establecer una meta de carbono neutro para el año 2020, de esta forma todos los países participantes de este proyecto pueden contribuir positivamente a la reducción de agentes contaminantes y mejorar la calidad de vida de los habitantes del planeta.

De este Trabajo de Memoria se espera contextualizar el rol que juegan cada uno de estos gases contaminantes en la atmósfera y sus correspondientes formas de emisión a través de los motores utilizados por las aeronaves comerciales actuales y sus consecuencias en el medio ambiente en diversos territorios del planeta, asimismo mencionar medidas correctivas y reglamentarias vigentes.

Se entrega, además, una propuesta de dos modelos; uno de medición y otro de mantenimiento que permiten obtener un inventario inicial de gases contaminantes en Chile y entregar escenarios favorables y desfavorables con la implementación de estos modelos.

Executive Summary

Currently, world civil aviation is rapidly growing by about 5% each year (M. Masiol, R. M. Harrison, Atmospheric Environment, 2014). This growth is predominately associated with economic development and globalization. The impacts of civil aviation growth are of great concern to the world's environmental authorities, who debate whether gases emitted by the aeronautical industry contribute to climate change, the deterioration of air quality in the vicinity of airports and noise pollution in both the sky and the earth.

This environmental problem is of particular interest to the scientific community and to policy makers, especially in relation to the breach of limit and target values for many air pollutants, mainly nitrogen oxides and particulate matter near the busiest airports, which have grave consequences for public health.

As a result of the global problem, precautionary measures have been taken to study the impact of polluting gases generated by the aeronautical industry on human health, climate change, local air quality and some other gaps that have not been discovered yet. The scientific community and environmental organizations have been working to clarify the different behaviors of these pollutant gases. Such behaviors are important to establish as they could pose greater levels of contamination.

Given the necessity to study and generate pollutant gases inventories around the world, the main target is to establish a neutral carbon index by the year 2020. With this target in mind, all the countries participating in this project can contribute to the reduction of aeronautic pollutants and improve air quality for the world’s inhabitants

This paper describes the role played by each of these pollutant gases in the atmosphere and their process of emission through airplane engines. It also discusses the global debate of the consequences of these gases on the diverse territories of the planet. Additionally, it considers the different regulations in place in involved countries.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS 2
Resumen ejecutivo 3
Executive Summary 5
INTRODUCCIÓN 10
CAPITULO I: ANTECEDENTES GENERALES 13
1.1 Justificación 13
1.2 Objetivos 15
1.2.1 Objetivo Principal 15
1.2.2 Objetivos Secundarios 15
1.3 Alcance 16
1.4 Metodología 17
1.5 Estado del Arte 19
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO 22
2.1 Antecedentes de la Industria Aeronáutica 22
2.1.1 Motores 22
2.1.2 Tipos de Motores 22
2.2 Flota de aeronaves y motores de explotadores chilenos (LATAM y Sky Airlines) 27
2.3 Ciclo LTO (Landing – Take Off) 30
2.3.1 Fases de vuelo 32
2.4 Formación de contaminantes 34
2.5 Material contaminante expulsado por los motores Turbofan: 37
2.6 Gases Contaminantes de la Industria Aeronáutica 41
2.6.1 Gases producto de combustión completa 43
2.6.2 Gases producto de combustión incompleta 50
2.7 Regulación y estandarización OACI 62
2.8 Normativa de calidad de aire en Chile 64
2.9 Gestión Medio Ambiental de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) en Chile. 68
2.10 Medidas medioambientales de Estados Unidos 71
2.11 Medidas medioambientales de Europa 72
2.12 Tecnologías utilizadas para reducir la contaminación 75
2.12.1 Gases que requieren atención: 75
2.12.2 Métodos operacionales de reducción de contaminación 75
2.13 Otros métodos de control operacionales de gases contaminantes 78
CAPITULO III: MODELO DE TRABAJO 80
3.1 Definición de un modelo 80
3.2 Definición de un modelo de mantenimiento 81
3.2.1 Tipos de Mantenimiento 81
3.2.2 Roles de los organismos normativos en esta propuesta 82
3.3 Modelos de esta propuesta 83
3.3.1 Modelo de medición 83
3.3.2 Modelo de Mantenimiento 88
3.4 Metodología y desarrollo de implementación del modelo de medición 90
3.5 Metodología y desarrollo de implementación del modelo de mantenimiento: 98
3.6 Convergencia de los modelos de medición y mantenimiento 104

CAPITULO IV: IMPACTOS ECONÓMICOS, SOCIALES Y POLÍTICOS GENERADOS POR LA PROPUESTA. 105
4.1 Impacto político 105
4.1.1 Situación chilena 105
4.1.2 Contexto Internacional 107
4.1.3 Ventajas y desventajas políticas que pudiese generar en Chile esta propuesta de modelos: 108
4.2 Impacto Social 109
4.2.1 Situación Chilena 109
4.2.2 Contexto Internacional 110
4.2.3 Ventajas y desventajas sociales que pudiese generar en Chile esta propuesta de modelos: 111
4.3 Impacto Económico 112
4.3.1 Metodología de evaluación Económica 112
4.3.2 Indicadores económicos 114
4.3.3 Costos y beneficios económicos que pudiese generar en Chile esta propuesta de modelos (Cuantitativo y Cualitativo) 118
CONCLUSIÓN 119
ANEXOS 123
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 126

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Influencia de la presión en Pe, Te, Gaire, y Vc.c.de la cámara de combustión sobre el índice de emisión del HC. 34
Gráfico 2: Influencia de la presión en Pe, Te, Gaire y V.c.c de la cámara de combustión sobre el índice de emisión del CO**.** 35
Gráfico 3: Influencia de la presión en Pe Te, Gaire y Vc.c de la cámara de combustión sobre el índice de emisión del NOX**.** 36
Gráfico 4: Influencia de las condiciones de funcionamiento de la cámara de combustión sobre la emisión de humos**.** 37
Gráfico 5: Variación de la concentración de CO emitido por los motores de las aeronaves desde el año 1970 hasta el año 2013 51
Gráfico 6: Muestra de emisiones de gases contaminantes durante las cuatro fases de un ciclo LTO. Todos los datos fueron calculados desde los parámetros de EI´s y consumo de combustible desde el Databank de la OACI. 52
Gráfico 7: Variación de la concentración de HC emitidos por los motores de las aeronaves desde el año 1970 hasta el año 2013 59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tabla que muestra la flota LATAM en Chile, especificando el número de aeronaves activas, número de butacas de cada aeronave, fabricante de los motores y su respectivo modelo. 28
Tabla 2: Tabla que muestra la flota de Sky Airline en Chile, especificando el número de aeronaves activas, número de butacas de cada aeronave, fabricante de los motores y su respectivo modelo. 29
Tabla 3: Tabla que muestra las emisiones de referencia en un Ciclo LTO según la certificación que establece la OACI. 32
Tabla 4: Familia de motores montado en los aviones más populares. Esta lista representa un aproximado del 75% del total de motores Turbofan en uso. Los datos son promedios (con desviación estándar ±) para el consumo de combustible y emisiones por Ciclo LTO reportados por familia de motores. 38
Tabla 5: Tabla que muestra las normas de calidad primaria de los gases contaminantes más importantes en Chile, se hace enfoque en los niveles de concentración, periodos de medición y límites de concentración. 66
Tabla 6: Tabla que muestra los tipos de eventos, eventos y casos provocados por exposición crónica a PM2,5. 67
Tabla 7: Muestra la cantidad de contaminantes en ug/m^3 del aeropuerto Arturo Merino Benítez y sus vecindades, adicionalmente se muestra la cantidad máxima permitida por el Ministerio de Medio Ambiente de modo de identificar si se está cumpliendo la norma en la localidad. 70
Tabla 8: Tabla resumen de los modelos y bases de datos aprobados por el Comité de la Aviación de Protección Medio Ambiental (CAEP) 85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2: Turborreactor puro de compresor doble. 26
Figura 1: Turborreactor puro de compresor simple. 26
Figura 3: Motor Turborreactor de doble flujo 27
Figura 4: Explicación conceptual de un Ciclo LTO en las inmediaciones del aeropuerto... 31
Figura 5: Diagrama simplificado de un motor Turbofan que muestra los productos ideales y actuales de la combustión de un motor de una aeronave, relación de procesos atmosféricos con sus productos, efectos medio ambientales, efectos en la salud y lugares de deposición de los gases contaminantes. 39
Figura 6: Figura que muestra un ejemplo de montaje de la sonda para toma de muestras en un motor tipo. 91

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 1: Diagrama de flujo que muestra la metodología y pasos a seguir para el desarrollo de este trabajo de título. 19
Diagrama 2: Características que debe poseer un modelo de medición para poder ser validado por CAEP. 85
Diagrama 3: Metodología de trabajo del modelo de medición de esta propuesta. 96
Diagrama 4: Metodología de trabajo mediante 3 pasos del modelo de mantenimiento de esta propuesta. 99

ÍNDICES DE ECUACIONES

Ecuación 1: Parámetro de contaminación 77
Ecuación 2: Emisiones de ciclo LTO 94

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Valores típicos indicados en los diagramas de caja. 123
Anexo 2: Regulaciones locales de calidad de aire de algunos países, principalmente se miden los niveles de PM, CO, NO2, SO2y O3 medidas en microgramo por metro cubico, los valores establecidos pueden variar año a año. En la primera línea se pueden observar los parámetros aceptables en el medio ambiente que ha publicado la World Health Organization (WHO). 125

INTRODUCCIÓN

Dada la necesidad de cuidar el medio ambiente y a raíz del cambio climático experimentado estos últimos años, se está dando especial énfasis en la reducción de emisiones de gases contaminantes dañinos y precursores de generar el efecto invernadero, principales culpables del calentamiento global. La industria aeronáutica que aproximadamente contamina el 3% del total de emisiones de CO_2 de origen humano está consciente de las emisiones generadas y está dispuesta a entregar nuevas propuestas para reducirlas.

Como principal medida de reducción en las emisiones de gases contaminantes, la Unión Europea (UE) ha propuesto un sistema de cobros por impuestos en el año 2008 a las aerolíneas que operan sobre su espacio aéreo, el que tiene sus fundamentos en las emisiones de CO_2 de los motores de todas las aeronaves en el proceso de combustión completa e incompleta. La decisión de la UE ha generado oposición por parte de Estados Unidos, Canadá, China, India y otros países que poseen altos índices de operación en este territorio, sosteniendo que la medida tomada por la UE es unilateral e injusta dado que se cobra una tasa por todo el trayecto del vuelo y no considera los tiempos de sobrevuelo sobre el territorio donde se realiza el cobro, por otro lado se establece que la medida viola el tratado internacional firmado con los países participantes en el Protocolo de Kioto sobre la reducción de las emisiones de los gases del tipo invernadero para frenar el cambio climático.

Como consecuencia de esta problemática, las Naciones Unidas, a través de sus organismos especializados, en este caso, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) -se hace presentes para poder expandir su foco de acción sobre la reducción de emisiones contaminantes en la aviación. El plan que entró en acción el 16 de febrero del año 2005 establece que los países desarrollados listados en la ONU del Annex I del Protocolo de Kioto, reduzcan de manera colectiva las emisiones de 6 gases contaminantes precursores del efecto invernadero (NO_X, CO_2, SO_X, CO, HC, PM).Para ello los países participantes deben realizar reuniones de trabajo cada 3 años para determinar medidas de control y mitigación.

De esta manera, en la Asamblea N°36/22 del año 2007 se acuerda una "*declaración refundida de las políticas y prácticas permanentes de la OACI relativas a la protección del Medio Ambiente*", es decir, **se designa a la OACI** como el ente regulador del Medio Ambiente y la Aviación Civil Internacional. Por otro lado se mandató la formación de un Grupo sobre la Aviación Civil y el Cambio Climático (GIACC). El principal hito logrado con esta asamblea es el acuerdo de no implantar sistema de comercio de derechos de emisión aplicable a explotadores de aeronaves de otros estados contratantes.

En la Asamblea N°37/19 del año 2010 se asume la coordinación conjunta de los países participantes y se pone énfasis en los siguientes puntos:

a) Lograr una mejora media anual de 2% en el rendimiento de combustible a mediano plazo.

b) Alcanzar una meta colectiva mundial que aspira que las mediciones mundiales netas de carbono de la aviación civil internacional se mantengan a un mismo nivel a partir del 2020

c) Solicitar al Consejo la elaboración de un plan mundial sobre el CO_2 para las aeronaves.

d) Implementar políticas de uso de combustible alternativo sostenible para la aviación.

e) Otorgar asistencia a los estados en desarrollo.

Con respecto a la asamblea realizada el año 2013, se establece en la Resolución N°38/18 que:

a) Se debe preparar la presentación de planes de acción en forma voluntaria a todos los estados.

b) Se debe elaborar un plan mundial de marco para las *Medidas basadas en criterios de mercado* (Global Market-based Measure - MBM)[1] y contemplar un umbral mínimo del mismo que otorgue exenciones para la aplicación de MBM regionales para ser revisado en la próxima asamblea.

[1] MBM (Market Based Measure): Corresponden a mecanismos basados en criterios de mercado que buscan reducir de manera eficiente las emisiones de CO_2 de la aviación internacional en su dimensión económica.

c) Se debe elaborar un plan mundial sobre el CO_2 para las aeronaves en el año 2015 para ser adoptada por el consejo el año 2016.

d) Se crea el Environment Advisory Group (EAG) para analizar las MBM con el correspondiente grupo de trabajo -Global Market-based Measure Technical Task Force (GMTF).

e) En la segunda sesión del EAG se presentará una metodología de trabajo y las propuestas de los países participantes a la OACI: "El Strawman".

Así se ha encomendado el trabajo técnico al "Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP)", se ha creado el "Environment Advisory Group"para analizar las MBM y, por otro lado, se están presentando las diferentes propuestas alternativas de los países miembros de la OACI para poder finalmente adoptar una medida consistente para reducir de manera colectiva las emisiones. Parte de este trabajo es entregar herramientas de gestión y/o propuestas para combatir el cambio climático y reducir los contaminantes.

A partir de la necesidad de buscar nuevas metodologías de control y reducción de emisiones de efecto invernadero a nivel global, nacen distintos programas y planes de acción para cumplir con un nivel estable de emisiones para el año 2020. En ese mismo sentido, es que me atrevo a presentar en esta Memoria un Modelo de Medición y otro de Mantenimiento que buscan reducir los niveles de gases contaminantes generados en Chile.

CAPITULO I: ANTECEDENTES GENERALES

1.1 Justificación

El estudio de los gases del tipo invernadero y las emisiones en la aviación comercial es de interés público y político, pues es imperante disminuir la concentración de gases precursores del calentamiento global en la atmósfera terrestre. (e.g., Mahashabde et al., 2011). De hecho, en la industria aeronáutica, surge la inquietud en la construcción de los primeros motores a turbo reacción en la década de sesenta, con el principal objetivo de estudiar el impacto directo e indirecto en el clima y sus posibles consecuencias. Algunos estudios anteriores se concentran principalmente en las emisiones de los motores turbo reactores en altitudes de crucero (30.000 pies[2] de altura) (e.g., Reinking et al., 1968: Kuhn, 1970; Arnold et al., 1992; Fahey et al., 1995ab; Wahner et al., 1995; Brasseur et al., 1996; Shumman, 1996, 1997; Anderson et al., 1998ab).

Por otro lado, el interés de estudiar las emisiones de la industria aeronáutica en los aeropuertos se encuentra en el estudio de Daley & Naugle en 1979 y de Naugle & Fox en 1981, sin embargo, sólo en la actualidad se le ha dado más importancia a los efectos que tienen las emisiones de los motores de las aeronaves en las cercanías de aeropuertos y así poco a poco se han ido sumando aeropuertos que desean hacerse responsables, tanto de la contaminación del aire como de la contaminación acústica en las áreas residenciales aledañas (Roy M.Harrison & M. Masiol et al., 2014). Estudios científicos comprueban que pueden tener efectos adversos en la fase respiratoria y generar problemas cardiopulmonares, incluyendo el cáncer pulmonar, en la población. (Boldo et al., 2006; Li et al., 2003a; Pope and Dockery, 2006; Scwarze et al., 2006).

Los aeropuertos son importantes fuentes de gases contaminantes en zonas urbanas que aún no han sido reguladas. Muchas agencias de salud no tienen información disponible sobre la cantidad de contaminantes que existen en estas zonas, tampoco se conoce con detalle cuál

[2] Pie de longitud: Es una unidad de medida anglosajona utilizado en EE.UU y Reino Unido que equivale a 1 pie = 12 pulgadas = 0,304800 metros. Se emplea para expresar la altitud de aviones y otros vehículos aéreos en pies. Fuente: Enciclopedia.us.es (Última consulta 10 de Septiembre 2016).

es el tipo del contaminante emitido por las aeronaves y cuáles son propias de las operaciones de plataforma de los aeropuertos. (Zhu et al., 2011; Garnier et al., 1997; Herndon et al., 2005; Yu et al., 2004)

Aquí reside la importancia de estudiar las características de los gases contaminantes para poder localizar y obtener un inventario más claro sobre las medidas correctivas que se deben tomar para mejorar la calidad del aire local y global. La identificación y el estudio de los gases provenientes de la industria aeronáutica chilena permitirán a las autoridades y a los explotadores tomar las correspondientes medidas de control.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Principal

Proponer dos modelos, uno de mantenimiento de motores y otro de medición de gases que ayuden a certificar y disminuir los niveles de emisiones de gases contaminantes de la industria aeronáutica en Chile, basado en un análisis de las emisiones según la fase del vuelo en un ciclo LTO, de modo de identificar el o los momentos en que los niveles de gases contaminantes son significativos.

1.2.2 Objetivos Secundarios

- Estudiar las fases de vuelo críticas de un vuelo comercial e identificar la más contaminante.
- Generar un estudio bibliográfico para fomentar estudios del comportamiento de las emisiones de la industria aeronáutica en el futuro.
- Motivar y generar conciencia sobre el impacto de estos gases en la salud y el medioambiente.
- Obtener un inventario inicial de gases contaminantes en Chile mediante la utilización del modelo de medición propuesto.
- Innovar en la creación de nuevos modelos de mantenimiento que contribuyan a mejorar la calidad del aire, a partir del modelo de mantenimiento propuesto.
- Despertar el interés de la industria aeronáutica para utilizar métodos más limpios de operación en las distintas fases de un vuelo.

1.3 Alcance

El alcance de esta memoria es **Descriptivo**. Se muestran e identifican los estudios realizados en materia de emisiones de gases contaminantes en el mundo, a la vez que se plantea un modelo de medición y otro de mantenimiento para reducir los niveles de gases en Chile para, luego, en lo posible, ser propuesto a las autoridades aeronáuticas chilenas. Igualmente, aunque bastante ambicioso, sería deseable fomentar el trabajo conjunto entre las autoridades reguladoras y las aerolíneas chilenas El modelo consta de un análisis cuantitativo y cualitativo de datos a extraer a través del uso de una herramienta de monitoreo y sondeo de los gases en los motores de las aeronaves que operan en territorio chileno.

Para este trabajo sólo se consideraran explotadores comerciales chilenos de gran tamaño, en este caso particular, se referirá a LATAM Airlines y Sky Airlines. Se considerarán los materiales de su flota predominante para describir y caracterizar el tipo de motores que utilizan en sus operaciones diarias sobre el territorio chileno. Sólo se toma en cuenta en este trabajo de título los motores tipo Turbofan.

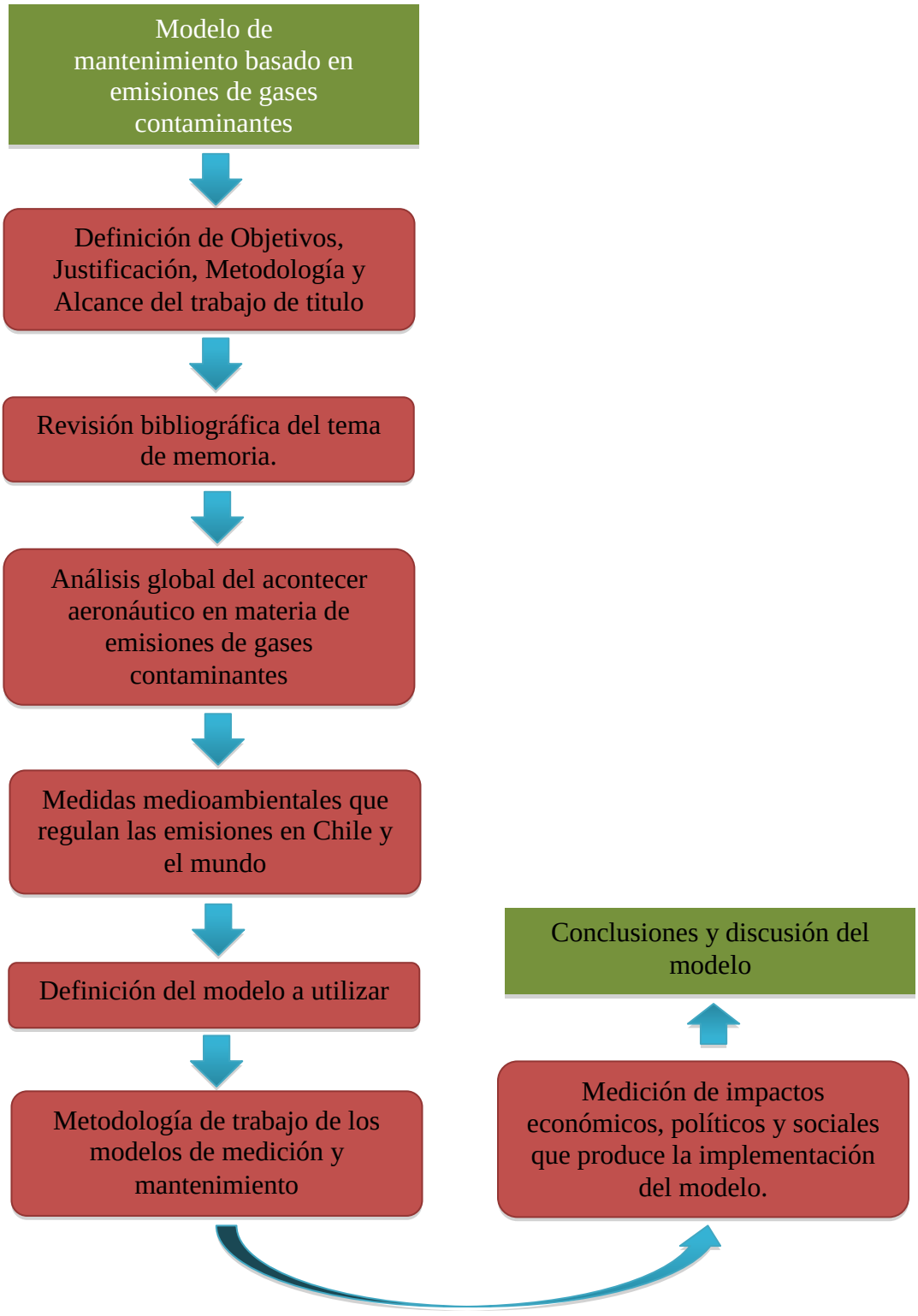
Es de suma importancia mencionar que se indicarán los parámetros que se necesitarán para poder realizar el análisis de este modelo para su posterior revisión y generación de medidas correctivas necesarias.

1.4 Metodología

1. Revisión bibliográfica en materia de control y estudios de emisiones de gases contaminantes en el mundo.
2. Definición de un modelo de control de emisiones de gases contaminantes en Chile aplicable al mantenimiento predictivo de motores de explotadores chilenos.
3. Proponer un plan de adquisición de herramientas de medición que permita facilitar la elección de las mejores alternativas de medición de gases emitidos directamente desde los motores de las aeronaves en Chile.
4. Medir el impacto que pudiese tener la implementación de este modelo en la industria aeronáutica chilena, utilizando el método de comparación que identificará las ventajas y desventajas que se pudiesen presentar en los escenarios económicos, políticos y sociales de la industria aeronáutica.
5. Conclusiones del modelo.

El plan general de la metodología a seguir en este trabajo de memoria puede visualizarse claramente en el Diagrama 1 mostrado a continuación:

Diagrama 1: Diagrama de flujo que muestra la metodología y pasos a seguir para el desarrollo de este trabajo de título.



1.5 Estado del Arte

El afán de conocer los efectos de la aviación en el cambio climático surge décadas atrás. En la literatura es posible encontrar los efectos potenciales de las estelas de condensación en la aviación que data de la década de 1960 y principios de la de 1970 (Reinking, 1968; Kuhn, 1970; SMIC, 1971). Sin embargo, el interés sobre los impactos de la aviación global en la atmósfera se inicia en los años 70 con el desgaste de la capa de ozono.

En los últimos años de 1980 e inicios de los 90, se da inicio a varias investigaciones que buscan conocer los efectos de las emisiones de los óxidos de nitrógeno (NO_X) en la formación del ozono troposférico (O_3). También durante estos años se complementan los conocimientos sobre la generación de las estelas de condensación provenientes de la actual flota subsónica de aeronaves. Los proyectos de EU AERONOX y US SASS (Schumann, 1997; Friedl et al., 1997) en conjunto con otros programas de investigación permiten identificar numerosas emisiones y efectos de la aviación sobre el cambio climático, incluyendo el impacto del CO_2, las emisiones de partículas y otras inducidas por la aviación.

En 1999, un año después de la evaluación europea sobre el impacto atmosférico de la aviación (Brasseaur et al., 1998), el panel intergubernamental del cambio climático (IPCC) publicó un reporte llamado "Aviation and Global Atmosphere" (IPCC, 1999) que presenta la primera evaluación comprensiva de los impactos de la aviación en el clima. En este reporte se establece la unidad de medida conocida como Forzamiento Radiativo (RF) para referirse al impacto de los gases contaminantes en la atmosfera terrestre. Se utilizan las unidades watts por metro cuadrado (Wm^{-2}) para representar estos cambios originados en lo más alto de la atmosfera.

A partir de esta investigación, se estiman los efectos que generan los gases contaminantes emitidos por la aviación en el Forzamiento Radiativo:

- CO_2 tiene un efecto positivo en el RF.
- NO_X tiene un efecto positivo en el RF; este elemento se compone de tres elementos adicionales, producción de O_3 tiene un efecto positivo en RF, la reducción del

metano (CH_4) tiene un efecto negativo en el RF, y el decrecimiento del O_3 a largo plazo tiene un efecto negativo en el RF.

- H_2O tiene un efecto positivo en el RF.
- La formación lineal persistente de estelas de condensación tiene un efecto positivo en el RF.
- SO_X tiene un efecto positivo en el RF.
- El material particulado (PM= *Particular Matter*) tiene un efecto positivo en el RF.

El efecto positivo en el Forzamiento Radiativo tiende a calentar la superficie terrestre (mayor energía recibida que emitida), mientras que el efecto negativo en el Forzamiento Radiativo enfría el sistema (mayor energía pérdida que recibida). Considerando el sistema climático de la Tierra, las posibles causas del Forzamiento Radiativo pueden ser; el cambio en la radiación solar incidente o los efectos generados por el aumento de gases del tipo invernadero en la atmósfera.

Estos efectos fueron reevaluados cuantitativamente por Sausen et al. (2005), lo que permitió determinar que el total de RF corresponde a 47.8 mWm^{-2} en el año 2000, este resultado se ajusta al obtenido por el IPCC en el año 1999 para el tráfico entre los años 1992-2000. Este razonamiento sobre los efectos de los gases contaminantes se mantiene hasta hoy.

A pesar de los eventos mundiales significativos para la aviación como la guerra del golfo, el atentado a las torres gemelas y otros desastres , el volumen de transporte de pasajeros aumentó en términos de ingreso por pasajero transportado por kilómetro (RPK) en un promedio del 5,2% por año entre los años 1992 y 2005.

Entre los años 2000 y 2005, según información reciente sobre el tráfico aéreo de la OACI y la información sobre las ventas de combustible para la aviación proporcionada por la agencia internacional de energía (IEA, 2007), se indica un fuerte incremento en la actividad aérea asociada al aumento de las emisiones de CO_2 en este período. Los grupos de trabajo III (WGIII) y I (WGI) de la IPCC, estimaron que la aviación representa el 3% del total de forzamiento radiativo de origen antropogénico en el año 2005.

Dada la imposición que intentó poner la UE en el año 2008 mediante el cobro de emisiones por vuelos en territorio europeo, la OACI decide generar nuevas medidas de regulación que ayuden a fomentar el menor impacto climático producido por la industria aeronáutica del mundo. De esta manera, se determina recalcular las evaluaciones de RF del año 2005 para proveer nuevos escenarios ilustrativos de emisiones provenientes por la aviación para el año 2050, y examinar las oportunidades de mitigación que se pueden presentar con la mejora de las tecnologías y nuevas medidas regulatorias (D.S. Lee et al., 2009).

En la actualidad los países miembros de la OACI trabajan en conjunto para generar nuevas medidas correctivas locales que permitan buscar y mantener un nivel de carbono neutro para el año 2020.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la Industria Aeronáutica

2.1.1 Motores

Los motores para la aviación civil son generalmente clasificados como motores de turbinas a gas (Turbofan y Turboprop), propulsados gracias al uso de combustible de aviación Keroseno o también conocido como Jet Fuel; mientras que para la aviación general se utilizan motores de combustión interna mediante el uso de pistones que son propulsados gracias al uso de gasolina de aviación o también comúnmente conocida como AVGAS (OACI, 2011). La mayoría de las aerolíneas modernas están equipadas con motores Turbofan, derivados de los motores Turbo Jet que fueron construidos durante el desarrollo de la Segunda Guerra Mundial. Actualmente existen aeronaves de aviación general que pueden ser propulsadas con motores de Turbo Jet pequeños, pero para fines de esta Memoria no se tomarán en cuenta debido a su baja cantidad de usuarios en el mundo y, por lo tanto, su aporte de gases contaminantes es despreciable.

2.1.2 Tipos de Motores

***Motor Turbo Jet*:** Es un motor de reacción, cuyos componentes fundamentales son turbo máquinas, es decir, corresponden a compresores de flujo único que también son normalmente conocidos como turborreactores que trabajan en conjunto con una o más turbinas. Estos motores basan su funcionamiento en la aplicación de la Segunda y Tercera Ley de Newton:

1ª Ley de Newton: Todo cuerpo permanece en estado de reposo o velocidad constante (Aceleración nula) cuando se le deja libre sin que actúe ninguna fuerza sobre él.

2ª Ley de Newton: El incremento de la cantidad de movimiento es igual a la impulsión de la fuerza aplicada y tiene la misma dirección que aquella.
Fórmula 1: $F = m * a$, donde F= Fuerza, m= masa, a= aceleración.

3ª Ley de Newton: A toda acción de una fuerza, hay una reacción igual y actuando en la misma dirección y sentido contrario.

Estos motores generan empuje principalmente producido por la diferencia de presiones que se encuentran a lo largo del paso de aire por los componentes de inyección y expansión de aire. Estas diferencias de presión permiten acelerar el flujo de aire por unidad de tiempo y generan una importante variación entre las velocidades de entrada y de salida del motor. Está variación puede ser hasta tres veces más rápida que la velocidad de aire de admisión. (Motores a Reacción; M. Cuesta Alvarez, 2010).

Los motores Turbo Jet o Turbocompresores están compuestos por:

1. Difusor de admisión.
2. Un compresor de entrada.
3. Difusor postcompresor.
4. Compresor principal.
5. Cámara de combustión que añade el combustible para el encendido.
6. Una o más turbinas que extraen energía desde los gases en expansión.
7. Tobera de escape que acelera los gases de salida del motor para generar empuje.

Descripción de componentes

1. Difusor: Es un conducto en el cual la corriente fluida pierde velocidad y gana presión, este puede ser subsónico y supersónico.
    a) Difusor subsónico: La corriente fluida a la entrada, tiene una velocidad menor que la del sonido en el seno de dicho fluido.
    b) Difusor supersónico: La corriente fluida a la entrada, tiene una velocidad mayor que la del sonido en el seno de dicho fluido.

2. Compresores: Son aquellos componentes que tienen como principal propósito, aumentar la energía del fluido por elevación de presión, mediante la aplicación de trabajo mecánico. El turbocompresor entrega energía al fluido en un órgano llamado rotor, este luego transforma la energía cinética en energía de presión en el difusor.

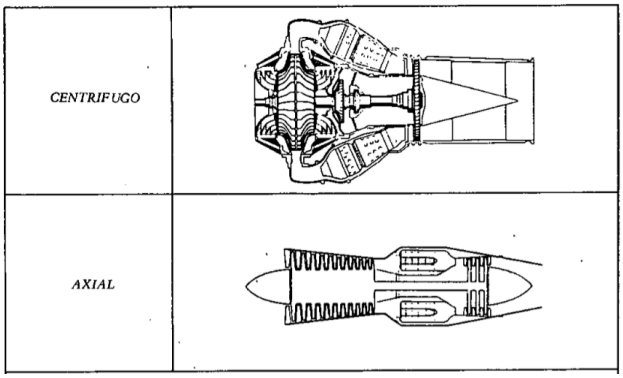
3. Cámara de Combustión: Zona del motor donde se suministra energía calórica que permite alimentar a todo el motor, esta energía se transforma en cinética en la turbina para luego mover el compresor y sus accesorios. En las cámaras de combustión se eleva la temperatura hasta un nivel muy alto que permita ser compatible con la resistencia de los materiales de construcción del motor.
   La combustión se realiza a presión constante (Teoría).

4. Turbinas: Son aquellos componentes cuyo propósito es transformar la energía de presión de un fluido, en energía mecánica. Esta transformación de energía cinética en energía mecánica se origina en la fase expansiva del fluido en el estator, y finaliza al momento en el cual la energía cinética hace girar el rotor.

5. Tobera: Es un conducto en el cual la corriente fluida gana velocidad a costa de perder presión, este puede ser subsónica y supersónica
   a) Tobera subsónica: La corriente fluida a la entrada, tiene una velocidad menor que la del sonido en el seno de dicho fluido.
   b) Tobera supersónica: La corriente fluida a la entrada, tiene una velocidad mayor que la del sonido en el seno de dicho fluido.

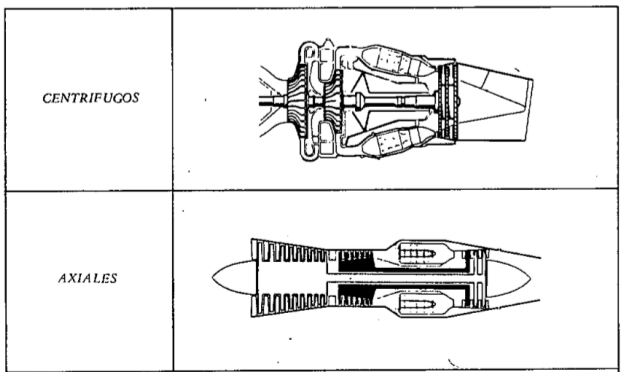
Este tipo de motores pueden tener distintos tipos de configuraciones que van a depender del número y tipo de compresores que estos posean, un ejemplo del tipo de motores Turbo Jet que se pueden encontrar se pueden visualizar en la Figura 1 y Figura 2.

Figura 2: Turborreactor puro de compresor simple.



Fuente: Motores a Reacción; M. Cuesta Álvarez. 2010.

Figura 1: Turborreactor puro de compresor doble.



Fuente: Motores a Reacción; M. Cuesta Álvarez. 2010.

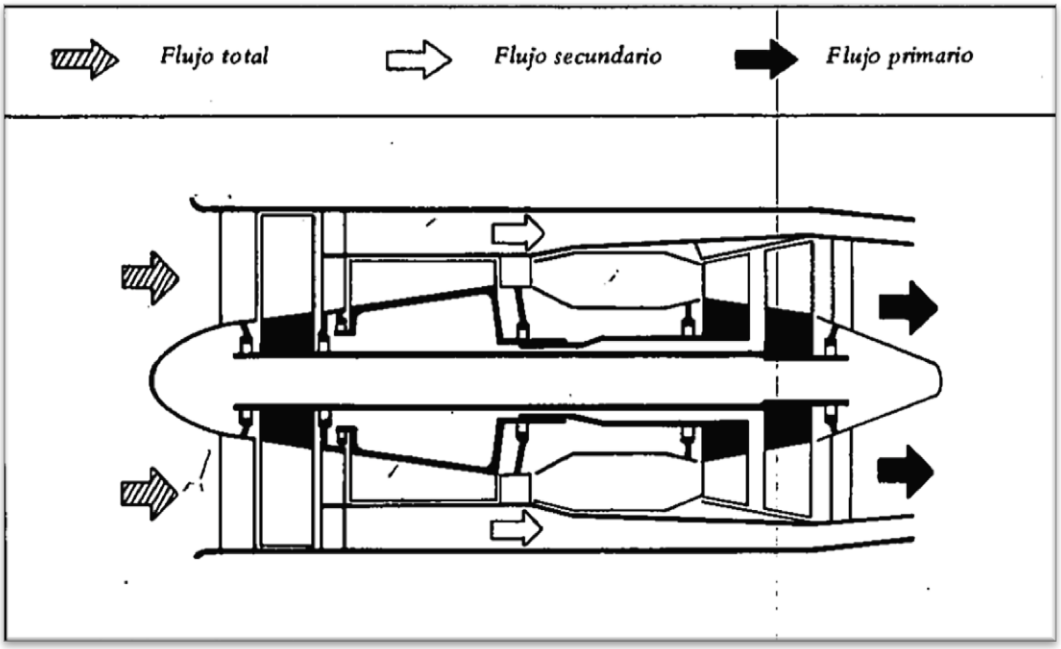
Motor Turbofan

Los motores Turbofan utilizan un motor Turbo Jet en su núcleo para poder generar energía de empuje y mover un compresor de alabes sobredimensionado que está ubicado en la parte frontal del motor, esta zona sobredimensionada respecto al turborreactor puro, es el encargado de acelerar el flujo de aire que no va a ser sometido a combustión. (Motores a Reacción; M. Cuesta Alvarez, 2010). Este tipo de motores utilizan un doble flujo, es decir, su flujo está compuesto por dos tipos de aires:

1. Flujo de Aire Primario: Es aquel aire que penetra el tubo de llama axialmente y por su centro, en este lugar del tubo aún no hay turbulencia ni efecto de paredes. Dicho aire es aquel que se utilizará para la combustión. El aire es admitido por el motor Turbo Jet que se encuentra ubicado en el núcleo del motor.
2. Flujo de Aire Secundario: Corresponde a la parte del aire que pasa a través del conductor del motor en forma de anillo que se forma entre la pared exterior del tubo de llama y la del interior de la carcasa de la cámara. Este tipo de aire es utilizado para disminuir la temperatura del tubo de llama y de los productos de la combustión además de ayudar a estabilizar la llama y reducir el ruido de los motores.

En la Figura 3 es posible visualizar claramente los flujos de aire primario y secundario.

Figura 3: Motor Turborreactor de doble flujo



Fuente: Motores a Reacción; M. Cuesta Álvarez, 2010.

Los motores Turbofan utilizan el flujo de derivación o bypass ratio que se refiere a la razón de flujo de masa de aire que avanza entre el combustor y la turbina por la parte exterior del núcleo del motor (Flujo Secundario) con respecto a la masa de aire que avanza por el núcleo del motor para producir combustión y luego transformarla en energía mecánica (Flujo Primario). Altas razones de flujo de derivación son preferidos en la aviación civil debido a que reducen el ruido y aumentan la eficiencia del uso de combustible (Roy M.Harrison & M. Masiol et al., 2014).

Motor a Pistón Recíproco: Este tipo de motores predomina en aeronaves pequeñas que son utilizadas para vuelos privados como; clubes o academias de vuelo, turismo y paracaidismo. Los motores a pistón utilizan los mismos principios básicos de funcionamiento que los de un motor para automóvil, pero generalmente requieren de mejores características de performance para su funcionamiento. Los motores de cuatro cilindros son los comúnmente utilizados, seguido de los de dos cilindros y ocasionalmente pueden encontrarse motores diésel instalados en aeronaves pequeñas (Roy M.Harrison & M. Masiol et al., 2014).

La principal diferencia entre un motor a pistón y un motor jet, es que la combustión es un proceso continuo en los motores Jet, mientras que en los motores a pistón la combustión no es continua y la chispa es intermitente.

2.2 Flota de aeronaves y motores de explotadores chilenos (LATAM y Sky Airlines)

2.2.1 LATAM Airlines: LATAM Airlines es una aerolínea chilena - brasileña que se creó a mediados del año 2012 mediante la fusión de dos grandes compañías aéreas latinoamericanas entre la chilena LAN Airlines y la brasileña TAM Líneas Aéreas. Debido al tamaño de la flota y el número de pasajeros transportados, es la compañía más grande de América Latina y ocupa el puesto número diez en el ranking mundial. Esta fusión busca desarrollar economías de escala entre ambas empresas, además de otorgar mejores destinos y beneficios a sus pasajeros, aumentando el número de vuelos disponibles.

LATAM Airlines en Chile cuenta con una flota total de 127 aeronaves con más de 140 destinos en Sudamérica, América, Europa y Asia. Los tipos de aeronaves y sus respectivas configuraciones de motor y de ocupación pueden visualizarse en la Tabla 1.

Tabla 1: Flota LATAM en Chile, especificando el número de aeronaves activas, número de butacas de cada aeronave, fabricante de los motores y su respectivo modelo.

Flota LATAM Chile				
Aeronaves	Total	Butacas	Motores	Modelo
Airbus A319-100	16	144	Pratt & Whitney	V2524-A5
Airbus A320-200	54	168-174	Pratt & Whitney	V2527E-A5
Airbus A321-200	14	220	CFM International	CFM56-5B3/P
Boeing 767-300ER	21	220	General Electric	CF6-80C2B7F
Boeing 787-8	10	247	Rolls-Royce	Trent 1000
Boeing 787-9	12	283	Rolls-Royce	Trent 1000

Fuente: Elaboración propia con información de Airfleets.net (Última consulta; 16 de Octubre 2016).

2.2.2 Sky Airline: Sky Airline es una aerolínea chilena de bajo costo que fue fundada el año 2002. Esta empresa busca diferenciarse en el rubro aeronáutico chileno como una empresa Low Cost volando a 13 destinos en Chile y a 4 en Sudamérica (Lima, Buenos Aires, Córdoba y Montevideo). Sky Airline es la segunda aerolínea más importante del país ocupando un 25% de la cuota del mercado nacional.

Sky Airline cuenta, en la actualidad, con una flota de 15 aeronaves que poseen tecnología de punta que permite a la compañía disminuir considerablemente los costos de combustible y mantenimiento. En la Tabla 2 es posible visualizar la composición de la flota actual de acuerdo al tipo de aeronave y configuraciones de motor y ocupación.

Tabla 2: Tabla que muestra la flota de Sky Airline en Chile, especificando el número de aeronaves activas, número de butacas de cada aeronave, fabricante de los motores y su respectivo modelo.

Flota Sky Airline				
Aeronaves	**Total**	**Butacas**	**Motores**	**Modelo**
Airbus A319-100	13	150	CFM International	CFM56-5B5/3
Airbus A320-200	2	180	Pratt & Whitney	V2527E-A5

Fuente: Elaboración propia con información de Airfleets.net (Última consulta; 16 de Octubre 2016).

Esta información será útil en el desarrollo de este trabajo, la que permitirá especificar a qué clase de aeronaves y motores podrá ser aplicado el tipo de mantenimiento correspondiente.

Se estima que ambas empresas aumenten su flota en un 5% entre los años 2016-2020; factor que también debe ser considerado pues permite generar proyecciones de emisiones de gases contaminantes en los cielos chilenos a partir del año 2017.

2.3 Ciclo LTO (Landing – Take Off)

Para que los aviones generen sustentación y puedan volar, la aeronave debe cumplir con ciertos requisitos importantes previos y posteriores a cualquier vuelo, es por ello que se deben ejecutar ciertas etapas que se subdividen en 8 fases de vuelo que serán descritas a continuación. Estas etapas han sido estandarizadas por la OACI y las describe como un ciclo normal de despegue y aterrizaje (Landing and Take Off) o LTO por sus siglas en inglés.

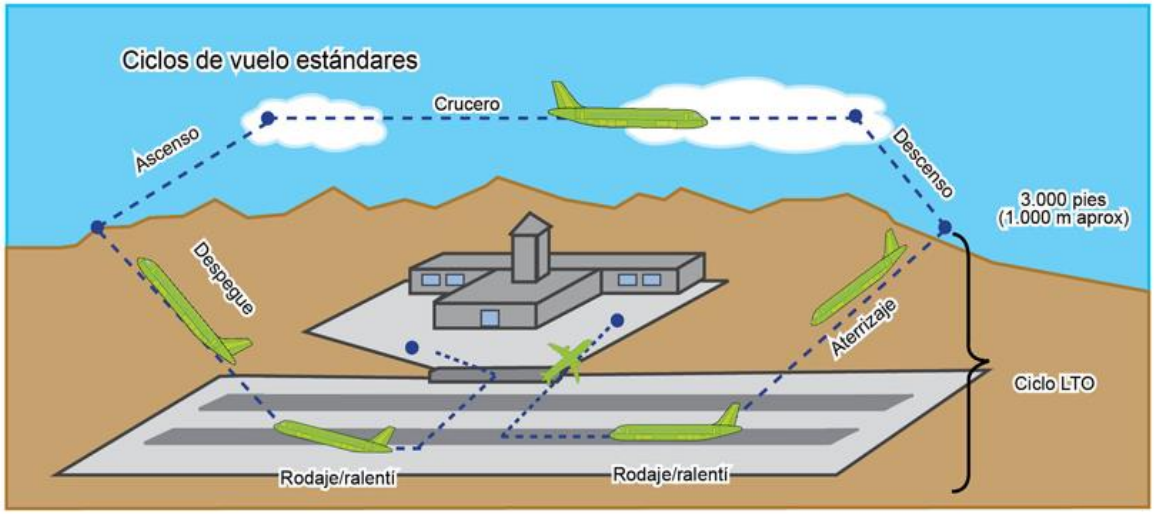
Ciclo de aterrizaje y despegue (LTO); El ciclo LTO normalizado se inicia cuando la aeronave está en su etapa de descenso (3.000 ft) a medida que se aproxima al aeropuerto desde la altitud de crucero[3], aterriza y rueda hasta la puerta de desembarque. El ciclo continúa a medida que la aeronave hace el rodaje hacia la pista para el despegue y ascenso hasta que sale de la zona de mezcla (3 000 ft) para regresar a la altitud de crucero.

Un LTO de aeronave es equivalente a dos operaciones de una aeronave: una de aterrizaje y una de despegue (Federal Aviation Administration [FAA]). Los cuatro modos de operación específicos del ciclo LTO de referencia de la OACI son: despegue, ascenso, aproximación y rodaje/marcha lenta en tierra.

La Figura 4 muestra visualmente la ubicación del incio y final de cada una de estas fases, estos ciclos se definen como estándares y se realizan en todas las operaciones aéreas.

[3] Altitud en la cual la aeronave mantiene una altura y velocidad constante.

Figura 4: Explicación conceptual de un Ciclo LTO en las inmediaciones del aeropuerto.



Fuente: OBSA.

Las turbinas de aviación están sujetas a certificaciones (OACI) en las que se definen los límites de emisiones permisibles en base a un ciclo LTO. Para poder certificar un motor principal la OACI se basa en 3 parámetros básicos:

I. **Tiempo en Modo (TIM):** Período medido en minutos, donde los motores del avión gastan cierta cantidad de combustible con una cierta cantidad de potencia determinada, generalmente corresponde a una fase del ciclo LTO.

II. **Indicador de Emisiones (EI):** Está determinado por la masa de contaminantes emitidos por unidad de masa de combustible consumido de un motor en específico. La base de datos de la OACI entrega las medidas de contaminantes en g/Kg de CO, HC y NO_x.

III. **Flujo de Combustible:** Cantidad de combustible volumétrico que fluye por un sector específico de las líneas de combustible, este se mide generalmente con las unidades Kg/s.

La OACI utiliza ciertas emisiones de referencia en un Ciclo LTO, sin tomar en cuenta algunos detalles y variaciones que existen en la realización actual de las operaciones, por lo que ha creado la Tabla 3 de modo de simplificar las configuraciones de potencia y tiempos en modo para estandarizar este ciclo. Las certificaciones de emisión de un Ciclo LTO fueron diseñadas para utilizar un ciclo de referencia que permite comparar las tecnologías que se han ido implementando en la industria aeronáutica.

Asimismo también este ciclo es bastante adecuado para calcular inventarios básicos sobre emisiones de gases contaminantes, (Airport Air Quality, ICAO, 2012).

Tabla 3: Tabla que muestra las emisiones de referencia en un Ciclo LTO según la certificación que establece la OACI.

Operating Phase	Time-in-mode (Minutes)		Thrust setting (percentage of rated thrust)
Approach	4,0		30 %
Taxi and ground idle	26	7,0 (in) 19,0 (out)	7 %
Take-off	0,7		100 %
Climb	2,2		85 %

Fuente: Airport Air Quality, ICAO, 2012.

2.3.1 Fases de vuelo

Despegue: La aeronave es guiada para rodar por la pista y calles de rodaje para luego ascender hasta completar el segundo segmento del despegue, situado a 400 pies sobre la pista. Se desarrolla dentro de la Zona de Control (CTR), espacio aéreo controlado que se extiende desde la superficie terrestre hasta un límite superior determinado. Si se produce una falla antes de alcanzar la velocidad de decisión (V1), se llevará a cabo un despegue interrumpido. En caso de que la falla se detecte una vez sobrepasada dicha velocidad, se deberá continuar con el despegue.

Ascenso Luego de haber realizado el despegue (a unos 400 pies sobre la pista), la aeronave continúa ascendiendo siguiendo las Rutas de Salida o *Standard Instrument Departure* (SID), hasta alcanzar el nivel de vuelo en la que se encuentran las aerovías. Esta ruta se desarrolla dentro de la estructura del espacio aéreo denominada Área de Control (CTA), y en concreto por el Área de Control Terminal (TMA), donde se presta servicio de control de tráfico aéreo.

Crucero: Fase en la que se completa la mayor parte del vuelo, volando a nivel establecido, con una configuración y velocidad prácticamente constantes. Esta fase se desarrolla dentro del CTA, dentro de la cual se incluyen las aerovías (AWY).

Descenso: Tras la fase de ruta, la aeronave comienza a descender siguiendo las Rutas de Llegada o *Standard Arrival* (STAR), dirigiéndose a puntos de control, en caso de que sea necesario, se pueden llevar a cabo circuitos de espera hasta que se autorice a proseguir con la fase de Aproximación. Al igual que la fase de salida, se desarrolla dentro del TMA.

Aproximación: Estas operaciones se desarrollan dentro del TMA, hasta que son transferidas al CTR justo antes de comenzar el aterrizaje. La aproximación está determinada por las Cartas de Aproximación, que pueden ser instrumentales o visuales, dependiendo del tipo de aproximación que la aeronave lleve a cabo. Si una vez alcanzada la altitud/altura de decisión (DA/H) no se ha establecido contacto visual con la pista, se debe proceder a realizar una aproximación frustrada.

Aterrizaje: Fase del vuelo que comienza tras la aproximación y finaliza cuando la aeronave se ha detenido completamente en las inmediaciones del aeropuerto. Al igual que el despegue y la aproximación, se desarrolla dentro de CTR. En caso de fallos durante la fase del aterrizaje, siempre que las circunstancias y la configuración de la aeronave lo permitan, se deberá realizar un aterrizaje interrumpido (Go Around).

Rodaje: Operaciones que se realizan al interior del TMA. El propósito del rodaje es maniobrar el avión hacia el gate de aparcamiento y/o posición de despegue y desde el aparcamiento hasta el umbral de la pista. Esta operación se debe realizar en el área de movimiento de un aeropuerto.

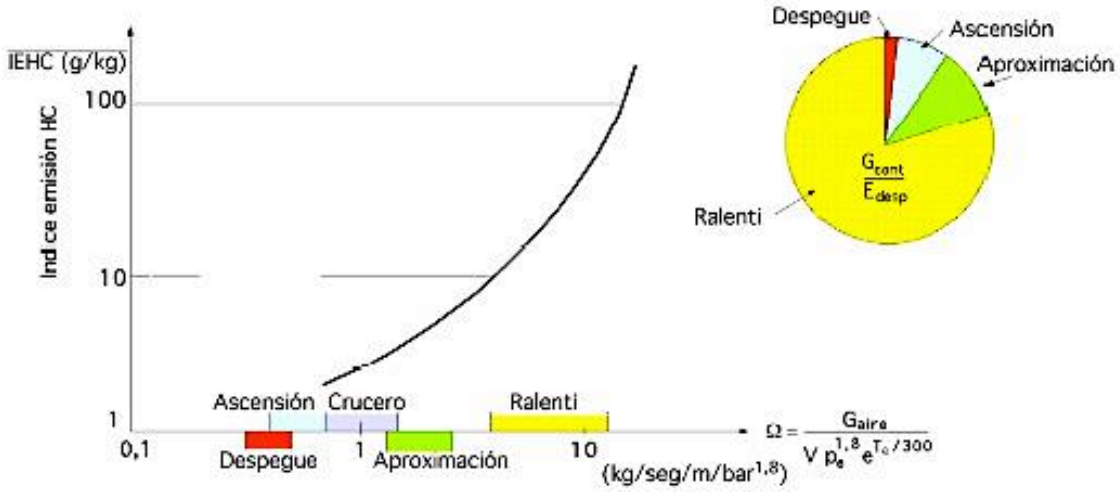
Ralentí: Se refiere a la acción de llevar la palanca aceleradora de los motores al mínimo de potencia posible. Comúnmente se realiza cuando se desea disminuir la velocidad de la aeronave, ya sea en tierra como en el aire. Esta condición siempre debe chequear.

2.4 Formación de contaminantes

El estudio realizado por Pedro Fernández Díez, ex profesor de la Universidad de Cantabria en Santander (España) en el año 2009[4], puede esclarecer cuáles son los gases contaminantes que son expulsados por la cámara de combustión de un motor tipo turbina en las diferentes fases de un vuelo y determinar la concentración expulsada de gases del tipo invernadero.

CO y HC: Se producen en la fase intermedia de una oxidación completa. Una vez oxidado completamente da origen al CO_2. Estas reacciones dependen de la presión y temperaturas locales, concentraciones y tiempo de permanencia en el motor.

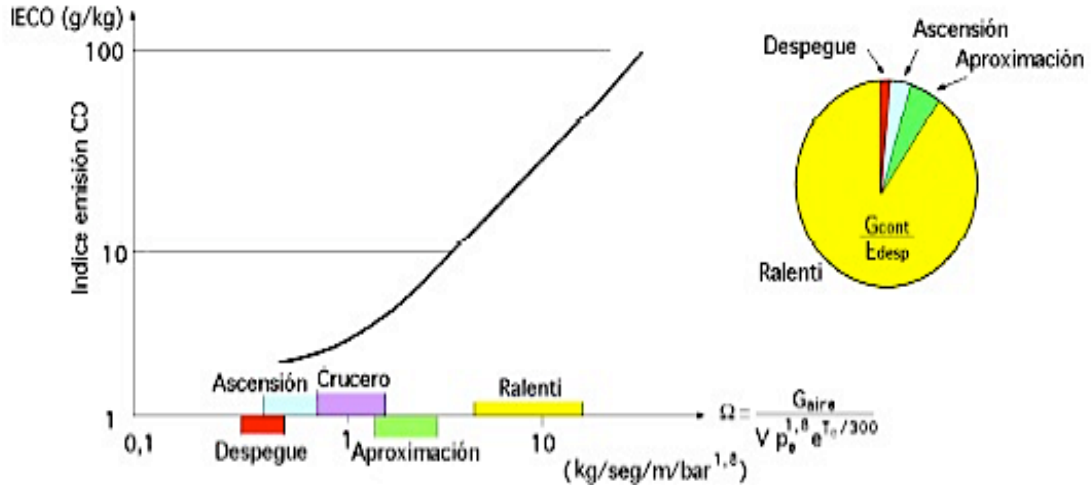
Gráfico 1: Influencia de la presión en Pe, Te, Gaire, y Vc.c.[5]de la cámara de combustión sobre el índice de emisión del HC.



Fuente: Fernández, 2009.

[4] PEDRO FERNANDEZ DIEZ. *Contaminación por Motores de Turbinas a Gas* (2009).
[5] Pe: Presión de entrada, Te: Temperatura de entrada, Gaire: Gasto másico de aire, V.c.c: Volumen cámara de combustión.

Gráfico 2: Influencia de la presión en Pe, Te, Gaire y V.c.c de la cámara de combustión sobre el índice de emisión del CO**.**



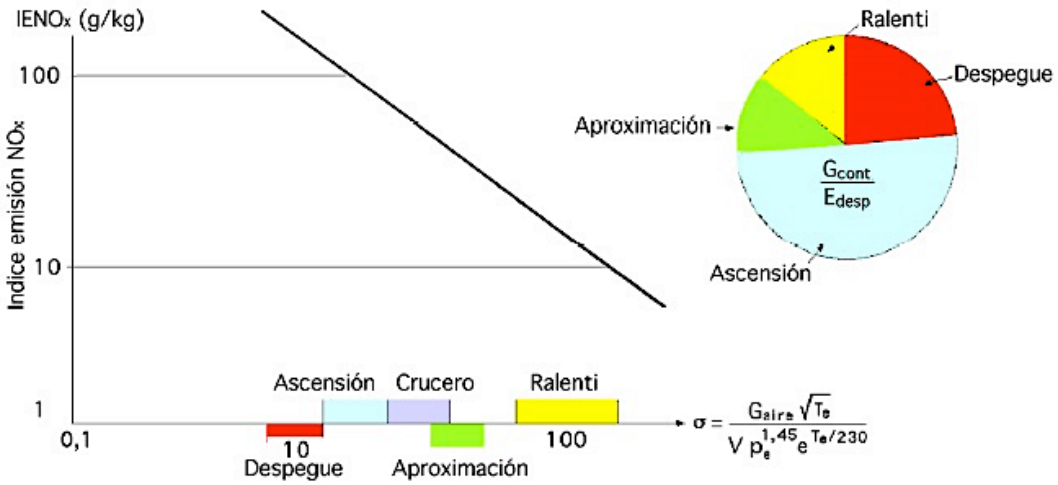
Fuente: Fernández, 2009.

Al visualizar ambos gráficos, se determina que la mayor emisión de HC y CO se dan en la fase de ralentí[6]. Es importante mencionar que no se tomaron en cuenta los parámetros de carga aerodinámica, características de carburación, reparto de aire dentro de la turbina y enfriamiento por aire.

Óxidos de nitrógeno (NO_x): Cuando un motor turborreactor se encuentra en funcionamiento, las reacciones de oxidación son más lentas que las de combustión del carburante, por lo tanto, las concentraciones resultantes no se encuentran en equilibrio químico proporcionalmente al tiempo de permanencia. La formación de estos gases se da específicamente en las zonas de alta temperatura.

[6] Número de revoluciones por minuto a las que debe funcionar un motor de explosión cuando no está acelerado.

Gráfico 3: Influencia de la presión en Pe Te, Gaire y Vc.c de la cámara de combustión sobre el índice de emisión del NO_X.

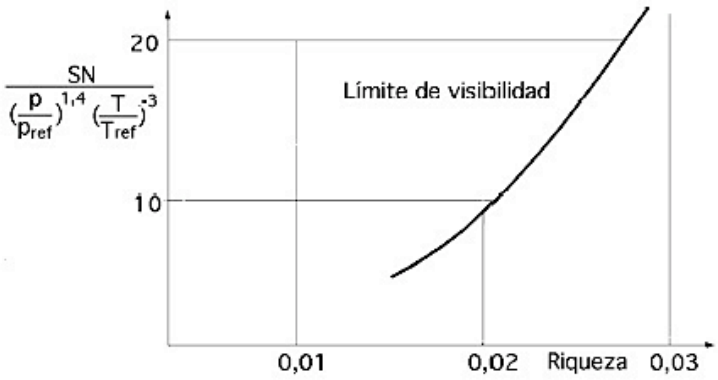


Fuente: Fernández, 2009.

Se logra observar que los gases de NO_X se producen en condiciones de gran carga. En el despegue y ascenso se emiten aproximadamente ¾ de la masa total de NO_X. Dada la complejidad del tubo de combustión, las concentraciones y temperaturas locales de la mezcla que se realiza en la zona primaria son las que controlan los procesos químicos. Si se mejora la mezcla o se realiza una premezcla, se pueden reducir los niveles de NO_X emitidos de manera significativa.

Humos y Material Particulado (PM): Los humos no quemados son producidos bajo condiciones de alta presión, en zonas de la cámara donde la concentración es elevada (Zona Primaria).

Gráfico 4: Influencia de las condiciones de funcionamiento de la cámara de combustión sobre la emisión de humos**.**



Fuente: Fernández, 2009.

El nivel de humos emitidos por un turborreactor aumenta con la presión y con la riqueza de funcionamiento de la cámara de combustión y disminuye con la temperatura en la zona de dilución; zona donde hay aire terciario fresco y más frio.

2.5 Material contaminante expulsado por los motores Turbofan:

La OACI decidió en el año 2013 realizar un inventario de motores Turbofan que comúnmente son utilizados por los explotadores comerciales, de modo de determinar cuál es la cantidad promedio emitida por cada uno de estos motores según su modelo y fabricante, en conjunto con su montaje en distintos tipos de fuselajes. Este inventario considera un total de 487 motores Turbofan activos en el mundo que representan aproximadamente el 75% del total de motores activos.

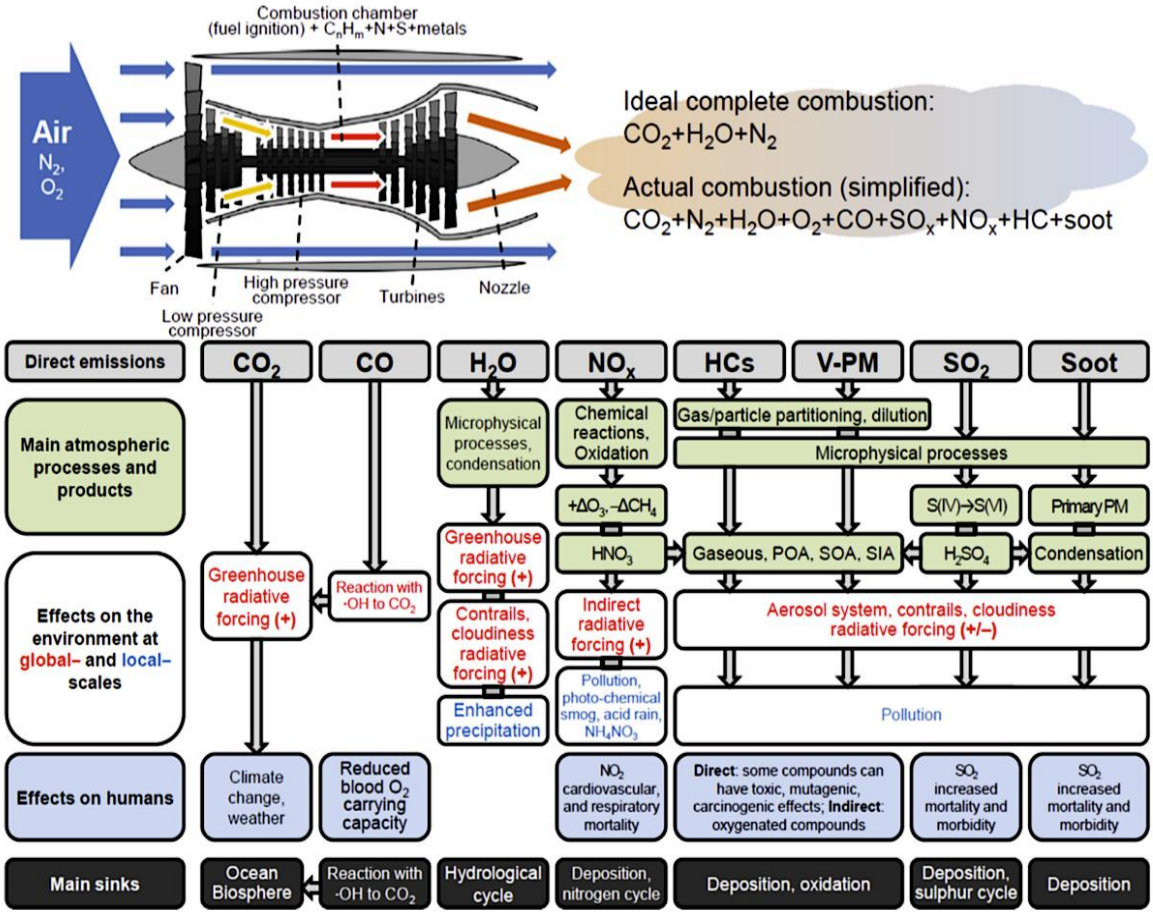
Este inventario (Tabla 4) tiene como principal objetivo el informar y establecer una línea de referencia para estudios más complejos de medición de emisiones de gases de acuerdo al tipo de aeronave y fabricante de motores.

Tabla 4: Familia de motores montado en los aviones más populares. Esta lista representa un aproximado del 75% del total de motores Turbofan en uso. Los datos son promedios (con desviación estándar ±) para el consumo de combustible y emisiones por Ciclo LTO reportados por familia de motores.

Manufacturer	Engine Family	Main aircraft and number of engines	Fuel and Emissions per LTO cycle (Kg)			
			Fuel	CO	NOx	HC
General Electric	CF6 series	A300 (2); A310(2); A330(2); B747(4); B767(2); MD DC - 10 (3); MD 11 (3)	811 ± 76	11 ± 5	12 ± 2	2,3 ± 2,2
	GE90 series	B777 (2)	1159 ± 141	14 ± 7	25 ± 5	1,1 ± 0,8
	Genx series	B747 (4); B787 (2); replacing CF6 series	827 ± 74	7 ± 1	10 ± 3	0,2 ± 0,1
CMF International	CFM56 series	A318 (2); A319 (2); A320 (2); A321 (2); A340 (4); B737 (2); MD DC - 8 (4)	419 ± 46	6 ± 2	5 ± 1	0,6 ± 0,4
Pratt & Whitney	JT8D series	B707 (4); B727 (3); B737 (2); MD DC-9 (2); MD80 (2)	477 ± 35	5 ± 2	4 ± 1	1 ± 0,9
	JT9D series	A300 (2); A310 (2); B747 (4); B767 (2); MD DC-10 (3)	842 ± 45	19 ± 10	13 ± 1	7 ± 4,8
	PW 4000 series	A300 (2); A310 (2); B747 (4); B767 (2); B777 (2); MD DC-11 (3)	966 ± 150	8 ± 3	17 ± 6	1 ± 0,8
Rolls - Royce	RB211 series	B747 (4); B757(2); B767 (2); L1011 (3); Tu-204 (2)	852 ± 128	15 ± 15	15 ± 5	7,1 ± 11,1
	Trent series	A330 (2); A340 (4); A380 (4); B777 (2); B767 (2)	817 ± 370	5 ± 2	19 ± 4	0,2 ± 0,3
BMW Rolls - Royce	BR700 series	B717 (2)	332 ± 32	4 ± 1	4 ± 1	0,1 ± 0,1
International Aero Engines	V2500 series	A319 (2); A320 (2); A321 (2); MD-90 (2)	452 ± 35	3 ± 0.4	6 ± 1	0,04 ± 0,01
Aviadvigatel Solorvëv	D30 series	Tu - 154 (3)	622 ± 110	21 ± 6	5 ± 1	5.5 ± 2.4
B (Boeing); A (Airbus); MD (McDonnell Douglas); L (Lockheed); Tu (Tupolev)						

Fuente: EASA, 2013 (ICAO Databank, Agosto 2013).

Figura 5: Diagrama simplificado de un motor Turbofan que muestra los productos ideales y actuales de la combustión de un motor de una aeronave, relación de procesos atmosféricos con sus productos, efectos medio ambientales, efectos en la salud y lugares de deposición de los gases contaminantes.



Fuente: M. Masiol & R.M. Harrison et al., 2014.

En la Figura 5 es posible entender el funcionamiento de un motor Turbofan de manera más gráfica, visualizando el proceso de inyección de aire en la parte frontal del motor, los principales componentes, los flujos de aire primario/secundario y los gases emanados por el mismo. Asimismo se explica el efecto e impacto de los gases contaminantes en los procesos atmosféricos, en el medio ambiente, en la salud humana y los principales lugares de deposición de estos elementos contaminantes.

Con estos datos en consideración es posible determinar el comportamiento de estos gases en el funcionamiento de un motor de turbina y encontrar la fase crítica de emisión.

Se logra determinar de los estudios de P. Fernández, OACI y M. Masiol & R.M. Harrison que las fases más críticas de emisión de contaminantes corresponden a aquellas que requieren mayor esfuerzo de los motores y aquellas que se mantienen activas por largos períodos de tiempo, es decir, las fases de despegue, ascenso y ralentí respectivamente.

Con respecto a la naturaleza de los gases expulsados, la mayoría corresponde a CO, HC, NO_X, CO_2 y Material Particulado. El CO, NO_X y HC se dan en mayor concentración en las fases de despegue y ascenso, mientras que el CO_2, y las PM se dan en las fases de ralentí. Las fases comunes de ralentí son la puesta en marcha, taxeo y estacionamiento de la aeronave.

2.6 Gases Contaminantes de la Industria Aeronáutica

Los principales gases contaminantes o gases del tipo invernadero que generan los motores turborreactores son: (Wahner et al., 1995; Lewis et al,.1999; Anderson et al.,2006; Lee et al.,2010)

- **Producto de combustión completa**: Dióxido de carbono (CO_2), Material particulado (PM_{10}, $PM_{2,5}$)[7], Vapor de Agua (H_2O), Sulfatos de Oxido (SO_X)

- **Contaminantes que no son quemados**: Monóxido de carbono (CO), Humos, Nitritos de óxido (NO_x), e Hidrocarburos no quemados (HC).

La emisión de los motores de las aeronaves es considerada como una de las principales fuentes contaminantes en los aeropuertos. Con respecto a esto, se ha reportado que la cantidad de gases contaminantes emitidos está directamente relacionada con la configuración de potencia que utilizan los motores (e.g., Anderson et al., 2005; Wey et al., 2006). En el proceso de oxidación del nitrógeno atmosférico a altas temperaturas en el combustor de un motor Turbojet se fomenta la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x). Además el combustible utilizado en la industria contiene elementos metálicos (Fe, Cu, Zn) que también lideran la formación de otros sub-productos no deseados de la combustión, como los Sulfatos de Oxido (SO_X), hidrocarburos no quemados y material particulado. Estudios consideran que también se debe tomar en cuenta que los gases de escape pueden contener ciertas especies provenientes de la combustión y de la salida de aceites lubricantes. (Dakhel et al., 2007; Timko et al., 2010b; Yu et al., 2010 y 2012; Kinsey et.al 2011).

[7] $PM_{10} y\ PM_{2,5}$: Son partículas de diámetro menor o igual a 10 micrones (un micrón es la milésima parte de un milímetro). Por su tamaño, el MP10 es capaz de ingresar al sistema respiratorio del ser humano. Mientras menor sea el diámetro de estas partículas, mayor será el potencial daño en la salud.
Podemos subdividir al Material Particulado en:
- Fracción gruesa: de 2,5 a 10 micrones. Puede llegar hasta los pulmones.
- Fracción fina: menor a 2,5 micrones. Puede ingresar hasta los alvéolos y luego a la sangre.

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente de Chile: mma.gob.cl. Última revisión 9 de Octubre 2016

Del estudio de Lee del año 2009 en conjunto con referencias del estudio de Roy M Harrison del año 2014 (Lee et al., 2009, M. Masiol & R.M. Harrison et al., 2014) se puede extraer de una manera más realista y simplificada el proceso de combustión originado en los motores de las aeronaves comerciales:

$$C_nH_m + N_2 + O_2 + S \rightarrow CO_2 + N_2 + H_2O + O_2 + CO + SO_X + NO_X + HC + PM$$

El porcentaje de concentración de estos gases contaminantes generalmente es el mismo según el *Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)* que corresponde al 99,5 – 99,9% de contenido molar típico de un motor comercial que consiste de N_2, O_2, CO_2 y H_2O, pero otros estudios reportan de manera mas detallada los gases generados producto de la combustión de un motor Turbo Jet (Lewis et al., 1999). Los productos de la combustión de los motores están principalmente formados por CO_2(72%), H_2O (27,6%), mientras que el producto residual sólo corresponde a menos del 1%.

Se estima que al menos el 90% de las emisiones de las aeronaves, a excepción de hidrocarburos y CO (70%), son producidos mientras se vuela en altitudes de crucero, mientras que el resto es emitido en el despegue, aterrizaje y operaciones en tierra.

Las concentraciones de los gases contaminantes dependen de factores como la tecnología ocupada en la turbina y el funcionamiento de la cámara de combustión. De estos gases generados, los más perjudiciales son el CO_2 y los NO_x que son precursores del calentamiento global, sobre todo el CO_2 por su alta concentración en el aire.

La OACI establece regulaciones de calidad de aire locales, es decir, las regulaciones de gases dependen propiamente de las medidas ambientales que toma cada país, por ejemplo, Estados Unidos pone especial énfasis en las emisiones de NO_2, NO_x y O_3, mientras que la Unión Europea busca reducir los niveles de CO_2. La habilidad para conformar estos parámetros y regulaciones dependen de variables locales como la meteorología, la concentración de gases, la densidad de la población, el tipo y tamaño de la industria aeronáutica y la clase de tecnología utilizada para el control de emisiones de la localidad (Referirse a Anexo 2).

Cabe mencionar que hay localidades que no tienen regulaciones de calidad de aire y que son justamente estas localidades las que necesitan mayor atención y medidas correctivas debido a su gran rapidez de desarrollo y crecimiento. Una eventual localidad son los países de Sudamérica con gran industria petrolera e industrial.

2.6.1 Gases producto de combustión completa

Vapor de agua (H_2O): El agua es el producto clave de cada combustión de hidrocarburos y los motores de las aeronaves liberan agua en forma de vapor. El vapor de agua es un gas de efecto invernadero que a incrementos de concentración en la estratósfera y tropósfera tienden a aumentar la temperatura de la superficie de la Tierra. El vapor de agua liberado o absorbido vía calor latente durante la condensación y evaporación también juega un rol fundamental en los procesos globales de la circulación del aire en la atmósfera terrestre (Shneider et al., 2010 & Solomon et al., 2010). Además el efecto que genera el vapor de agua en la formación de nubes tipo cirrus, y las generadas con el choque de las partículas de agua con las aeronaves en la alta tropósfera pueden ser relevantes indirectamente en el aumento del forzamiento radiativo[8] que consecuentemente incrementa positivamente los efectos del calentamiento global (Lee et al., 2009). Sin embargo, las emisiones de agua producidas por la flota mundial de aeronaves en la tropósfera son pequeñas en comparación con las originadas naturalmente en el ciclo hidrológico y estos no son considerados relevantes en la contaminación del aire local y en la salud humana. (IPCC, 1999)

En el informe anual global de forzamiento radiativo a la actualidad se ha determinado que las emisiones de vapor de agua generadas por la aviación son de 0,9 (rango 0,3 – 1,4) mW m^{-2}. El incremento del vapor de agua en la tropósfera baja puede tener efectos secundarios en la precipitación, niebla, visibilidad y otros procesos micro físicos[9].

[8] Forzamiento Radiativo: Corresponde al cambio del flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra medido en el borde superior de la Tropósfera, este genera cambios internos en la composición de la atmósfera, o cambios en el aporte externo de energía solar. El forzamiento radiativo positivo calienta la superficie de la Tierra, mientras que el negativo lo enfría. Fuente: Greenfacts.org

[9] WILCOX, L.J., SHINE, K.P. y HOSKINS, B.J., Radiative forcing due to aviation water vapour emissions. *Atmospheric Environment* (2012).

Dióxido de carbono (CO_2): El dióxido de carbono es el gas reconocido como el principal precursor del calentamiento global, su principal rol en la tierra es regular la temperatura de los frentes climáticos, su comportamiento en la atmósfera es simple, muy estudiado y conocido. Su principal origen deriva de la combustión de combustibles fósiles, incluyendo algunos pequeños contribuyentes como la producción de cemento y combustión a gas. Estudios recientes determinan que las emisiones de CO_2 provenientes de los combustibles fósiles y de la producción de cemento han aumentado en un 41% desde el año 1990 hasta el año 2000, posteriormente, desde el año 2000 al 2010 se ha registrado un aumento del 5.9% principalmente emitidos por países con economías emergentes[10].

El dióxido de carbono es el gas de carbono expulsado más abundante en los motores de las aeronaves reportadas (IPCC 1999; Anderson et al., 2006) y corresponde al 72% del total de los productos generados en la combustión completa. Comúnmente, los índices de motor de aviones modernos reportan concentraciones de 3160 ± 60 g kg $Fuel^{-1}$ para la combustión completa y las emisiones de CO_2 dependen de una simple función relacionada con el consumo de combustible (Owen et al., 2010). Sin embargo algunos estudios determinan que el CO_2 mostrado en los índices de motor tiene una leve disminución a baja potencia, principalmente causado por la combustión incompleta que puede aumentar la cantidad relativa de monóxido de carbono e hidrocarburos en el escape (Wey et al., 2006; Settler et al., 2011). El rol de la aviación en el aumento de las emisiones de CO_2 a nivel global no puede ser pasado por alto, gracias a los inventarios de AERO2K es posible estimar las emisiones globales de CO_2 de la aviación civil y militar, para el año 2002 se registra una emisión de 553 Tg CO_2 de la aviación civil y 61 Tg CO_2 de la aviación militar, pero sin duda el registro que más ha generado preocupación ha sido el del año 2005, donde se registró el dato más alto de emisiones de CO_2 con un total de 733 Tg y^{-1}(Lee et al., 2009), que corresponde aproximadamente al 3% del total de emisiones provenientes de combustibles fósiles. (Howitt et al., 2011). Al igual que el reporte del vapor de agua se estimó el valor de CO_2 producido por una aeronave bajo los 1000 metros y asumiendo un valor constante

[10] PETERS, G.P., MARLAND, G., LE QUÉRÉ, C., BODEN, T., CANADELL, J.G. y RAUPACH, M.R., Rapid growth in CO2 emissions after the 2008-2009 global financial crisis (2012).

de consumo igual a 3160 kg $Fuel^{-1}$ y considerando la literatura durante los ciclos LTO en el año 2005 (M. Masiol & R.M. Harrison et al., 2014). Los resultados muestran que del total global de emisiones de CO_2 corresponde a 44 Tg, donde el 22,23% corresponde al porcentaje emitido a lo largo de Europa.

Sulfatos de Oxido (SO_X): Un tipo de este compuesto es el dióxido de Sulfuro (SO_2), el cual es emitido hacia la atmosfera de dos formas distintas:

1. De forma natural; debido a las erupciones volcánicas, incendios forestales y áreas altamente vegetativas
2. De manera antropogénica; del proceso de transformación del crudo y el carbón, combustión de combustibles fósiles, derretido de metales y varios otros procesos industriales (e.g., Seinfeld and Pandis, 2006; Smith et al., 2011)

Además, su exposición prolongada a los seres vivos genera gran cantidad de incidencias en la salud principalmente asociado a cardiopatías isquémicas[11].(Sunyer et al.,2003b)

La oxidación del SO_2 es reconocida como el mayor canal de formación del ácido sulfúrico atmosférico, y el Trióxido de Sulfuro (SO_3) es un importante intermediario en los procesos de oxidación (Vahedpour et al., 2011). Por lo tanto, el SO_2 tiene un efecto indirecto en la deposición del ácido y un importante rol en sistema aerosol actuando como un precursor de sulfatos. El sulfato de aerosol es conocido por modificar tanto directa como indirectamente el forzamiento radiativo y también por influir de manera indirecta/directa en el cambio climático.

Por otro lado, el dióxido de sulfuro es impresionantemente predominante debido a las distintas especies de sulfato existentes en las emisiones de un motor, estas especies son principalmente originadas por la oxidación del sulfuro añadido en el combustible del motor (Anderson et al., 2005; Lee et al., 2002). Por lo tanto, las emisiones de SO_2

[11] **Cardiopatía Isquémica**: La cardiopatía isquémica es la enfermedad ocasionada por la arteriosclerosis de las arterias coronarias, es decir, las encargadas de proporcionar sangre al músculo cardiaco (miocardio). La arteriosclerosis coronaria es un proceso lento de formación de colágeno y acumulación de lípidos (grasas) y células inflamatorias (linfocitos). Estos tres procesos provocan el estrechamiento (estenosis) de las arterias coronarias.Fuente:http://www.fundaciondelcorazon.com/informacion-para-pacientes/enfermedades-cardiovasculares/cardiopatia-isquemica.html. [Última revisión: Septiembre 2016].

pueden variar en función del contenido de sulfuro propio del combustible. En el pasado se llevaron a cabo algunos estudios que analizaron y modelaron las emisiones de sulfuro de un motor de aeronaves para lograr determinar su rol de importancia en la formación de nubes de humo visibles tras el paso de una aeronave por la tropósfera (e.g., Busen and Schumann, 1995; Schumann et al., 1996; Brown et al., 1996b, 1997; Arnold et al., 1998a).

Con los estudios anteriores, se logra determinar un promedio de emisiones correspondiente a 0,8 – 1,3 g de SO_X por Kg de combustible quemado en combustión completa (e.g., Lewis et al 1999; Kim et al., 2007; Lee et al., 2010; Presto et al., 2011), sin embargo, las medidas en altitudes de vuelos han demostrado que el dióxido de sulfuro (SO_2) varía con el promedio de sulfuro añadido en el combustible. Los estudios también son determinantes para reportar que no existe dependencia entre las emisiones de Sulfatos de Oxido y los regímenes de potencia que se aplican en los motores.

La importancia de las emisiones de SO_2 a escala local en las inmediaciones de los aeropuertos fue destacada por el investigador Yu Cheung en el año 2004[12], quién logró determinar que el SO_2 es un buen rastreador de emisiones de gases contaminantes de las aeronaves en los aeropuertos de Los Angeles y Hong Kong. Sin embargo, a escala global las emisiones de SO_X generadas por la actividad aeronáutica es considerada como secundaria con respecto a otras fuentes emisoras de mayor escala. En el estudio de Kjellström et al (1999)[13], se utiliza un modelo general de circulación del aire que incluye el ciclo del sulfuro para investigar el impacto de las emisiones de SO_X provenientes de la industria aeronáutica del mundo, y se ha determinado que la aviación aporta en un 1% del total de la masa de sulfato concentrada en la zona norte del mundo (40° N), lugar en el cual las emisiones de la industria aeronáutica son mayores.

[12] YU, K.N., CHEUNG, Y.P., CHEUNG, T. y HENRY, R.C., Identifying the impact of large urban airports on local air quality by nonparametric regression (2004).
[13] KJELLSTRÖM, E., FEICHTER, J., SAUSEN, R. y HEIN, R., The contribution of aircraft emissions to the atmospheric sulfur budget (1999).

Material Particulado (PM): *Particulate matter* (PM) por sus siglas en inglés, es emitido por una gran variedad de orígenes naturales o antropogénicas. Este último posee una gran variedad de composiciones químicas y propiedades físicas. En la actualidad se ha investigado la composición del material particulado de una gran cantidad de fuentes originadoras del contaminante, sin embargo, existen muy pocos estudios realizados sobre la emisión de este contaminante por los motores de las aeronaves. Esto se debe principalmente a que la OACI aún no ha definido la emisión estándar de PM en los ciclos LTO. Como consecuencia, se ha despertado el interés de configurar una certificación limitante para este contaminante que busca en un futuro ser considerado en la regulación de la calidad del aire y los impactos del contaminante en el cambio climático (Kinsey 2009). En este mismo contexto, existen algunos programas que buscan describir las emisiones de PM de los motores de las aeronaves, un ejemplo claro está siendo liderado por el comité E-31 de la *Society of Automotive Engineers (SAE)* que se encuentra desarrollando un modelo de testeo estándar que permita certificar los niveles de material particulado emitido por los motores.

A pesar del número de estudios sobre las emisiones de PM en los motores de aeronaves publicados recientemente, desde el punto de vista físico y químico, la información entregada sigue siendo inadecuada y deja muchas interrogantes sin resolver. Esta temática está generando bastantes problemas debido a que varios estudios epidemiológicos han comprobado la fuerte correlación existente entre la exposición al material particulado y la salud humana. La inhalación de PM puede generar el aumento proporcional de enfermedades cardiorrespiratorias que están altamente relacionadas con la reducción de la esperanza de vida de los seres vivos (Pope et al., 2009; Hoek et al., 2010; Sapkota et al., 2012; Raaschou-Nielsen et al.,2013).

El material particulado generado por los motores de aeronaves puede ser clasificado en dos fracciones; PM volátil y PM no volátil, mientras que la combinación de ambos es comúnmente referida como el total de PM emitido. El PM no volátil es directamente emitido por los motores y está compuesto de elementos del grafito y carbón con algunos restos metálicos que son principalmente estables a altas presiones y temperaturas normalmente alcanzadas en la fase de escape del motor. Mientras que el

PM volátil es formado a través del proceso de particionado de gas a partícula y de los procesos de conversión del sulfuro y otros gases orgánicos.

Las emisiones de PM generalmente varían en un rango aproximado de 10 a 550 mg PM kg $Fuel^{-1}$(Kinsey, 2009)[14]. Además, la curva de emisiones de PM versus empuje tiene forma de "U", mostrando elevadas emisiones a bajas configuraciones de empuje y va decreciendo a medida que se aumenta el empuje y vuelve a aumentar a altas o full potencia de los motores (Whitefield et al., 2008; Kinsey, 2009; Kinsey et al., 2010, 2011). Sin embargo, hay algunas desviaciones en el comportamiento del material particulado.

Los índices de masa de emisiones en diferentes empujes han mostrado que este valor depende de muchos factores, algunos de ellos son;

a) Familia de motores.
b) Tecnología.
c) Sulfuro contenido en el combustible.
d) Rangos de operación.
e) Condiciones calientes o frías del motor.
f) Condiciones medioambientales.

También las emisiones de PM en tiempo real han determinado peaks significativos durante los cambios de configuración de potencia (Agrawal et al., 2008)[15].

Un estudio de emisiones de material particulado realizado en aeronaves de Delta Airlines en Atlanta Hartsfield elaborado por Prem Lobo en el año 2015[16] y otros investigadores tiene como objetivo, identificar el comportamiento del material expulsado en la tobera de escape de la flota de aeronaves de las aerolínea Delta Airlines, dentro de las aeronaves y motores estudiados se encuentran;

[14] KINSEY, John S. *Characterization of emissions from commercial aircraft engines during the Aircraft Particle Emissions experiment (APEX) 1 to 3* (2009).
[15] AGRAWAL, Harshit, SAWANT, Aniket A., JANSEN, Karel, WAYNE MILLER, J. and COCKER III, David R., *Characterization of chemical and particulate emissions from aircraft engines* (2008).
[16] LOBO, *Prem, et al. PM emissions measurements of in-service commercial aircraft engines during the Delta-Atlanta Hartsfield Study* (2015).

a) MD88´s con motores JT8D-219.
b) B757 con motores PW-2037.
c) B767 con motores CF6-80.

Para este estudio se puso una sonda en forma de rastrillo a un metro de distancia desde la tobera de escape. Las sondas fueron enfriadas por agua para protegerlas de la degradación termal y además fueron modificadas para inhibir la conversión de agua a partícula.

En el caso de los Motores CF6-80 y PW-2037 no se realizó el test al 100% de potencia debido a temas de seguridad de la sonda (desprendimiento). Mientras que los motores JT8D-219 fueron estudiados en todos los rangos de potencia posibles en un ciclo LTO.

Se concluyó a partir de este estudio que en los motores CF6-80 Y PW-2037 se observan altas concentraciones de PM a ralentí (4% a 7% de la potencia de la potencia total) y las más bajas se registran a 15% - 30% de la potencia total y luego las concentraciones vuelven a aumentar sustancialmente con el aumento de la potencia. Estos resultados confirman las conclusiones de otros estudios realizados anteriormente, en los que los rangos de emisiones de PM son similares (Hu et al., 2009; Mazaheri et al., 2009; Zhu et al., 2011; Klapmeyer and Marr, 2012; Lobo et al., 2012b).

Este estudio fue determinante para confirmar que las emisiones específicas de las aeronaves varían con el tipo de motor y tecnología, siendo los motores más antiguos los que arrojan valores mayores de emisión de PM´s[17].

[17] MASIOL, Mauro and HARRISON, Roy M., Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. *Atmospheric Environment* (2014).

2.6.2 Gases producto de combustión incompleta

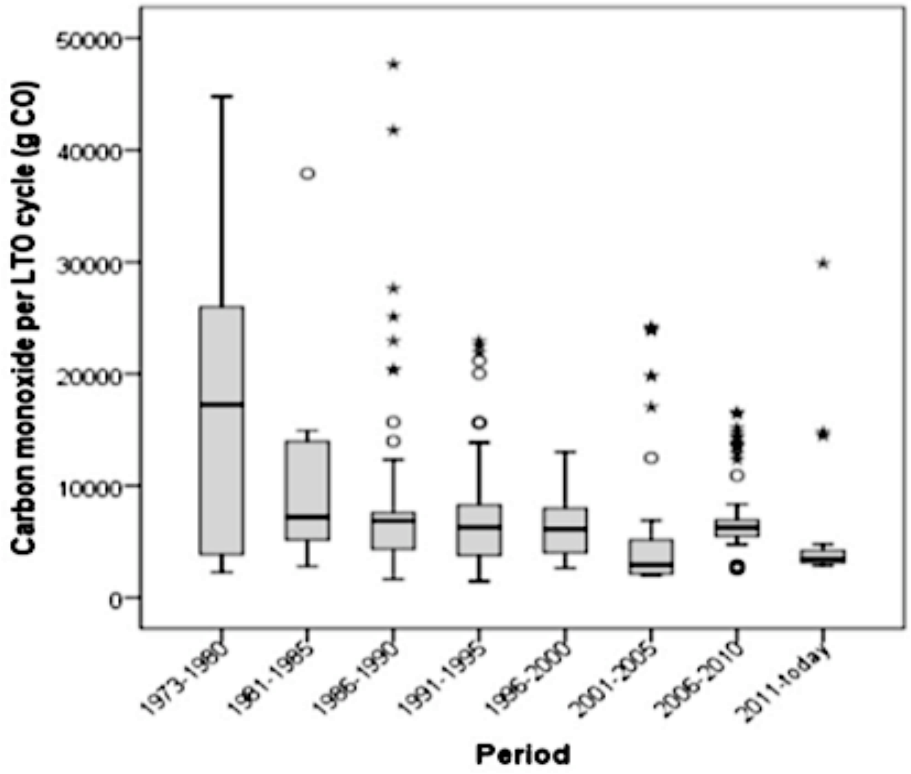
Monóxido de carbono (CO): Este compuesto es principalmente producido en la atmósfera por la oxidación fotoquímica del gas metano y otros gases derivados de los hidrocarburos que provienen directamente de las emisiones generadas por procesos de combustión antropogénica, como por ejemplo los emitidos por los vehículos, sistemas de calefacción doméstica, emisiones industriales y quema de biomasa. Su período de vida útil en la tropósfera varía desde los 30 a los 90 días, generalmente es transformado mediante el proceso de oxidación en carbonilos radicales (Seinfeild and Pandis, 2006)[18].

Este gas es considerado como el más perjudicial para la salud humana por la habilidad de formar una fuerte unión con la hemoglobina. Esta unión genera carboxihemoglobina que puede generar efectos adversos sobre la salud humana debido a la reducción de la capacidad de transportar oxígeno en la sangre. Su alta concentración en la sangre puede provocar asfixia, disminución de performance neuropsicológica, riesgo de isquemia al miocardio y disturbios rítmicos en los latidos del corazón a personas con problemas cardiovasculares (Samoli et al., 2007; Bell et al., 2009).

En la industria aeronáutica, el monóxido de carbono es generalmente emitido por los motores de las aeronaves a través del resultado de la combustión incompleta del combustible tipo Jet. Las emisiones de CO están reguladas y estandarizadas por la OACI, a la que cada empresa manufacturera de motores debe proveer los índices de emisiones de este gas durante un Ciclo LTO (ICAO, 2008). En los últimos 40 años, la mejora de la tecnología de los motores ha permitido reducir significativamente las emisiones de CO en un Ciclo LTO. En el Gráfico 5 se puede visualizar este cambio.

[18] SEINFELD, John H.; PANDIS, Spyros N.; NOONE, Kevin. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change* (1998).

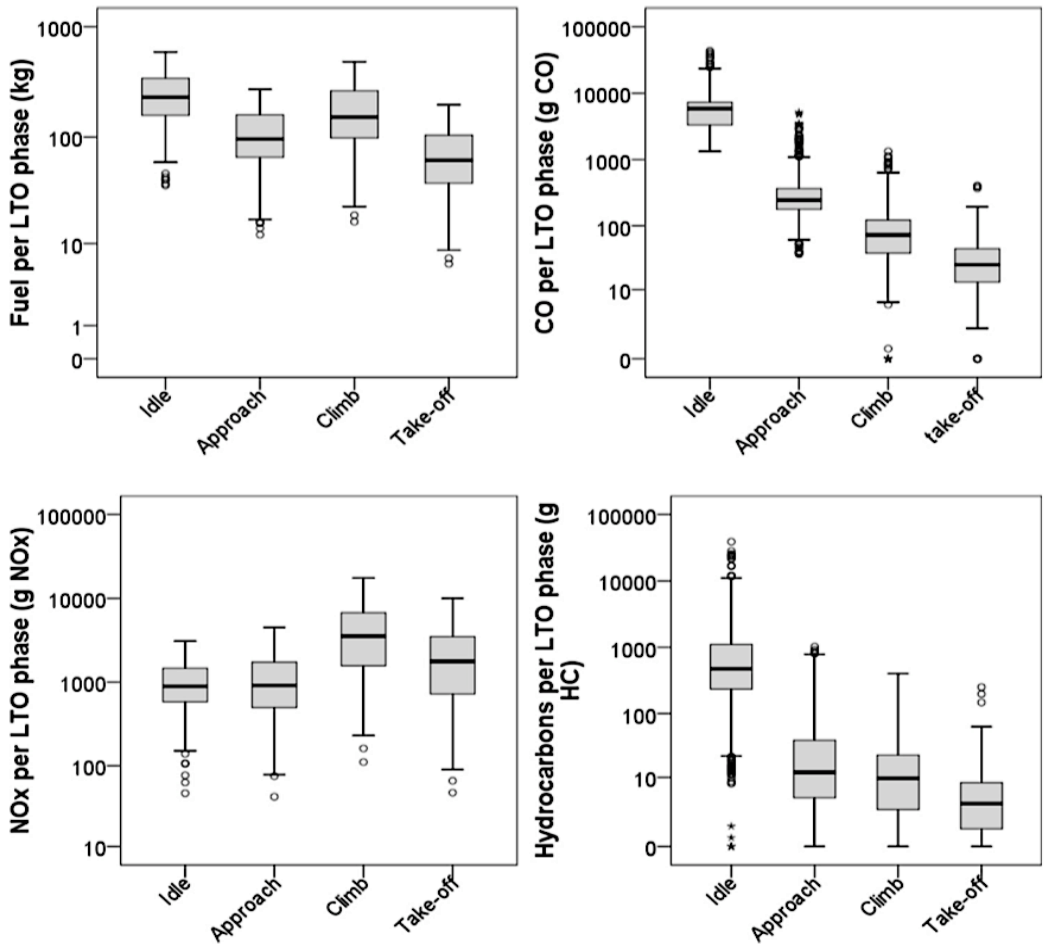
Gráfico 5: Variación de la concentración de CO emitido por los motores de las aeronaves desde el año 1970 hasta el año 2013.



Fuente: OACI Databank de Abril 2013 (EASA, 2013).

Las emisiones de monóxido de carbono son mayores a bajas configuraciones de empuje cuando las temperaturas y presión en el combustor son bajas, por lo tanto la combustión es menos eficiente (Sutkus et al., 2001). Debido a la predominancia de este gas en configuraciones de bajo empuje, las emisiones de CO son de gran importancia en la calidad de aire en las vecindades de los aeropuertos debido a que las fases de ralentí y taxeo de las aeronaves se realizan a configuraciones de bajo empuje, estas etapas son las que más tiempo utiliza la aeronave mientras esta en un aeropuerto. (Referirse al Anexo 1 para lectura de diagramas de caja).

Gráfico 6: Muestra de emisiones de gases contaminantes durante las cuatro fases de un ciclo LTO. Todos los datos fueron calculados desde los parámetros de EI´s y consumo de combustible desde el Databank de la OACI.



Fuente: OACI Databank de Abril 2013 (EASA, 2013).

El Gráfico 6 reporta el total de emisiones de CO de los motores en funcionamiento durante las cuatro etapas de un ciclo LTO, aquí queda evidenciado que durante la etapa de ralentí se encuentra un valor mayor a dos órdenes de magnitud que en las etapas de ascenso y despegue de un ciclo LTO (Referirse al Anexo 1 para lectura de diagramas de caja).

Dicho lo anterior, existen varias reacciones químicas en la tropósfera que involucran la participación de hidroxilos radicales, O_2 y nitritos de oxido que generan el dióxido de carbono y el ozono (O_3) (M. Masiol & R.M. Harrison et al., 2014).

Algunos estudios han revelado algunas diferencias directas bastante considerables entre la información de la OACI con respecto a las mediciones realizadas durante las operaciones de ralentí y taxeo en los aeropuertos. Estos resultados son generalmente más altos que aquéllos certificados por OACI. Un ejemplo claro es el estudio de Heland and Shäfer (1998)[19] que logró reportar una concentración de 51,8 ± 4,6 kg $Fuel^{-1}$ en ralentí en un motor CFM56-3, este resultado corresponde a un rango entre 27% a 48% mayor que la información entregada por la OACI. Herndon et al. (2008)[20] reportaron que la contaminación observada en operaciones en tierra es mayor (superiores que el 100%) que la precedida en la certificación de los motores para la condición de potencia de un 7%. Estos estudios parecen confirmar que las operaciones normales de taxeo y ralentí en los aeropuertos ocurren a condiciones de potencia más bajas que las estandarizadas por la OACI, como resultado se incrementan los valores de Monóxido de Carbono emitidos, sobrepasando de manera considerable los valores certificados (e.g., Shäfer et al. 2003).

Otro estudio en el Aeropuerto de Zurich (e.g., Schürman et al., 2007) ha demostrado que las concentraciones de CO en las vecindades terminales del aeropuerto son altamente dependientes al movimiento de las aeronaves en tierra.

Los estudios mencionados anteriormente son relevantes en la determinación de emisiones de Monóxido de Carbono en las vecindades del aeropuerto; a partir de ellos es posible entregar conclusiones para la comunidad aeronáutica, dejando abierta la discusión sobre los métodos que se necesitan para determinar el impacto de estos gases contaminantes en los aeropuertos del mundo.

[19] HELAND, J. y SCHÄFER, K., *Determination of major combustion products in aircraft exhausts by FTIR emission spectroscopy* (1998).
[20] HERNDON, S.C., et al., *Commercial Aircraft Engine Emissions Characterization of in-Use Aircraft at Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport* (2008).

Óxidos de Nitrógeno (NO_x) y Nitrógeno Acido (HNO_X): Los óxidos de nitrógeno en medios ambientes urbanos son principalmente emitidos por la combustión de combustibles fósiles en forma de Monóxido de Nitrógeno (NO). Este último cumple un importante rol en la química atmosférica, actuando rápidamente con el ozono ambiental (O_3), formando Dióxido de Nitrógeno (NO_2) en un corto intervalo de tiempo. Otras fuentes emisoras de Nitritos de Oxido (NO_x) en la atmosfera son la quema indiscriminada de la biomasa, emisiones agrícolas, iluminaria, transporte estratosférico y del proceso de oxidación del amonio (IPCC, 1999).

Con respecto al NO_2, este un gas respiratorio irritante que tiene efectos extensamente estudiados en la salud humana (Samoli et al., 2006; Weinmayr et al., 2010; Chiusolo et al., 2011), aquellos indican la relación directa que existe con las enfermedades cardiovasculares y respiratorias, estas enfermedades pueden hasta incluso provocar la muerte de un ser vivo.

Además los Óxidos de Nitrógeno son producidos en zonas de alta temperatura de un motor a reacción (Combustor), derivados principalmente por la oxidación termal[21] del Dinitrógeno (N_2) atmosférico, por lo tanto, la formación de NO_x es sensitiva a la presión presente en el combustor, flujo de derivación y geometría (Sutkus et al., 2001). Existe NO_x adicional que puede derivar de la combustión de nitrógeno añadido en el combustible, generalmente este no es medido pero puede variar en un rango desde cero a 20 partes por millón (ppm) (Chevron Coporation, 2006). Del estudio de Gardner et al. (1997)[22] se estima que el 93% de NO_x emitido por las aeronaves, se concentra en el hemisferio norte y aproximadamente el 60% de estos a niveles crucero. En el año 2005 se indica que las emisiones de NO_x durante un Ciclo LTO corresponden a 0,23 Tg (Kim et al., 2007) que en porcentaje equivale al 8% de las emisiones globales de NO_x provenientes de la industria aeronáutica.

[21] Oxidación termal: Es el proceso de oxidar materiales combustibles elevando la temperatura del material por encima de su punto de auto-ignición en la presencia de oxígeno, y manteniéndolo a alta temperatura por un tiempo suficiente para completar su combustión a bióxido de carbono y agua. Fuente: EPA. Gov / EPA-452/F-03-039

[22] GARDNER, R. M., et al. The ANCAT/EC global inventory of NOx emissions from aircraft. *Atmospheric Environment* (1997).

La OACI certifica los parámetros de NO_x generados por las aeronaves, pero existe una diferencia en la masa molecular del NO y el NO_2. En la metodología utilizada por la OACI para el cálculo de estos parámetros no se hace ninguna distinción entre ambos y solo se refiere a estos como NO_2 equivalentes a menos que se especifique.

Dada la sensibilidad que presenta este gas contaminante con la presión del combustor, las emisiones de NO_x se incrementan linealmente con el aumento de la potencia de los motores. A pesar de esta fuerte relación existente entre la potencia de los motores y las emisiones de este gas, el total de emisiones de NO_x por cada fase de un Ciclo LTO estandarizado es relativamente constante durante las fases de ralentí, aproximación y despegue (M. Masiol, R.M. Harrison et al., 2014). Refiérase al Gráfico 6.

Carslaw en el año 2008[23] estudió las emisiones individuales de las aeronaves que despegaban desde el aeropuerto de Heathrow y logró descubrir que los motores que reportaban mayores emisiones de NO_x corresponden a aquellos que proporcionalmente resultaban en menores concentraciones de otros gases contaminantes, es decir, motores que disminuían las emisiones de CO_2, CO, HC y ruido. Este resultado hipotético fue vinculado a factores operacionales de las aeronaves, como lo es el peso de la aeronave y configuraciones de potencia, que por lo tanto pueden representar una importante influencia en las concentraciones de NO_x emitidos por los motores.

El estudio además determinó que las concentraciones de NO_x pueden diferir hasta en un 41% en aeronaves que utilizan el mismo fuselaje y tipo de motores, mientras que en las aeronaves que utilizan el mismo tipo de motor en distintos tipos de fuselajes pueden diferir en un 28%.

La proporción entre NO_x y NO_2 en las emisiones de las aeronaves es un método de diagnóstico para conocer la eficiencia del combustor de los motores. Varios estudios determinan que la mayoría de los gases emitidos NO_x a través de un motor de alta razón de flujo de derivación en configuración de ralentí, se emite en forma de NO_2. Por el contrario, el NO es predominante en regímenes de alta potencia en los motores

[23] CARSLAW, David C., et al. Near-field commercial aircraft contribution to nitrogen oxides by engine, aircraft type, and airline by individual plume sampling. *Environmental science & technology* (2008).

(Wormhoudt et al., 2007; Timko et al.,2010b,c ; Wood et al.,2008b; Presto et al., 2011).

Además, estudios alarmantes indican altos niveles de NO_2 encontrados en las vecindades de los aeropuertos de Reino Unido y Zürich. Un ejemplo claro fue constatado el año 2006 la concentración de NO_2 alcanzó la meta anual objetiva (40 $\mu g\, m^{-3}$) propuesta por el departamento de transportes de Reino Unido en el aeropuerto de Heathrow, Londres (UK Department of Transport, 2006), mientras que en Suiza se encontraron algunos excedentes en la medida anual de NO_2 (Valor limite permitido: 30 $\mu g\, m^{-3}$) en las cercanías del aeropuerto de Zürich (Fleuti and Hofmann, 2005). Sin embargo, se debe tener en cuenta que estos aeropuertos están localizados en zonas cercanas a la ciudad, por lo tanto, es difícil saber si estos excedentes corresponden a aquellas concentraciones propias de las operaciones en el aeropuerto debido a la influencia de otras fuentes contaminantes externas.

Todos los análisis realizados en años anteriores (Unique, 2004; Stettler et al., 2011; Fleuti and Hofmann, 2005; Carslaw et al., 2006) convergen en que la mayoría de los óxidos de nitrógeno son expulsados a partir de los ciclos LTO, mientras que las menores contribuciones de este gas es encontrado en las emisiones de maquinaria de plataforma, handling e infraestructura del aeropuerto.

Además de las investigaciones mencionadas, se han realizado estudios más recientes para poder medir el impacto del NO_X en altura. El organismo investigador REACT4C realizó un estudio multimodelo en el año 2014 que permite medir el efecto de las emisiones de NO_x en la atmósfera. Este organismo se encuentra conformado por varios investigadores de distintas universidades europeas, como por ejemplo; Center for International Climate and Environmental Research - Oslo (CICERO) Noruega, University of L' Aquila – Italia, Department of Geosciences (University of Oslo) y Deutches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Oberpfaffenhofen, Alemania (O.A. Søvde et al., 2014).

En este estudio específico se utilizaron cinco distintos modelos de medición que permitieron modelar de la mejor manera posible el comportamiento de una

meteorología real presente los cielos de Europa. A partir de este estudio se lograron aclarar algunas interrogantes sobre el impacto de este gas en alturas crucero.

Grewe et al. (2002)[24] logra determinar que las emisiones de NO_x de las aeronaves, producen Ozono (O_3) eficientemente a menores altitudes, pero en su contraparte el período de permanencia de este gas se reduce considerablemente debido a la acción que genera el HNO_3 en el NO_x presente en ambientes húmedos.

Por otra parte los investigadores buscan mitigar el impacto de O_3 aumentando y disminuyendo 2.000 pies la altitud de crucero de estudio, para lo cual se aplica un método de 100% de perturbaciones que busca realizar una comparación entre los modelos de estudio, aun así estas perturbaciones pudiesen provocar no linealidades.

Algunas de las conclusiones a las cuales se llegan aumentando 2.000 pies a la altitud original, es que las concentraciones de NO_x varían entre el 4% y el 10% durante la temporada de verano, mientras que en invierno las concentraciones varían entre el 10% y el 30%, sugiriendo que las no linealidades juegan un pequeño rol en el verano, pero pueden ser importantes en el invierno.

En el escenario donde se disminuyen 2.000 pies a la altitud de crucero, se reduce el impacto del O_3. En la región de máximo impacto, en el verano se logra visualizar una reducción de 1-2 Ppb[25] cuando es comparado con los modelos del caso base. Esta reducción es menor en invierno debido a la baja actividad fotoquímica.

A través de este estudio anterior se logra concluir y determinar que la perturbación química y sensibilidad del O_3 a la altitud con respecto de las emisiones de NO_x provenientes de las aeronaves son consistentes con estudios realizados en el pasado (Gauss et al., 2006; Köhler et al., 2008; Frömming et al., 2012). De esta forma se deja bastante claro que la formación de ozono es mayor cuando se vuela a mayores altitudes crucero, mientras que se reduce considerablemente cuando se vuela a altitudes menores de crucero. Este fenómeno es producido principalmente por la mayor cantidad de

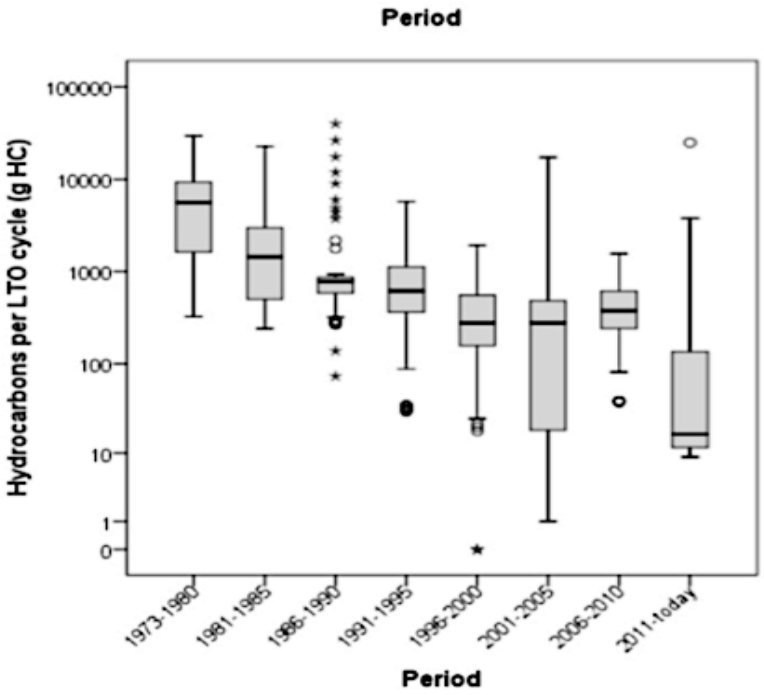
[24] GREWE, V., DAMERIS, M., FICHTER, C. y LEE, D.S., *Impact of aircraft NOx emissions. Part 2: Effects of lowering the flight altitude* (2002).
[25] Ppb: Partes por billón.

HNO_3 que se encuentra a bajas altitudes, este gas permite que el NO_x no se disocie eficientemente y reduce el período de vida de las moléculas de O_3 en la atmósfera.

Por otro lado, el efecto que produce el NO_x con los cambios de altitud crucero en el forzamiento radiativo es el siguiente: Se incrementa el total de Forzamiento Radiativo entre 2 ± 1 mW m^{-2} al aumentar la altitud crucero en 2.000 pies debido a la acción de gases fotoquímicos. Caso similar ocurre cuando se disminuyen 2000 pies, el forzamiento radiativo se ve reducido en 2 ± 1 mW m^{-2}. Estas medidas de referencia fueron medidas en una concentración de 1 Tg (N) yr^{-1} y los cambios se presentaron en periodos cortos de vida de O_3.

Hidrocarburos no quemados (HC): Los hidrocarburos no quemados son emitidos como resultado de la ineficiencia de los motores turbo jet en el proceso de conversión del combustible en CO_2 y H_2O (Knighton et al., 2009). Aun así los niveles de hidrocarburos no quemados emitidos por la aviación no son considerables en comparación a las emisiones que generan los sistemas de transporte en la superficie del aeropuerto, que pueden generar efectos adversos en la salud de las personas expuestas. Sin embargo, los HC han sido incluidos como uno de los parámetros de monitoreo por la OACI (ICAO, 2008).

Gráfico 7: Variación de la concentración de HC emitidos por los motores de las aeronaves desde el año 1970 hasta el año 2013.



Fuente: OACI Databank de Abril 2013 (EASA, 2013).

El Gráfico 7 provee bastante información sobre las emisiones de una gran variedad de motores, además se permite visualizar la reducción de emisiones de HC desde el año 1970 a la actualidad, debido al desarrollo de nuevas tecnologías en los motores (Referirse a Anexo 1 para lectura de diagramas de caja).

Desafortunadamente, los parámetros de HC proporcionados por la OACI sólo se refieren al conglomerado total de los Hidrocarburos existentes, incluyendo las contribuciones del gas Metano (CH_4), pero no se han hecho correcciones sobre algunos niveles de trasfondo en la toma de aire del motor (Anderson et al., 2006: Lee et al., 2010). Consecuentemente, la información sobre los HC no entrega datos de un gran número de hidrocarburos específicos no provenientes del Metano que hoy han sido identificados, y en algunos casos cuantificados en los residuos de escape de las aeronaves (Herndon et al., 2009; Agrawal et al., 2008). Este hecho claramente

representa una problemática en la falta de conocimiento sobre el impacto de las aeronaves en el medioambiente y la salud humana. Esto se debe a la gran variedad de propiedades físico-químicas y toxicológicas desconocidas de cada una de estas clases de Hidrocarburos orgánicos. Algunos compuestos orgánicos volátiles son conocidos como precursores en la formación de ozono y su impacto en la reducción de visibilidad en las pistas luego de la formación de partículas[26].

Entre los Hidrocarburos emitidos por las aeronaves, 12 especies y dos grupos de compuestos orgánicos complejos están compilados en la lista de los contaminantes del aire más peligrosos presentados por la USEPA[27] (Federal Aviation Administration, 2003). Estos compuestos son los siguientes: 1,3 – Butadieno, n – hexano, Acetaldehído, Xilenos, Acroleína, Propaldehído, Benceno, Estireno, Etilbenceno, Tolueno, Formaldehido, principales sustancias compuestas de policíclicos orgánicos y 16 grupos de hidrocarburos policíclicos aromáticos.

De los programas de investigación realizados en los últimos 20 años se han realizado varios experimentos que han permitido entregar más información detallada sobre los hidrocarburos específicos en las emisiones de los motores de las aeronaves. EXCAVATE & APEX[28] (Cain et al., 2013) han logrado medir las emisiones de los hidrocarburos específicos de un motor Turboshaft, utilizando varios tipos de combustibles alternativos. A pesar de que estos estudios han entregado información útil sobre las características de las emisiones de HC, a la fecha aún existen tareas por realizar, debido a que muchas características físicas y químicas siguen sin explicación, además de algunos resultados poco concluyentes que requieren mayor investigación.

El total de emisiones index de HC es mayor en configuraciones de baja potencia donde la temperatura y presión del combustor es baja y la combustión es menos eficiente (Sutkus et al., 2001; Yelvington et al., 2007). Este comportamiento de las emisiones de HC también es confirmada por la OACI en los motores Turbofan. Por consiguiente

[26] MASIOL, Mauro and HARRISON, Roy M., *Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution* (2014).
[27] USEPA: De sus siglas en Inglés; Agencia de protección medioambiental de los Estados Unidos (US Environmental Protection Agency)
[28] EXCAVATE & APEX: (Aircraft Particle Emissions Experiments) De sus siglas en ingles corresponde a experimentos sobre material particulado emitidos desde las aeronaves.

estudios similares han reportado el mismo comportamiento para especies de Hidrocarburos diferentes (Slemr et al., 2001; Spicer et al., 1994, 1994). La campaña EXCAVATE (Anderson et al., 2006) también destacó que la mayoría de las especies de HC están fuertemente relacionadas con que las emisiones a alta potencia son dramáticamente menores en comparación a las de baja potencia o ralentí. Durante las campañas de APEX 1,2 y 3 (Knighton et al., 2007) se logró observar que en condiciones de potencia mayores al 15% de empuje, la eficiencia de combustión es cercana al 100%, resultando en emisiones HC incluso más bajos que los niveles de detección del instrumento para varios compuestos específicos.

Por otro lado la relación inversa entre las emisiones de HC y los regímenes de potencia tienen una alta relevancia en la calidad de aire local en los aeropuertos, lugar donde las fases de taxeo y ralentí son predominantes en el rodaje y encendido de aeronave en tierra. El Gráfico 6 muestra cómo el efecto acumulativo de las emisiones de HC llega a ser incluso mayores en 2 órdenes de magnitud en el proceso de cambio desde ralentí hasta el despegue durante ciclos LTO estandarizados. Actualmente existe muy poca información sobre las emisiones de Hidrocarburos en configuraciones de potencia que son menores al 7% (Ralentí OACI) que es prácticamente evidente en los estudios realizados (Roy M.Harrison & M. Masiol et al., 2014).

2.7 Regulación y estandarización OACI

Con respecto a las normas y reglamentos sobre emisiones de motores de aeronaves y vehículos terrestres se puede dilucidar que actualmente los estándares y regulaciones de la OACI que afectan a las principales fuentes de emisión (aeronaves y aeropuertos) se dividen en 2 subcategorías (ICAO et al., 2008):

1) Medidas que limitan a las particulares fuentes de emisión: Estas comprenden las normas de la OACI sobre las emisiones de los motores de las aeronaves (adoptadas en reglamentos nacionales y multinacionales) y medidas nacionales que establecen límites para fuentes distintas de las aeronaves, como instalaciones fijas (calderas, generadores, incineradores) y vehículos terrestres.

2) Regulaciones Nacionales: que establecen límites de concentración de contaminantes ambientes para condiciones de calidad del aire local. Referirse a la Tabla 4.

Esta distinción es muy importante, dado que las fuentes particulares de emisión de contaminantes que operan en las vecindades del aeropuerto pueden obedecer a límites de contaminación propios y esto también puede generar que no se cumplan con los umbrales de concentración de contaminación del aire local. Todos estos factores dependen de factores propios de la localidad como; volumen del tráfico de aeronaves, topografía, condiciones meteorológicas y proximidad con otras fuentes de alta emisión de contaminantes.

Estudios del Grupo intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) confirman que las aeronaves son relativamente pequeños contribuyentes a la contaminación regional, pero aun así puede aumentar la contaminación de NO_x si el tráfico aéreo aumenta y otras emisiones no relacionadas con la aeronáutica son más limpias. No obstante a medida que pasa el tiempo se están fabricando motores que son más amigables con el medio ambiente.

La contaminación estándar de referencia que determina la OACI en el año 2008 para los gases contaminantes en la fase de despegue y aterrizaje (LTO) es la siguiente:

- HC: 19,6 g/kN.
- CO: 118 g/kN.
- NO_x: 100 g/kN.
- Humos: 18,8 g/kN.

Actualmente no existe ninguna concentración estándar para PM_{10} y $PM_{2,5}$ establecida por la OACI, los entes regionales medidores de las emisiones de gases contaminantes son los principales responsables de mantener la cantidad de estas partículas en el aire.

La OACI tiene como foco reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) provenientes directamente desde los motores de las aeronaves. La meta de esta medida es poder obtener un valor de carbono neutro para el año 2020. Además, se están realizando nuevas Asambleas entre los países participantes, que permiten entregar nuevas metodologías e innovaciones en materia de obtención y reducción de emisiones de CO_2 en el mundo.

2.8 Normativa de calidad de aire en Chile

En la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), a la cual se adhirió Chile el año 1994, estableció que los países contratantes deberán reportar periódicamente los avances de implementación local del cumplimiento de los objetivos propuestos en dicha convención. Un componente importante en la emisión de estos reportes , son los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.

El organismo encargado de coordinar e implementar el sistema nacional de inventarios de gases de efecto invernadero de Chile es la Oficina de Cambio Climático del Ministerio de Medio Ambiente (SNICHILE), quien elaboró e implementó un programa de calidad de aire llamado "Programa Aire Limpio", con el cual busca mejorar sustancialmente la calidad del aire en las principales zonas urbanas del país.

Hoy Chile cuenta con normas primarias[29] de calidad que regulan la concentración del aire de seis tipos de contaminantes, que ya han sido identificados como nocivos para la salud de los seres vivos. Estas normas regulan las concentraciones máximas respecto del material particulado (PM), Dióxido de azufre (SO_2), Ozono troposférico (O_3), Monóxido de carbono (CO) y Plomo (Pb).

Como método de evaluación de la calidad del aire, en relación a los estándares regulatorios establecidos, actualmente se analizan los registros de las Estaciones de Monitoreo con Representatividad Poblacional (EMRP). En Chile también se tienen estaciones de monitoreo que pertenecen a privados quienes cumplen con todos las exigencias de calificación ambiental que permiten dar seguimientos de los impactos de proyectos o planes de descontaminación. Un caso muy particular de seguimiento en los

[29] "Es aquella norma que establece los valores de concentraciones y periodos máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, radiaciones , energías, ruidos, vibraciones o combinaciones de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente puede constituir un riesgo para la vida o la salud de la población" Artículo 2°, letra n, ley 19.300.

impactos ambientales se da comúnmente en las fundiciones de cobre que se encuentran establecidas en el norte del país.

El monitoreo de gases contaminantes en el país ha colocado especial atención en la concentración de material particulado PM_{10}, sin embargo, ha entrado en vigencia una nueva norma para el material particulado más fino, $PM_{2,5}$. Pese a que aún no existen mediciones para material particulado fino en todo el país, las mediciones de PM_{10} permiten hacer estimaciones respecto a la concentración de su fracción más fina. De acuerdo con estas estimaciones, se ha podido concluir que las ciudades que se localizan en la zona centro y sur del país, registran altos niveles de concentración de $PM_{2,5}$, superando hasta los 20 microgramos por metro cúbico establecido como un límite máximo en la normativa vigente.[30].

Las ciudades de la zona norte del país no registrarían niveles tan altos de $PM_{2,5}$ anualmente, debido a que las principales fuentes de contaminación corresponden a la industria minera que registra mayoritariamente aporte de material particulado grueso (Kavouras et al., 2001)[31]. Sin embargo, algunas ciudades del norte pueden ser consideradas como fuentes contaminantes de material particulado fino debido a la presencia de actividad termoeléctrica y/o fundiciones de cobre.

Con el conocimiento de estos antecedentes, se ha logrado estimar que en Chile al menos 10 millones de personas están expuestas a concentraciones promedio mayores de $PM_{2,5}$ a las permitidas anualmente. Siguiendo con la metodología que ha propuesto el Ministerio de Medio Ambiente, se estima que al menos 4.000 personas mueren prematuramente al año por enfermedades cardiopulmonares que están asociadas a la exposición crónica de $PM_{2,5}$.

[30] DICTUC; *Elaboración de una matriz fuente receptor a nivel nacional que aporte como insumo a la valoración económica dela reducción del riesgo en salud asociado a la contaminación del aire.* (2011b).
[31] Kavouras, *Source apportionment of PM10 and PM25 in five Chilean cities using factor analysis*, (2001).

Tabla 5: Normas de calidad primaria de los gases contaminantes más importantes en Chile[32].

Normas de calidad del aire vigentes en Chile			
Parámetro	**Período temporal**	**Norma, ug/m^3**	**Superación de norma**
PM_{10}	Anual	50	Se supera si el promedio aritmético de 3 años consecutivos > 50 ug/m^3.
	24 hr	150	Se supera si el percentil 98 (9 ° valor) del año sobrepasa la norma.
O_3	Móvil de 8 hrs	120	Se supera si el promedio aritmético de 3 años consecutivos del percentil 99 de los máximos diarios de concentración de 8 hr registrados en un año calendario es > a 120 ug/m^3.
SO_2	Anual	80	Se supera si el promedio aritmético de 3 años consecutivos > 80 ug/m^3.
	24 hr	250	Se supera si el promedio aritmético de 3 años consecutivos del percentil 99 de los máximos diarios es de 1 hr registrados en un año calendario es > a 250 ug/m^3.
NO_2	Anual	100	Se supera el promedio aritmético de 3 años consecutivos es de > 100 ug/m^3.
	1 hr	400	Se supera si el promedio aritmético de 3 años consecutivos del percentil 99 de los máximos diarios de 1 hr registrados en un año calendario es > a 250 ug/m^3.
CO	8 hrs	10	Se supera cuando el promedio aritmético de 3 años consecutivos del percentil 99 de los máximos diarios de concentración de 8 hrs registrados en 1 año calendario es > a 10 mg/Nm^3.
	1 hr	30	Se supera si el promedio aritmético de 3 años consecutivos del percentil 99 de los máximos diarios de 1 hr registrados en un año calendario es > a 30 mg/Nm^3.

Fuente: Elaboración propia con información de Ministerio de Medio Ambiente Chileno (2011).

[32] **µg/m3**: microgramos por metro cúbico,
mg/Nm3: miligramos por metro cúbico normal
Condición Normal: La condición normal corresponde a la presión de una atmósfera (1 atm.) y una temperatura de 25 grados Celsius (25ºC).

En la Tabla 5 es posible conocer la cantidad máxima permisible de permanencia de estos gases contaminantes en el aire del territorio chileno. Por otro lado en la Tabla 7 es posible visualizar la cantidad de casos y eventos registrados causados por la exposición prolongada al material particulado fino en Chile.

Tabla 6: Tipos de eventos, eventos y casos provocados por exposición crónica a $\boldsymbol{PM_{2,5}}$.

Tipo de Evento	Evento	Grupo de Edad	Casos
Mortalidad prematura	Cardiopulmonar	Todos	4.200
Admisiones hospitalarias	Ataques al corazón	65+	2.500
	Disritmia	65+	1.200
	Enfermedad isquémica al corazón	65+	900
	Bronquitis crónica	18-64	700
	Bronquitis crónica	65+	1.200
	Neumonía	65+	6.800
Restricción de actividad	Días de pérdida de trabajo	Todos	1.570.000
	Días de actividad restringida	Todos	7.670.000
	Días de actividad restringida menor	Todos	28.900.000

Fuente: Elaboración Propia con información del Ministerio Medio Ambiente (2011a).

2.9 Gestión Medio Ambiental de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) en Chile.

La DGAC es el organismo regulador y fiscalizador de la aeronáutica civil en Chile. Dentro de sus funciones claves se encuentra la de gestionar el medio ambiente de las dependencias, donde está tiene jurisdicción, es por ello que la DGAC ha realizado mediciones de contaminantes en los principales aeropuertos del país, determinando sus fuentes de emisión, cantidad de contaminantes en los aeropuertos y generación de modelos de dispersión que permiten determinar el aporte de las emisiones provenientes de fuentes emisoras en localidades y sectores aledaños a las instalaciones de un determinado proyecto, permitiendo de este modo asignar las cuotas de responsabilidad en los niveles de calidad del aire medidos en su entorno.

La verificación de los contaminantes asociados a operaciones tanto internas como externas del aeropuerto Arturo Merino Benítez (AMB) en Santiago de Chile, debieron ser modelados a requerimiento de la "Guía para el Uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA, 2012"[33]. Aquí se establece la utilización del modelo llamado "CALPUFF", el cual es definido por la Agencia EPA[34] y es utilizado como referencia para simular la dispersión de los gases contaminantes provenientes del aeropuerto (Algoritmos, 2014)[35].

Un ejemplo del uso de este modelo puede ser visualizado en la Tabla 7 con las mediciones realizadas en el principal aeropuerto del país, Aeropuerto Arturo Merino Benítez (AMB), ubicado en Santiago.

El sistema de modelación llamado CALPUFF utilizado por la DGAC está compuesto por tres componentes principales: CALMET, CALPUFF y CALPOST, además de un conjunto de preprocesadores diseñados para incluir en el modelo datos meteorológicos

[33] SEIA: Servicio Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental Chileno.
[34] Agencia EPA: Agencia de Protección Medio Ambiental de Estados Unidos.
[35] Algoritmos, *Modelación de la dispersión de las emisiones atmósfericas provenientes del aeropuerto Arturo Merino Benítez* (2014). LIC 04/10.

y geofísicos. La siguiente cita fue obtenida de Algoritmos 2013 y establece lo siguiente:

"CALMET es un modelo meteorológico que simula campos de viento y temperatura en un dominio de modelación engrillado y tridimensional. CALMET también "Modelación de la Dispersión de las Emisiones Atmosféricas Provenientes del 18 Aeropuerto Arturo Merino Benítez, Año 2012" Versión A-2 Noviembre, 2013 produce campos en dos dimensiones como son: Altura de la capa mezcla, características de superficie y propiedades de dispersión.
CALPUFF modela el transporte y dispersión de contaminantes emitidos por las fuentes emisoras en forma de paquetes o "PUFF" de material procesándolos a través del dominio de modelación. La salida primaria de este modelo contiene cada hora de concentración o flujo de deposición evaluados en receptores determinados".

"Finalmente CALPOST procesa las salidas de CALPUFF creando los archivos con las tabulaciones necesarias para la evaluación de los resultados." (Algoritmos, 2014)

Con la utilización de estos distintos modelos es posible conocer si la calidad del aire local de los aeropuertos cumple con la normativa medio ambiental chilena

Tabla 7: Cantidad de contaminantes en ug/m^3 del aeropuerto Arturo Merino Benítez y sus vecindades, adicionalmente se muestra la cantidad máxima permitida por el Ministerio de Medio Ambiente de modo de identificar si se está cumpliendo la norma en la localidad.

Parámetro	Estadístico	Puntos de Interés		Norma (ug/m^3)
		Estación EAMB01	Estación Pudahuel	
SO_2	Percentil 99.73 valores horarios	--	45	**1.000**
	Percentil 99.7 promedios diarios	--	25	**365**
	Percentil 99 promedios diarios	--	27	**250**
	Promedio periodo	--	10	**80**
NO_2	Percentil 99 valores máximos horarios	126	163	**400**
	Promedio periodo	29	36	**100**
CO	Percentil 99 valores máximos horarios	2.519	13.305	**30.000**
	Percentil 99 valores máximos 8 horas	1.346	9.296	**10.000**
MP 10	Percentil 98 promedio diario	127	130	**150**
	Promedio periodo	60	51	**50**
MP 2.5	Percentil 98 promedio diario	54	82	**50**
	Promedio periodo	23	26	**20**

Fuente: Elaboración propia con información de DGAC – Algoritmos (2014).

A través del uso de estos modelos, la DGAC concluye que Arturo Merino Benítez (AMB) no es considerado como potencial fuente de contaminación local de gases del tipo invernadero con respecto a su referencia (Estación Pudahuel), si bien el material particulado 2,5 sobrepasa la norma dictada por el Ministerio de Medio Ambiente de Chile, este número no es representativo dado que solo sobrepasa la norma en un 1%. Gran parte de las concentraciones monitoreadas en la Estación provienen de fuentes externas que no corresponden necesariamente a las generadas por la operación de Aeropuerto AMB.

Al mismo tiempo la DGAC también es partícipe de otras formas de mitigación y control de contaminantes en los aeropuertos como:

1. Contaminación acústica.
2. Tratamiento de aguas servidas provenientes directamente de las aeronaves.
3. Control de fauna mediante el uso de equipamiento preventivo.
4. Capacitación sobre manipulación de mercancía peligrosa.

2.10 Medidas medioambientales de Estados Unidos

La US Environmental Protection Agency (EPA) ahora está consciente del cambio climático que afecta a nuestro planeta y está potencialmente interesada en proponer medidas de acción, es por ello que sugiere que se estudie la sección 231(a) de la Clean Air Act (CAA) que se refiere a la regulación y estandarización de los gases precursores del efecto invernadero, y solicita que se tomen medidas sobre las emisiones estándares de gases del tipo invernadero sobre algunas clases de turbinas de aviación. La Federal Aviation Administration (FAA) deberá velar el cumplimiento de estos estándares de emisión de cada una de estas clases de turbinas.

Desde el año 1973 cuando la EPA puso en marcha la regulación de las emisiones de gases contaminantes de las aeronaves, ésta sólo se consultó ocasionalmente, pero desde el año 1997 (año en el que se modificó la regulación en un trabajo conjunto con la OACI y CAEP para generar procedimientos más consistentes de las operaciones de motores que generan un empuje mayor a 26,7 kN), esta modificación también permitió generar mejores medidas restrictivas en las emisiones de NO_x ,CO_2 y humos. A partir de esta fecha las restricciones de emisiones se han vuelto más severas, lográndose la medida más restrictiva actual en los años 2013 – 2014.

Hoy la FAA propone que se ocupe la misma definición utilizada en la sección 231(a)(2) como la utilizada en la sección 202(a)(1) de la CAA, de modo de dar una definición y nombre a la mezcla de los 6 gases contaminantes en conjunto. Además, en la actualidad se busca determinar científicamente la naturaleza de la mezcla de estos gases contaminantes y ver si efectivamente la mezcla de estos gases son precursores del cambio climático, de esta

forma se puedan generar bases razonables para ser adoptadas en la misma definición de “air pollution” definidas en la sección 231(a)(2).

Actualmente estos gases no se encuentran catalogados bajo la definición de “air pollution” en la CAA, es por ello que se busca investigar sobre estos gases para determinar si estos representan o no un peligro para la salud pública. A partir de esta investigación se espera crear nuevas bases y regulaciones más acordes a la realidad actual de la industria y sus necesidades.

2.11 Medidas medioambientales de Europa

Europa se ha propuesto disminuir las concentraciones de CO_2 en su territorio que para ellos representa grandes contribuciones al deterioro medioambiental precursor del cambio climático que afectará a Europa de varias formas, incluyendo cambios en el promedio de la temperatura, la cantidad de agua precipitada, el calentamiento del océano, los incrementos en la subida del nivel del mar, al igual que la disminución de nieve y hielo en tierra y mar. Esto ya ha generado una variedad de impactos en los ecosistemas, los sectores socio-económicos y en la salud humana.

En este contexto, los esfuerzos internacionales de limitar el cambio climático, la UE se ha comprometido a disminuir sus emisiones de gases de invernadero en al menos un 20% para el año 2020, y un 30% para el año 2030. En el sector de transporte se espera una reducción de un 20% en el año 2030 utilizando como referencia los niveles obtenidos en el año 2008, y en un 70% para el año 2050. Estos compromisos han sido respaldados en una canasta de medidas como por ejemplo la inclusión del sector aeronáutico en el sistema de emisiones de la UE; el ETS o Emissions Trading System. Este sistema se integra luego de que se definiera en la UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) que se requieren medidas de mercado que orienten a las aerolíneas europeas a medir sus niveles de emisión y determinar las mejores formas de mitigación ambiental.

En la actualidad la ETS cubre todos los vuelos internos por Europa. Este sistema de mercado contribuirá en la reducción de emisiones del sector en alrededor de 16 millones de toneladas anualmente o alrededor de 65 millones de toneladas entre el período de los años 2013 y 2016. Más de 100 aeropuertos en Europa también han implementado cargos por contaminación acústica desde el año 1990 (EAER, 2016).

Con respecto a la contaminación del aire, uno de los mayores riesgos medio ambientales de muerte prematura en Europa corresponde a la contaminación regional y local del aire. Aquello aumenta la incidencia de una gran variedad de enfermedades, daños en el ecosistema y la vegetación. Estos impactos significan una gran pérdida económica para Europa en términos de recursos naturales, agricultura, productividad de la fuerza laboral y salud de sus ciudadanos.

Por otro lado, a diferencia de la OACI y a partir de la motivación generada por esta, la UE ha decidido tomar en consideración dos gases contaminantes relevantes que son emitidos por la industria aeronáutica, estos corresponden a los NO_X y el material particulado (PM). La legislación de contaminantes del aire de la UE sigue un enfoque de doble vía en la implementación de los estándares de aire local y control de mitigación de las fuentes emisoras de contaminantes (Emisiones de los motores y estándares de calidad del combustible).

De la misma forma, Europa considera que la única forma efectiva de combatir las emisiones de estos gases de invernadero es mediante el uso de medidas de mercado, ya que la tecnología y las medidas operacionales por si solas no son suficientes para combatir los desafíos del crecimiento medio ambiental en el sector aeronáutico mundial.

En los reportes de emisiones realizados por la European Aviation Environmental Report (EAER) de gases de tipo invernadero base de la Convención de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se ha establecido que la aviación doméstica de los estados miembros de la UE representa sólo el 0,5% del total de emisiones de gases contaminantes aportados por la aviación internacional (3% y en crecimiento).

Por otro lado el enfoque inicial que tuvo la ETS fue la cobertura de todos los vuelos que llegaban y salían de los aeropuertos comerciales de algunos países miembros de la UE como: Noruega, Islandia, Liechtenstein y otros territorios relacionados. En el año 2013 se unieron a la batalla contra la contaminación los aeropuertos no comerciales que habían sido excluidos del enfoque de la UE para facilitar las negociaciones y llegar a un acuerdo global en la Asamblea de la OACI organizada este mismo año. La OACI posteriormente decidió desarrollar un mecanismo de trabajo global de las MBM para combatir las emisiones producidas por la aviación que aún deberá ser acordada por los países participantes e implementada a partir del año 2020 (EAER, 2016).

Teniendo en cuenta los trabajos de la OACI, la UE decidió continuar con el foco de reducción de gases contaminantes formulado por la ETS dentro del territorio Europeo desde el año 2013 al 2016, sólo vuelos entre los aeropuertos comerciales son actualmente considerados. De este modo vuelos llegando y saliendo desde zonas periféricas de la UE sólo están cubiertos si se producen en la misma región.

2.12 Tecnologías utilizadas para reducir la contaminación

2.12.1 Gases que requieren atención:

Los niveles de gases inquemados de CO y HC han disminuido su emisión de manera importante en la última generación de turbinas construidas, no ocurre los mismo con los NO_x, **los cuales son los más contaminantes.** El acortamiento del largo de las cámaras de combustión de las nuevas turbinas y los avances en la combustión contribuyen a que el aumento de la relación de compresión genere un aumento de emisiones de gases del tipo NO_x.

Adicionalmente existe otra problemática ligada a la falta de estudio en operaciones de aviones supersónicos que son contaminantes en altura, y la afluencia de los NO_x en la destrucción de la capa de ozono, siendo, así, este contaminante el que actualmente necesita mayor atención por parte de los fabricantes de motores.

2.12.2 Métodos operacionales de reducción de contaminación

Utilización de combustibles alternativos: La experiencia ha demostrado que el uso de otros combustibles naturales genera una menor temperatura de llama en un determinado diseño de cámara de combustión, sin embargo, dado el bajo poder calorífico del carburante se debe sacrificar consumo específico del combustible, es decir, aumenta el consumo de combustible. Por otro lado, los precios de venta de los combustibles alternativos son muy altos con respecto a los de un galón de combustible normal, esta variante es muy importante para la industria por los enormes gastos operacionales que esto genera.

Mejora en sistemas de inyección: Al mejorar los sistemas de inyección se disminuyen los niveles de contaminación de los gases no quemados dado que una mejor calidad de aire - carburante y su respectiva distribución en la cámara de combustión, condicionan las riquezas de la mezcla y temperaturas locales. Por lo tanto, una mejora en los sistemas de inyección es una muy buena forma de reducir la contaminación.

Actualmente se está sustituyendo los tubos de vaporización por una inyección aerodinámica que ha reducido circunstancialmente la emisión de CO_2.

Mejor Repartición de Aire: Los niveles de contaminantes expulsados al medio ambiente también dependen del reparto de aire que existe en la turbina. El problema es que no se permite establecer un compromiso entre las prestaciones y las sustancias contaminantes. Si se modifican en una cámara de combustión los orificios de dilución, la contaminación de los NO_x disminuye, pero se debe sacrificar volumen de la cámara lo que genera un aumento de la temperatura en la misma, dando lugar a un aumento de los niveles de emisión de los gases no quemados.

Optimización de reparto de combustible: Al mejorar el reparto de combustible no es posible reducir los niveles de los NO_x. En estados de baja carga,[36]es posible optimizar la estequiometria de la cámara de combustión, repartiendo el combustible en los inyectores del motor, pero este sistema exige un sistema de alimentación de combustible más complejo, no pudiendo ser aplicado en regímenes de alta carga[37], por lo tanto, no es posible reducir los niveles de NO_x, sino que favorece a una débil producción, mejorando el compromiso entre el funcionamiento a ralentí y el funcionamiento en plena carga.

Acortamiento de la cámara de combustión: Permite reducir el tiempo de permanencia de la presencia de los factores que generan la emisión de gases NO_x. Actualmente la relación longitud diámetro ha disminuido en un 30% en los últimos 30 años. Lo que permite un mejor control de la aerodinámica interna de la turbina sin aumentar la temperatura de salida y sin aumentar los niveles de gases no quemados, lo que permite obtener turbinas modernas con niveles de NO_x muy parecida a los niveles de los de motores antiguos a pesar de las relaciones de compresión.

[36] Estados en los cuales no se requiere demasiada potencia de las turbinas para mover la aeronave.
[37] Estados de alta carga: Despegue y Ascenso.

Acción sobre el ciclo del motor: Queda especificado en las normas OACI que el parámetro que se utiliza para medir las emisiones de gases contaminantes es la masa del contaminante (D_p) emitida en el Ciclo LTO con relación al empuje en el despegue. La ecuación 1 nos permite conocer el parámetro de contaminación:

Ecuación 1: Parámetro de contaminación

$$\frac{G_{cont}}{E_{desp}} = \frac{Masa\ de\ contaminante\ emitida\ durante\ Ciclo\ LTO}{Empuje\ de\ despegue}\ \frac{g}{\kappa N}$$

Fuente: KURNIAWAN, Jermanto S.; KHARDI, Salah. *Comparison of methodologies estimating emissions of aircraft pollutants, environmental impact assessment around airports* (2011).

Este parámetro nos entrega información con respecto a un índice de emisión (IE), el cual representa el nivel tecnológico de la cámara de combustión. Esta fórmula indica a los fabricantes que para reducir la contaminación se debe disminuir la relación que existe entre la masa del contaminante y el empuje ($\frac{G_{cont}}{E_{desp}}$), para ello:

1. Se deben mejorar las cámaras de combustión.
2. Seleccionar ciclos que otorguen un menor consumo específico donde su consecuencia directa en motores de alta relación de dilución sea la disminución de los niveles de contaminación.

2.13 Otros métodos de control operacionales de gases contaminantes

Manejo del tráfico aéreo: El más obvio de estos procedimientos de control de gases que permite reducir considerablemente el uso de combustible proviene de la mejora del manejo del tráfico aéreo en el mundo, el que puede ser capaz de optimizar las altitudes de crucero reduciendo la distancia vertical de separación entre aeronaves (RVSM). También la reducción de tiempos en circuitos de espera permite reducir el costo por combustible y los tiempos de operación en las cercanías del aeropuerto.
Un estudio de EUROCONTROL (Jelinek et al., 2002) muestra que la introducción de RVSM a lo largo de Europa ha permitido reducir el consumo de combustible y las emisiones de CO_2 en un rango de 1,6% a 2,3% bajo condiciones apropiadas. Sin embargo la optimización de separación del tráfico aéreo es una alternativa ahorradora, pero no una que puede ser mejorada con incrementos en el futuro.

Cambios de altitudes de crucero: Estudios de modelos paramétricos (Fichter et al., 2005; Grewe et al., 2002; Gauss et al., 2006) indican que los efectos sobre las estelas de condensación[38] y el O_3 se pueden disminuir si se reducen las altitudes de vuelo crucero. Estos estudios no plantean generar un cambio global en las altitudes de vuelo crucero, sino que simplemente permiten probar ciertas hipótesis de reducción mediante el uso de estudios paramétricos.

Mannstein et al., 2005[39] sugiere que pequeños cambios tácticos en la altitud pueden ser necesarios en los vuelos reales para evadir gotas de hielo en regiones sobre saturadas, sería importante entregar información adecuada sobre estos parámetros. De esta forma se podrían generar modelos de predicción que permitan conocer la ubicación de estas regiones en cada operación para mejorar la seguridad en vuelo.

[38] Corresponde al vapor que se encuentra en ambientes fríos (Mayor altitud, menor temperatura) bajando la temperatura del vapor hasta su condensación en pequeñas gotas de agua y/o sublimando en hielo. Estas múltiples gotas de agua forman trazos o estelas de hielo.
[39] MANNSTEIN, Hermann; SCHUMANN, Ulrich. Aircraft induced contrail cirrus over Europe. *Meteorologische Zeitschrift* (2005).

Sin embargo, existen acuerdos entre las aerolíneas que establecen que la reducción de altitudes crucero incurre en una penalización en el gasto de combustible que no es directamente cuantificable. Este tema sigue en discusión dado que los expertos señalan que esta penalización debiese ser asumida por las empresas aéreas, debido a que el impacto que genera el CO_2 en el forzamiento radiativo es mayor y tiene una mayor duración que la formación de estelas de condensación en un mismo vuelo.

Cambios de velocidad de operación: La reducción de velocidad en los vuelos también significa una reducción del consumo de combustible, donde la superficie de la aeronave es la más beneficiada con estos cambios en la velocidad. Actualmente existen motores Propfan sin ductos que son más eficientes en el uso del combustible a bajas velocidades que un motor Turbofan, también son capaces de reducir el consumo de combustible a menores altitudes crucero. Estos motores siguen en desarrollo y no han sido certificados todavía para ser colocados en el mercado. La gran desventaja que presenta este tipo de motores, con respecto a los motores Turbofan, es que los motores Propfan son más ruidosos por el hecho de que este nuevo motor no utiliza ductos conductores de ruido.

CAPITULO III: MODELO DE TRABAJO

3.1 Definición de un modelo

Es muy importante definir el significado de un modelo antes de poder realizar cualquier tipo de análisis con respecto a este trabajo de título.

Un Modelo debe poseer tres características muy relevantes:

1. Un modelo siempre está basado en un modelo original ya formulado anteriormente.
2. Un modelo sólo refleja la selección de características más relevantes con respecto al modelo original.
3. Un modelo puede utilizarse para algún propósito en particular, pero siempre teniendo en cuenta el modelo original.

Las características 1 y 2 se deben cumplir simultáneamente cuando realizamos una proyección, es decir, en el proceso de partida del modelo y en su finalización. Se pierde mucha información en el desarrollo, es por ello que el fin de cualquier modelo es lograr seleccionar toda esta información relevante que se ha omitido u olvidado originalmente[40].

La tercera característica de un modelo, se cumple cuando se detalla el propósito del modelo, por lo tanto este debe entregar información:

- Sobre algo (contenido, significado)
- Con algún propósito (contexto de uso)

Ya una vez definidas todas estas características, podemos seleccionar el tipo de modelo que vamos a utilizar.

[40]STACHOWIAK, Herbert. *Allgemeine modelltheorie* (1973)

3.2 Definición de un modelo de mantenimiento

Un modelo de mantenimiento es una mezcla de varios tipos de mantenimientos en proporciones determinadas, y que tiene como principal objetivo de responder adecuadamente a las necesidades de un equipo en concreto. Cada equipo requiere de una combinación distinta de mantenimientos, una determinada mezcla de tareas, de modo que la cantidad de modelos posibles serán tantos como equipos que puedan existir. Además, la práctica ha demostrado que estos modelos deben estar complementados con otros tipos de tareas adicionales[41].

3.2.1 Tipos de Mantenimiento

Mantenimiento correctivo: Conjunto de tareas que tienen como objetivo corregir los defectos que se vayan presentando en los distintos equipos, estos defectos son comunicados al departamento de mantenimiento por los propios usuarios o por sistemas incorporados en los equipos.

Mantenimiento preventivo: Este mantenimiento tiene como misión mantener un nivel de servicio dado, se programan las correcciones en los puntos más vulnerables en el momento más oportuno.

Mantenimiento predictivo: Este tipo de mantenimiento busca conocer e informar permanentemente el estado y operatividad de las instalaciones o equipos mediante el conocimiento previo de algunas variables representativas del estado y operatividad. Es necesario identificar variables físicas que sean indicativas (Temperatura, energía expulsada, velocidad, etc.) para poder realizar este tipo de mantenimiento. Es el tipo de mantenimiento que utiliza más equipos tecnológicos, dado que este tipo de mantenimiento requiere conocimientos matemáticos, físicos y técnicos.

[41] GARRIDO, Santiago García. *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Ediciones Díaz de Santos, (2010).

Mantenimiento cero horas: Es aquel mantenimiento que requiere un conjunto de tareas que tienen por objetivo revisar equipos en intervalos de tiempo establecidos antes de que aparezca alguna falla. Esta revisión consiste en dejar el equipo a medir en un estado de cero horas de funcionamiento, es decir, equipo restablecido de fábrica. En esta revisión se reparan todos los elementos que son sometidos a desgaste. Con todo esto se pretende asegurar con alta probabilidad, un tiempo prolongado de buen funcionamiento del equipo.

Mantenimiento en uso: Este mantenimiento, corresponde a un mantenimiento básico que es realizado por el mismo usuario del equipo. Consiste en una serie de tareas elementales como: toma de datos, inspección visual, lubricación, limpieza, etc. Para este tipo de mantenimiento no se requiere una gran formación, sino tan sólo un entrenamiento básico y breve.

3.2.2 Roles de los organismos normativos en esta propuesta

1. **OACI:** El rol que asumiría en esta propuesta de modelos sería; normar la emisiones de un gas en especifico, el CO_2. Además, podría establecer parámetros que permitan comparar y mantener los niveles de gases contaminantes inventariados en el mundo. De esta forma la OACI mantendría su objetivo de reducir las emisiones de este gas y no cambiaría el enfoque con la implementación de este modelo.
2. **DGAC:** Se sugiere que su rol en esta propuesta sería; vigilar y normar la calidad del aire en las vecindades del aeropuerto. Se espera que el trabajo normativo se ejecute de la mano con el Ministerio de Medio Ambiente Chileno.
3. **MMA (SNICHILE):** El rol que asumiría la Oficina de Cambio Climático del Ministerio de Medio Ambiente Chileno en esta propuesta sería el de coordinar e implementar el sistema nacional de inventarios de gases de efecto invernadero provenientes de la industria aeronáutica Chilena (Emisión directa).

3.3 Modelos de esta propuesta

3.3.1 Modelo de medición

El modelo de medición que se utilizará en este Trabajo de Memoria es un modelo sofisticado, desarrollado por el Comitee on Aviation Environmental Protection (CAEP) en el año 2010, que busca reflejar de la mejor forma posible las emisiones reales de los motores de las aeronaves. Uno de los principales objetivos de la CAEP es identificar y realizar análisis de proyecciones futuras para limitar o reducir los impactos actuales y futuros de los gases contaminantes y ruido producidos por la aviación civil internacional. El objetivo de estos estudios es evaluar la viabilidad técnica y económica de las opciones consideradas, además de considerar las ventajas y desventajas en el ámbito ambiental. Para lograr este objetivo CAEP ha confiado en el uso de varias simulaciones computacionales y bases de datos ofrecidas por las organizaciones internacionales que forman parte del grupo de trabajo.

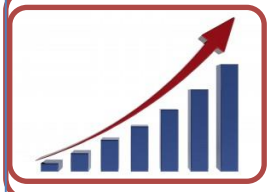
Para apoyar estos análisis, la CAEP, en su octava reunión celebrada en febrero del año 2010, lleva a cabo una evaluación completa de los modelos propuestos de medición y las bases de datos brindadas. El objetivo de esta evaluación fue asesorarse en cuanto a la determinación de herramientas que fueran lo suficientemente robustas, transparentes, rigurosa y apropiada para un correcto análisis, también para entender las potenciales diferencias que pueden presentarse en los resultados del modelaje.

Para definir el modelo de medición a utilizar en este trabajo, se requiere una metodología común que permita la consistencia en la evaluación del modelo a lo largo de cuatro áreas de modelaje que definen las características claves que debe contener un modelo robusto. Además el análisis práctico debe ir acompañado de un riguroso proceso de evaluación que permita encontrar las fortalezas y deficiencias del modelo, en caso de que este sea deficiente se deben refinar y mejorar los procesos de medición de este modelo.

Las características que debe poseer un modelo de medición o base de datos robustos según CAEP deben ser los siguientes:

Capacidades

- El modelo debe responder las preguntas propuestas por CAEP
- Limitaciones del modelo
- Capacidades del modelo en la evaluacion de nuevas politicas. La capacidad debe entregar un valor agregado.
- Ajustar el modelo en la estimación cuantitativa de las incertidumbres encontradas.



Información para la interacción de actividades de proyección

- La herramienta de medición debe ser capaz de recolectar la información de ruido, emisiones y flujo de combustible requerido por la FESG para el analisis economico que realiza CAEP en los estudios políticos.
- La herramienta debe entregar la información en el formato exigido por la FESG.

Metodologías

- Funcionamiento del modelo. Debe cumplir con los estándares establecidos.
- Información requerida.
- Determinar la procedencia de la información.
- El modelo debe ser flexible en la admisión de nuevos escenarios.

Preparación

- Probabilidad de la herramienta para evaluar una aplicación de estudios políticos de la CAEP.
- Evaluar la labor y generar compromisos con el desarrollo.
- Evalua la madurez de las metodologías.
- Evalua la madurez de los modelos de las actividades de validación.
- Evalua el número de innovaciones que aun no han sido incorporadas y probadas

Transparencia

- Los métodos de recolección de información y algoritmos deben ser razonables en los datos de emisiones, ruido y uso del combustible.
- Debe ser confiable.
- La herramienta debe representar razonablemente las proyecciones y relaciones que existen entre los factores medio ambientales.
- Se deben validar y verificar los algoritmos y metodologías de la CAEP.
- La arquitectura del sistema, requerimientos funcionales, descripción de algoritmos, descripción de la información y otros diseños de software deben estar disponible para la CAEP.

Usabilidad

- Determinar participantes de este modelo y su entrenamiento.
- Determinar el nivel de accesibilidad y disponibilidad
- Los grupos de trabajo de la CAEP deben interactuar durantes los procesos de desarrollo e inicio.

Validación y Verificación

- Existencia de un estándar de oro para poder comparar la herramienta de medición.

Fuente: Elaboración propia adoptado con información de la OACI y CAEP (2016).

Diagrama 2: Características que debe poseer un modelo de medición para poder ser validado por CAEP.

Adicionalmente el comité (CAEP) ha aprobado el uso de ciertos modelos de medición que se han utilizado en investigaciones anteriores de gases contaminantes, algunos de estos modelos aceptados son los siguientes:

Tabla 8: Resumen de los modelos y bases de datos aprobados por el Comité de la Aviación de Protección Medio Ambiental (CAEP).

Modelling Area	Model / Database Name	Release	Sponsoring Organization
Noise	AEDT/MAGENTA	1.4	US FAA
	ANCON2	2.3	UK DfT
	STAPES	1.1	EUROCONTROL
Local air quality	ADMS	3.0	UK DfT
	AEDT/EDMS	1.4	US FAA
	ALAQS	nov-08	EUROCONTROL
	LASPORT	2.0	Swiss Federal Office for Civil Aviation (FOCA) German Ministry of Transport (BMVBS)
Greenhouse Gas	AEDT/SAGE	1.4	US FAA
	AEM III	2.0	EUROCONTROL
	Aero2k	2.0	UK DfT
	FAST	-	UK DfT
Economics	APMT/Economics	4.0.3	US FAA
	Nox Cost	4.0	CAEP
All	Airports Database	1.5.4	US FAA, EUROCONTROL
All	Common Operations Database	2.0	US FAA, EUROCONTROL
All	2006 Cambell - Hill Fleet Database	CAEP/8	CAEP
All	2006 Cambell - Hill Fleet	CAEP/8	US FAA

	Database Extension		
All	Population Database	1.0	US FAA, EASA
LAQ, GHG	ICAO aircraft engine emmissions databank (EDB)	16A	UK DfT, CAEP www.caa.co.uk/EDB
Noise	ICAO Noise database (NoisedB)		France DGAC http://noisedb.stac.aviation-civile.gouv.fr/
All	ANP - Aircraft Noise and Performance	1.0	EUROCONTROL
All	Base of Aircraft Data (BADA)	3.6	EUROCONTROL
All	Forecasting and Operations Module (FOM)	2.3.2	US FAA
All	FESG Traffic Forecast (pas. + cargo)	CAEP/8	ICAO Secretariat, CAEP, ICCAIA
All	FESG Retirement Curves	CAEP/8	ICCAIA, CAEP
All	Growth & Replacement Database	7	ICCAIA, CAEP

Fuente: Elaboración propia con información de CAEP/8 (2017). Disponible en: http://www.icao.int/modelling&databases

El modelo aprobado por CAEP que se utilizará en este Trabajo de Memoria corresponde al presentado por la CAEP en su octava congregación que corresponde a la mezcla del uso de la base de datos de emisiones de la OACI (EDB) y los datos sobre emisiones reales obtenidos a través del motor. Este modelo requiere un gran conocimiento de las operaciones de la aeronave y los motores, además de conocer y estudiar este modelo de medición que no está normalmente disponible en dominios públicos. La información real y refinada requerida para este análisis será obtenida mediante técnicas de medición que se realizan en tiempo real, posteriormente estos datos serán procesados y computados para su revisión final.

Este modelo es adecuado para ser utilizado en Chile dado que la DGAC utiliza la base de datos de la OACI (EDB) para poder medir y comparar las emisiones de gases contaminantes en el aire del aeropuerto AMB con respecto a la contaminación presente en la Región Metropolitana.

La implementación de este programa de medición también tiene algunas dificultades que se deben tener en consideración como:

- Tiempos requeridos para la extracción y análisis de datos
- Definición de un grupo de trabajo destinado para el análisis de los gases contaminantes.
- Tipo de motores a los cuales se realizará este sondeo de acuerdo a la familia que pertenecen y al tipo de fuselaje en el que se encuentran montados.
- Capacitación del personal en el manejo de las herramientas de medición.
- Fallas en la medición o errores inesperados.
- Riesgo de probables daños estructurales del motor en el posicionamiento de las herramientas de medición.
- Viabilidad económica y técnica.
- Aprobación del sistema de medición por parte de los explotadores.
- Factores adicionales que no fueron mencionados en esta propuesta.

Si alguno de estos factores pudiese ser limitante en el desarrollo del proceso de medición para los explotadores chilenos o para los organismos reguladores de emisiones contaminantes, existe la posibilidad de que este estudio se vea retrasado o anulado.

3.3.2 Modelo de Mantenimiento

El modelo de mantenimiento que se utilizará para esta Memoria será un modelo de **mantenimiento predictivo**, sus fundamentos vienen principalmente asociados a la necesidad de ciertas fases recopilatorias de información que permiten medir los gases emitidos desde la fuente directa de emisión (Motores Turbofan). Luego de recopilar esta información, es necesario el análisis de los datos obtenidos para establecer un inventario de emisiones generadas por los motores en las aeronaves que operan en territorio chileno.

Además de analizar y crear un inventario inicial de gases contaminantes existentes en la flota de aeronaves según tipo de fuselaje y fabricante de motores de los explotadores chilenos, se deberá comprobar si estos gases cumplen con la norma de aire local y las establecidas por la OACI. En el caso de que los parámetros de gases emitidos se escapen de la norma exigida, se deberán tomar medidas correctivas de mantenimiento o medición dependiendo de cuál sea el caso. Una vez se hayan corregido estos parámetros se procederá a certificar los motores de la aeronave con la otorgación de un "**sello verde**" que asegurará que el funcionamiento de la aeronave no entrega mayores aportes de gases contaminantes al medio ambiente y cumple con la norma vigente medio ambiental. Esta certificación será válida por un periodo establecido de servicio por el explotador y los organismos reguladores del medio ambiente.

El modelo de mantenimiento predictivo se basará en el análisis y observación de gases contaminantes expulsados por las aeronaves. Las experiencias de investigaciones anteriores ayudarán a formar fundamentos de medición que permitirán a los explotadores expandir horizontes en las metodologías de mantenimiento.

Este programa de mantenimiento no es sencillo debido a que se deben tener en consideración:

- Tiempos de observación y análisis de datos.
- Consideraciones especiales de los explotadores en sus modelos de mantenimiento.

- Aprobación del modelo de mantenimiento predictivo por los explotadores, organismos reguladores y fabricantes de motores.
- Viabilidad económica de realización.
- Los datos pueden provenir de distintas fuentes, ya sea por la experiencia de operación del equipo de trabajo de los explotadores, informes de autoridades aeronáuticas y/o fabricantes.
- Nivel de relevancia que tienen las normativas de calidad de aire en el territorio chileno.
- El modelo predictivo es poco objetivo y muy subjetivo para determinar fallas reales en el funcionamiento de motores y/o componentes del mismo.
- Necesidad de un equipo técnico con vasta experiencia en emisiones de gases contaminantes.
- Capacitación del personal para identificar fallas internas del motor mediante las emisiones de gases contaminantes.
- Adecuación del taller de mantenimiento para poder realizar este tipo de mantenimiento.

Este modelo de mantenimiento predictivo trabajará de la mano con el modelo de medición establecido en esta Memoria, dando cumplimiento a los objetivos específicos de esta propuesta. Además se espera que de este trabajo conjunto se logre:

1. Resolver problemáticas medio ambientales que se presentan en las localidades.
2. Ayudar a los explotadores chilenos a encontrar fallas predictivas mediante la medición y observación de gases contaminantes en los motores.
3. Mejorar el trabajo y comunicación entre la Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile, la Junta Aeronáutica Civil de Chile, las Aerolíneas chilenas y el Ministerio de Medio Ambiente chileno.
4. Obtener un inventario inicial sobre las emisiones directas desde las fuentes de contaminación (Motores de las aeronaves).

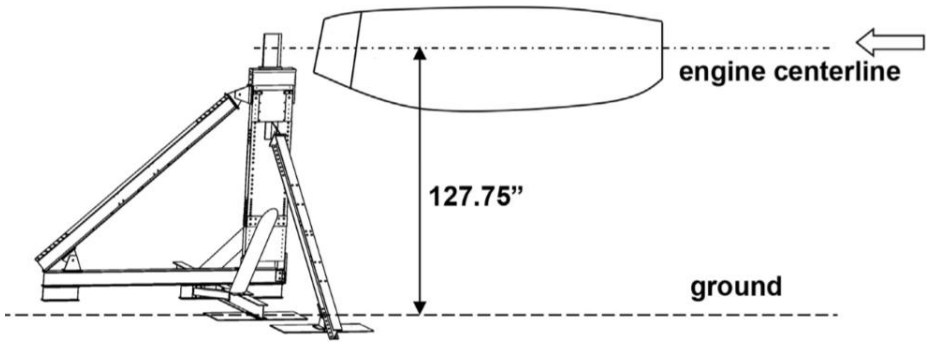
3.4 Metodología y desarrollo de implementación del modelo de medición

El modelo de medición buscará reducir costos de análisis y mejorar los procesos de recolección de datos, es por ello que se medirán las emisiones de las aeronaves que pasan la noche en el hangar o aquellas aeronaves que deben pasar por un proceso de mantenimiento programado. De esta forma se verá reducido el costo de mantener una aeronave en tierra y no afectará las operaciones regulares del explotador.

Para iniciar el proceso de medición se debe realizar en primer lugar la colocación de los instrumentos de medición. El instrumento primario corresponde a una sonda tipo rastrillo que será colocada a 1 metro de la tobera de escape del motor que corresponde a la misma configuración utilizada en el estudio de Delta Airlines en el año 2006[42] y APEX (P. Lobo et al., 2015) (Wey et al., 2007)[43]. Como referencia se puede utilizar la configuración de la Figura 6, es importante especificar el lugar actual y real de posicionamiento de esta sonda con respecto al suelo con el fin de evitar errores de medición. Estas sondas deberán ser construidas a medida según el tipo de aeronave y motor, también deberán utilizar métodos de control de dilución para inhibir el potencial de condensación de agua, conversión de gas a partícula y de partícula a gas de modo de reducir las concentraciones de gases contaminantes a los rangos óptimos operativos del instrumento. Se recomienda que estas sondas sean enfriadas por agua para protegerlas de la degradación termal durante la toma de mediciones.

[42] P. Lobo et al., PM emissions measurements of in-service commercial aircraft engines during the Delta-Atlanta Hartsfield Study (2015).
[43] WEY, C. C., et al. Aircraft particle emissions experiment (APEX), [2006].

Figura 6: Figura que muestra un ejemplo de montaje de la sonda para toma de muestras en un motor tipo.



Fuente: P. Lobo et al., PM emissions measurements of in-service commercial aircraft engines during the Delta-Atlanta Hartsfield Study (2015).

Este modelo de medición propone la construcción de una plataforma móvil de medición para dar una mayor libertad al equipo de trabajo en la toma de muestras en las inmediaciones del aeropuerto para considerar condiciones meteorológicas determinadas.

Para la medición de gases contaminantes se deben utilizar instrumentos de medición de captación rápida que permitan reproducir de la mejor forma posible el funcionamiento de los motores en las cuatro configuraciones típicas establecidas por la OACI; Ralentí (7% de la potencia total), aproximación (30% de la potencia total), ascenso (85% de la potencia total), despegue (100% de potencia). Es muy importante definir cuántos ciclos van a ser realizados y ver si existe la posibilidad de desarrollar esta medición utilizando el máximo de potencia de los motores sin efectos de desprendimiento de los instrumentos de medición.

Este proceso de medición se realizará para cada familia de motores y fuselajes, es decir, considerando la flota de los explotadores chilenos. Estas mediciones se podrán realizar en la toda la familia de aeronaves A319, A320, A321, Boeing 767 y Boeing 787.

3.4.1 Caso Chileno

LATAM Airlines: Toda la flota de aeronaves que posee LATAM utiliza el mismo montaje y configuración de motores, es decir, la familia de aeronaves A320-200 utiliza motores Pratt & Whitney (Tabla 1) modelo V2527E-A5, por lo tanto sólo bastará con el uso de una aeronave de esta familia para poder realizar la medición de gases contaminantes y establecer un **factor α** que permita estimar que todas las aeronaves pertenecientes a la misma familia con dicha configuración tienen un valor aproximado estándar de emisiones de gases contaminantes. Si este factor resulta ser considerable, debe explicitarse en el trabajo de medición y se debe asignar un promedio para estandarizar los datos. Por otro lado el equipo analista también deberá especificar un **valor β**, que corresponde a un error determinado por los valores de incertidumbre del análisis (uso, desgaste, factores externos).

Lo mismo ocurrirá para el caso de las aeronaves A319-100, A321-200 y Boeing 767-300ER. En la familia de las aeronaves Boeing 787-800 y 787-900 será distinto el método de medición dado que ambas aeronaves presentan distintas capacidades de performance de carga, para este caso es posible utilizar una aeronave de la familia y con la información de gases contaminantes obtenidas por la aeronave, generar un factor de diferencial de medición (α) según las diferencias de performance que presentan ambas familias de aeronaves, reduciendo de esta manera los costos de medición y de mantenimiento.

El equipo de medición deberá construir 5 sondas personalizadas que corresponden a aquellas que se deben utilizar en las aeronaves A319-100, A320-200, A321-200, Boeing 767-300ER y Boeing 787-800/900. Estas sondas deben tener una distancia determinada desde el suelo y distintas formas de fijación a la tobera de escape de acuerdo al modelo y tipo de motor. Además deberá contar con un instrumento de medición móvil que permita adecuarse a todas las configuraciones de montaje de los equipos de medición para obtener datos reales en terreno.

Sky Airline: La flota de Sky Airlines es bastante reducida y acotada, por lo tanto la metodología de medición será similar a la utilizada en el caso de LATAM. La flota actual de la aerolínea se compone de dos familias de aeronaves con el mismo montaje y fabricante de motores (Tabla 2). En ambas familias se tomaran mediciones diferentes debido a que las familias A319-100 y la familia A320-200 utilizan distintas configuraciones de motor, por lo tanto se requerirá una aeronave de cada familia para lograr obtener mediciones de gases contaminantes con su respectivo factor α comparativo entre aeronaves de la misma familia y configuración, como también se consideraran errores β de incertidumbre estimados en los procesos de medición.

En primer lugar el equipo de medición deberá construir dos sondas personalizadas que corresponderán a aquellas utilizadas en las aeronaves A319-100 y A320-200. Estas sondas deberán contar con especificaciones similares a las mencionadas en el caso LATAM, el posicionamiento de las sondas vendrá dado por las necesidades del explotador y por el equipo de medición. También deberán contar con un equipo móvil de medición que permita tomar medidas reales en terreno. Si ambas empresas trabajan como una alianza es posible ahorrar en costos de equipos y configuraciones, de esta forma es posible estandarizar el modo de posicionamiento de las sondas y el tipo de instrumentación (Reducción de costos de medición).

En segundo lugar se deberán analizar los parámetros de evaluación del modelo de medición, para ello se utilizará un software computacional que permite estudiar los datos obtenidos en el proceso de sondeo. Utilizando la información de performance y de operación reales, las emisiones de gases contaminantes pueden ser calculadas con programas computacionales como: Boeing Fuel Flow Method 2 o el método desarrollado por Alemania llamado Deutsches Zentrum für Luft – und Raumfahrt. (OACI, 2007 a, b). Estos programas pueden ser a elección del equipo de medición, explotadores, fabricantes, organismos normativos y/o autoridades. Es importante que la elección del software de análisis de datos sea certificada y aprobada por la OACI y las organizaciones regulatorias medio ambientales.
Para el análisis de datos, los parámetros mínimos de evaluación son los siguientes:

1. Medidas de Tiempos en Modo (TIM) para diferentes tipos de aeronaves/motores bajo diferentes condiciones de peso y meteorológicas.
2. Medidas de la activación del flujo reverso para diferentes tipos de aeronaves/motores en diferentes condiciones meteorológicas.
3. Medidas de variación de performance para diferentes tipos de aeronaves/motores bajo ciertas condiciones meteorológicas reinantes en el aeropuerto.
4. Infraestructura y límites del aeropuerto.
5. Configuraciones típicas o reales de potencia durante el uso de reversos.
6. Información real de las configuraciones de las aeronaves/motores.
7. Información real del flujo de combustible.
8. Frecuencia y tipos de prueba de motor.
9. Frecuencia de remolques operativos de aeronaves.
10. Velocidades reales a ralentí de distintos tipos de motores.
11. Configuraciones reales o típicas de potencia para el aterrizaje y despegue.
12. Perfiles de ascenso y aproximación.
13. Frecuencia de utilización de un solo motor para el taxeo (rodaje).
14. Índices de emisiones (EI) de gases contaminantes directos del motor de NO_X, SO_X, CO_2, H_2O, CO, HC y PM.

Una vez se obtengan los datos de emisiones de gases contaminantes de los motores de la flota real, y con la adquisición de los parámetros de Tiempo en Modo (TIM), flujos de combustible, se pueden calcular las emisiones del Ciclo LTO utilizando la ecuación número 2:

Ecuación 2: Emisiones de ciclo LTO

$$E_{ij} = \sum (TIM_{jk} \ x\ 60) \text{ x } (\frac{FF_{jk}}{1000}) \text{ x } (EI_{jk}) \text{ x } (NE_j)$$

Fuente: KURNIAWAN, Jermanto S.; KHARDI, Salah. *Comparison of methodologies estimating emissions of aircraft pollutants, environmental impact assessment around airports* (2011).

Las variables de la Ecuación 1 corresponden a:

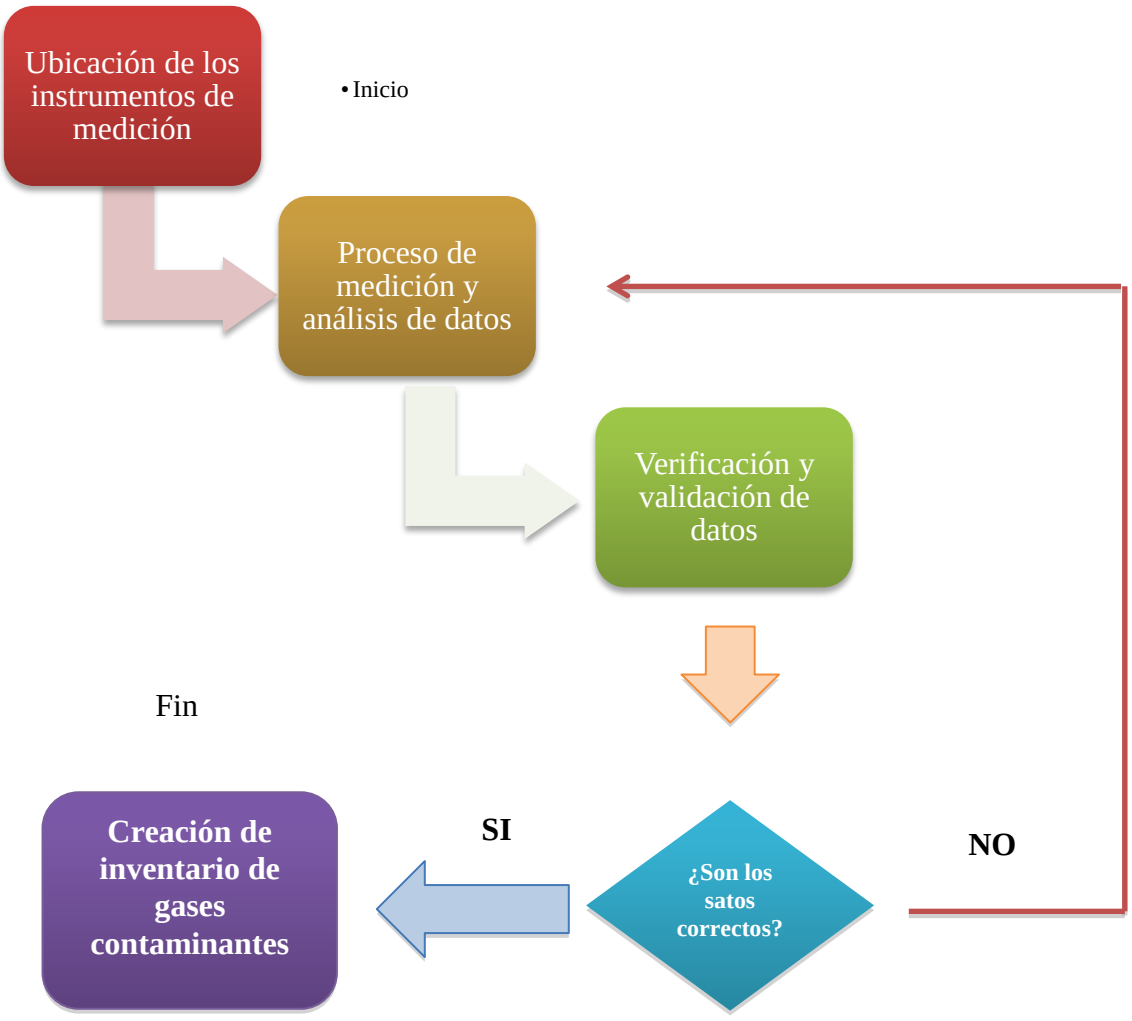
- E_{ij}= Total de emisiones de gases contaminantes en gramos i (ej.: CO, HC, PM, etc.) producidas por un tipo de aeronave j en un Ciclo LTO.
- TIM_{jk}= Tiempo en Modo basado en la performance operacional de una aeronave para un modo k (ej.: Ralentí, aproximación, ascenso y despegue), en minutos, para una aeronave tipo j.
- FF_{jk}= Flujo de combustible para un modo k, en kilogramos por segundo, por cada motor utilizado en tipo de aeronave j.
- EI_{jk}= Performance basado en los índices de emisión por contaminante i (ej.: NO_X, CO_2, CO, PM, etc.), en gramos por contaminante en un kilogramo de combustible en modo k por cada motor utilizado en un tipo de aeronave j.
- NE_j= Número de motores utilizados en la aeronave tipo j.

En tercer y último lugar se debe realizar un proceso de verificación y validación de los datos obtenidos de la fase de medición de gases contaminantes. En esta fase es importante realizar un análisis visual exhaustivo de los instrumentos de medición para verificar que no hayan sufrido daño o alteraciones que pudiesen afectar los resultados de la medición. En caso de que los datos arrojados sean incorrectos o poco fidedignos para su posterior estudio, se debe evaluar la posibilidad de repetir el proceso de medición corrigiendo los defectos encontrados en la examinación inicial.

Además, se sugiere comprobar si los datos procesados por el software computacional corresponden a los rangos esperados por el equipo de medición y establecer un **factor de error β** que permita considerar incertidumbres. Una solución forma de verificar si los datos obtenidos son correctos, es realizar gráficos de tendencia que ayuden a visualizar los puntos de conflicto, además se puede hacer uso de herramientas que permitan suavizar los datos de emisiones de gases contaminantes. En caso de que los datos se alejen demasiado del objetivo de medición, se sugiere evaluar la posibilidad de repetir el proceso de medición en tiempo real teniendo especial cuidado de los valores críticos en los resultados de emisiones.

Una vez que se hayan verificado las emisiones de gases contaminantes, se deben validar los resultados obtenidos con la base de datos de emisiones de la OACI (EDB) e inventarios de gases contaminantes obtenidos en investigaciones pasadas (P. Lobo et al., 2015). Esta información permitirá al equipo de trabajo determinar si los resultados obtenidos en el modelo de medición pueden ser una nueva referencia de inventario en el mundo o si los resultados confirman los datos correspondientes a inventarios ya investigados. Si se trata de un nuevo inventario referencial, éste deberá buscar sus bases en las condiciones meteorológicas reinantes de la localidad, configuraciones de potencia, características del aeropuerto, tipo de configuración de motores montados en el tipo de familia de aeronaves, tipo de combustible utilizado, peso de la aeronave, tipo de herramientas de medición y datos de performance operacionales.

Diagrama 3: Metodología de trabajo del modelo de medición de esta propuesta.



Los factores de error serán determinados por la edad de los motores y el estado operacional de la aeronave. Se deben determinar factores comparativos entre un motor nuevo y un motor usado para establecer un **factor β** de error, que será considerado en el proceso de medición. Este principio permitirá al equipo de trabajo determinar puntos claves en el proceso de mantenimiento para encontrar fallas asociadas a partes específicas del motor.

El modelo de medición se da por finalizado cuando los datos de emisiones contaminantes hayan sido analizados, verificados y validados por los explotadores, fabricantes y organismos encargados de regular y normar las emisiones de gases contaminantes en Chile.

3.5 Metodología y desarrollo de implementación del modelo de mantenimiento:

En primera instancia se debe tener una base de modelamiento de un mantenimiento predictivo. Esta base vendrá definida por las necesidades básicas y principales que requiera el explotador de las aeronaves. Los fundamentos de este modelo predictivo pueden ser confirmadas por investigaciones pasadas, las cuales que preestablecen que el exceso de emisiones de gases contaminantes está asociado al mal funcionamiento de componentes propios del motor (P. Lobo et al., 2015; Herndon et al., 2008). Un ejemplo claro fue observado en el estudio de P. Lobo en el año 2006 en el cual se observó que un motor modelo JT8D-219 montado en una aeronave MD88 de la aerolínea Delta reportó un exceso de emisiones de SO_X, este exceso se produjo por una falla en el sistema de inyección de combustible. Este fue el primer gran paso en el proceso de identificación y asociación entre las fallas de componentes del motor y las emisiones de gases contaminantes.

El objetivo de este modelo de mantenimiento propuesto es utilizar los datos obtenidos a partir del modelo de medición anteriormente mencionado, de esta forma reconocer si las fallas sistemáticas del motor tienen o no alguna relación con las fallas presentadas. En caso positivo, se deben establecer asociaciones claras entre la "posible falla" encontrada en componentes del motor con la cantidad de emisiones de gases contaminantes expulsados por los motores. En caso contrario, se debe diagnosticar el estado de los componentes del motor y determinar el factor desencadenante en el aumento de emisiones. Además de verificar si este componente fue la causa de exceso, se entregarán soluciones de reducción de gases en el mantenimiento de línea entre la aerolínea y los principales fabricantes de motores.

Los factores a considerar en el modelo de mantenimiento son:

1. Conocimiento de la relación existente entre emisiones de gases contaminantes y los componentes del motor.

2. Cumplimiento de los niveles de gases contaminantes exigidos por los organismos normativos.
3. Conocimiento de los efectos de la temperatura, presión y velocidad del flujo de aire en los procesos de liberación de gases contaminantes.
4. Determinación de la fase del Ciclo LTO más crítica en la emisión de gases contaminantes según la configuración de motores y tipo de aeronave.
5. Cantidad de personal capacitado para realizar y analizar este mantenimiento predictivo.

Este modelo de mantenimiento predictivo se compone de tres fases cruciales que permitirán al modelo tomar medidas correctivas derivadas del modelo de medición establecido en esta propuesta, representados en el Diagrama 4.

Diagrama 4: Metodología de trabajo mediante 3 pasos del modelo de mantenimiento de esta propuesta.

1. **Identificación**

El modelo de mantenimiento predictivo suele ser subjetivo en la mayoría de los casos, pero en este caso particular se cuenta con información real y actual sobre emisiones directas desde la fuente, por lo tanto, este mantenimiento será objetivo gracias al uso de un espectrómetro que ayudará al personal a identificar posibles fallas en los procesos de combustión del combustible a lo largo del motor Turbofan. De esta forma, se permitirá asociar si alguna falla en los componentes del motor tienen algún efecto en la cantidad de gases contaminantes emitidos, por lo tanto, en esta fase es donde se deben establecer algunas relaciones entre:

a) Cantidad de emisiones de gases contaminantes emitidos – Fallas de componentes del motor.
b) Edad del motor – Cantidad de fallas.
c) Efectos de la Temperatura, Presión y Velocidad del flujo de aire – Cantidad de emisiones de gases contaminantes emitidos.
d) Hallazgo de fuentes de contaminación – Tipo de gas contaminante emitido.

El proceso de identificación de fallas debe guiarse utilizando el inventario de gases contaminantes. Además en este Trabajo de Memoria se han detallado relaciones que existen entre las fases de vuelo una aeronave y las emisiones de gases contaminantes[44], que pueden ser de gran ayuda en el hallazgo de fallas en los componentes del motor.

Una vez que se hayan relacionado estas variables, es necesario incorporarlas en el modelo de mantenimiento preventivo utilizado por los explotadores, de manera de expandir los horizontes de revisión de componentes en los motores de toda la flota. De la misma forma, se sugiere incorporar esta información en el inventario de emisiones de gases contaminantes que permitirá a la industria aeronáutica del mundo tener un mayor conocimiento de las formas de emisión de los gases contaminantes.

[44] PEDRO FERNANDEZ DIEZ. *Contaminación por Motores de Turbinas a Gas* (2009).

2. **Control de emisiones**

Es en esta etapa del modelo se realiza el mantenimiento preventivo de los motores que utiliza como referencia los niveles de gases contaminantes permisibles por los organismos normativos y reguladores chilenos e internacionales. El plan de mantenimiento predictivo será determinado por el equipo de medición y el operador chileno Este plan se debe adecuar a las especificaciones que entrega el fabricante de los motores y los límites especificados de emisiones. Los métodos de mantenimiento correctivo se dejan en manos del equipo de mantenimiento de la aerolínea en conjunto con los fabricantes de motores que aún tienen responsabilidad según los contratos de compra. Ellos deben encargarse de establecer y confirmar las relaciones necesarias mencionadas en está la primera etapa.

En primera instancia se deben tomar las medidas correctivas en los niveles de emisión de los gases contaminantes de los motores de las aeronaves. El método de comprobación que se utilizará en esta etapa se basará en la comparación de los datos obtenidos en el modelo de medición con los niveles permitidos de emisiones de gases contaminantes establecidos por la OACI (EDB), DGAC y el Ministerio del Medio Ambiente Chileno. Para ello se utilizará el inventario obtenido del modelo de medición de ambos explotadores chilenos, se identificará la fase de vuelo de un Ciclo LTO que resulta ser el más contaminante y con la ayuda de las especificaciones del fabricante de los motores, se verificará si los componentes del motor están o no en óptimas condiciones de operación.

Además, si se encuentran valores de emisiones de gases contaminantes que se escapan críticamente de los límites permisibles, se sugiere implementar algunas de las medidas preventivas y correctivas como:

I. Realizar mantenimiento correctivo de los componentes del motor que presentan fallas según el tipo de gas contaminante emitido.
II. Examinación de condiciones de performance y operación de los motores.

III. Comprobación del tipo y calidad del combustible utilizado.

IV. Revisión de las condiciones operacionales y meteorológicas del lugar que se realizó la medición.

V. Búsqueda de factores externos que pueden alterar los procesos de medición.

VI. Verificación de obstrucciones del sistema de flujo de combustible – aceite.

Si en el proceso de identificación, no se encontraron fallas en los componentes del motor, es necesario hacer una examinación exhaustiva interna del motor para identificar presencia de sedimentos, fugas, desgaste de componentes, daños parciales, estado de los filtros de combustible y aceite en conjunto de otros componentes más para determinar si estas emisiones pudiesen ser producidas por factores externos. Todo esto se realiza con el fin de descartar y corregir errores de medición.

3. **Certificación y aprobación**

La última fase contempla una verificación final de los rangos de emisión de gases contaminantes emitidos por los motores de las aeronaves,. Se realiza una medición final en la cual se comprueba si las medidas correctivas y preventivas de mantenimiento han logrado generar cambios en los niveles emitidos de gases contaminantes. Esta medición dependerá de los requerimientos específicos de los explotadores.

Si las aeronaves cumplen con los rangos establecidos por la normativa chilena e internacional, se procede a certificar a las aeronaves como “verdes”, es decir, estas aeronaves han sido exhaustivamente investigadas y analizadas de acuerdo al tipo de configuración de motores determinada.

El proceso de certificación lo llevaría a cabo la DGAC en conjunto con el Ministerio del Medio Ambiente. A cada aeronave aprobada se le otorgará un “Sello Verde”, el cual acredita que los explotadores realizaron las mediciones de emisiones de gases contaminantes de la flota y cumplen con los estándares nacionales e internacionales de emisión de gases contaminantes. Así se confirma que las operaciones de flota de los

explotadores chilenos no son contribuyentes significativos en la formación de gases contaminantes del tipo invernadero.

Esta certificación tendría una validez acordada entre los organismos reguladores y las aerolíneas chilenas por un período mínimo de un año. Lo que dependería de distintos factores:

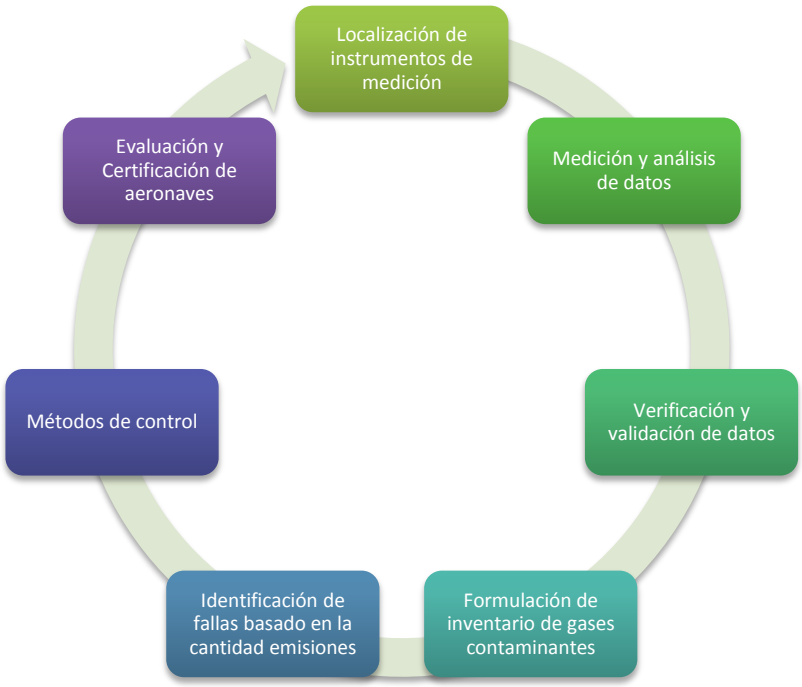
- Ciclos de mantenimiento realizados por los explotadores chilenos.
- Cambios en la normativa medio ambiental en Chile y el mundo.
- Necesidad de los organismos reguladores y normativos chilenos (DGAC y MMA).
- Adquisición de nuevas aeronaves en la flota.
- Cambios en la configuración de los motores y/o eventual overhaul de motores.

Sería de gran relevancia que Chile adopte duras medidas medio ambientales para combatir el cambio climático. Se debería dejar establecido que el incumplimiento de normas podrían significar una sanción monetaria a las empresas aeronáuticas chilenas, pudiendo incluso limitar la operación de las aeronaves hacia el exterior.

3.6 Convergencia de los modelos de medición y mantenimiento

Para que los modelos cumplan con las especificaciones exigidas por la CAEP, éstos deben ser capaces de comunicarse entre ellos y ayudarse en el proceso de evaluación e identificación de la información.

Diagrama 4: Metodología de trabajo de los modelos propuestos. El proceso de alimentación de información es cíclico y repetitivo entre ambos modelos.



Fuente: Elaboración propia.

Ambos modelos trabajaran de forma conjunta en todo el proceso de medición y mantenimiento. Siempre que se necesiten datos adicionales en el modelo de mantenimiento, se puede contar con el uso de las herramientas del modelo de medición para obtenerlas,. Lo mismo ocurre para el modelo de mantenimiento, este proceso de retroalimentación da consistencia y redundancia al desarrollo de ambos modelos.

CAPITULO IV: IMPACTOS ECONÓMICOS, SOCIALES Y POLÍTICOS GENERADOS POR LA PROPUESTA.

4.1 Impacto político

4.1.1 Situación chilena

Al parecer de este memorista, las políticas públicas en Chile están cambiando su enfoque con respecto a los efectos de los gases contaminantes en el medio ambiente. Si bien Chile durante este último tiempo ha intentado adoptar medidas medio ambientales similares a las presentes en Europa y Estados Unidos, los organismos fiscalizadores que verifican el cumplimiento de la legislación y normativa en materia medio ambiental no están realizando un buen trabajo de identificación y monitoreo de los gases contaminantes. El Ministerio de Medio Ambiente reconoce en su artículo n° 52016 Capítulo I, que aún no existen mediciones de material particulado fino en todo el país y que como método de estimación utilizan las mediciones de material particulado grueso para definir la fracción más fina en comunas donde no existe información.

La gran diferencia que existe entre las políticas exteriores y la Chilena radica en que los países más desarrollados invierten grandes recursos en materias medio ambientales y la legislación es mucho más dura para los emisores de gases contaminantes. Este Trabajo de Memoria no busca en lo absoluto emitir juicios acerca de la política medio ambiental chilena, sino que busca hacer un llamado de conciencia acerca de la necesidad de invertir más en materias medio ambientales.

En la actualidad el organismo que se encarga de monitorear los niveles de gases contaminantes en el aire en las localidades del aeropuerto es la DGAC. Todos los años el Ministerio les exige presentar un plan de monitoreo que permita evaluar si el aeropuerto es o no un contribuyente de emisiones de gases contaminantes de efecto invernadero en el aire. Parece importante que en este contexto, las empresas y los organismos reguladores/normativos formen alianzas de trabajo para poder mejorar las condiciones ambientales existentes en la actualidad.

Si bien, Chile no es un ejemplo demostrativo en materia de emisiones de gases contaminantes (en comparación con otros países densamente poblados), sin duda, las aerolíneas chilenas tienen una participación significativa en países de Latinoamérica con la presencia operativa de LATAM Airlines. Es por ello que sería conveniente que las autoridades medio ambientales chilenas tomen medidas precautorias en cuanto a la correcta regulación de las emisiones, con el fin de evitar conflictos políticos y sanitarios en materia medio ambiental con otros países latinoamericanos, evitando así lo sucedido entre Estados Unidos y la Unión Europea el año 2008.

Por otro lado, los beneficios cualitativos y cuantitativos que se generan mediante una norma medioambiental suelen entregar resultados positivos luego de un largo periodo de tiempo. Para ello se deben realizar inversiones adicionales para sostener y medir constantemente la calidad del aire en el País. La metodología normativa que pareciera más conveniente en la actualidad es la del concepto “el que contamina, paga” siendo esta modalidad fuente de financiamiento de aquellas tareas necesarias para monitoreo.

4.1.2 Contexto Internacional

P.E. Sikorska, (Master en Derecho Aeronáutico de Universidad de Southampton) 2016[45] establece en un artículo de prensa que a la fecha no existe ninguna ley internacional unificadora que regule las emisiones de gases contaminantes tipo invernadero provenientes de la aviación o las emisiones de carbón emergentes de sectores aeroespaciales, a pesar de que existe evidencia de los efectos adversos que estas emisiones provocan como precursores del cambio climático. La política y economía previenen leyes duras de regulación, en muchas ocasiones los intereses políticos y preferencias están por sobre la creación de leyes. La creación de leyes duras no garantiza que el estado se haga responsable de ellas, incluso si se crea una convención internacional comprensiva, nunca se llegaría a algún acuerdo debido a la oposición de varios países.

La creación de leyes internacionales unificadoras parece casi imposible en este escenario; la única opción que se puede considerar como viable es la creación de leyes blandas. Paradójicamente, la efectividad de aceptación de estas leyes blandas es bastante alta debido a la falta de sanciones que se imponen. Una vez que se aceptan y se crean estas leyes blandas, la presión informal de la opinión pública emerge para ayudar a potenciarla.

Con respecto a si se puede armonizar o unificar las emisiones de la industria aeronáutica, al parecer, como antes dicho, no se podría lograr en un nivel internacional con tan sólo una relevante ley blanda creada por la OACI. Una ley blanda nunca podrá ser reemplazada por una ley internacional unificadora, la ley blanda tan sólo es un medio para restaurar la cooperación internacional y para llamar la atención de la comunidad internacional sobre la seriedad del problema que están generando las emisiones de gases contaminantes y carbón.

[45] SIKORSKA, Paulina E. *The need for legal regulation of global emissions from the aviation industry in the context of emerging aerospace vehicles* (2015).

Sikorska cree que la única solución que existe para lograr una fuerte alianza internacional se debe basar en la creación de leyes unificadoras de duro carácter. La abogada no es la única experta que piensa que se deben tomar medidas más rígidas en este ámbito; la UE también está al tanto de la situación, plantea que las leyes ya no representan un medio de control y la forma de atacar más eficientemente a la industria es mediante el uso de técnicas de mercadeo.

4.1.3 Ventajas y desventajas políticas que pudiese generar en Chile esta propuesta de modelos:

Ventajas	Desventajas
Creación de alianzas de trabajo para combatir las emisiones de gases contaminantes en Chile entre los organismos reguladores y los principales explotadores aeronáuticos.	Se deben realizar cambios en la normativa actual para la generación de nuevas leyes restrictivas. Importante mencionar que, este proceso toma mucho tiempo y a veces las leyes se dan por sentado y se rechazan por omisión.
La propuesta es útil para estandarizar los niveles permitidos de emisiones de gases contaminantes generados por los motores de las aeronaves en Chile.	Pueden generarse incongruencias en los procesos de certificación, proceso en el cual se les pueden dar preferencia a los intereses políticos y/o económicos.
Desarrollo del primer inventario de emisiones de gases contaminantes en Latino América. Este inventario servirá como referencia para otros estudios futuros y ayudará a expandir los horizontes de medición..	Posible rechazo de los datos obtenidos en el proceso de medición debido al uso de metodologías distintas a las utilizadas por la DGAC y el Ministerio de Medio Ambiente chileno.
Incentivos gubernamentales a generar licitaciones relacionadas con la mitigación de emisiones de gases contaminantes en Chile (Mayores Inversiones destinadas a investigación de emisiones en la industria aeronáutica).	Las opciones de normas o regulaciones tanto gubernamentales como empresariales, suelen entregar beneficios a largo plazo. Los beneficios son categorizados como cualitativos y es difícil establecer un valor cuantitativo a estos.
Chile puede convertirse en un buen referente político y empresarial regional en la regulación de emisiones de gases contaminantes en la industria aeronáutica Latinoamericana.	Desincentivo privado a invertir en el país en materia medioambiental. Las empresas no ven resultados cuantitativos inmediatos en el proceso de control de gases contaminantes y delegan esta responsabilidad al gobierno.

4.2 Impacto Social

4.2.1 Situación Chilena

El impacto social que busca generar este Trabajo de Memoria, es incentivar la construcción de una Responsabilidad Social Empresarial (RSE) medioambiental, siendo los principales operadores de aeronaves en Chile los responsables de mejorar su relación con sus clientes y organizaciones medioambientales normativas nacionales e internacionales.

Otro de los impactos sociales que se plantea con la implementación de estos modelos de regulación, sería la creación de políticas públicas para incentivar y educar a la población chilena en materia medioambiental, enseñando mediante buenos ejemplos empresariales y del gobierno el interés del país de mejorar la calidad de vida de los chilenos.

Además, Debido a la falta de RSE medioambiental en las empresas aeronáuticas chilenas, el pasajero no ve reflejado el impacto ambiental que genera el uso de este medio de transporte, sino que privilegia la duración y precio de su viaje por sobre el daño que éste genere para su salud, lo que refleja una falta de educación cívica en materia medio ambiental y co-responsabilidad.

Por otro lado, los trabajos de expansión del aeropuerto AMB en Santiago de Chile en el año 2017 podrían empeorar la calidad del aire en las inmediaciones del aeropuerto, lo que, trae consigo un aumento de tráfico de aeronaves en el terminal aeroportuario que pudiesen desencadenar un aumento de gases del tipo invernadero. Por lo tanto, se deberían realizar mediciones e inventariar la cantidad de gases contaminantes en el aire durante este periodo clave de tiempo, que permitan determinar si trabajos futuros en el aeropuerto, aumentos de tráfico aéreo en tierra y aumento operacional de flota pueden significar un mayor riesgo para la salud de los chilenos.

El impacto social que generaría el uso de estos modelos, entregaría a Chile una ventaja comparativa internacional en materia medioambiental, otorgándole de esta manera el prestigio de ser uno de los pioneros en normar y regular las emisiones de gases contaminantes de la industria aeronáutica en Latinoamérica. El rol empresarial de la aerolínea tomaría más fuerza y permitiría dar una identidad propia con ventajas competitivas y estratégicas con respecto al resto.

4.2.2 Contexto Internacional

La UE utiliza el concepto de Responsabilidad Social Empresarial para referirse a una **integración voluntaria**, por parte de las empresas, en los intereses sociales y medioambientales al operar comercialmente y al interactuar con sus contrapartes Stakeholders); teniendo en cuenta también los aspectos económicos – financieros.

La sociedad europea parece llevar la delantera en la inversión de recursos gubernamentales en el bienestar de su población. La educación concientiza desde muy pequeños a los estudiantes a preservar el medioambiente y a generar recursos naturales que reduzcan de manera definitoria el impacto medioambiental. Los habitantes del antiguo continente parecen tener un rol activo en la toma de decisiones políticas y económicas de sus países, llegando a medidas que buscan atacar a la industria aeronáutica utilizando el concepto “el que contamina, paga”.

Universidades extranjeras como la Universidad de Bremen (Alemania) y la Universidad Politécnica de Madrid(España), invierten en materia de investigación e innovan en nuevos proyectos que buscan reducir la cantidad de emisiones de gases contaminantes en los aeropuertos. Delos Aerospace crea el primer sistema eléctrico de taxeo conocido como Electric Green Taxiing System (EGTS) por sus siglas en inglés. Este sistema fue inventado el año 2003 y empresas como Honeywell Aerospace y Safran han iniciado las primeras pruebas con aerolíneas europeas como Airfrance y EasyJet entregando

excelentes resultados. Se espera que este proyecto de inicio el año 2018 en los principales aeropuertos europeos (Luxemburgo y Frankfurt)[46].

El impacto internacional que busca generar la implementación de los modelos de medición y mantención presentados, es poder permitir a Chile formar parte de la comunidad medioambiental internacional y como un buen referente en la tarea de contrarrestar el efecto de los gases de tipo invernadero.

4.2.3 Ventajas y desventajas sociales que pudiese generar en Chile esta propuesta de modelos:

Ventajas	Desventajas
Despierta el interés social empresarial y se contribuye en la disminución de emisiones de gases contaminantes.	Exigencias sociales extremas en el control y mitigación de los gases del tipo invernadero.
Mejora el bienestar y salud de la población, disminuyendo las cantidades de enfermedades provocadas por la exposición a estos gases contaminantes.	El beneficio social medio ambiental se verá reflejado en un período de largo plazo, lo que puede generar inconsistencias en el cumplimiento de la responsabilidad social-empresarial medio ambiental.
Mejora la calidad del aire local del aeropuerto Arturo Merino Benítez (AMB). Además de mejorar el ecosistema y productividad de los recursos naturales del país	Aumentan los costos por eliminación o reducción de gases contaminantes y residuos. Se puede traducir en un desincentivo social a invertir en materia medioambiental
Promover y concientizar a la población en materia medioambiental. La población se sentirá más identificada con las empresas aeronáuticas y les otorgarán un valor agregado.	Si la sociedad no forma parte de un rol activo en la toma de decisiones medioambientales, las organizaciones normativas y las empresas pueden pasar por encima las exigencias sociales del país.
Mejora el comportamiento de las organizaciones y empresas para la creación de nuevos proyectos de mejoras ambientales y aumenta la producción la industria aeronáutica. Las relaciones internacionales mejoran, por lo tanto, se incrementan las opciones de cooperación internacional.	Se deben implementar nuevos lineamientos sociales que generen interés en los pasajeros. Para ello se deben crear estrategias comerciales de forma que el pasajero encuentre su identidad reflejada en la aerolínea.

[46] GUO, Rui; ZHANG, Yu; WANG, Qing. Comparison of emerging ground propulsion systems for electrified aircraft taxi operations (2014).

4.3 Impacto Económico

4.3.1 Metodología de evaluación Económica

A diferencia de los impactos políticos y sociales que pudiesen provocar en la industria la implementación de esta propuesta de modelos, el impacto económico considera los costos y beneficios del mismo. Una vez que se hayan estimado estas variables asociadas a los impactos producidos por distintas opciones regulatorias, las estimaciones se deben integrar de manera de obtener indicadores que permitan a los reguladores y explotadores tomar decisiones respecto de la conveniencia o no de aplicar una determinada norma o plan según el modelo utilizado.

La razón por el cual se opta a utilizar el enfoque de costo/beneficio es:

a. Se puede valorar en gran parte los beneficios,
b. Las opciones que se están comparando generan beneficios de distinta naturaleza, y por lo tanto, su elección no puede depender sólo de los costos,
c. El beneficio suele ser heterogéneo, por lo tanto, se hace necesario llevarlo a una unidad monetaria.

Independientemente del enfoque que se utilice para cuantificar el impacto económico, cuando los beneficios no logran poder ser valorados debido a la falta de información o al uso de metodologías inadecuadas, éstos deben ser en gran medida identificados y en lo posible ser cuantificados. De esta forma se entrega información al regulador y a los explotadores para optar a la mejor decisión respecto al modelo a utilizar o normas a seguir para determinar aquellas áreas que requieren mayor esfuerzo por mejorar la entrega de información o realizar estudios más profundos.

Para la evaluación económica también es muy importante considerar la agregación de costos y beneficios; como lo son los costos de inversión, operación y mantención que genera la utilización del modelo. Cada una de estas variables debiesen ser llevadas a unidades comunes mediante un proceso de agregación, es decir:

- Presentar los costos en términos reales y en forma de flujo anual, esto permite diferencia qué costos corresponden a los de inversión, operación y mantención.
- Se sugiere llevar los costos a valor presente utilizando tasas de descuento apropiadas.
- Los costos importantes sin cuantificar deben ser presentados según su relevancia.
- Se deben presentar los costos de distinta categoría en forma separada.

Con respecto a los beneficios, éstos deberán ser agregados apropiadamente cuando sea posible, algunas recomendaciones para evaluarlos son:

- Los beneficios podrán ser presentados en forma de flujos anuales para así poder ser fácilmente identificables y comparables con los costos. Se puede optar a llevar estos beneficios a valor presente.
- Los beneficios cualitativos deberán en lo posible ser presentados de manera cuantitativa dejando en lo posible la implicancia e importancia de cada uno de ellos.
- Categorizar los beneficios separadamente; a pesar de que estos pueden ser cuantificables, las incertidumbres asociadas no son iguales para todos ellos.
- Presentar beneficios de acuerdo al perfil temporal en el que ocurren.

4.3.2 Indicadores económicos

Para el proyecto de evaluación económica, se deben seleccionar algunos indicadores económicos que permitan entregar información certera con respecto a los costos y beneficios económicos asociados al uso de los modelos de medición y mantención. Además, estos indicadores permiten obtener información sobre la rentabilidad social del proyecto o con respecto al costo/efectividad. Se recomienda utilizar 4 indicadores utilizando el enfoque costo/beneficio:

1. **Valor Presente Neto (VPN o VAN):** Corresponde a la sumatoria total de los beneficios sociales netos del proyecto (Beneficio – Costos), actualizados a una tasa de descuento relevante. VPN Positivo → Socialmente rentable, VPN Negativo → No es socialmente rentable.
2. **Tasa Interna de Retorno (TIR):** Es aquella tasa para el cual el VPN es cero. Cuando la tasa interna de retorno es mayor a la tasa de descuento conviene realizar la inversión. Este indicador se utiliza para priorizar u ordenar proyectos de inversión social. El uso de este indicador puede traer consigo algunos problemas, como:
    a) Puede existir más de una TIR.
    b) Conduce a la entrega de resultados contradictorios al momento de ser utilizada para comparar distintas opciones.[47]
3. **IVAN:** Es la relación entre el VPN y la inversión. Este indicador muestra los beneficios sociales netos que se obtienen por peso invertido y es utilizado para ordenar los proyectos de inversión. Es una herramienta útil para analizar distintos proyectos que tienen distintos montos de inversión cuando se raciona el financiamiento.
4. **Período de recuperación de la inversión:** Corresponde al indicador del tiempo que se requiere para recuperar el capital invertido. Esta herramienta es muy útil para la toma de decisiones, comparación de proyectos con beneficios distantes entre sí, con otros que con igual inversión generan beneficios más inmediatos.

[47] Fontaine, El rol macroeconómico del Estado (1983)

Aquellos costos o beneficios que no se puedan cuantificar o valorar, deben ser incluidos y analizados en base a algunos indicadores de análisis cualitativo, como:

- Magnitud del efecto
- Temporalidad del efecto (Inmediato o de largo plazo)
- Probabilidad de exposición y daño
- Irreversibilidad del impacto

Además del uso de estos indicadores, el organismo evaluador debe considerar dos factores fundamentales: El horizonte de evaluación y el uso de una tasa de descuento apropiada.

La elección del período de análisis debe tomar en cuenta la vida útil del proyecto regulatorio o la vida útil de los modelos de este trabajo. Los proyectos medioambientales generalmente tienen un horizonte de largo plazo, debido a que las medidas implementadas ven sus efectos después de un tiempo significativo (10 – 20 años). Por otro lado los beneficios al ecosistema o salud de la población pueden tener un largo período de maduración. Sin embargo, si se utiliza una tasa de descuento alta, los beneficios tendrán un VPN bajo y/o casi nulo, por lo tanto, no tendría sentido realizar un análisis con un horizonte más allá de 20 o 25 años.

Para el horizonte de evaluación se recomienda al organismo evaluador utilizar el siguiente criterio:

a) Identificar las inversiones más importantes y su respectiva duración en el proyecto. Generalmente la inversión inicial corresponde a la compra de instrumentos de medición y control, se sugiere utilizar este período de duración como horizonte de evaluación.
b) Si se utiliza el criterio anterior y en la fecha de término del período de evaluación existen costos y beneficios relacionados con el proyecto, éstos deben estimarse, actualizarse e incorporarse como un valor residual de la inversión.

Con respecto a la elección de la mejor tasa de descuento, se sugieren tomar en cuenta los siguientes factores:

a) Utilizar una tasa de descuento que sea utilizada frecuentemente para la evaluación de proyectos públicos (Licitaciones) con el objetivo de que sean comparables.
b) Si existen factores de incertidumbre, se recomienda que estos sean evaluados de manera separada, realizando un análisis de incertidumbre para cada uno de ellos. Por lo tanto, se recomienda que la tasa de descuento no se ajuste por factores de incertidumbre.
c) Si existen beneficios en períodos muy lejanos de tiempo o cuando se prevé que la factibilidad económica del proyecto es dependiente de la tasa de descuento, se recomienda utilizar tasas de descuento del orden del 2% al 7% (Porcentaje de tasas de descuento utilizadas en proyectos ambientales en Estados Unidos). Si en este caso el proyecto resulta ser dependiente de la tasa de descuento, se debe tomar en cuenta este factor de decisión y se debe dejar expresado explícitamente la tasa utilizada.

En las evaluaciones económicas de normativas medioambientales, los factores de incertidumbre vienen asociados a la estimación de los beneficios. Sin embargo, algunas variables económicas como las predicciones de precios y cambios tecnológicos pueden ser altamente inciertas.

Las incertidumbres no debiesen limitar el análisis económico sino que estas debieran ser incorporadas. Para ello se debe reunir la mejor información posible y realizar una evaluación imparcial de los datos cualitativos y cuantitativos para tomar la mejor decisión.

Para tomar en cuenta algunas incertidumbres se recomienda lo siguiente:

- Identificar las principales fuentes de incertidumbre.
- Asociar las variables a una distribución probabilística.
- Utilizar la distribución de probabilidades para reestimar los resultados y que estas puedan propagarse en los modelos.
- El análisis debe permitir estimar algún grado de importancia de una variable en los resultados del modelo.
- Cuando no sea posible distribuir las variables en distribuciones de probabilidad, se puede recurrir a sensibilizar las variables y parámetros.
- Se recomienda utilizar enfoques que permitan analizar los beneficios obtenidos que permitan disminuir la incertidumbre de información. De esta forma es posible determinar si dicha incertidumbre es importante o no, y decidir si se asignan recursos a dicha información.

Es importante la consideración de estas recomendaciones al realizar un estudio económico del impacto de este Trabajo de Memoria, si bien el objetivo de este trabajo no es el de evaluar la viabilidad económica del proyecto, se deja a libre discusión y análisis el tipo de evaluación económica a utilizar para la realización del proyecto. El estudio económico queda abierto como un tema a resolver para futuros trabajos de titulación.

4.3.3 Costos y beneficios económicos que pudiese generar en Chile esta propuesta de modelos (Cuantitativo y Cualitativo)

Costos		Beneficios	
Descripción	Costo US	Descripción	Beneficio US
Compra equipos de medición de gases y soportes (Sable Systems CA - 10 y Cambustion DMS500).	Costo Estimado: 50.000 US	Desarrollo de estrategias de competitividad y fortalecimiento del mercado aéreo internacional.	Beneficio Estimado: 100.000 US
Capacitación de personal para uso de instrumentación de medición y calibración de equipos. Curso 3 horas por 2 semanas para 200 trabajadores.	Costo Estimado: 20.200 US	Mejoras en los procesos de medición gracias a personal capacitado. Se ven incrementados los procesos normativos medioambientales.	Beneficio Estimado: 30.000 US
Costos de análisis de agentes contaminantes y pago de licencias comerciales por el uso de softwares computacionales.	Costo Estimado: 15.000 US	Fidelización de clientes e integración de factores ambientales en la cadena de valor de las aerolíneas (10 años).	Beneficio Estimado: 40.000 US
Costos de certificación de emisiones (2 Meses).	Costo Estimado: 4.000 US	Formación de nuevas alianzas corporativas bajo los mismos criterios de evaluación medioambiental.	Beneficio Estimado: 80.000 US
Costos de auditoria que miden el progreso de las implementaciones cada 6 meses.	Costo Estimado: 3.500 US	Identificación del cliente con las aerolíneas nacionales.	Beneficio Estimado: 10 US por pasajero
Costos de mantenimiento preventivo y correctivo encontrados a partir del análisis.	Costo Estimado: 300.000 US	Mejoras e innovación en los procesos de mantención e identificación de fallas de los motores.	Beneficio Estimado: 500.000 US
Costos de Diagnóstico general con respecto a los niveles de gases contaminantes en el aire (10 - 20 años).	Costo estimado: 70.000 US por año	Disminución de gases contaminantes en el aire, que aumentan la calidad de vida de los chilenos (10 - 20 años).	Beneficio Estimado: 200.000 US por año y más

Lo escenarios considerados en los costos y beneficios de esta propuesta son optimistas y el dólar observado para el análisis de costos y beneficios estimados corresponde a $ 663,73 CLP.

CONCLUSIÓN

En este extenso Trabajo de Memoria se ha consultado 152 fuentes confiables extraídas de revistas, estudios y libros aeronáuticos. De esta forma se da cumplimiento a uno de los objetivos específicos de esta memoria, es decir, a la recopilación de estudios que determinan el comportamiento de los gases de efecto invernadero en la industria aeronáutica. Este compendio podría ser útil para la creación del inventario. Además, se pueden caracterizar y catalogar certeramente los gases según su naturaleza y comportamiento en el aire.

Por otro lado, de este Trabajo de Memoria es posible concluir que las fases del Ciclo LTO más críticas en emisiones de gases contaminantes corresponden a aquellas que requieren mayor esfuerzo de los motores, es decir, las fases de despegue y ascenso. Mientras que en tierra, las fases que más contaminan corresponden al taxeo, puesta en marcha y aquellas que requieren bajo empuje (Ralentí).

Con respecto a la naturaleza de los gases; los gases contaminantes que se emiten en las fases de despegue corresponden a CO, NO_X y HC. De estos gases, el que se emite en mayor proporción es el NO_X, llegando a alcanzar hasta el 50% del total de emisiones en el ascenso. Por el contrario, en operaciones terrestres, los gases emitidos corresponden a Material Particulado (PM) y Monóxido de carbono (CO). En cuanto a la fase ralentí, el que se emite en mayor proporción es el CO, alcanzando hasta un 85% del total de gases emitidos en tierra.

A juicio de este memorista, es urgente la necesidad de crear conciencia medioambiental en la sociedad chilena. El gobierno juega un papel fundamental en el desarrollo de nuevas campañas y normas medioambientales que promuevan, entre otros, el reciclaje, el cuidado de los recursos naturales no renovables, la disminución en la cantidad de residuos expulsados en procesos de producción y reducir las emisiones de gases del tipo invernadero.

Además sería relevante que la sociedad tomara un rol más activo en la toma de decisiones para mitigar las emisiones de las principales fuentes de contaminación en el país, creándose así una conciencia ciudadana ambientalista. De esta forma las decisiones medioambientales no serían unilaterales y la población chilena se sentiría más representada con las medidas tomadas a manos de privados y del gobierno.

A lo largo del desarrollo de este Trabajo de Memoria se logran detectar distintas falencias en el sistema aeronáutico chileno. Una en particular, que más llama la atención, es la aparente falta de coordinación existente entre los organismos normativos gubernamentales con los explotadores aeronáuticos chilenos (DGAC y MMA – Aerolíneas chilenas). La información sobre la naturaleza y cantidad de los gases contaminantes presentes en el aeropuerto AMB se encuentra a libre disposición de los explotadores aeronáuticos chilenos, pero no se encontró evidencia de si se realizan alianzas de trabajo entre los operadores y organismos reguladores para mitigar la presencia de estos gases.

Los explotadores chilenos argumentan que su flota es relativamente nueva y los motores utilizados en sus aeronaves cumplen con las normas de emisión establecidas por la OACI y el Ministerio del Medio Ambiente de Chile. Sobre esta teoría no parece existir ningún fundamento que confirme la veracidad de estos hechos, por lo tanto, se requiere con extrema importancia de un sistema de validación que logre confirmar lo mencionado por las aerolíneas chilenas.

La implementación de los dos modelos planteados en mi propuesta, tanto de medición como de mantenimiento, podría ser una buena oportunidad para fortalecer y unificar el trabajo entre los organismos reguladores y las aerolíneas, además de identificar si los operadores chilenos son o no responsables del aumento de gases del tipo invernadero en el territorio y así poder tomar medidas correctivas a tiempo para controlar de forma certera y precisa las emisiones de los gases contaminantes de la industria.

La certificación “verde” de las aeronaves potenciaría a la industria aeronáutica a desarrollar una responsabilidad social empresarial con sus clientes y a mejorar las relaciones internacionales. A través de la realización de inventarios de emisiones de gases

contaminantes, las empresas podrían establecer fallas operacionales propias del funcionamiento de los motores, como también innovar en nuevas metodologías de mantenimiento que puedan disminuir los costos operacionales y aumentar los beneficios netos.

La posibilidad de utilizar la propuesta de los modelos de medición y mantenimiento están estrictamente ligadas a la viabilidad económica del proyecto. Si bien existen diversas formas de reducir costos de mantención, operación y medición, se debería realizar una inversión inicial importante para analizar la cantidad y significancia de los gases contaminantes expulsados por los motores en el aire. El gobierno también podría colaborar con licitaciones que permitan a externos realizar el trabajo de medición y de alguna forma ayudar a las aerolíneas con la recolección de información. Si el estudio económico determina que el proyecto es demasiado caro de realizar, existe la probabilidad de que esta propuesta no se pueda llevar a cabo.

En el impacto económico de esta propuesta se dan algunas recomendaciones para analizar un estudio económico, si bien el objetivo de esta memoria no es el verificar la viabilidad económica de la implementación de los modelos, esta recomendación puede ser de utilidad para estudios y trabajos futuros que permitan determinar si la propuesta aquí presentada es posible de realizar o no. La viabilidad económica es muy relevante para poder determinar las mejores decisiones normativas en el país e integrar nuevas metodologías de trabajo en las aerolíneas chilenas.

La integración de la gestión medioambiental en las aerolíneas podría mejorar su competitividad y obtener algunas ventajas como:

- Participar en la cadena de valor de otras organizaciones (proveedores y clientes), incluyendo las administraciones públicas, que han empezado a incluir cláusulas ambientales en sus proyectos de compra y contratación.
- Desarrollar productos y procesos de mantenimiento innovadores de mejor calidad a través de la incorporación de variables ambientales en el proceso de diseño. Estos

factores los diferenciarían de la competencia y les posibilitaría el acceso a nuevos mercados.

- Mejorar su reputación, lo que ayudaría a conseguir más pasajeros y reducir el riesgo de perder los que tiene debido a la mala gestión de la empresa.

De esta manera las aerolíneas podrían enfocar su actividad de tal forma que potencie sus efectos medioambientales positivos y elimine o mitigue los negativos, lo que fomentaría la competencia y la sostenibilidad de la empresa a nivel nacional e internacional.

Es muy importante que países de Latinoamérica, América del Norte y Asia adopten iniciativas de mayor responsabilidad ambiental que promuevan el desarrollo y la difusión de nuevas tecnologías respetuosas con el medio ambiente.

Es de esperar que los esfuerzos de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas con su Objetivo 12 de Desarrollo Sostenible "Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles" tenga buena acogida en los patrones de producción de las aerolíneas y los motive a tomar la responsabilidad que les compete por el uso de los recursos, la contaminación y los hábitos de consumo.

El llamado es a mejorar los procesos de regulación e innovar en la creación de proyectos que disminuyan eficientemente la cantidad de gases contaminantes liberados por los motores de las aeronaves y de esta forma contribuir a la reducción de las tasas de mortalidad asociadas a problemas de salud causados por la mala calidad del aire, además de mejorar el ecosistema y la producción de los recursos naturales del país.

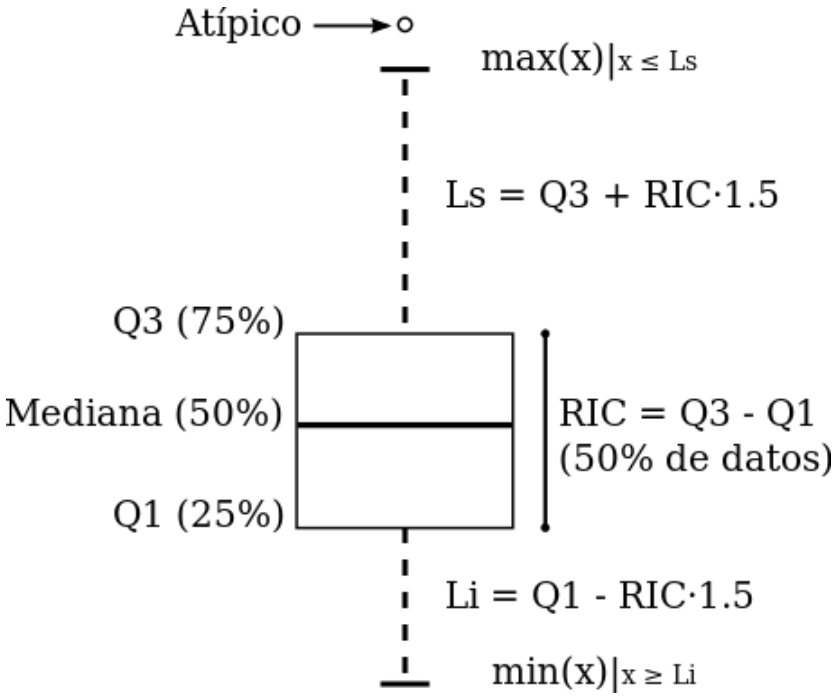
ANEXOS

Método de lectura de los diagramas de caja:

El diagrama de cajas es un gráfico basado en cuartiles (Estadística Descriptiva), medio por el cual se visualiza la distribución de un conjunto de datos. Se encuentra compuesto por el cuerpo (Rectángulo) y dos brazos.

El gráfico muestra información sobre valores máximos y mínimos, cuartiles (Q1), Mediana (Q2) y Q3, valores atípicos, y simetrías de distribución. En primera instancia se debe encontrar el valor de la mediana para luego encontrar el valor de los 2 cuartiles restantes.

Anexo 1: Valores típicos indicados en los diagramas de caja.



Fuente: Wikipedia.com

Para interpretar el gráfico se deben obtener las medias de cada intervalo, y luego la mediana de la tabla de frecuencias. Con los datos se utiliza la fórmula de la media para cada intervalo elevado a la mediana.

- Q_1 (25% de los datos)

- Q_2 o mediana (el 50% de los datos).
- Q_3 (75% de los datos).
- Rango Intercuartílico (Q3 – Q1)

Las líneas que se extienden de la caja, tienen 2 límites, uno superior y uno inferior, estos valores se extienden hasta los valores máximos y mínimos de la serie o hasta 1.5 veces el RIC (Rango Intercuartílico).

Cuando los valores se extienden más allá de los valores normales, significa que existen valores atípicos en la serie y dado el caso se deben calcular los valores Límite inferior y Límite superior (Li y Ls respectivamente).

- Se consideran atípicos los valores inferiores a Q1-1.5•RIC o Q3+3•RIC.
- Además, se pueden considerar valores extremadamente atípicos que son aquellos que exceden Q1-3•RIC O Q3+3•RIC.
- Se deben marcar todos los valores atípicos que están fuera del intervalo (Li, Ls).

Anexo 2: Regulaciones locales de calidad de aire de algunos países, principalmente se miden los niveles de PM, CO, NO_2, SO_2y O_3 medidas en microgramo por metro cubico, los valores establecidos pueden variar año a año. En la primera línea se pueden observar los parámetros aceptables en el medio ambiente que ha publicado la World Health Organization (WHO). Fuente: Airport Air Quality, ICAO, 2012.

Country/ Organization	Pollutant (averaging period)	Sulphur dioxide			Nitrogen dioxide			Carbon Monoxide		Ozone			PM10	
		1 hour	24 hours	Annual	1 hour	24 hours	Annual	1 hour	8 Hours	1 hour	8 Hours	24 hours	24 hours	Annual
		ug/m3	ug/m3	ug/m3	ug/m3	ug/m3	ug/m3	ug/m3	ug/m3	ug/m3	ug/m3	ug/m3	ug/m3	ug/m3
WHO	WHO Guidelines	---	125	---	200	---	40 - 50	30	10	---	120	---	---	---
EU	Air Quality Framework Directive	350	125	20	200	---	40	---	10	---	120	---	50	40
Australia	National Environmental Protection Measure for Ambient Air Quality	520	200	50	220	---	50	---	10	200	---	---	50	---
Brazil	Resolution 03 of CONAMA (National Council for the Environment), June 1990 -- Air Quality National Standards	---	365	80	320	---	100	40	10	160	---	---	150	50
Canada	National Ambient Air Quality Objectives, Canadian Environmental Protection Act, June 2000	900	300	60	400	200	100	35	15	160	---	50	---	---
China	Ambien Air Quality Regulations G83095 -- 1996	500	150	50	150	100	50	10	---	160	---	---	150	100
India	G.S.R.6(E).[21/12/1983] --- The Air (Prevention and Control od Pollution) (Union Territories) Rules, 1983	---	80	60	---	80	60	4	2	---	---	---	100	60
Japan	Ministry of the Environmental Quality Standards	260	100	---	75 - 110	---	---	12	23	120	---	---	---	---
South Africa	SANS 1929 Guidelines	---	125	50	200	---	40	30	10	200	120	---	75	40
Switzerland	Swiss Lufreinhalteverordnung (LRV)	---	100	30	---	80	30	---	---	120	---	---	50	20
USA	NAAQS	---	360	80	---	---	100	40	10	240	160	---	150	50

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI, ACI Global Traffic Forecast 2006-2025. Executive Summary. Edition 2007. [(Consulta: Noviembre 2016]. Disponible en: http://www.aci.aero/aci/aci/file/Economics/ACI%20Executive% 20Summary.pdf.

ACI, ACI Global Traffic Forecast Report 2008-2027. In: ICAO Conference on the Economics of Airports and Air Navigation Service, Montreal al, 15e20 September 2008. Working Paper, CEANS-WP/66. 2008. [Consulta: Diciembre 2016] Disponible en: http://www.icao. int/Meetings/ceans/Documents/Ceans_Wp_066_en.pdf. (Consulta: Diciembre 2016)

ACI, ACI Releases its 2012 World Airport Traffic Report. Media Release, Airports Council International, Montreal. 2013. Disponible en: http://www.aci.aero/media/ bc5239b4-07ac-4d1f-8cbbdb8f1b093d80/News/Releases/2013/PR_2013_08_ 28_WATR_Release_pdf. (Consulta Enero 2017)

AGRAWAL, Harshit, SAWANT, Aniket A., JANSEN, Karel, WAYNE MILLER, J. and COCKER III, David R., 2008. Characterization of chemical and particulate emissions from aircraft engines. *Atmospheric Environment*. June 2008. Vol. 42, no. 18, p. 4380–4392. DOI 10.1016/j.atmosenv.2008.01.069.

AIRPLANES, Boeing Commercial. Current Market Outlook: 2010-2029. *Seattle, USA*, 2010.

Air-quality-strategy_LHR.pdf. [en línea], [Consulta: Febrero 2017]. Disponible en: http://www.heathrow.com/file_source/Company/Static/PDF/Communityandenvironment/air-quality-strategy_LHR.pdf.

ANDERSON, B.E., BEYERSDORF, A.J., HUDGINS, C.H., PLANT, J.V., THORNHILL, K.L., WINSTEAD, E.L., ZIEMBA, L.D., HOWARD, R., CORPORAN, E., MIAKE-LYE, R.C., HERNDON, S.C., TIMKO, M., WOODS, E., DODDS, W., LEE, B., SANTONI, G., WHITEFIELD, P., HAGEN, D., LOBO, P., KNIGHTON, W.B., BULZAN, D., TACINA, K., WEY, C., VANDERWAL, R., BHARGAVA, A. y AL, et, 2011. Alternative Aviation Fuel Experiment (AAFEX). [En línea]. S.l.: [Consulta: 25 abril 2017]. Disponible en: https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20110007202.

ANDERSON, B.E., BRANHAM, H.-S., HUDGINS, C.H., PLANT, J.V., BALLENTHIN, J.O., MILLER, T.M., VIGGIANO, A.A., BLAKE, D.R., BOUDRIES, H., CANAGARATNA, M. y AL, et, 2005. Experiment to Characterize Aircraft Volatile Aerosol and Trace-Species Emissions (EXCAVATE). [En línea]. S.l.: [Consulta: Enero 2017]. Disponible en: https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20050214696.

ANDERSON, B.E., CHEN, G. y BLAKE, D.R., 2006. Hydrocarbon emissions from a modern commercial airliner. *Atmospheric Environment*, vol. 40, no. 19, pp. 3601-3612. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2005.09.072.

ANDERSON, B.E., COFER, W.R., BAGWELL, D.R., BARRICK, J.W., HUDGINS, C.H. y BRUNKE, K.E., 1998. Airborne observations of aircraft aerosol emissions I: Total nonvolatile particle emission indices. *Geophysical Research Letters*, vol. 25, no. 10, pp. 1689-1692. ISSN 1944-8007. DOI 10.1029/98GL00063.

ANDERSON, B.E., COFER, W.R., BARRICK, J.D., BAGWELL, D.R. y HUDGINS, C.H., 1998. Airborne observations of aircraft aerosol emissions II: Factors controlling volatile particle production. *Geophysical Research Letters*, vol. 25, no. 10, pp. 1693-1696. ISSN 1944-8007. DOI 10.1029/98GL00661.

ANDERSON, J.O., THUNDIYIL, J.G. y STOLBACH, A., 2012. Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health. *Journal of Medical Toxicology*, vol. 8, no. 2, pp. 166-175. ISSN 1556-9039, 1937-6995. DOI 10.1007/s13181-011-0203-1.

ARNOLD, F., SCHEID, J., STILP, T., SCHLAGER, H. y REINHARDT, M.E., 1992. Measurements of jet aircraft emissions at cruise altitude I: The odd-nitrogen gases NO, NO2, HNO2 and HNO3. *Geophysical Research Letters*, vol. 19, no. 24, pp. 2421-2424. ISSN 1944-8007. DOI 10.1029/92GL02926.

ARNOLD, F., STILP, T., BUSEN, R. y SCHUMANN, U., 1998. Jet engine exhaust chemiion measurements: Implications for gaseous SO3 and H2SO4. *Atmospheric Environment*, vol. 32, no. 18, pp. 3073-3077. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/S1352-2310(97)00400-7.

ARNOLD, F., WOHLFROM, K.-H., KLEMM, M.W., SCHNEIDER, J., GOLLINGER, K., SCHUMANN, U. y BUSEN, R., 1998. First gaseous ion composition measurements in the exhaust plume of a jet aircraft in flight: Implications for gaseous sulfuric acid, aerosols, and chemiions. *Geophysical Research Letters*, vol. 25, no. 12, pp. 2137-2140. ISSN 1944-8007. DOI 10.1029/98GL01579.

ARUNACHALAM, S., WANG, B., DAVIS, N., BAEK, B.H. y LEVY, J.I., 2011. Effect of chemistry-transport model scale and resolution on population exposure to PM2.5 from aircraft emissions during landing and takeoff. *Atmospheric Environment*, vol. 45, no. 19, pp. 3294-3300. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2011.03.029.

Aviation and the Global Atmosphere. [En línea], [Consulta: Octubre 2016]. Disponible en: http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/aviation/index.php?idp=88.

BELL, M.L., PENG, R.D., DOMINICI, F. y SAMET, J.M., 2009. Emergency Hospital Admissions for Cardiovascular Diseases and Ambient Levels of Carbon Monoxide. *Circulation*, vol. 120, no. 11, pp. 949-955. ISSN 0009-7322, 1524-4539. DOI 10.1161/CIRCULATIONAHA.109.851113.

BRASSEUR, G.P., MÜLLER, J.-F. Y GRANIER, C., 1996. Atmospheric impact of NOx emissions by subsonic aircraft: A three-dimensional model study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 101, no. D1, pp. 1423-1428. ISSN 2156-2202. DOI 10.1029/95JD02363.

BRITISH AIRPORTS AUTHORITY, Gatwick. Baseline Emission Inventory (2006). [Consulta: Septiembre, 2016], Disponible en: http://83.98. 24.64/Documents/business_and_community. *Publications/2006/2010_basline_emissions_i nventory. pdf* . 2010.

BROWN, R.C., ANDERSON, M.R., MIAKE-LYE, R.C., KOLB, C.E., SOROKIN, A.A. y BURIKO, Y.Y., 1996. Aircraft exhaust sulfur emissions. *Geophysical Research Letters*, vol. 23, no. 24, pp. 3603-3606. ISSN 1944-8007. DOI 10.1029/96GL03339.

BROWN, R.C., MIAKE-LYE, R.C., ANDERSON, M.R. y KOLB, C.E., 1996. Effect of aircraft exhaust sulfur emissions on near field plume aerosols. *Geophysical Research Letters*, vol. 23, no. 24, pp. 3607-3610. ISSN 1944-8007. DOI 10.1029/96GL03338.

BROWN, R.C., MIAKE-LYE, R.C., ANDERSON, M.R. y KOLB, C.E., 1997. Aircraft sulfur emissions and the formation of visible contrails. *Geophysical Research Letters*, vol. 24, no. 4, pp. 385-388. ISSN 1944-8007. DOI 10.1029/97GL00107.

BUSEN, R. y SCHUMANN, U., 1995. Visible contrail formation from fuels with different sulfur contents. *Geophysical Research Letters*, vol. 22, no. 11, pp. 1357-1360. ISSN 1944-8007. DOI 10.1029/95GL01312.

CAIN, J., DEWITT, M.J., BLUNCK, D., CORPORAN, E., STRIEBICH, R., ANNEKEN, D., KLINGSHIRN, C., ROQUEMORE, W.M. y VANDER WAL, R., 2013. Characterization of Gaseous and Particulate Emissions From a Turboshaft Engine Burning Conventional, Alternative, and Surrogate Fuels. *Energy & Fuels*, vol. 27, no. 4, pp. 2290-2302. ISSN 0887-0624. DOI 10.1021/ef400009c.

CARSLAW, D.C. y BEEVERS, S.D., 2004. New Directions: Should road vehicle emissions legislation consider primary NO2? *Atmospheric Environment*, vol. 38, no. 8, pp. 1233-1234. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2003.12.008.

CARSLAW, D.C., 2005. Evidence of an increasing NO2/NOX emissions ratio from road traffic emissions. *Atmospheric Environment*, vol. 39, no. 26, pp. 4793-4802. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2005.06.023.

CARSLAW, D.C., BEEVERS, S.D., ROPKINS, K. y BELL, M.C., 2006. Detecting and quantifying aircraft and other on-airport contributions to ambient nitrogen oxides in the vicinity of a large international airport. *Atmospheric Environment*, vol. 40, no. 28, pp. 5424-5434. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2006.04.062.

CARSLAW, David C., et al. Near-field commercial aircraft contribution to nitrogen oxides by engine, aircraft type, and airline by individual plume sampling. *Environmental science & technology*, 2008, vol. 42, no 6, p. 1871-1876.

Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP). [En línea], [Consulta: Marzo 2017]. Disponible en: https://www.icao.int/environmental-protection/pages/CAEP.aspx.

CURTIUS, J., ARNOLD, F. y SCHULTE, P., 2002. Sulfuric acid measurements in the exhaust plume of a jet aircraft in flight: Implications for the sulfuric acid formation efficiency. *Geophysical Research Letters*, vol. 29, no. 7, pp. 17-1. ISSN 1944-8007. DOI 10.1029/2001GL013813.

CURTIUS, J., SIERAU, B., ARNOLD, F., BAUMANN, R., BUSEN, R., SCHULTE, P. y SCHUMANN, U., 1998. First direct sulfuric acid detection in the exhaust plume of a jet aircraft in flight. *Geophysical Research Letters*, vol. 25, no. 6, pp. 923-926. ISSN 1944-8007. DOI 10.1029/98GL00512.

CYRYS, J., EEFTENS, M., HEINRICH, J., AMPE, C., ARMENGAUD, A., BEELEN, R., BELLANDER, T., BEREGSZASZI, T., BIRK, M., CESARONI, G., CIRACH, M., DE HOOGH, K., DE NAZELLE, A., DE VOCHT, F., DECLERCQ, C., DĖDELĖ, A., DIMAKOPOULOU, K., ERIKSEN, K., GALASSI, C., GRĄULEVIČIENĖ, R., GRIVAS, G., GRUZIEVA, O., GUSTAFSSON, A.H., HOFFMANN, B., IAKOVIDES, M., INEICHEN, A., KRÄMER, U., LANKI, T., LOZANO, P., MADSEN, C., MELIEFSTE, K., MODIG, L., MÖLTER, A., MOSLER, G., NIEUWENHUIJSEN, M., NONNEMACHER, M., OLDENWENING, M., PETERS, A., PONTET, S., PROBST-HENSCH, N., QUASS, U., RAASCHOU-NIELSEN, O., RANZI, A., SUGIRI, D., STEPHANOU, E.G., TAIMISTO, P., TSAI, M.-Y., VASKÖVI, É., VILLANI, S., WANG, M., BRUNEKREEF, B. y HOEK, G., 2012. Variation of NO2 and NOx concentrations between and within 36 European study areas: Results from the ESCAPE study. *Atmospheric Environment*, vol. 62, pp. 374-390. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2012.07.080.

DAKHEL, P., LUKACHKO, S.P., WAITZ, I.A., MIAKE-LYE, R.C. y BROWN, R.C., 2007. Postcombustion Evolution of Soot Properties in an Aircraft Engine. *Journal of Propulsion and Power*, vol. 23, no. 5, pp. 942-948. ISSN 0748-4658. DOI 10.2514/1.26738.

DALEY, M.P.S. y NAUGLE, M.D.F., 1979. Measurement and Analysis of Airport Emissions. *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 29, no. 2, pp. 113-116. ISSN 0002-2470. DOI 10.1080/00022470.1979.10470763.

DfT: annual report 2006 - GOV.UK. [En línea], [sin fecha]. [Consulta: Marzo 2017]. Disponible en: https://www.gov.uk/government/publications/department-for-transport-annual-report-2006.

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS Y TECNOLÓGICAS DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE (DICTUC), 2011a. *Valores recomendados a utilizar en la realización de un AGIES que incorpore un análisis costo beneficio - salud*. Santiago: Ministerio del Medio Ambiente.

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS Y TECNOLÓGICAS DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE (DICTUC), 2011b. *Elaboración de una matriz fuente receptor a nivel nacional que aporte como insumo a la valoración económica de la reducción del riesgo en salud asociado a la contaminación del aire.* Santiago: Ministerio del Medio Ambiente.

EASA (European Aviation Safety Agency), 2013. ICAO Aircraft Engine Emissions Databank (updated April 2013). [Consulta: Diciembre, 2016] Disponible en: http://easa.europa.eu/environment/edb/aircraft-engine-emissions.php.

Environmental Health Perspectives – Short-Term Effects of Nitrogen Dioxide on Mortality and Susceptibility Factors in 10 Italian Cities: The EpiAir Study. [En línea], [sin fecha]. [Consulta: 26 abril 2017]. Disponible en: https://ehp.niehs.nih.gov/1002904/.

E-Reporting. En: DOI: 10.1201/b15784-35, *Government Public Relations* [en línea], 2007. S.l.: CRC Press, Public Administration and Public Policy, pp. 381-395. [Consulta: 26 abril 2017]. ISBN 978-1-4200-6277-9. Disponible en: http://www.crcnetbase.com/doi/10.1201/b15784-35.

EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY, EUROPEAN UNION y EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2016. *European aviation environmental: report 2016.* [En línea]. Luxembourg: Publications Office. [Consulta: 26 abril 2017]. ISBN 978-92-9210-197-8. Disponible en: http://bookshop.europa.eu/uri?target=EUB:NOTICE:TO0115323:EN:HTML.

FAHEY, D.W., KEIM, E.R., WOODBRIDGE, E.L., GAO, R.S., BOERING, K.A., DAUBE, B.C., WOFSY, S.C., LOHMANN, R.P., HINTSA, E.J., DESSLER, A.E., WEBSTER, C.R., MAY, R.D., BROCK, C.A., WILSON, J.C., MIAKE-LYE, R.C., BROWN, R.C., RODRIGUEZ, J.M., LOEWENSTEIN, M., PROFFITT, M.H., STIMPFLE, R.M., BOWEN, S.W. y CHAN, K.R., 1995. In situ observations in aircraft exhaust plumes in the lower stratosphere at midlatitudes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 100, no. D2, pp. 3065-3074. ISSN 2156-2202. DOI 10.1029/94JD02298.

Federal Aviation Administration, 2003. Select Resource Materials and Annotated Bibliography on the Topic of Hazardous Air Pollutants (HAPs) Associated with Aircraft. Airports and Aviation Report. Disponible en: http://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/media/HAPs_rpt.pdf (Último acceso Enero 2017).

FIELDING, John P. Introduction to Aircraft Design Cambridge University Press. *Cambridge, UK*, 1999.

FLEUTI, E., HOFMANN, P., 2005. Airport Local Air Quality Studies, ALAQS Case Study: Zürich Airport 2004, a Comparison of Modelled and Measured Air Quality. Tech.

FLEUTI, Emanuel; POLYMERIS, Juan. Aircraft NOx-Emissions Within the Operational LTO Cycle. *Unique (Flughafen Zrich AG) and Swiss Flight Data Services*, 2004.

FONTAINE, Juan Andrés. El rol macroeconómico del Estado. *Estudios públicos*, 1983, vol. 9.

GARNER, F., BAUDOIN, C., WOODS, P. y LOUISNARD, N., 1997. Engine emission alteration in the near field of an aircraft. *Atmospheric Environment*, vol. 31, no. 12, pp. 1767-1781. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/S1352-2310(96)00329-9.

GAUSS, M., ISAKSEN, I.S.A., LEE, D.S. y SØVDE, O.A., 2006. Impact of aircraft NOx emissions on the atmosphere – tradeoffs to reduce the impact. *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 6, no. 6, pp. 1529-1548. ISSN 1680-7324. DOI 10.5194/acp-6-1529-2006.

GEMMER, M., 2012. Environmental Monitoring & Public Reporting. [En línea], [Consulta: Octubre 2017]. Disponible en: http://www.ecegp.com/chinese/DataBase/UploadFile/20150605145957591.pdf.

GREWE, V., DAMERIS, M., FICHTER, C. y LEE, D.S., 2002. Impact of aircraft NOx emissions. Part 2: Effects of lowering the flight altitude. *Meteorologische Zeitschrift*, pp. 197-205. ISSN ,. DOI 10.1127/0941-2948/2002/0011-0197.

GUO, Rui; ZHANG, Yu; WANG, Qing. Comparison of emerging ground propulsion systems for electrified aircraft taxi operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, vol. 44, p. 98-109.

HALL, C.M., SCOTT, D. y GÖSSLING, S., 2013. The Primacy of Climate Change for Sustainable International Tourism. *Sustainable Development*, vol. 21, no. 2, pp. 112-121. ISSN 1099-1719. DOI 10.1002/sd.1562.

HARRISON, R.M., BEDDOWS, D.C.S. y DALL'OSTO, M., 2011. PMF Analysis of Wide-Range Particle Size Spectra Collected on a Major Highway. *Environmental Science & Technology*, vol. 45, no. 13, pp. 5522-5528. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es2006622.

HARRISON, R.M., JONES, A.M., GIETL, J., YIN, J. y GREEN, D.C., 2012. Estimation of the Contributions of Brake Dust, Tire Wear, and Resuspension to Nonexhaust Traffic Particles Derived from Atmospheric Measurements. *Environmental Science & Technology*, vol. 46, no. 12, pp. 6523-6529. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es300894r.

HELAND, J. y SCHÄFER, K., 1997. Analysis of aircraft exhausts with Fourier-transform infrared emission spectroscopy. *Applied Optics*, vol. 36, no. 21, pp. 4922-4931. ISSN 1539-4522. DOI 10.1364/AO.36.004922.

HELAND, J. y SCHÄFER, K., 1998. Determination of major combustion products in aircraft exhausts by FTIR emission spectroscopy. *Atmospheric Environment*, vol. 32, no. 18, pp. 3067-3072. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/S1352-2310(97)00395-6.

HEMIGHAUS, Greg, et al. Aviation fuels technical review. *Chevron Products Company*, 2006. Disponible en:

https://www.cgabusinessdesk.com/document/aviation_tech_review.pdf (Consulta: Septiembre 2016)

HERNDON, S.C., JAYNE, J.T., LOBO, P., ONASCH, T.B., FLEMING, G., HAGEN, D.E., WHITEFIELD, P.D. y MIAKE-LYE, R.C., 2008. Commercial Aircraft Engine Emissions Characterization of in-Use Aircraft at Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport. *Environmental Science & Technology*, vol. 42, no. 6, pp. 1877-1883. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es072029+.

HERNDON, S.C., ONASCH, T.B., FRANK, B.P., MARR, L.C., JAYNE, J.T., CANAGARATNA, M.R., GRYGAS, J., LANNI, T., ANDERSON, B.E., WORSNOP, D. y MIAKE-LYE, R.C., 2005. Particulate Emissions from in-use Commercial Aircraft. *Aerosol Science and Technology*, vol. 39, no. 8, pp. 799-809. ISSN 0278-6826. DOI 10.1080/02786820500247363.

HERNDON, S.C., ROGERS, T., DUNLEA, E.J., JAYNE, J.T., MIAKE-LYE, R. y KNIGHTON, B., 2006. Hydrocarbon Emissions from In-Use Commercial Aircraft during Airport Operations. *Environmental Science & Technology*, vol. 40, no. 14, pp. 4406-4413. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es051209l.

HERNDON, S.C., SHORTER, J.H., ZAHNISER, M.S., NELSON, JAYNE, J., BROWN, R.C., MIAKE-LYE, R.C., WAITZ, I., SILVA, P., LANNI, T., DEMERJIAN, K. y KOLB, C.E., 2004. NO and NO2 Emission Ratios Measured from In-Use Commercial Aircraft during Taxi and Takeoff. *Environmental Science & Technology*, vol. 38, no. 22, pp. 6078-6084. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es049701c.

HERNDON, S.C., WOOD, E.C., NORTHWAY, M.J., MIAKE-LYE, R., THORNHILL, L., BEYERSDORF, A., ANDERSON, B.E., DOWLIN, R., DODDS, W. y KNIGHTON, W.B., 2009. Aircraft Hydrocarbon Emissions at Oakland International Airport. *Environmental Science & Technology*, vol. 43, no. 6, pp. 1730-1736. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es801307m.

HESTER, R.E., HARRISON, R.M. y AYRES, J.G., 1998. Health Effects of Gaseous Air Pollutants. *Air Pollution and Health* [en línea]. S.l.: s.n., pp. 1-20. [Consulta: 25 abril 2017]. Disponible en: http://pubs.rsc.org/en/content/chapter/bk9780854042456-00001/978-0-85404-245-6.

HOWITT, O.J.A., CARRUTHERS, M.A., SMITH, I.J. y RODGER, C.J., 2011. Carbon dioxide emissions from international air freight. *Atmospheric Environment*, vol. 45, no. 39, pp. 7036-7045. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2011.09.051.

HU, S., FRUIN, S., KOZAWA, K., MARA, S., WINER, A.M. y PAULSON, S.E., 2009. Aircraft Emission Impacts in a Neighborhood Adjacent to a General Aviation Airport in Southern California. *Environmental Science & Technology*, vol. 43, no. 21, pp. 8039-8045. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es900975f.

ICAO (International Civil Aviation Organization), 2013. Annual Report of the Council 2012. Disponible en: http://www.icao.int/publications/pages/publication.aspx?docnum1⁄410001.

III, C.A.P. y DOCKERY, D.W., 2006. Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 56, no. 6, pp. 709-742. ISSN 1096-2247. DOI 10.1080/10473289.2006.10464485.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ed.), 2011. *Airport air quality manual*. 1. ed. Montréal: International Civil Aviation Organization. Doc / International Civil Aviation Organization [Englische Ausgabe], 9889. ISBN 978-92-9231-862-8.

JELINEK, Frank, et al. The EUR RVSM implementation Project-Environmental Benefit Analysis.". *Fuel*, 2002, vol. 400, no 200, p. 56.

JURKAT, T., VOIGT, C., ARNOLD, F., SCHLAGER, H., KLEFFMANN, J., AUFMHOFF, H., SCHÄUBLE, D., SCHAEFER, M. y SCHUMANN, U., 2011. Measurements of HONO, NO, NO_y and SO_2 in aircraft exhaust plumes at cruise: EXHAUST PLUME MEASUREMENTS OF HONO AND SO_2. *Geophysical Research Letters*, vol. 38, no. 10, pp. n/a-n/a. ISSN 00948276. DOI 10.1029/2011GL046884.

KAMPA, M. y CASTANAS, E., 2008. Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, vol. 151, no. 2, pp. 362-367. ISSN 0269-7491. DOI 10.1016/j.envpol.2007.06.012.

KAVOURAS, Ilias G., et al. Source apportionment of PM10 and PM25 in five Chilean cities using factor analysis. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2001, vol. 51, no 3, p. 451-464.

KIM, B.Y., FLEMING, G.G., LEE, J.J., WAITZ, I.A., CLARKE, J.-P., BALASUBRAMANIAN, S., MALWITZ, A., KLIMA, K., LOCKE, M., HOLSCLAW, C.A., MAURICE, L.Q. y GUPTA, M.L., 2007. System for assessing Aviation's Global Emissions (SAGE), Part 1: Model description and inventory results. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 12, no. 5, pp. 325-346. ISSN 1361-9209. DOI 10.1016/j.trd.2007.03.007.

KINSEY, John S. *Characterization of emissions from commercial aircraft engines during the Aircraft Particle Emissions experiment (APEX) 1 to 3*. Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2009.

KINSEY, J.S., DONG, Y., WILLIAMS, D.C. y LOGAN, R., 2010. Physical characterization of the fine particle emissions from commercial aircraft engines during the Aircraft Particle Emissions eXperiment (APEX) 1–3. *Atmospheric Environment*, vol. 44, no. 17, pp. 2147-2156. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2010.02.010.

KINSEY, J.S., HAYS, M.D., DONG, Y., WILLIAMS, D.C. y LOGAN, R., 2011. Chemical Characterization of the Fine Particle Emissions from Commercial Aircraft

Engines during the Aircraft Particle Emissions eXperiment (APEX) 1 to 3. *Environmental Science & Technology*, vol. 45, no. 8, pp. 3415-3421. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es103880d.

KINSEY, J.S., TIMKO, M.T., HERNDON, S.C., WOOD, E.C., YU, Z., MIAKE-LYE, R.C., LOBO, P., WHITEFIELD, P., HAGEN, D., WEY, C., ANDERSON, B.E., BEYERSDORF, A.J., HUDGINS, C.H., THORNHILL, K.L., WINSTEAD, E., HOWARD, R., BULZAN, D.I., TACINA, K.B. y KNIGHTON, W.B., 2012. Determination of the emissions from an aircraft auxiliary power unit (APU) during the Alternative Aviation Fuel Experiment (AAFEX). *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 62, no. 4, pp. 420-430. ISSN 1096-2247. DOI 10.1080/10473289.2012.655884.

KJELLSTRÖM, E., FEICHTER, J., SAUSEN, R. y HEIN, R., 1999. The contribution of aircraft emissions to the atmospheric sulfur budget. *Atmospheric Environment*, vol. 33, no. 21, pp. 3455-3465. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/S1352-2310(98)00368-9.

KLAPMEYER, M.E. y MARR, L.C., 2012. CO2, NOx, and Particle Emissions from Aircraft and Support Activities at a Regional Airport. *Environmental Science & Technology*, vol. 46, no. 20, pp. 10974-10981. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es302346x.

KNIGHTON, W.B., ROGERS, T.M., ANDERSON, B.E., HERNDON, S.C., YELVINGTON, P.E. y MIAKE-LYE, R.C., 2007. Quantification of Aircraft Engine Hydrocarbon Emissions Using Proton Transfer Reaction Mass Spectrometry. *Journal of Propulsion and Power*, vol. 23, no. 5, pp. 949-958. ISSN 0748-4658. DOI 10.2514/1.22965.

KUGELE, A. y JELINEK, F., 2005. Experimental Centre. [En línea], [Consulta: 26 abril 2017]. Disponible en: https://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/document/eec/report/2005/034_Aircraft_Particulate_Matter_Emission_Estimation.pdf.

KUHN, P.M., 1970. Airborne Observations of Contrail Effects on the Thermal Radiation Budget. *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 27, no. 6, pp. 937-942. ISSN 0022-4928. DOI 10.1175/1520-0469(1970)027<0937:AOOCEO>2.0.CO;2.

LAVOIE, George A.; HEYWOOD, John B.; KECK, James C. Experimental and theoretical study of nitric oxide formation in internal combustion engines. *Combustion science and technology*, 1970, vol. 1, no 4, p. 313-326.

KURNIAWAN, Jermanto S.; KHARDI, Salah. Comparison of methodologies estimating emissions of aircraft pollutants, environmental impact assessment around airports. *Environmental Impact Assessment Review*, 2011, vol. 31, no 3, p. 240-252.

LEE, B.H., SANTONI, G.W., WOOD, E.C., HERNDON, S.C., MIAKE-LYE, R.C., ZAHNISER, M.S., WOFSY, S.C. y MUNGER, J.W., 2011. Measurements of Nitrous Acid in Commercial Aircraft Exhaust at the Alternative Aviation Fuel Experiment.

Environmental Science & Technology, vol. 45, no. 18, pp. 7648-7654. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es200921t.

LEE, D.S., FAHEY, D.W., FORSTER, P.M., NEWTON, P.J., WIT, R.C.N., LIM, L.L., OWEN, B. y SAUSEN, R., 2009. Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, vol. 43, no. 22–23, pp. 3520-3537. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2009.04.024.

LEE, D.S., PITARI, G., GREWE, V., GIERENS, K., PENNER, J.E., PETZOLD, A., PRATHER, M.J., SCHUMANN, U., BAIS, A., BERNTSEN, T., IACHETTI, D., LIM, L.L. y SAUSEN, R., 2010. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric Environment*, vol. 44, no. 37, pp. 4678-4734. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2009.06.005.

LEWIS, Ernie R.; SCHWARTZ, Stephen E. *Sea salt aerosol production: mechanisms, methods, measurements, and models-A critical review*. American geophysical union, 2004.

LEWIS, Jerry S., et al. Aircraft technology and its relation to emissions. *Aviation and the Global Atmosphere*, 1999, p. 291-70.

LISTER, D. H., et al. *Aviation and the Global Atmosphere-Summary for Policymakers*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1999.

LOBO, P., HAGEN, D.E. y WHITEFIELD, P.D., 2011. Comparison of PM Emissions from a Commercial Jet Engine Burning Conventional, Biomass, and Fischer–Tropsch Fuels. *Environmental Science & Technology*, vol. 45, no. 24, pp. 10744-10749. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es201902e.

LOBO, P., HAGEN, D.E. y WHITEFIELD, P.D., 2012. Measurement and analysis of aircraft engine PM emissions downwind of an active runway at the Oakland International Airport. *Atmospheric Environment*, vol. 61, pp. 114-123. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2012.07.028.

LOBO, P., HAGEN, D.E., WHITEFIELD, P.D. y RAPER, D., 2015. PM emissions measurements of in-service commercial aircraft engines during the Delta-Atlanta Hartsfield Study. *Atmospheric Environment*, vol. 104, pp. 237-245. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2015.01.020.

MAHASHABDE, A., WOLFE, P., ASHOK, A., DORBIAN, C., HE, Q., FAN, A., LUKACHKO, S., MOZDZANOWSKA, A., WOLLERSHEIM, C., BARRETT, S.R.H., LOCKE, M. y WAITZ, I.A., 2011. Assessing the environmental impacts of aircraft noise and emissions. *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 47, no. 1, pp. 15-52. ISSN 0376-0421. DOI 10.1016/j.paerosci.2010.04.003.

MANNSTEIN, Hermann; SCHUMANN, Ulrich. Aircraft induced contrail cirrus over Europe. *Meteorologische Zeitschrift*, 2005, vol. 14, no 4, p. 549-554.

MARTELLA, R., BELL, C., STEENLAND, P., CROUGH, M., CAHAN, J. y PRAITIS, J., [sin fecha]. EPA'SAdvance NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING OF GREENHOUSE GASES: AIRCRAFT INDUSTRY DIGEST. [En línea], [Consulta: Abril 2017]. Disponible en: http://www.sidley.com/~/media/files/experience/epas%20advance%20notice%20of%20proposed%20rulemaking%20of%20g2__/extensioncerepexperiencedocument2/aircraft%20supplement.pdf.

MASIOL, Mauro and HARRISON, Roy M., 2014. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. *Atmospheric Environment*. October 2014. Vol. 95, p. 409–455. DOI 10.1016/j.atmosenv.2014.05.070.

MAZAHERI, M., BOSTROM, T.E., JOHNSON, G.R. y MORAWSKA, L., 2013. Composition and Morphology of Particle Emissions from in-use Aircraft during Takeoff and Landing. *Environmental Science & Technology*, vol. 47, no. 10, pp. 5235-5242. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es3046058.

MAZAHERI, M., JOHNSON, G.R. y MORAWSKA, L., 2009. Particle and Gaseous Emissions from Commercial Aircraft at Each Stage of the Landing and Takeoff Cycle. *Environmental Science & Technology*, vol. 43, no. 2, pp. 441-446. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es8013985.

MAZAHERI, M., JOHNSON, G.R. y MORAWSKA, L., 2011. An inventory of particle and gaseous emissions from large aircraft thrust engine operations at an airport. *Atmospheric Environment*, vol. 45, no. 20, pp. 3500-3507. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2010.12.012.

MITCHELL, D., EKSTRAND, H., PRATS, X. y GRNSTEDT, T., 2012. An environmental assessment of air traffic speed constraints in the departure phase of flight: A case study at Gothenburg Landvetter Airport, Sweden. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 17, no. 8, pp. 610-618. ISSN 13619209. DOI 10.1016/j.trd.2012.07.006.

Modelling and Databases. [En línea], [Consulta: Enero 2017]. Disponible en: https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/modelling-and-databases.aspx.

MORAWSKA, L., RISTOVSKI, Z., JAYARATNE, E.R., KEOGH, D.U. y LING, X., 2008. Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure. *Atmospheric Environment*, vol. 42, no. 35, pp. 8113-8138. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2008.07.050.

MOTORES A REACCIÓN - 9788428328258 - MARTIN CUESTA ALVAREZ - paraninfo.es. [En línea], [Consulta: Enero 2017]. Disponible en: http://www.paraninfo.es/catalogo/9788428328258/motores-de-reaccion.

NAUGLE, Dennis F.; FOX, Donald L. Aircraft and air pollution. *Environ. Sci. Technol.;(United States)*, 1981, vol. 15, no 4.

OWEN, B., LEE, D.S. y LIM, L., 2010. Flying into the Future: Aviation Emissions Scenarios to 2050. *Environmental Science & Technology*, vol. 44, no. 7, pp. 2255-2260. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es902530z.

PEDRO FERNANDEZ DIEZ. Libro: Contaminación por Motores de Turbinas a Gas. [En línea]. [Consulta: Diciembre 2016]. Disponible en: http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=12.

PENNER, J.E., 1999. *Aviation and the Global Atmosphere: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. S.l.: Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-66404-2.

PETERS, G.P., MARLAND, G., LE QUÉRÉ, C., BODEN, T., CANADELL, J.G. y RAUPACH, M.R., 2012. Rapid growth in CO2 emissions after the 2008-2009 global financial crisis. *Nature Climate Change*, vol. 2, no. 1, pp. 2-4. ISSN 1758-678X. DOI 10.1038/nclimate1332.

PETZOLD, A., OGREN, J.A., FIEBIG, M., LAJ, P., LI, S.-M., BALTENSPERGER, U., HOLZER-POPP, T., KINNE, S., PAPPALARDO, G., SUGIMOTO, N., WEHRLI, C., WIEDENSOHLER, A. y ZHANG, X.-Y., 2013. Recommendations for reporting «black carbon» measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 13, no. 16, pp. 8365-8379. ISSN 1680-7324. DOI 10.5194/acp-13-8365-2013.

POPE, C.A.I., EZZATI, M. y DOCKERY, D.W., 2009. Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States. *New England Journal of Medicine*, vol. 360, no. 4, pp. 376-386. ISSN 0028-4793. DOI 10.1056/NEJMsa0805646.

PRESS-KRISTENSEN, K. y ØKOLOGISKE RÅD, 2012. *Air pollution in airports: ultrafine particles, solutions and successful cooperation*. Kbh.: Danish Ecocouncil. ISBN 978-87-92044-37-2.

PRESTO, A.A., NGUYEN, N.T., RANJAN, M., REEDER, A.J., LIPSKY, E.M., HENNIGAN, C.J., MIRACOLO, M.A., RIEMER, D.D. y ROBINSON, A.L., 2011. Fine particle and organic vapor emissions from staged tests of an in-use aircraft engine. *Atmospheric Environment*, vol. 45, no. 21, pp. 3603-3612. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2011.03.061.

PROTECTION, Environmental. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation. *Volume II Aircraft Engine Emissions. International Civil Aviation Organization*, 2008

RAASCHOU-NIELSEN, O., ANDERSEN, Z.J., BEELEN, R., SAMOLI, E., STAFOGGIA, M., WEINMAYR, G., HOFFMANN, B., FISCHER, P., NIEUWENHUIJSEN, M.J., BRUNEKREEF, B., XUN, W.W., KATSOUYANNI, K., DIMAKOPOULOU, K., SOMMAR, J., FORSBERG, B., MODIG, L., OUDIN, A., OFTEDAL, B., SCHWARZE, P.E., NAFSTAD, P., FAIRE, U.D., PEDERSEN, N.L., ÖSTENSON, C.-G., FRATIGLIONI, L., PENELL, J., KOREK, M., PERSHAGEN, G., ERIKSEN, K.T., SØRENSEN, M., TJØNNELAND, A., ELLERMANN, T., EEFTENS,

M., PEETERS, P.H., MELIEFSTE, K., WANG, M., BUENO-DE-MESQUITA, B., KEY, T.J., HOOGH, K. de, CONCIN, H., NAGEL, G., VILIER, A., GRIONI, S., KROGH, V., TSAI, M.-Y., RICCERI, F., SACERDOTE, C., GALASSI, C., MIGLIORE, E., RANZI, A., CESARONI, G., BADALONI, C., FORASTIERE, F., TAMAYO, I., AMIANO, P., DORRONSORO, M., TRICHOPOULOU, A., BAMIA, C., VINEIS, P. y HOEK, G., 2013. Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). *The Lancet Oncology*, vol. 14, no. 9, pp. 813-822. ISSN 1470-2045, 1474-5488. DOI 10.1016/S1470-2045(13)70279-1.

REINKING, Roger F. Insolation reduction by contrails. *Weather*, 1968, vol. 23, no 4, p. 171-173.

SAMOLI, E., AGA, E., TOULOUMI, G., NISIOTIS, K., FORSBERG, B., LEFRANC, A., PEKKANEN, J., WOJTYNIAK, B., SCHINDLER, C., NICIU, E., BRUNSTEIN, R., FIKFAK, M.D., SCHWARTZ, J. y KATSOUYANNI, K., 2006. Short-term effects of nitrogen dioxide on mortality: an analysis within the APHEA project. *European Respiratory Journal*, vol. 27, no. 6, pp. 1129-1138. ISSN 0903-1936, 1399-3003. DOI 10.1183/09031936.06.00143905.

SAMOLI, E., TOULOUMI, G., SCHWARTZ, J., ANDERSON, H.R., SCHINDLER, C., FORSBERG, B., VIGOTTI, M.A., VONK, J., KOŠNIK, M., SKORKOVSKY, J. y KATSOUYANNI, K., 2007. Short-Term Effects of Carbon Monoxide on Mortality: An Analysis within the APHEA Project. *Environmental Health Perspectives*, vol. 115, no. 11, pp. 1578-1583. ISSN 0091-6765. DOI 10.1289/ehp.10375.

SAPKOTA, A., CHELIKOWSKY, A.P., NACHMAN, K.E., COHEN, A.J. y RITZ, B., 2012. Exposure to particulate matter and adverse birth outcomes: a comprehensive review and meta-analysis. *Air Quality, Atmosphere & Health*, vol. 5, no. 4, pp. 369-381. ISSN 1873-9318, 1873-9326. DOI 10.1007/s11869-010-0106-3.

SCHNEIDER, T., O'GORMAN, P.A. y LEVINE, X.J., 2010. Water Vapor and the Dynamics of Climate Changes. *Reviews of Geophysics*, vol. 48, no. 3, pp. RG3001. ISSN 1944-9208. DOI 10.1029/2009RG000302.

SCHUMANN, U., 1997. The impact of nitrogen oxides emissions from aircraft upon the atmosphere at flight altitudes—results from the aeronox project. *Atmospheric Environment*, vol. 31, no. 12, pp. 1723-1733. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/S1352-2310(96)00326-3.

SCHUMANN, U., SCHLAGER, H., ARNOLD, F., BAUMANN, R., HASCHBERGER, P. y KLEMM, O., 1998. Dilution of aircraft exhaust plumes at cruise altitudes. *Atmospheric Environment*, vol. 32, no. 18, pp. 3097-3103. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/S1352-2310(97)00455-X.

SCHÜRMANN, G., SCHÄFER, K., JAHN, C., HOFFMANN, H., BAUERFEIND, M., FLEUTI, E. y RAPPENGLÜCK, B., 2007. The impact of NOx, CO and VOC emissions on

the air quality of Zurich airport. *Atmospheric Environment*, vol. 41, no. 1, pp. 103-118. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2006.07.030.

SCHWARTZ, Joel. Air pollution and hospital admissions for cardiovascular disease in Tucson. *Epidemiology*, 1997, p. 371-377.
SEINFELD, John H.; PANDIS, Spyros N.; NOONE, Kevin. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. 1998.

SIKORSKA, Paulina E. The need for legal regulation of global emissions from the aviation industry in the context of emerging aerospace vehicles. *International Comparative Jurisprudence*, 2015, vol. 1, no 2, p. 133-142.

SLEMR, F., GIEHL, H., HABRAM, M., SLEMR, J., SCHLAGER, H., SCHULTE, P., HASCHBERGER, P., LINDERMEIR, E., DÖPELHEUER, A. y PLOHR, M., 2001. In-flight measurement of aircraft CO and nonmethane hydrocarbon emission indices. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 106, no. D7, pp. 7485-7494. ISSN 2156-2202. DOI 10.1029/2000JD900580.

SMITH, S.J., VAN AARDENNE, J., KLIMONT, Z., ANDRES, R.J., VOLKE, A. y DELGADO ARIAS, S., 2011. Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005. *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 11, no. 3, pp. 1101-1116. ISSN 1680-7324. DOI 10.5194/acp-11-1101-2011.

SOLOMON, S., ROSENLOF, K.H., PORTMANN, R.W., DANIEL, J.S., DAVIS, S.M., SANFORD, T.J. y PLATTNER, G.-K., 2010. Contributions of Stratospheric Water Vapor to Decadal Changes in the Rate of Global Warming. *Science*, vol. 327, no. 5970, pp. 1219-1223. ISSN 0036-8075, 1095-9203. DOI 10.1126/science.1182488.

SØVDE, O.A., MATTHES, S., SKOWRON, A., IACHETTI, D., LIM, L., OWEN, B., HODNEBROG, Ø., DI GENOVA, G., PITARI, G., LEE, D.S., MYHRE, G. y ISAKSEN, I.S.A., 2014. Aircraft emission mitigation by changing route altitude: A multi-model estimate of aircraft NOx emission impact on O3 photochemistry. *Atmospheric Environment*, vol. 95, pp. 468-479. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2014.06.049.

SPICER, C. W., et al. Chemical composition and photochemical reactivity of exhaust from aircraft turbine engines. En *Annales Geophysicae*. Springer-Verlag, 1994. p. 944-955.

STETTLER, M.E.J., EASTHAM, S. y BARRETT, S.R.H., 2011. Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions. *Atmospheric Environment*, vol. 45, no. 31, pp. 5415-5424. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2011.07.012.

SUNYER, J., et al. Respiratory effects of sulphur dioxide: a hierarchical multicity analysis in the APHEA 2 study. *Occupational and Environmental Medicine*, 2003, vol. 60, no 8, p. e2-e2.

SUNYER, Jordi, et al. The association of daily sulfur dioxide air pollution levels with hospital admissions for cardiovascular diseases in Europe (The Aphea-II study). *European heart journal*, 2003, vol. 24, no 8, p. 752-760.

SUTKUS JR, Donald J.; BAUGHCUM, Steven L.; DUBOIS, Douglas P. Scheduled civil aircraft emission inventories for 1999: database development and analysis. 2001.
TIMKO, M.T., YU, Z., ONASCH, T.B., WONG, H.-W., MIAKE-LYE, R.C., BEYERSDORF, A.J., ANDERSON, B.E., THORNHILL, K.L., WINSTEAD, E.L., CORPORAN, E., DEWITT, M.J., KLINGSHIRN, C.D., WEY, C., TACINA, K., LISCINSKY, D.S., HOWARD, R. y BHARGAVA, A., 2010. Particulate Emissions of Gas Turbine Engine Combustion of a Fischer−Tropsch Synthetic Fuel. *Energy & Fuels*, vol. 24, no. 11, pp. 5883-5896. ISSN 0887-0624. DOI 10.1021/ef100727t.

TIMKO, Michael T., et al. Gas turbine engine emissions—part I: volatile organic compounds and nitrogen oxides. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2010, vol. 132, no 6, p. 061504.

TIMKO, Michael T., et al. Gas turbine engine emissions—Part II: Chemical properties of particulate matter. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2010, vol. 132, no 6, p. 061505.

UNIQUE, 2004. Aircraft NOx-Emissions within the Operational LTO Cycle. Unique (Flughafen Zürich AG) in Cooperation with Swiss Flight Data Monitoring. [Consulta: Agosto 2016]. Disponible en: http://www.zurich-airport.com/Portaldata/2/Resources/documents_unternehmen/umwelt_und_laer

US EPA, O., [sin fecha]. Vehicles and Engines. [En línea]. [Consulta: Enero 2017]. Disponible en: https://www.epa.gov/vehicles-and-engines.

VAHEDPOUR, M., GOODARZI, M., HAJARI, N. y NAZARI, F., 2011. Theoretical study on the atmospheric formation of sulfur trioxide as the primary agent for acid rain. *Structural Chemistry*, vol. 22, no. 4, pp. 817-822. ISSN 1040-0400, 1572-9001. DOI 10.1007/s11224-011-9758-3.

WAHNER, A., et al. Subsonic and supersonic aircraft emissions. *Scientific Assessment of Ozone Depletion*, 1994, p. 11.1-11.32.

WEINMAYR, Gudrun, et al. Short-Term Effects of PM^ sub 10^ and NO^ sub 2^ on Respiratory Health among Children with Asthma or Asthma-like Symptoms: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environmental health perspectives*, 2010, vol. 118, no 4, p. 449.

WEY, C. C., et al. Aircraft particle emissions experiment (APEX). 2006.

WEY, C.C., ANDERSON, B.A., WEY, C., MIAKE-LYE, R.C., WHITEFIELD, P. y HOWARD, R., 2007. Overview on the Aircraft Particle Emissions Experiment (APEX).

Journal of Propulsion and Power, vol. 23, no. 5, pp. 898-905. ISSN 0748-4658. DOI 10.2514/1.26406.

WHITEFIELD, Philip D., et al. *Summarizing and interpreting aircraft gaseous and particulate emissions data*. 2008.

WILCOX, L.J., SHINE, K.P. y HOSKINS, B.J., 2012. Radiative forcing due to aviation water vapour emissions. *Atmospheric Environment*, vol. 63, pp. 1-13. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2012.08.072.

WOOD, E.C., HERNDON, S.C., TIMKO, M.T., YELVINGTON, P.E. y MIAKE-LYE, R.C., 2008. Speciation and Chemical Evolution of Nitrogen Oxides in Aircraft Exhaust near Airports. *Environmental Science & Technology*, vol. 42, no. 6, pp. 1884-1891. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es072050a.

WOOD, Ezra. *Aircraft and Airport-related Hazardous Air Pollutants: Research Needs and Analysis*. Transportation Research Board, 2008.

WORMHOUDT, J., HERNDON, S.C., YELVINGTON, P.E., MIAKE-LYE, R.C. y WEY, C., 2007. Nitrogen Oxide (NO/NO2/HONO) Emissions Measurements in Aircraft Exhausts. *Journal of Propulsion and Power*, vol. 23, no. 5, pp. 906-911. ISSN 0748-4658. DOI 10.2514/1.23461.

YELVINGTON, P.E., HERNDON, S.C., WORMHOUDT, J.C., JAYNE, J.T., MIAKE-LYE, R.C., KNIGHTON, W.B. y WEY, C., 2007. Chemical Speciation of Hydrocarbon Emissions from a Commercial Aircraft Engine. *Journal of Propulsion and Power*, vol. 23, no. 5, pp. 912-918. ISSN 0748-4658. DOI 10.2514/1.23520.

YU, K.N., CHEUNG, Y.P., CHEUNG, T. y HENRY, R.C., 2004. Identifying the impact of large urban airports on local air quality by nonparametric regression. *Atmospheric Environment*, vol. 38, no. 27, pp. 4501-4507. ISSN 1352-2310. DOI 10.1016/j.atmosenv.2004.05.034.

YU, Z., LISCINSKY, D.S., WINSTEAD, E.L., TRUE, B.S., TIMKO, M.T., BHARGAVA, A., HERNDON, S.C., MIAKE-LYE, R.C. y ANDERSON, B.E., 2010. Characterization of Lubrication Oil Emissions from Aircraft Engines. *Environmental Science & Technology*, vol. 44, no. 24, pp. 9530-9534. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es102145z.

YU, Z., HERNDON, S.C., ZIEMBA, L.D., TIMKO, M.T., LISCINSKY, D.S., ANDERSON, B.E. y MIAKE-LYE, R.C., 2012. Identification of Lubrication Oil in the Particulate Matter Emissions from Engine Exhaust of In-Service Commercial Aircraft. *Environmental Science & Technology*, vol. 46, no. 17, pp. 9630-9637. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es301692t.

ZHU, Yifang, et al. Aircraft emissions and local air quality impacts from takeoff activities at a large International Airport. *Atmospheric Environment*, 2011, vol. 45, no 36, p. 6526-6533.