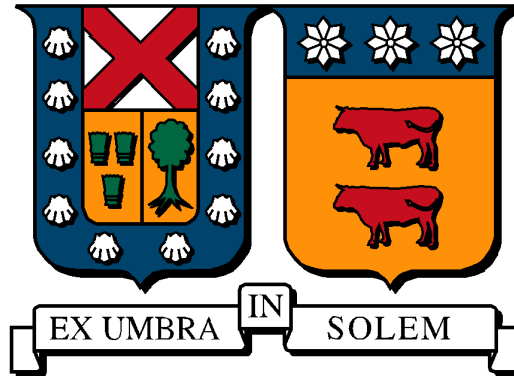


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
ACADEMIA DE CIENCIAS AERONÁUTICAS
SANTIAGO - CHILE



**REDUCCIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN AEROLÍNEAS:
BUENAS PRÁCTICAS Y RECOMENDACIONES DESDE UNA
PERSPECTIVA MEDIOAMBIENTAL Y DE COSTOS**

JOSÉ SÁNCHEZ VERGARA

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO EN AVIACIÓN COMERCIAL**

PROFESOR GUÍA : SR. VÍCTOR POBLETE G.
PROFESOR CORREFERENTE : SRA. JAVIERA ARTEAGA R.

NOVIEMBRE DE 2018

Resumen Ejecutivo

Los motores de aviones, al igual que los de otros medios de transporte que utilizan combustibles fósiles, emiten gases contaminantes hacia la atmósfera, los cuales tienen un efecto directo en el cambio climático. La industria aérea a nivel mundial produce un 2 % del total de las emisiones de gases de efecto invernadero de la actividad humana, los cuales además tienen un efecto mayor en la atmósfera, debido a que son liberados a grandes alturas. Por otra parte, el consumo de combustible es uno de los mayores costos operacionales de las aerolíneas, llegando a abarcar cerca de un 35 % como promedio en la industria en 2008, disminuyendo actualmente hasta un promedio cercano al 18 %.

La reducción del consumo de combustible con miras medioambientales es una de las formas en que la industria aérea busca reducir su contribución al cambio climático, impulsado principalmente por la OACI y IATA. Por su parte, para las aerolíneas la eficiencia energética toma cada vez mayor importancia debido a los costos de combustible y la volatilidad de los precios, lo que afecta negativamente el desempeño económico de estas.

En este trabajo se realizó una recopilación de medidas para la reducción del consumo de combustible para aerolíneas, por medio de un análisis de las prácticas de la industria a nivel global. Como resultado se logró recopilar un total de 38 medidas, las cuales se dividen según sean de carácter Operacional, de Infraestructura o Tecnológicas.

Finalmente, se realizó una ejemplificación de la aplicación de algunas de estas medidas en una aerolínea chilena, de manera de visualizar a grandes rasgos los beneficios entregados por estas, comparando estos con los costos asociados a su aplicación.

Executive Summary

Aircraft engines, just like those of other means of transport that use fossil fuels, produce pollutant emissions into the atmosphere, which have a direct effect on climate change. Global air transport produces 2 % of all the greenhouse gases of human activity. These emissions have a greater effect on the atmosphere, due to the higher altitudes at which these gases are released. On the other hand, fuel consumption is one of the main operational costs of airlines, accounting for an industry average of 35 % on 2008, decreasing to approximately 18 % nowadays.

Fuel consumption reduction from an environmental perspective is one of the many ways in which industry is working to reduce its contribution to climate change, all of this being mainly promoted by ICAO and IATA. However, airlines tend to give more importance to fuel consumption reduction, due to high fuel costs and volatility of prices, which negatively affect their economic performance.

In this work, a collection of fuel consumption reduction measures was conducted by the means of a global industry analysis. As a result, a total of 39 different measures were identified, which are divided regarding their nature, be it Operational, of Infrastructure, or Technologic.

Finally, an example of the application of some of these measures was considered for a Chilean airline, in order to roughly visualize its benefits compared to the costs associated to the implementation of them.

Índice general

Índice de figuras	9
Índice de tablas	11
1. Antecedentes Generales	19
1.1. Justificación del tema	19
1.2. Objetivos	21
1.3. Metodología	21
1.4. Alcance	22
2. Estado del Arte	23
2.1. Antecedentes	25
2.2. Marco Teórico	28
2.2.1. Consumo de combustible en aerolíneas	28
2.2.2. Combustibles alternativos	29
2.2.3. Sistema de Gestión Ambiental	30
2.2.4. Cambio Climático y políticas	32
2.2.5. Huella de carbono	33
2.2.6. Industria aérea y protección ambiental	33
3. Recopilación de medidas	39
3.1. Medidas o Planes de acción en el ámbito operacional	40
3.1.1. Cuantificadas	40
3.1.2. No Cuantificadas	46
3.2. Medidas o Planes de acción en el ámbito de la Infraestructura	48
3.2.1. Cuantificadas	48
3.2.2. No Cuantificadas	51
3.3. Medidas o Planes de acción en el ámbito de la Tecnología	54
3.3.1. Cuantificadas	54
3.3.2. No Cuantificadas	57
3.3.3. En Desarrollo	59
4. Caracterización de evaluación de medidas	61
4.1. Pintura Basecoat - Clearcoat	62
4.2. Optimización de embarque	65
4.3. Contenedores de carga	67
4.4. Comentarios	69
5. Conclusiones	71
6. Anexos	75
Bibliografía	81

Índice de figuras

2.1.	Ciclo de Mejora Continua. Elaboración propia	31
2.2.	Crecimiento de emisiones de CO ₂ para la industria aeronáutica. Elaboración propia (IATA, 2009)	36
3.1.	Aeronave utilizando energía de GPU. Fuente: Airport Suppliers.	41
3.2.	Fotograma de video promocional, mostrando a Técnicos de Lufthansa operando equipos de lavado CYCLEAN. Fuente: Lufthansa Technik.	42
3.3.	Vehículo SuperTug remolcando a un B777 de United Airlines. Fuente: Martin Pinnau.	43
3.4.	Contenedor de carga Nordisk WeightSaver AKE (LD3) fabricado con material Twintex. Fuente: Nordisk Aviation.	44
3.5.	Comparación entre Descenso de Perfil Optimizado y descenso escalonado. El OPD permite mantener el empuje inactivo, reduciendo el consumo de combustible. Fuente: BridgeNet International.	49
3.6.	Ilustración de los distintos tipos de modificación de rutas según tipo de sistema, dependiendo si es una ruta fija, UPR o DARP. Fuente: BridgeNet International.	50
3.7.	Comparación entre EAT (línea celeste) y la forma convencional (línea roja). En esta imagen se puede apreciar que el EAT permite cruzar hacia el terminal desde la pista 26R sin interrumpir los despegues en la pista 26L.	52
3.8.	Algunos tipos de dispositivos de punta de ala.	54
3.9.	Asientos Slimline en un avión de Ryanair. Fuente: Ryanair.	57
3.10.	Algunos tipos de vehículos eléctricos.	57
3.11.	Los asientos Side-Slip aumentan el espacio disponible en el pasillo: A la derecha se muestra el asiento en condición inicial, y a la izquierda se muestra el asiento posicionado en su forma operacional. Fuente: Molon Labe Seating.	59
3.12.	Microestructura de la superficie con recubrimiento de piel de tiburón. Fuente: Fraunhofer IFAM.	59

Índice de tablas

2.1.	Comparación de valor energético, según Poder Calorífico Inferior (LHV). Elaboración propia (Boundy et al., 2011; College of the Desert, 2001; European Biofuels, 2011; Exxon Mobil, 2018; P Pires et al., 2018)	30
2.2.	Precios en Euros por tonelada de CO ₂ equivalente de bonos de carbono de la Unión Europea (EUA) y Certificado de Reducción de Emisiones (CER) de la Mesa Ejecutiva de Mecanismos de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto. Elaboración Propia (SendeCO ₂ , 2018)	33
4.1.	Resumen de costos asociados a utilización de pinturas, en USD. Elaboración propia. .	63
4.2.	Proyección a 5 años de la diferencia de costos acumulada entre pintura estándar y BC/CC. Elaboración propia.	64
4.3.	Resumen del cálculo de combustible y dinero ahorrado anualmente por optimización de embarque. Elaboración propia.	65
4.4.	Resumen de ahorro por optimización de embarque, según porcentaje de utilización de APU. Elaboración propia.	66
4.5.	Especificaciones técnicas y costos de cada contenedor. Elaboración propia.	68
4.6.	Estructura de costos de cada tipo de contenedor, por unidad. Elaboración propia. . . .	68
4.7.	Ahorros esperados, periodo de recuperación y costo a diez años de los tres tipos de contenedores, respecto a uno estándar. Elaboración propia.	68
6.1.	Comparación de Sky Airline respecto a las medidas recopiladas. Elaboración propia.	79

Glosario de términos

APU	Auxiliary Power Unit	Unidad Auxiliar de Energía
ATAG	Air Transport Action Group	Grupo de Acción de Transporte Aéreo
CCO	Continuous Climb Operations	Operaciones de Ascenso Continuo
CDA	Continuous Descent Approach	Aproximación de Descenso Continuo
CORSIA	Carbon Offsetting And Reduction Scheme For International Aviation	Esquema de Bonos y Reducción de Carbono para la aviación internacional
CSPR	Closely Spaced Parallel Runways	Pistas Paralelas Cercanamente Espaciadas
DARP	Dynamic Airborne Reroute Procedures	Procedimientos de Desvío Aéreo Dinámico
EPA	United States Environmental Protection Agency	Agencia de Protección del Medio Ambiente
FAAE	Fatty Acids Alkyl Esters	Esteres Alquílicos de Ácidos Grasos
FAME	Fatty Acids Methyl Ester	Esteres Metílicos de Ácidos Grasos
GEI		Gases De Efecto Invernadero
GNSS	Global Navigation Satellite System	Sistema Global de Navegación Satelital
GPU	Ground Power Unit	Unidad de Energía en Tierra
GWP	Global Warming Potential	Potencial de Calentamiento Global
HEFA	Hydroprocessed Esters And Fatty Acids	Esteres y Ácidos Grasos Hidroprocesados
IATA	International Air Transport Association	Asociación Internacional de Transporte Aéreo
OACI	Organización De Aviación Civil Internacional	Organización de Aviación Civil Internacional
OEF	Optimized Enroute Flight	Vuelo en ruta optimizado
PBN	Performance Based Navigation	Navegación Basada en Performance
PCA	Pre-Conditioned Air	Aire Pre-Acondicionado
RNAV	Area Navigation	Navegación de Área
RNP	Required Navigation Performance	Performance de Navegación Requerida
ULD	Unit Load Device	Dispositivo de carga unitaria. Denominación para contenedores de carga de aeronaves
UPR	User Preferred Route	Ruta Preferida por Usuario

Introducción

La relación entre la aviación y la contaminación del medio ambiente se puede ver desde distintas perspectivas, entre las cuales se puede mencionar principalmente el hecho de que los aviones producen contaminación por medio de la emisión de gases hacia la atmósfera, además de los ruidos asociados a su actividad que afectan principalmente a las cercanías de los aeropuertos. En los inicios de la aviación comercial, la protección del medio ambiente no estaba tan presente en el desarrollo de tecnologías y políticas de la industria, por lo que el consumo de combustibles era bastante alto y los motores muy ruidosos. Con el pasar de los años, el interés por el medio ambiente empezó a ser un tema de importancia para la comunidad internacional, principalmente de la mano con las preocupaciones por el cambio climático.

El desarrollo tecnológico de la aviación, motivado en buena parte por los enormes costos operacionales (IATA, 2010), en su mayoría de combustibles, llevaron a generar grandes avances en eficiencia de estos, un tema de vital importancia para cualquier operador aéreo. Sin embargo, las aerolíneas no han sido las únicas beneficiarias de esto, ya que la reducción en consumo de combustible ha generado también una menor cantidad de gases emitidos hacia la atmósfera por la actividad aérea, lo cual se traduce en un menor impacto ambiental.

A pesar de los avances en eficiencia en el consumo de combustibles, la aviación comercial genera problemas ambientales desde otros puntos. Los grandes aeropuertos, con sus flujos constantes de vuelos, generan un gasto energético considerable en electricidad y agua, por lo que también se ha visto la necesidad de hacer sus operaciones más eficientes y buscar alternativas para reducir su impacto ambiental.

Actualmente, la industria cuenta con medidas para reducir el impacto ambiental de la aviación comercial, y en mayor importancia, la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, lo cual tiene directa relación con el consumo de combustible por parte de las aerolíneas. La OACI, Organización de Aviación Civil Internacional, ha trabajado durante años en la búsqueda de una meta conjunta para la aviación, aportando

con iniciativas y estudios en temática medioambiental, para lograr este objetivo sin afectar el desarrollo y la competitividad de la industria, a lo cual se ha sumado la IATA, Asociación de Transporte Aéreo Internacional, aportando en la búsqueda de una alternativa a esta materia. Estos esfuerzos conjuntos, buscan generar una mayor sustentabilidad en la industria aérea, en el cual el consumo de combustible toma un rol fundamental, por lo que tanto operadores como fabricantes buscan alternativas para tener vuelos mucho más eficientes energéticamente.

Hoy, Chile se encuentra enfrentado a un constante desarrollo de la industria aérea. La cantidad de personas que vuelan en avión en Chile ha ido en un constante aumento, llegando a un total de 1.114.520 pasajeros en vuelos domésticos para el periodo de Diciembre del 2017, un 17 % más que el mismo periodo del año anterior. En la misma línea, el total de personas transportadas en vuelos nacionales el mismo año llegó a 11.597.628, un 7 % más que el año 2016 (Junta de Aeronáutica Civil, 2018). Si bien se suelen experimentar fluctuaciones y algunos decaimientos temporales en el crecimiento, la tendencia a lo largo de los años es clara: la cantidad de personas que acuden al avión como medio de transporte está en alza y al parecer continuará así.

El crecimiento experimentado tiene varios factores a considerar. La formación en el año 2015 del Grupo LATAM, luego de la unión entre la línea aérea nacional LAN y la brasileña TAM sería una maniobra que buscaría posicionar de mejor manera al nuevo grupo dentro del mercado aéreo en Latinoamérica. Sin embargo, la realidad en el mercado en Chile sería distinta, ya que el surgimiento de nuevos competidores haría que la concentración de mercado de LATAM pasara desde un 74 % en 2016, a un 68 % en 2017, y un 62 % en el periodo entre enero y julio del 2018 (Junta de Aeronáutica Civil, 2018).

El 2017, Sky Airline terminaría su transformación completa hacia un modelo low cost, pasando desde un 25 % a un 27 % de concentración de mercado desde 2016 a 2017 (Junta de Aeronáutica Civil, 2018). Aparentemente, el nuevo modelo de Sky aumentaría la competencia hacia el principal actor del mercado, LATAM, lo cual obligaría a esta a adoptar un modelo similar en el mercado nacional para hacer frente a esta competencia.

A pesar de la baja en la participación de LATAM y el crecimiento que tuvo Sky en 2017, ambas aerolíneas se verían amenazadas por un nuevo competidor: Jetsmart. Luego de su entrada en funcionamiento a mitad del mismo año, Jetsmart pasaría a abarcar un 12 % del mercado nacional en el periodo enero-julio del 2018 (Junta de Aeronáutica Civil, 2018), entrando fuertemente en la competencia con precios bajos, con su modelo *Ultra Low Cost*.

La aparición de nuevos competidores en la industria nacional ha sido un agente importante en la baja de precios de los pasajes, así como las nuevas estrategias que han debido adoptar los principales actores. Todo esto se ha traducido en el aumento del tráfico nacional en los últimos años, lo cual se espera que siga aumentando, luego del anuncio por parte del gobierno de Chile en cuanto a la reducción de las tasas aéreas, con lo que se busca fomentar aún más el desarrollo de la industria en el país (Mora, 2018).

En línea con lo expuesto anteriormente, es que la industria debe buscar alternativas que ayuden a alcanzar niveles de contaminación que tengan coherencia con las metas a futuro y el contexto ambiental actual, llevándolo a la realidad de la industria en Chile. Al ser los fabricantes de aeronaves y motores los que determinan la eficiencia energética de las aeronaves, el espacio con que cuentan las aerolíneas para poder disminuir el consumo de combustible es bastante reducido. Sin embargo, alrededor del mundo distintas aerolíneas han podido encontrar variadas alternativas que ayudan a disminuir el impacto de la utilización de combustible, pero muchas veces las acciones tomadas por estas no son replicadas por otros operadores o no son difundidas a nivel de industria. Es por ello que el presente trabajo busca recopilar aquellas medidas utilizadas por la industria a nivel internacional que busquen hacer frente al consumo de combustible en aerolíneas, teniendo en cuenta su beneficio para el medioambiente.

1

Antecedentes Generales

1.1. Justificación del tema

El transporte aéreo, al igual que otros medios de transporte alimentados por energías fósiles, genera emisiones contaminantes que son perjudiciales para el medio ambiente. Además, las emisiones generadas por motores de aviones se producen a gran altura, lo cual aumenta su impacto (Metz and Davidson, 2007). Particularmente, el forzamiento radiativo ¹ generado por las emisiones a gran altura es de entre 2 y 3 veces el efecto del CO₂ solo, mientras que el efecto radiativo antropogénico en general, está estimado en 1,5 veces el del CO₂, es decir, las emisiones de gases en altura pueden tener el doble de impacto sobre la atmósfera que las emisiones a baja altura. Debido a lo anterior es que la Organización de Aviación Civil Internacional, ha trabajado para abordar el impacto ambiental del transporte aéreo y buscar alternativas que ayuden a trabajar en conjunto como industria.

En particular, los estudios que se han realizado en esta materia han logrado determinar que la industria aérea es responsable de un 2 % de las emisiones totales de CO₂ generadas por la actividad humana. Junto a lo anterior, se estima que el crecimiento de la industria aérea seguirá creciendo a una tasa de un 5 % anual, que al contrastarse con las mejoras en eficiencia de consumo de combustible, los cuales se proyectan en un 1-2 %, generaría un aumento de las emisiones de entre un 3 % y un 5 % anual, ante la ausencia de otras medidas adicionales (Metz and Davidson, 2007). De hecho, se estima que de no tomar las medidas necesarias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la aviación, el impacto de la industria llegaría a abarcar entre un 15 % y un 40 %

¹Se denomina forzamiento radiativo al cambio en el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra medido en el borde superior de la troposfera. Un forzamiento radiativo positivo contribuye a calentar la superficie de la Tierra, mientras que uno negativo favorece su enfriamiento (Green Facts, 2018).

del total de emisiones a nivel global para el año 2050 (Cohen and Higham, 2011), lo cual representa un aumento considerable, ya que indica que la falta de medidas en esta materia podría llevar a la industria aeronáutica a convertirse en uno de los principales contribuyentes en el cambio climático antropogénico.

Sin embargo, no se debe desconocer que la mayor preocupación de las aerolíneas para reducir el consumo de combustible se debe al impacto económico de este dentro de sus estructuras de costos. El combustible en general tiene una alta volatilidad de precios, por lo que no es extraño ver variaciones porcentuales en nivel de precios de más de dos cifras, lo cual ha motivado a buscar alternativas para reducir su impacto, tales como la gestión de ingresos, herramientas financieras como el *Fuel Hedging* o la gestión de la capacidad de las rutas y aviones (Sibdari et al., 2018). El beneficio obtenido por estas medidas no necesariamente resuelven el problema, por ejemplo el fuel hedging solo sirve cuando los precios de los combustibles están al alza, por lo que esta práctica ampliamente utilizada ante el riesgo por el alza de precios de combustibles, le provocó grandes pérdidas a algunas aerolíneas que siguieron esta práctica y se enfrentaron a sorpresivas caídas en los precios del petróleo (Carey, 2016; PwC, 2015), lo cual ayuda a visualizar que, si bien existen formas de mitigar el impacto, atacar el consumo de combustible directamente es la única forma de minimizar el riesgo y los costos operacionales en el largo plazo.

Por otra parte, el tráfico aéreo en Chile se mantiene en crecimiento. Si bien la tasa de crecimiento del transporte de pasajeros pasó de un 18 % en 2010 a un 1 % en 2015, para el año 2016 por primera vez se alcanzó a transportar más de un millón de pasajeros en el mes de enero (Junta de Aeronáutica Civil, 2015, 2016, 2017).

Junto con lo anterior, se debe tener en cuenta la llegada de nuevas aerolíneas que han llegado a operar tanto al mercado doméstico chileno, así como nuevas rutas internacionales que han traído la llegada de nuevos competidores. La oferta de vuelos en Chile va en aumento, junto con precios mucho más accesibles, los cuales llegan a competir directamente con los otros medios de transportes tradicionales del país. Los medios de transporte como buses y trenes tienen una fuerte utilización en Chile, debido a las largas distancias entre regiones. En específico, la competencia por parte de las aerolíneas, principalmente low cost, ha logrado disminuir en un 20 % la cantidad de personas que se transportan en buses en Chile (Asencio, 2017), lo cual podría seguir en aumento en el futuro, si entran nuevos competidores en el mercado.

En consideración de los antecedentes presentados, es que se realiza este trabajo, con la finalidad de presentar una recopilación de prácticas y recomendaciones para la

reducción del consumo de combustible para las aerolíneas chilenas, ante el crecimiento de la industria y de las regulaciones en temáticas ambientales.

1.2. Objetivos

Objetivo General

Realizar una recopilación de buenas prácticas y recomendaciones que apunten a la reducción del consumo de combustible, por medio de un análisis de la industria a nivel global.

Objetivos Específicos

- Identificar las buenas prácticas y recomendaciones para la reducción del consumo de combustible, por parte de aerolíneas en el mundo.
- Clasificar las prácticas y recomendaciones según su naturaleza, ya sean operacionales, de infraestructura o tecnológicas.
- Evaluar la implementación de algunas de estas medidas para una aerolínea nacional

1.3. Metodología

- Se realizará una revisión a la información disponible respecto a las prácticas en reducción del consumo de combustible.
 - Se hará una revisión de la literatura existente en esta materia, consultando en primera instancia la información entregada por las propias aerolíneas sobre las prácticas y medidas adoptadas por estas respecto a la reducción del consumo de combustible.
 - Se revisarán también estudios científicos en esta materia, a modo de encontrar investigaciones que respalden las medidas utilizadas por la industria actualmente, así como también con la finalidad de buscar sugerencias y/o nuevas tecnologías en desarrollo.
 - Las medidas identificadas serán clasificadas en tres categorías: operacionales, infraestructura y tecnología.

- Se considerará un caso aplicado, comparando la situación actual de una aerolínea nacional, y evaluando la aplicación de aquellas medidas que aún no hayan sido aplicadas en dicha aerolínea.
 - Se tomarán en cuenta principalmente los costos de implementación de cada medida y se efectuará una estimación de la reducción de combustible esperada, de modo de comparar el beneficio entregado con sus costos de implementación.

1.4. Alcance

El alcance de este trabajo es de tipo descriptivo, ya que busca identificar y recopilar las prácticas más comunes y eficientes en la reducción del consumo de combustible en las aerolíneas a nivel global. Principalmente se busca analizar y recopilar aquellas prácticas de las principales aerolíneas comerciales a nivel mundial en cuanto a la reducción del consumo de combustible, tanto desde el punto de vista de las operaciones aéreas, como las terrestres y presentar un modelo para abordar el caso en Chile.

Por otra parte, el alcance temporal es de tipo transversal, ya que no supone un seguimiento y solo se pretende observar la naturaleza de los costos de la reducción del consumo de combustible y su incidencia sobre las aerolíneas, lo cual se pretende abordar para la situación de la industria considerando la información disponible dentro de los últimos 20 años.

2

Estado del Arte

La búsqueda de la reducción del consumo de combustible puede ser vista desde varias perspectivas distintas. Por una parte, la reducción del consumo de combustible desde el punto de vista económico es algo intuitivo, ya que este forma una parte importante de los costos operacionales de las aerolíneas, lo cual si se suma a las fuertes fluctuaciones que pueden llegar a experimentarse en el precio de los combustibles, puede generar un fuerte impacto económico hacia los operadores. Por otra parte, y en lo que busca hacer énfasis este trabajo, es la perspectiva medioambiental. El rápido desarrollo tecnológico a nivel mundial en el último siglo, lleva consigo una importante preocupación: el cambio climático generado por la actividad humana. Cada vez más industrias buscan generar nuevas alternativas que permitan dar cobertura a las necesidades de las personas, buscando lograr un equilibrio con el cuidado del medio ambiente. En este sentido, la industria aérea se encuentra trabajando conjuntamente para establecer metas globales que estén en línea con los objetivos de los tratados internacionales vigentes en materia medio ambiental, de manera de hacer del transporte aéreo una industria sustentable y operacionalmente segura.

En términos globales, la búsqueda de la protección del medioambiente ha sido un proceso que se ha desarrollado desde hace ya varios siglos. Unos de los primeros estudios que abordaron esta materia, fueron desarrollados en el siglo 13 por diversos intelectuales y estudiosos del medio oriente, los cuales se enfocaron en los efectos de la contaminación en el aire y el agua principalmente (Gari, 2002). En el mismo siglo, en Inglaterra, el Rey Eduardo I prohibiría el uso de carbón en mineral, debido a la gran cantidad de humo que afectaba al aire de Londres (Brimblecombe, 1976), esta sería una de las primeras formas de políticas ambientales de las que se tiene conocimiento.

A partir de fines del siglo 19 en adelante, a nivel mundial se gestarían muchos más hitos de importancia en materia ambiental, como el desarrollo de distintas instituciones e investigaciones enfocadas en esta materia. Dentro de los hechos que cabe destacar se

encuentra la creación del Programa de la ONU para el Medio Ambiente (PNUMA), el desarrollo del Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 1998) y el Tratado de París (UNFCCC, 2017b), los cuales han sido el resultado de los esfuerzos internacionales a través de los años para regular el cuidado del medio ambiente.

En la aviación, las primeras muestras de preocupación en esta materia comenzaron a desarrollarse en los años 60's con la introducción de aeronaves tipo jet, junto con el aumento en el uso de estos para vuelos internacionales. Durante esta década se realizaron algunas conferencias internacionales a nivel de la OACI, principalmente para tratar el tema del ruido de las aeronaves, lo que concluiría en el Anexo 16 del Convenio de Chicago, titulado en ese momento "Ruido de Aeronaves" (OACI, 2017a).

Posteriormente, en 1973 la OACI formaría el Grupo de Estudio de Emisiones de Motores de Aeronaves, y luego en 1977 se formaría el Comité para Emisiones de Motores de Aeronaves, el cual buscaría desarrollar estándares para las emisiones de aeronaves, los cuales principalmente limitarían la emisión de humo y ciertos contaminantes gaseosos para motores turbo-jet y turbo-fan que fueran producidos a futuro. A raíz de esto, el alcance del Anexo 16 fue ampliado para incluir las emisiones gaseosas, por lo que pasó a titularse "Protección Medioambiental" (OACI, 2017a).

Los dos organismos mencionados anteriormente se fusionarían en 1983, para formar el Comité para la Protección del Medio Ambiente (CAEP, por sus siglas en inglés), el cual continuaría las labores para actualizar el Anexo 16 sobre ruidos y emisiones (OACI, 2017d).

En 2010, durante la asamblea de la OACI, se adoptó un compromiso global histórico y sin precedentes respecto a la aviación internacional y el cambio climático, para desarrollar una acción conjunta entre los países alrededor del mundo para limitar y reducir las emisiones de carbono en la aviación internacional. Con esto, la OACI sería la primera agencia de la ONU en llevar a una industria hacia el establecimiento de un acuerdo global dentro de las emisiones de CO₂ (OACI, 2017d).

Durante la asamblea número 39, en 2016, se lograría un acuerdo para el desarrollo del Esquema de Bonos y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA, por sus siglas en inglés), una medida con la que se busca limitar las emisiones de carbono por parte de la industria aérea. Esta medida sería la primera medida de este tipo adoptada internacionalmente para una industria en específico (OACI, 2017d).

2.1. Antecedentes

Los principales esfuerzos por disminuir el consumo de combustible vienen de los propios fabricantes de aeronaves y motores. Las organizaciones gubernamentales de aviación alrededor del mundo solo pueden fomentar y regular ciertas prácticas dentro de sus fronteras para lograr mayor eficiencia y/o reducir la contaminación de la actividad aérea. Las organizaciones mundiales trabajan continuamente para generar estándares de calidad y medidas de mercado que ayuden a reducir el impacto del uso de combustible y lograr una industria más eficiente y sustentable, tanto económica como energéticamente (OACI, 2017a). Las aerolíneas no cuentan con poder para hacer modificaciones sustanciales en el uso de combustible, ya que deben operar con los aviones y motores que sean desarrollados por la industria. Sin embargo, las aerolíneas tienen ciertos requerimientos y optarán siempre por aquellas aeronaves que sean ideales para su operación, por lo que cuando los fabricantes generan nuevos diseños y aeronaves con características muy distintas a las que ofrece el mercado, estos nuevos diseños pueden no ser del interés económico de las aerolíneas, como fue el caso del Boeing Sonic Cruiser (Norris, 2003), o actualmente la baja demanda de la gran apuesta del Airbus A380 (Jasper and Rothman, 2016).

Principalmente, los estudios señalan que una medida importante para la reducción del consumo de combustible es la reducción del peso vacío de la aeronave, así como de las cantidades de combustible transportado que no se utiliza en vuelo y mantenimientos adecuados a los motores (Sánchez Tirado and Puentes Márquez, 2012), lo cual se traduce en reducción de costos en esta materia. En general, los fabricantes de aeronaves buscan desarrollar materiales que ayuden a disminuir el peso de las estructuras de estas, de manera de generar menor consumo de combustible en el largo plazo. Ejemplos en esta materia es la utilización de materiales compuestos para la fabricación de motores, como es el caso del motor GEnx de General Electric, el cual cuenta con una reducción en su peso de 350 libras (158,8 kg) (GE Aviation, 2004), el cual además presenta una reducción en consumo de combustible de un 15 % (GE Aviation, 2017).

La aerodinámica juega un rol fundamental en la eficiencia de los vuelos. Lograr disminuir el roce de las aeronaves en vuelo es una de las formas más estudiadas para disminuir el consumo de combustible. Una de las medidas más conocidas en esta materia es el uso de winglets, los cuales disminuyen los vórtices de punta de ala en las aeronaves, aumentando la eficiencia y disminuyendo el efecto de arrastre de estos sobre la aeronave. Otras medidas que se han desarrollado son los nuevos conceptos de despegue y aterrizaje, los cuales buscan que la aeronave desarrolle una trayectoria distinta, generalmente con ascensos y descensos continuos, los cuales necesitan de

menos empuje de la aeronave, logrando disminuir significativamente el consumo de combustible (Ryanair, 2017).

El hecho de que el petróleo para producir combustibles se acabará es una realidad, los productores de combustible lo saben y por lo mismo se entiende que esto solo hará que los precios sean aún más volátiles (Faaij and van Dijk, 2012). La necesidad de combustibles por parte del sector de transportes seguirá en alza, mientras no se sigan generando nuevas tecnologías para ser más eficientes. De hecho, se espera que el consumo de combustible del sector de transportes a nivel global siga creciendo a un 1,3 % para el año 2030, alcanzando un 80 % del total mundial (Bello, 2012; Metz and Davidson, 2007).

Entendiendo la necesidad de buscar nuevos combustibles para la industria ante el crecimiento y la falta de petróleo, el uso de biocombustibles se asoma como una fuente para el desarrollo de una industria sustentable. Ciertamente, los biocombustibles se han desarrollado principalmente con el cambio climático como principal motivador. Estos combustibles podrían ser una alternativa para el futuro de la aviación, con los que se busca reducir las cantidades de gases de efecto invernadero sin tener que reducir necesariamente la cantidad de combustible consumido, por lo que no se podrían considerar como una alternativa atractiva económicamente para las aerolíneas, sobre todo considerando que sus costos de producción aún son mayores que los del combustible convencional. En general, los biocombustibles pueden reducir hasta un 80 % las emisiones de CO₂ en comparación a los combustibles fósiles (Air Transport Action Group, 2009). En particular, se ha determinado que la utilización de biocombustible a base de algas podría reducir la huella de carbono de la industria aérea hasta en un 85 % (Nair and Paulose, 2014).

La materia prima utilizada para la producción de biocombustibles es de origen biológico y por lo mismo, renovable. Cultivos de aceites no combustibles como la camelina, jatropha, algas, halófitos, desechos urbanos, residuos forestales, etc, son la mayor fuente de recursos para los procesos de producción (Lajo Bertran, 2009). Los combustibles alternativos pueden ofrecer ganancias económicas, particularmente para los países en desarrollo donde hay tierra disponible para la cultivación de estas plantas, dando la oportunidad de ser parte de la cadena para proveer de combustibles a la industria (Air Transport Action Group, 2011). Particularmente en la industria aérea, IATA espera que para el año 2030, la porción de combustibles de origen biológico utilizados contribuya al 30 % del total utilizado, lo cual muestra un fuerte incremento respecto a lo utilizado actualmente.

Como se ha mencionado con anterioridad, la reducción del consumo de combustible traería no solo una importante reducción de costos, sino que también un beneficio en cuanto a reducción de emisiones. Se estima que una reducción de 0,3 Kg de combustible, puede disminuir cerca de 1 Kg de CO₂, lo que a su vez se traduciría en un ahorro de USD 1,1 (Tsai et al., 2014). Además, el lograr reducir emisiones de gases no solo ayuda al medioambiente, sino que también es beneficioso para las aerolíneas en términos de imagen. De hecho, existe evidencia que indica que los pasajeros suelen optar por aerolíneas con mayor conciencia ambiental (Hagmann et al., 2015). Se ha encontrado evidencia de que la información medioambiental de las aerolíneas podría influenciar en la decisión de los pasajeros en sus viajes, si la información está disponible (Gössling et al., 2009). Estos resultados son compartidos por otros estudios donde se han realizado experimentos de elecciones de usuarios, donde han demostrado que un mejor desempeño medioambiental afecta la decisión de los consumidores (Araghi et al., 2014).

Finalmente, cabe mencionar un estudio realizado el año 2010, el cual toma en cuenta los costos monetarios por toneladas de CO₂ reducidas, por medio de la reducción del consumo de combustible. Este estudio es el que presenta mayor similitud con el tema de este trabajo, ya que muestra directamente el impacto monetario de las regulaciones ambientales, el cual indica que se pueden tomar medidas costo-efectivas para reducir el impacto ambiental, las que generarían un beneficio a la aerolínea desde un punto de vista de costos e imagen. Dicho estudio se centró en el impacto que el sistema de bonos de carbono de la Unión Europea tendría sobre una aerolínea chilena, desde la entrada en funcionamiento de este programa en el año 2012. En específico, dicho trabajo muestra un ahorro de USD 136,8 por tonelada de CO₂ reducida, lo que es producto tanto de reducción de emisiones desde punto de vista operacional, regulatorio y de programas de RSE (Brito Pérez, 2010). Sin embargo, el hecho de que el trabajo se realizara considerando el marco de bonos de carbono, el impacto económico establecido considera también la compra y venta de bonos de carbono, por lo que no representa el beneficio de las medidas de reducción por sí solas.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Consumo de combustible en aerolíneas

Los aviones comerciales utilizados por las aerolíneas alrededor del mundo son denominados aviones jet (o aviones a reacción), los cuales utilizan motores que ingresan aire por su sección delantera, el cual es luego comprimido y mezclado con combustible dentro de una cámara, lo cual al ser encendido genera gases que son eyectados a alta velocidad por la sección trasera del motor, generando el empuje que impulsa a la aeronave (Benyo, 2014).

El combustible utilizado por los aviones jet de las aerolíneas, es un combustible compuesto principalmente de keroseno. Entre los de uso civil se encuentran principalmente el Jet A-1, Jet A y Jet B (CSGNetwork, 2011b).

El combustible Jet A-1 es un tipo de combustible de keroseno, el cual es apropiado para la mayoría de los motores de turbina. Se produce bajo un estricto estándar aceptado internacionalmente, tiene un punto de inflamabilidad mayor a 38° C y un punto de congelación máximo de -47° C.

El combustible Jet A es un tipo de combustible de keroseno similar al anterior, normalmente disponible solo en EE. UU. Tiene el mismo punto de inflamabilidad, pero tiene un punto de congelamiento máximo de -40° C.

El Jet B es una mezcla de gasolina y keroseno, el cual es rara vez usado, excepto en climas muy fríos. Puede ser usado como alternativa al Jet A-1, pero tiene una mayor inflamabilidad que este último, lo cual lo hace más difícil de manejar. Es utilizado principalmente en países como Canadá, donde el clima frío requiere un combustible más inflamable (CSGNetwork, 2011a).

El consumo de combustible ha sido un tema de constante preocupación en la industria aeronáutica. Distintas medidas se han tomado para reducir el consumo de este en los aviones, considerando que este ítem alcanzó un 35 % de los costos operacionales de las aerolíneas a nivel global en 2008, aunque a la fecha se ha logrado reducir a un 18,9 % (IATA, 2018).

Las etapas de vuelo de mayor consumo de combustible en las aeronaves son el despegue y aterrizaje, ya que son las etapas en que se requiere mayor empuje, por lo que son más difíciles de disminuir (Faaij and van Dijk, 2012).

2.2.2. Combustibles alternativos

Los combustibles alternativos son aquellos derivados de fuentes distintas del petróleo, producidos por el uso de recursos biológicos. El uso de combustibles alternativos reduce la dependencia del petróleo y algunos se derivan de fuentes renovables. A menudo, los combustibles alternativos contaminan menos que la gasolina o el diésel (Fuel Economy, 2017).

Algunos ejemplos de combustibles alternativos:

- **Combustibles hidro-procesados (HEFA):** Se producen por la hidro-desoxigenación de aceites vegetales, grasas animales, grasas desechadas y propano. Ofrecen alta densidad energética, por lo que pueden ser utilizados por si solos, sin necesidad de mezclarse con otros combustibles. Generan menos contaminación de monóxido de carbono, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y material particulado. Se pueden utilizar en motores de aviación convencionales, sin necesidad de modificaciones. Honeywell UOP produce un combustible alternativo de este tipo, utilizado por United Airlines, el cual ofrece mayor energía por peso y menor punto de congelación (Honeywell UOP, 2018; United, 2018).
- **Combustibles Fischer Tropsch:** Son combustibles de hidrocarburos, producidos por la conversión catalítica de gases de síntesis (CO y H_2). No son tóxicos, no emiten óxido de nitrógeno y tienen emisiones de material particulado reducidas. Además, su combustión no emite CO_2 , ni HC. Su producción llega a ser un 10 % más cara que los combustibles convencionales (US EPA, 2002).
- **Biodiesel:** Consiste en ésteres alquílicos de ácidos grasos (FAAE) o ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME), especialmente aceites vegetales y grasa animal y se produce por trans-esterificación. Es biodegradable y ofrece gran lubricidad, a diferencia de los anteriores. No emite GEI y no genera contaminación de aguas, tierra o aire. Sin embargo, su densidad energética es baja y no permite ser utilizado en aviones.
- **Biohidrógeno líquido:** Consiste en la producción de hidrógeno (H_2) a partir de una amplia gama de recursos de biomasa, mediante procesos térmicos y bioquímicos. Tiene mayor energía por peso, comparado al combustible convencional, pero requiere mayor volumen de almacenamiento. Tiene baja emisión de GEI, pero requiere modificación de motores para ser utilizado en aviación. Las modificaciones requeridas son mínimas y consisten en modificaciones simples de dimensiones de las turbinas y toberas (Airbus Deutschland GmbH, 2003).

- **Bioalcohol:** Se producen por fermentación de almidón y azúcar, o conversión catalítica de biogás. Generalmente se usan etanol y butanol. Tienen alta volatilidad y bajo punto de inflamabilidad, lo que lo hace inviable para la aviación.

		JET A-1	Biodiesel FAME (20°C)	Fischer-Tropsch Diesel	HEFA (20°C)	Hidrógeno (25°C)
Densidad	$[kg/m^3]$	775 - 840	880	797,0	768,5	70,8
Energía Específica	$[MJ/kg]$	42,8	37,1	43,2	44,4	119,9
Densidad Energética	$[MJ/L]$	33,2 - 36,0	32,6	34,5	34,2	8,5

Tabla 2.1: Comparación de valor energético, según Poder Calorífico Inferior (LHV). Elaboración propia (Boundy et al., 2011; College of the Desert, 2001; European Biofuels, 2011; Exxon Mobil, 2018; P Pires et al., 2018)

Como se puede apreciar, el Hidrógeno es el que entrega mayor energía por kg de combustible, sin embargo, su baja densidad hace que su energía por volumen sea la menor de todas, por lo que se hace más difícil de implementar. Por el otro lado, los combustibles Fischer-Tropsch presentan valores energéticos muy similares a los del combustible Jet A-1, por lo que es la mejor opción para reemplazarlo.

2.2.3. Sistema de Gestión Ambiental

Cuando nos referimos a las medidas que pueda tener una organización en cuanto a materia medioambiental, nos estamos refiriendo también a lo que se conoce como Sistema de Gestión Ambiental. A continuación, se presentan las principales características, según la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (EPA) (US EPA, REG 06, 2017). Un Sistema de Gestión Ambiental (SGA), es un marco de trabajo que ayuda a una organización a alcanzar sus metas medioambientales por medio de la constante revisión, evaluación y mejoramiento de su desempeño medio ambiental. La suposición es que esta revisión y evaluación constante identificará oportunidades para mejorar e implementar el desarrollo medioambiental de la organización. El SGA no dicta el nivel de desempeño medioambiental que se debe alcanzar; el SGA de cada organización es adaptado a sus propios objetivos y metas individuales (US EPA, REG 06, 2017). Un SGA ayuda a una organización a tratar sus demandas regulatorias en una manera sistemática y costo-efectiva. Este abordaje proactivo puede ayudar a reducir el riesgo de incumplimiento y mejorar la salud y prácticas seguras de los trabajadores y el público. Un SGA puede además ayudar a abordar asuntos no regulados, como conservación de energía, y puede promover un control operacional y administración de trabajadores más fuerte. Los elementos básicos de un SGA incluyen lo siguiente (US EPA, REG 06, 2017)

1. Revisión de las metas medioambientales de la organización
2. Analizar su impacto medioambiental y sus requisitos legales

Deming (US EPA, REG 06, 2017). Actualmente la norma ISO 14001 se encuentra en su versión 2015 (ISO 14001:2015) (International Organization for Standardization, 2018).

2.2.4. Cambio Climático y políticas

Por “cambio climático” se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables (Naciones Unidas, 1992). El cambio climático es uno de los grandes desafíos que enfrenta la humanidad actualmente. Con la ratificación de Chile a las Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 1994 y al Protocolo de Kioto en 2002, nuestro país se compromete ante la comunidad internacional a hacer frente a este desafío (Ministerio del Medio Ambiente, 2017a).

En particular, al ratificar el Protocolo de Kioto, los países se comprometen a limitar y reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, por medio de la aplicación y/o elaboración de políticas y medidas en conformidad con sus circunstancias nacionales, como el fomento de la eficiencia energética en sectores pertinentes de la economía nacional; investigación, promoción, desarrollo y aumento del uso de energías renovables y tecnologías avanzadas; reducción de incentivos fiscales, exenciones tributarias y subvenciones que sean contrarios al objetivo de reducción de emisiones, entre otras medidas (UNFCCC, 2017a).

Por su parte, el Acuerdo de París, también ratificado en Chile en 2017 (Ministerio del Medio Ambiente, 2017b), entrega un objetivo mucho más específico que el Protocolo de Kioto, ya que busca mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de los 2°C respecto a los niveles preindustriales, y proseguir limitarlo a 1,5°C en el futuro, considerando que esto reduciría considerablemente los riesgos y efectos del cambio climático (UNFCCC, 2015). En línea con los tratados internacionales mencionados anteriormente, es que el Ministerio del Medio Ambiente, por medio de la División de Cambio Climático, busca cumplir con los compromisos adquiridos por medio del trabajo dividido en tres departamentos: 1) Mitigación en inventarios de Contaminantes Climáticos, 2) Adaptación al cambio climático y Desarrollo de Capacidades, y 3) Negociación Internacional y Financiamiento.

Por otra parte, la División de Cambio Climático es responsable de asesorar e implementar la Convención de Viena y el Protocolo de Montreal, sobre las sustancias agotadoras de la capa de ozono, potenciando así sinergias entre las acciones de protección de la capa de ozono y para enfrentar el cambio climático (Ministerio del Medio Ambiente, 2017a).

2.2.5. Huella de carbono

La huella de carbono es una forma simple y estándar de medir el impacto ambiental de las actividades humanas sobre el planeta. Esta es un recuento de las emisiones de CO₂ liberadas a la atmósfera, relacionadas a las actividades cotidianas. La medición toma en cuenta las emisiones de gases de efecto invernadero, medidas en unidades de CO₂ equivalentes (UACH, 2017).

El objetivo de la huella de carbono es calcular la cantidad de GEI emitidos directa o indirectamente y con ello reducir los niveles de contaminación por medio de un cálculo estandarizado de las emisiones en los procesos productivos de las empresas (UACH, 2017).

2.2.5.1. Bonos de carbono

Un bono de carbono es un crédito de reducción de emisiones de GEI lograda por una parte, el cual puede ser comprado por otra parte para compensar sus propias emisiones. Los bonos de carbono generalmente se miden en Toneladas de CO₂ equivalentes (CO₂e) y son comprados y vendidos a través de un número de corredores internacionales, vendedores online y plataformas de comercio (David Suzuki Foundation, 2017).

Varios tipos de actividades pueden generar bonos de carbono. Las fuentes de energía renovable, como las granjas eólicas, pueden crear bonos de carbono al remplazar el uso de combustibles fósiles. Otros tipos de bonos disponibles incluyen aquellos que sean el resultado de proyectos eficientes energéticamente, destrucción de GEI potentes, o programas que absorban el dióxido de carbono de la atmósfera, como la reforestación (David Suzuki Foundation, 2017).

Precio Bonos (Euro/tonCO ₂)	EUA	CER
Promedio 2017	5,83	0,23
Promedio 1S 2018	14,83	0,24

Tabla 2.2: Precios en Euros por tonelada de CO₂ equivalente de bonos de carbono de la Unión Europea (EUA) y Certificado de Reducción de Emisiones (CER) de la Mesa Ejecutiva de Mecanismos de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto. Elaboración Propia (SendeCO₂, 2018)

2.2.6. Industria aérea y protección ambiental

En relación a lo anterior, la industria aérea contribuye a la generación del cambio climático antropogénico, ya que genera un alto impacto ambiental debido la emisión de gases a gran altura. Por su parte, la Organización de Aviación Civil Internacional, entidad que regula y vela por el cumplimiento de los convenios internacionales, estándares y

prácticas recomendadas de la aviación civil a nivel internacional (OACI, 2017b), ha establecido una serie de metas en relación al impacto medioambiental de la aviación, las cuales buscan principalmente reducir los ruidos y emisiones realizadas por las aeronaves (OACI, 2017c).

Dentro de esta industria, una de las principales formas de reducir la emisión de GEI es por medio de la reducción de consumo de combustible, principalmente en aerolíneas low cost, ya que buscan reducir costos. Una aerolínea low cost, es aquella que tiene estructuras de costos relativamente bajas en comparación a otras aerolíneas y ofrece bajos precios. Dicha aerolínea puede ser independiente, una división o subsidiaria de una aerolínea mayor (OACI, 2004).

2.2.6.1. OACI respecto a la protección ambiental

La OACI ha trabajado a lo largo de los años para fomentar un desarrollo sustentable de la industria aeronáutica. Para cumplir con sus responsabilidades, la organización ha desarrollado una serie de estándares, políticas y material guía para la aplicación de medidas para abordar los ruidos y emisiones de aeronaves aprovechando mejoras tecnológicas, procedimientos operacionales, organización apropiada del tráfico aéreo, planificación correcta de aeropuertos y uso de tierra, y el uso de opciones basadas en el mercado (OACI, 2017c).

En 2004, la OACI adoptó tres metas ambientales importantes:

1. Limitar o reducir el número de personas afectadas por ruidos significativos de aeronaves
2. Limitar o reducir el impacto de las emisiones de aviación en la calidad del aire local
3. Limitar o reducir el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero de la aviación sobre el cambio climático

Las actividades de la OACI en el ámbito medioambiental están principalmente enfocadas en aquellos problemas que se benefician en mayor medida por medio de un acercamiento común coordinado, es decir, por medio de la cooperación para el beneficio mutuo (OACI, 2017c). La mayoría del trabajo es llevado por el Comité para la Protección Ambiental de la Aviación, CAEP, por sus siglas en inglés, el cual consiste de miembros y observadores de estados, organizaciones intergubernamentales y no gubernamentales que representen la industria de la aviación y los intereses medioambientales (OACI, 2017c).

La OACI mantiene relaciones cercanas con otras organizaciones reguladoras de la ONU que han expresado interés en la aviación civil, principalmente con la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, para el cual entrega resúmenes regulares sobre las actividades de la OACI relacionadas con emisiones (OACI, 2017c).

CORSIA

Durante la 39° sesión de la Asamblea de OACI, los estados miembros de OACI adoptaron el Esquema de Bonos de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA, por sus siglas en inglés), el cual es un sistema de bonos de carbono bajo el cual los operadores aéreos deberán comprar bonos de carbono por los aumentos en emisiones de CO₂ dentro del programa (IATA, 2017b).

Para abordar las preocupaciones de países en desarrollo, además de tomar en cuenta las distintas circunstancias y capacidades de los estados, el programa CORSIA será implementado en distintas fases.

Desde 2021 hasta 2026 el programa solo se aplicará a vuelos internacionales entre estados que acepten voluntariamente participar en esta. Todos los otros vuelos internacionales quedarán exentos.

A partir del 2027, la participación será obligatoria para los estados que cumplan con ciertos requisitos relacionados con su nivel de actividades aéreas, excepto los países menos desarrollados, estados en vías de desarrollo de pequeñas islas y países sin acceso al mar, los cuales quedarán exentos, a menos que quieran participar voluntariamente.

Uno de los motivos para adoptar el programa CORSIA por parte de la industria, se debe a la naturaleza internacional de las operaciones de las empresas aéreas, por lo que el adaptarse a marcos regionales es más complicado a nivel de industria aérea, debido a esto, contar con un sistema estandarizado hace el trabajo menos complejo y barato de implementar.

2.2.6.2. IATA respecto a la protección ambiental

IATA reconoce la necesidad de abordar el reto del cambio climático y ha adoptado una serie de metas para mitigar las emisiones de CO₂ del transporte aéreo (IATA, 2017a)):

1. Una mejora en promedio en consumo de combustible de 1,5 % anual desde 2009 hasta 2020

2. Limitar el crecimiento neto en emisiones de CO₂ de aviación a partir del 2020 (Crecimiento neutral)
3. Reducción en las emisiones netas de CO₂ de un 50 % para el año 2050, respecto a los niveles del 2005.

Estrategia de Cuatro Pilares

La tecnología existente actualmente y las mejoras en eficiencia de infraestructura y operaciones, junto con combustibles alternativos, no serán suficientes para lograr un crecimiento neutro a partir de 2020, como se muestra en la fig. 2.2. Debido a esto, es que se propone que la brecha en emisiones que deberá ser disminuida a partir de 2020 se logre a través de medidas basadas en el mercado, por ejemplo, bonos de carbono.

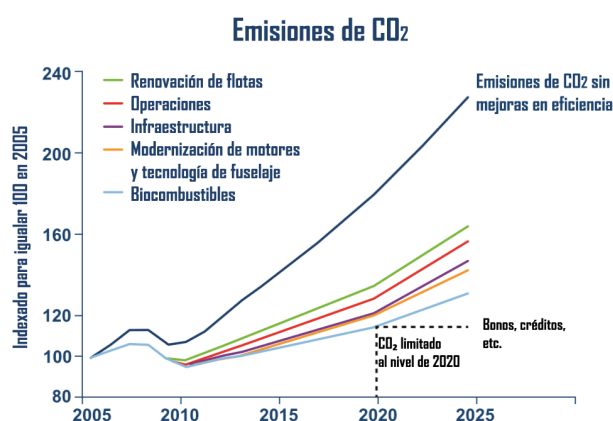


Figura 2.2: Crecimiento de emisiones de CO₂ para la industria aeronáutica. Elaboración propia (IATA, 2009)

IATA está comprometida en alcanzar las metas propuestas, para lo cual indica que se requiere un fuerte compromiso de parte de todas las partes para trabajar en conjunto, por medio de una estrategia de cuatro pilares para la industria aérea (IATA, 2017a).

La estrategia de cuatro pilares de la IATA consiste en lo siguiente:

- **Tecnología:** Mejorar la tecnología, incluyendo el desarrollo de combustibles sustentables bajos en carbono
- **Operaciones:** Lograr operaciones aéreas mucho más eficientes
- **Infraestructura:** Mejoras de infraestructura, incluyendo sistemas de gestión de tráfico aéreo más modernos
- **Medidas basadas en el mercado:** Contar con una única medida global basada en el mercado para cubrir la parte faltante

Evaluación Ambiental de IATA

IATA cuenta con un programa llamado IATA Environmental Assessment (IEnvA), el cual es un sistema diseñado para evaluar de forma independiente y mejorar la gestión ambiental de una aerolínea (IATA, 2017a).

IEnvA es un programa voluntario basado en principios de acuerdo a las obligaciones medioambientales y el compromiso con la mejora continua en la gestión ambiental.

Adoptar los procedimientos estándar y las prácticas recomendadas de IEnvA permite a la aerolínea enfocar recursos en mejorar el desempeño medioambiental, en lugar de desarrollar un SGA desde cero.

IEnvA es compatible con otros SGA como el ISO14001, con un alcance expandible a centros de mantenimiento (MRO), operaciones terrestres y servicios de catering.

IATA Carbon Offset Program (Programa de bonos de carbono de IATA)

Según IATA, los sistemas de bonos de carbono ofrecen una solución rápida, directa y pragmática a la reducción de emisiones de carbono en el corto plazo. El programa de bonos de carbono de la IATA busca establecer un modelo estandarizado, bajo el cual puedan trabajar aerolíneas de todos los tamaños.

El sistema de bonos de carbono de IATA está auditado y aprobado independientemente por el mayor estándar para bonos de carbono, Quality Assurance Standard. Los bonos aprobados por QAS son sometidos a una lista de comprobación de 40 puntos, entre los que se incluye cálculos de emisiones, selección de proyectos para la reducción de emisiones y provisión de información. IATA es uno de las cuatro únicas organizaciones a nivel global en contar con este estándar.

La industria aérea, debido a la importancia que tienen las organizaciones a nivel global, la seguridad operacional y la cooperación entre operadores, hacen necesario contar con medidas universales para hacer frente a los desafíos que se presentan, por lo que los esfuerzos de las distintas organizaciones deben buscar un fin común, para trabajar de manera óptima en estos aspectos. Debido a esto, se debe destacar la convergencia entre el trabajo de OACI e IATA. Como se mencionó dentro de los objetivos de OACI, se busca limitar o reducir el impacto de las emisiones de GEI de la aviación, lo cual se puede ver reflejado en las metas de la IATA respecto al crecimiento neutral desde 2020, solo que de una manera mucho más específica, estableciendo objetivos cuantificados. Por otra parte, el cuarto pilar de la estrategia de la IATA -Medidas basadas en mercado- se logra cubrir por medio del programa CORSIA, como una medida global para la industria.

3

Recopilación de medidas

Para el desarrollo de este trabajo, se tendrá en cuenta una división de las prácticas y medidas recomendadas, la cual corresponderá a Operacionales, Infraestructura y Tecnología, acorde a la estrategia de cuatro pilares de la IATA. En cuanto al cuarto pilar, medidas basadas en el mercado, el consenso actual de la industria es a contar con una sola medida en general para abordar este tema, por lo que no es algo que esté dentro del alcance de una aerolínea adoptar medidas en este aspecto. En particular, el trabajo en este aspecto se espera sea abordado por el programa CORSIA de la OACI, por lo que se excluye dentro de la clasificación de las medidas en este trabajo. Finalmente, las tres clasificaciones de medidas mencionadas, serán subdivididas en las siguientes categorías:

- **Cuantificadas:** Aquellas medidas consultadas donde se menciona un número en específico del beneficio en consumo de combustible que ha entregado al operador, el cual puede ser en porcentaje, cantidad de combustible ahorrado por vuelo, por pasajero, anual, etc.
- **No cuantificadas:** Medidas adoptadas por operadores, pero donde no se indica el beneficio que esta ha entregado, pero se menciona si ha tenido un impacto positivo o negativo.
- **En desarrollo:** Medidas que están siendo estudiadas y/o que se encuentran en periodos experimentales, donde se busca recabar más información sobre el potencial beneficio y la forma de aplicarlo, pero que se tiene una estimación de lo que podría entregar. Esta subdivisión será considerada solamente para las medidas de carácter tecnológico.

3.1. Medidas o Planes de acción en el ámbito operacional

Se considerarán dentro del ámbito operacional todas aquellas medidas y/o prácticas que se relacionen netamente con las decisiones que pueda tomar un operador, respecto a la forma en que desarrolla sus actividades. En otras palabras, todas aquellas medidas que pasan por medio de la gestión operacional de una empresa.

3.1.1. Cuantificadas

1. **Densidad de asientos:** Optar por configuraciones de asientos para las aeronaves, ofreciendo vuelos de clase única, permite generar mayor eficiencia de combustible por pasajero. Ryanair utiliza una configuración de 189 asientos en sus B737-800, a diferencia de las configuraciones de 162 asientos en dos clases normalmente utilizadas por otras aerolíneas. Con esto Ryanair logra reducir en un 14 % el consumo de combustible por pasajero.
2. **Aproximación de baja resistencia:** Mejor manejo de las características aerodinámicas de la aeronave durante las aproximaciones, para proporcionar un menor roce durante estas maniobras. Generalmente suele consistir de un mejor manejo de los controles de vuelo de la aeronave que puedan generar mayor resistencia, típicamente los flaps, así como también la disminución del uso de empuje inverso en los motores. **Ryanair** indica que ha obtenido una reducción del 5 % del consumo de combustible con esta medida, mientras que **Turkish Airlines** ahorró 7.984 toneladas de combustible en 2016. Otras aerolíneas que mencionan el uso de estas alternativas son Volaris, All Nippon Airways, Air New Zealand y Emirates.
3. **Utilización de GPU y Aire Acondicionado:** Usualmente, las aeronaves utilizan la energía del motor auxiliar (APU) para proveer de la energía necesaria durante las maniobras en tierra. Como alternativa al uso de APU, la utilización de una fuente de energía eléctrica en tierra (GPU) permite dar funcionamiento al avión durante estas maniobras, reduciendo el combustible consumido. El uso de GPU puede ser de tanto por medio de una unidad generadora de energía o por medio de una conexión a una fuente de energía en el puente de embarque, del cual además se puede hacer uso de aire preacondicionado (PCA). Se debe mencionar de igual forma, que la utilización de una GPU externa también tiene un consumo de combustible, aunque este es menor que el producido por el uso de APU.

Algunas aerolíneas que mencionan la utilización de esta medida son:

- **Air New Zealand**, con un ahorro de 188.000 litros de combustible en el primer mes de pruebas.
- **Qatar Airways**, con un ahorro de 21.783 toneladas de combustible en 2016.
- **Ryanair**, con un ahorro de 30 kg de combustible por *turnaround*.
- Otras aerolíneas que hacen esto, pero no mencionan el beneficio entregado son: Air France, Air India, Brussels Airlines, China Airlines, Copa Airlines, Emirates, Etihad, EVA Air, Garuda Indonesia, Iberia, Japan Airlines y LATAM.



Figura 3.1: Aeronave utilizando energía de GPU. Fuente: Airport Suppliers.

4. **Aumento del factor de carga:** El factor de carga es un número que indica el porcentaje de la capacidad de la aeronave, generalmente por cantidad de asientos, que es utilizado efectivamente por cada vuelo. Si bien un aumento en el factor de carga no hace necesariamente más eficiente un vuelo, si se hace más eficiente cuando se cuenta la cantidad de combustible consumido por pasajero. Ryanair ha logrado aumentar su factor de carga hasta un 93 %, con lo que han disminuido el consumo de combustible por pasajero en un 11 %. Naturalmente, el concepto también se puede utilizar para el transporte de carga. En este caso, LATAM busca realizar una mezcla de carga y pasajeros de forma óptima, de manera de lograr aumentar el factor de carga lo máximo posible y obtener mayor eficiencia en combustible.
5. **Lavado de Motores:** La correcta mantención de un motor implica una mayor vida útil y un mejor funcionamiento. Al igual que una mantención, el lavado regular de los motores es de gran importancia, ya que entrega los mismos beneficios. El correcto aseo de un motor, principalmente del compresor, implica que su consumo



Figura 3.2: Fotograma de video promocional, mostrando a Técnicos de Lufthansa operando equipos de lavado CYCLEAN. Fuente: Lufthansa Technik.

de combustible será menor, por lo que el lavado rutinario de estos implica mayor eficiencia. Algunas aerolíneas que mencionan la utilización de esta medida son:

- **All Nippon Airways**, con un ahorro de 21.000 litros de combustible, por lavado realizado.
- **Brussels Airlines**, con un ahorro total del 0,75 % de combustible.
- **Lufthansa**, utiliza un sistema de lavado de motores desarrollado por su división Lufthansa Technik. El sistema **Cycleclean** permite realizar el lavado de motor en menor tiempo que los métodos comunes. Además, entrega un ahorro de combustible de 1 %.
- **Norwegian** cuenta con un “lavado especial” (aunque no indican de qué se trata), con el cual ahorran 16.000 toneladas de combustible al año.
- Por su parte **Turkish Airlines** redujo su consumo de combustible en 2.234 toneladas en 2016.
- Otras aerolíneas que hacen esto, pero no mencionan el beneficio entregado son: Cathay Pacific, Copa Airlines, Emirates, EVA Air, KLM Royal Dutch Airlines y LATAM.

6. **Remolque de aeronaves:** El *taxeo* consiste en el movimiento en tierra de un avión dentro del aeropuerto, alimentado por sus propios medios. Naturalmente, como el avión es movido con la energía de sus motores, las maniobras de *taxeo* consumen combustible. Como alternativa al consumo de combustible de la aeronave, se suelen utilizar vehículos de remolque, los cuales tienen un consumo de combustible menor, y permiten mover el avión dentro del aeropuerto según sea necesario. En este sentido, United Airlines utiliza camiones **SuperTug**, con los cuales genera un ahorro de 8 millones de galones de combustible por año.



Figura 3.3: Vehículo SuperTug remolcando a un B777 de United Airlines. Fuente: Martin Pinnau.

7. **Taxeo con un motor:** Como se ha mencionado anteriormente, el taxeo consiste en el movimiento en tierra de la aeronave por medios propios, por lo que siempre es más conveniente usar vehículos de remolque. Sin embargo, estos vehículos no siempre están disponibles para las aerolíneas en todos los aeropuertos donde operan, por lo que muchas veces el taxeo es la única opción. Para estos casos, el taxeo con un motor puede ser la mejor opción, lo cual consiste en la utilización de un solo motor de la aeronave durante las maniobras de taxeo.

Algunas aerolíneas que mencionan la utilización de esta medida son:

- **American Airlines**, con un ahorro de 3,3 millones de galones de combustible al año.
 - **Qatar Airways**, con un ahorro de 4.883 toneladas de combustible en 2016.
 - **Ryanair**, que indica un ahorro del 1 % de combustible.
 - **Turkish Airlines** ahorró 5.948 toneladas de combustible en 2016.
 - **United Airlines**, que indica de 5 millones de galones de combustible por año.
 - Otras aerolíneas que hacen esto, pero no mencionan el beneficio entregado son: Air France, Air India, Air New Zealand, All Nippon Airways, Copa Airlines, Delta, Emirates, LATAM, SWISS y Volaris.
8. **Reducción de peso a bordo:** Se considera la reducción en peso de cualquier objeto o material que se utilice durante el vuelo, cuya disminución puede entregar mayor eficiencia de combustible. Muchas veces consiste en objetos que se llevan en grandes cantidades, en que la reducción de peso unitario puede traducirse en un gran beneficio en la totalidad de unidades llevadas en el avión.
- a) **Electronic Flight Bag:** Consiste en el uso de *iPads* para la documentación y manuales que debe llevar la tripulación, de manera de reducir el peso en

papel, por una alternativa mucho más liviana. American Airlines menciona que obtiene un ahorro de 400.000 galones de combustible al año, mientras que **Hainan Airlines** indica una reducción de 200 y 220 toneladas de combustible al aplicarlo en sus B737 y B787 respectivamente. Otras aerolíneas que se pueden mencionar son Aegean Airlines, easyJet, Ryanair, All Nippon Airways, EVA Air, Iberia y KLM Royal Dutch Airlines.

- b) **Agua potable:** Una forma de reducir el peso de la aeronave es por medio del manejo del volumen total de agua transportada, lo cual debe ser ajustado al número de personas y tiempo de vuelo. Mientras más agua sea transportada, mayor es el consumo de combustible de la aeronave. Por lo tanto, se requiere un cálculo cuidadoso y exhaustivo para determinar la cantidad de agua que debe ser transportada de forma óptima.
- **Jetblue** disminuyó un 25 % el agua potable, ahorrando 288.000 galones de combustible en su flota de A320.
 - **Qatar Airways** ahorró 1.791 toneladas de combustible en 2016 al disminuir el agua potable.
 - **Otros:** Comair, EVA Air, Garuda Indonesia, Hainan Airlines, Aegean Airlines y Brussels también redujeron el agua potable en el avión, sin mencionar el beneficio obtenido.
- c) **Carga:** El transporte de carga cuenta con diversos componentes que pueden aumentar el peso de la aeronave. Los contenedores de carga o ULDs pueden aportar un peso considerable a la aeronave, lo que si se suma a la cantidad de estos que se cargan dentro de una aeronave puede tener un gran impacto en el consumo de combustible. En este sentido, varios fabricantes de contenedores de carga han desarrollado contenedores fabricados con materiales compuestos que son más livianos que los materiales comunes.



Figura 3.4: Contenedor de carga Nordisk WeightSaver AKE (LD3) fabricado con material Twintex. Fuente: Nordisk Aviation.

- **Japan Airlines** reduce el peso en 26 kg por contenedor de carga, al usar material de fibra de vidrio “Twintex”.
 - **EVA Air** también ha reducido el peso de sus contenedores de carga.
 - **Qatar Airways** reduce la cantidad de seguros de carga en los vuelos realizados por B777 carguero, sin comprometer la seguridad, ya que solo se utilizan para cargas especializadas, ahorrando 20 toneladas de combustible en 2016.
- d) **Revistas:** Las aerolíneas generalmente incluyen revistas abordo, las cuales son de elaboración propia y están disponibles en cada asiento. Las revistas entregadas en los vuelos se pueden hacer más livianas, por medio del uso de papel más liviano, u optimizando su uso para reducir la cantidad de hojas utilizadas en cada una, de manera de reducir el peso total en la aeronave. **United Airlines** ahorra 170.000 galones de combustible con esta medida. Otras aerolíneas que aplican esto son Cathay Pacific y All Nippon Airways.
- e) **Productos:** Generalmente las aerolíneas incluyen una oferta de productos para la venta a los pasajeros. En algunas ocasiones puede ocurrir que ciertos productos tengan una muy baja demanda, por lo que una forma de reducir el peso en la aeronave es por medio de la revisión constante de la demanda de cada producto, de manera de asegurar que no haya un exceso de estos mismos, o simplemente eliminar los productos. En cuanto al servicio de alimentación a bordo, las acciones pueden comprender la reducción de peso en los carros utilizados, adquiriendo modelos más livianos, optimización de la cantidad de alimento transportado y la utilización de cubiertos más livianos.
- **United Airlines** ahorra 1,4 millones de galones de combustible con estas medidas.
 - **Etihad** logró ahorrar 1.100 toneladas de combustible al año con estas medidas.
 - Otras aerolíneas que mencionan estas medidas: Cathay Pacific, Brussels Airlines, EVA Air, Iberia, China Airlines, Air India y All Nippon Airways.
- f) **Entretenimiento**¹: Muchos aviones cuentan con sistemas de entretenimiento en los asientos, los cuales consisten de pantallas empotradas en cada uno de estos, las cuales cuentan con contenido multimedia para el uso de los pasajeros. **Scoot**, división low cost de Singapore Airlines, removi6 los siste-

¹El beneficio de esta medida no se menciona de forma cuantificada, sin embargo ha sido considerada en esta categoría para mantener un orden.

mas de entretenimiento y en su lugar ofrece iPads cargados con contenido multimedia, los cuales tienen un cargo adicional.

g) **Flyaway Kit:** Estos kits contienen herramientas y partes para realizar mantenimientos a la aeronave cuando esta no se encuentra en su base. Cada uno de estos kits pesa entre 500 y 900 kg. **Qatar Airways** ha planificado contingencias alternativas para reducir peso en esta materia, ahorrando 969 toneladas de combustible.

h) **Combustible de contingencia:** El combustible de contingencia es cargado en consideración del consumo extra en ruta que puede ser causado por el viento, cambios en la ruta o restricciones de ATM. Una correcta planificación y estimación del combustible de contingencias puede ayudar a reducir las cantidades cargadas a la aeronave, reduciendo su peso y el consumo de combustible, procurando hacerlo dentro de los niveles de seguridad.

- **Qatar Airways** ha gestionado su planificación de contingencias logrando reducir su consumo de combustible en 10.065 toneladas en 2016.
- **Air India**, redujo de un 5 % a un 3 % el combustible de contingencias en sus vuelos.
- KLM también ha reducido su combustible de contingencias.

9. **Lavado de aeronaves:** La acumulación de suciedad en la superficie de una aeronave aumenta la resistencia aerodinámica de esta, ya que las superficies se vuelven más irregulares, generando un flujo de aire más turbulento. El lavado rutinario de las aeronaves permite reducir la acumulación de suciedad en la superficie, reduciendo la resistencia y por ende, reduciendo el consumo de combustible. Algunas aerolíneas que mencionan la utilización de esta medida son United Airlines y Emirates. En particular, **Emirates** menciona que realiza un lavado “Drywash”, el cual consiste en la realización del lavado por medio de paños, lo que permite reducir el consumo de agua sustancialmente. Por su parte **Hainan Airlines** desarrolló su propio “Cleaning Robot”, el cual permite un lavado más rápido y con menor requerimiento de personal que los métodos comunes. Con esto obtienen una reducción en el consumo de combustible cercana a las 1200 toneladas.

3.1.2. No Cuantificadas

1. **Vuelos directos:** Realizar más vuelos directos, en lugar de vuelos con escalas, permite cubrir ciertas rutas con menor cantidad de aterrizajes y despegues. Considerando que justamente son los aterrizajes y despegues las etapas donde el

consumo de combustible es superior, la reducción de estas operaciones por medio de vuelos directos ayuda a reducir el consumo de combustible.

2. **Bajar las cortinas durante el desembarque:** Reduce la tasa de aumento de la temperatura en cabina, evitando el uso de aire acondicionado. Es especialmente beneficioso cuando este se encuentre funcionando con energía del motor auxiliar (APU). Algunas aerolíneas que hacen esto son Cathay Pacific y Delta.
3. **Centro de gravedad óptimo:** Consiste en una optimización de la distribución de la carga en la aeronave, de manera de establecer el centro de gravedad más conveniente para la aeronave. Realizar esta tarea de forma correcta permite balancear de mejor forma la aeronave, disminuyendo el consumo de combustible. Existen variadas herramientas de peso y balance, las cuales consisten generalmente en software que ayuda a optimizar esta tarea para realizarlo de forma automatizada, evitando errores y haciéndolo mucho más rápido. Algunas aerolíneas que mencionan esta medida son China Airlines, EVA Air y Garuda Indonesia.

3.2. Medidas o Planes de acción en el ámbito de la Infraestructura

Se considerarán todas aquellas medidas que afecten a la infraestructura general de la aviación comercial, como la gestión aeroportuaria y la gestión de tráfico aéreo, así como la gestión del uso de estas por parte de las aerolíneas. La aplicación de muchas de estas medidas se encuentra fuera del alcance de las aerolíneas, pero estas igualmente tienen un rol dentro de su implementación, ya sea por medio de la difusión de ciertas tecnologías o mejoras que requieran de un trabajo conjunto con aeropuertos o el tráfico aéreo.

3.2.1. Cuantificadas

1. **Navegación Satelital:** Consiste en la utilización del Sistema Global de Navegación Satelital (GNSS), el cual ayuda a las aeronaves a volar rutas más directas, por medio de rutas más eficientes en consumo de combustible, además de ayudar a la navegación en terrenos complicados o de baja altitud. El uso de GNSS permite la Navegación Basada en Performances (PBN, Performance Based Navigation), la cual consiste de la Navegación de Área (RNAV, Area Navigation) y Performance Requerida de Navegación (RNP, Required Navigation Performance). La implementación de este sistema no depende solo de la aerolínea, ya que requiere un trabajo conjunto con las autoridades aeronáuticas y gestión del espacio aéreo.

- a) **Continuous Descent Approach (CDA):** Las maniobras de descenso continuo o CDA, también conocidas como Perfil de Descenso Optimizado (OPD) son maniobras que permiten aterrizar de manera continua, reduciendo el consumo de combustible y los ruidos². Actualmente, los aterrizajes estándar en los aeropuertos se realizan por medio de un descenso escalonado, alcanzando distintos niveles de vuelo hasta descender completamente. Una maniobra de descenso continuo ideal permite a la aeronave descender desde altura crucero hacia la pista en una trayectoria suavizada de planeo utilizando poca energía, ahorrando tiempo, combustible y reduciendo ruidos. Algunas aerolíneas que utilizan esto:

- **China Airlines**, que ha logrado un ahorro de 998.400 libras de peso en combustible.

²También existe la forma análoga para el ascenso, conocida como CCO (Continuous Climb Operations)

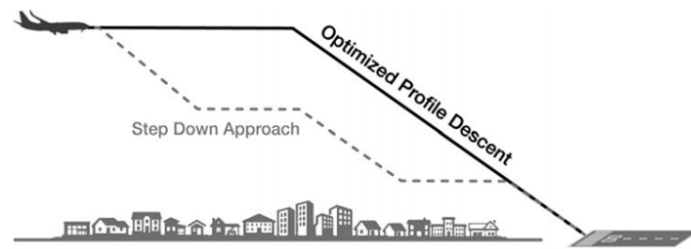


Figura 3.5: Comparación entre Descenso de Perfil Optimizado y descenso escalonado. El OPD permite mantener el empuje inactivo, reduciendo el consumo de combustible. Fuente: BridgeNet International.

- **Japan Airlines**, ha ahorrado un 3 % de combustible, al implementarlo en sus vuelos a San Francisco.
- **Etihad** ha ahorrado 980 toneladas de combustible con esta medida.
- Otras aerolíneas que reportan la utilización de CDA son: United Airlines, Qantas, South African Airways, Air France, Air India, All Nippon Airways, Brussels Airlines, Comair, Emirates, Finnair, Norwegian, LATAM y Delta.

b) **Optimized Enroute Flight:** Optimización de vuelo en ruta. Consiste en la utilización del GNSS para generar rutas óptimas considerando variables como la distancia, vientos y las condiciones meteorológicas. Este método permite volar de forma flexible, en lugar de utilizar las rutas establecidas por los sistemas de tráfico aéreo, ahorrando tiempo y combustible. Existen distintos tipos de optimización de ruta, dependiendo del momento en que se utilice la información:

- **Flexible Track Systems:** Sistema de rutas flexibles. Es la forma más simple de OEF, la cual genera una ruta óptima entre dos aeropuertos basada en pronósticos meteorológicos y modelos representativos de las performances de la aeronave. La ruta optimizada es utilizada para todos los vuelos entre estas ciudades y es actualizado por temporadas. **Emirates** ahorra combustible con esta medida.
- **User Preferred Routes (UPR):** Rutas preferidas por el usuario. Es un sistema similar al anterior, pero las rutas son actualizadas con información a corto plazo para cada vuelo, es decir, se toma la información disponible inmediatamente antes de realizar el vuelo, de manera de optimizar cada operación de forma individual. Algunas aerolíneas que utilizan UPR son:
 - **Japan Airlines**, que ahorra un 2 % de combustible en su ruta de Japón hasta Hawaii.
 - También es utilizado por Singapore Airlines, LATAM y Copa Airlines

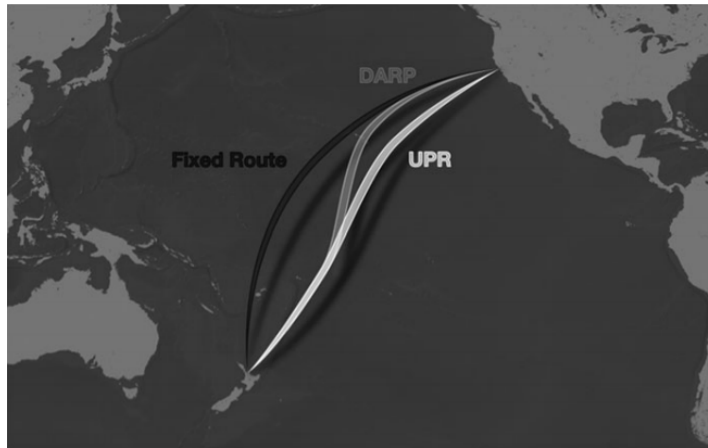


Figura 3.6: Ilustración de los distintos tipos de modificación de rutas según tipo de sistema, dependiendo si es una ruta fija, UPR o DARP. Fuente: BridgeNet International.

- **Dynamic airborne reroute procedure (DARP):** Proceso de redirección de rutas en vuelo. Consiste de un sistema dinámico que modifica la ruta utilizada en tiempo real (durante el vuelo), según la información recabada de forma inmediata. Estos vuelos comienzan con una ruta UPR, la cual es modificada durante el vuelo si es necesario. Por lo general las aerolíneas utilizan este sistema con distintos nombres, dependiendo el proveedor del servicio. Algunas aerolíneas que utilizan DARP son:
 - **Air New Zealand**, que ha generado un ahorro entre 2 % u 3 % en las rutas en que lo ha implementado.
 - **Japan Airlines** (*GoDirect Flight Efficiency*), ahorra aproximadamente un 2 % de combustible al año.
 - **Iberia** (*Doris*), con un ahorro de 2,5 % de combustible.
 - **Alitalia** (*WSI Fusion*), ahorra 25.000 kg de combustible al mes.
 - **Air China** (*FMS Wind Uplink*), ahorra US\$8.000 al año en combustible.
 - **Lufthansa** (*Lufthansa Lido/Flight 4D*). Permite ahorrar hasta un 5 % de combustible.
 - **Etihad** (*Boeing Wind Uplink*), consigue un ahorro de entre 90-180 kg de combustible por vuelo.
 - Otros: LATAM (*OSA Navigation System*), Norwegian (*AVTECH Sweden*), KLM, Copa Airlines, Singapore Airlines y Turkish Airlines (*GoDirect Flight Efficiency*).
- **Sin Especificar:** Las siguientes aerolíneas utilizan alguno de los sistemas anteriores para optimizar sus rutas de forma más directa:

- **Alaska Air:** Ahorra 518.000 galones de combustible al año, por medio de la combinación de operaciones con apoyo satelital.
 - **Qatar Airways,** obtuvo una reducción de 4.087 toneladas de combustible en 2016.
 - **Etihad** consiguió un ahorro en 2017 de 5.400 toneladas de combustible.
 - Otras: Swiss Airlines, Brussels Airlines, LATAM Airlines.
2. **Estaciones de carga para vehículos eléctricos:** Consiste en la provisión de estaciones de carga para vehículos de operación en tierra que funcionen con energía eléctrica. La instalación de dichas estaciones ayuda a fomentar la utilización de vehículos eléctricos por parte de las aerolíneas, generando una reducción en consumo de combustible. En el Aeropuerto de Seattle se estima una reducción anual cercana a un millón de galones de petróleo gracias a la utilización de esta medida.
3. **Instalación de GPU y PCA:** Si bien se mencionó con anterioridad el uso de las unidades de poder en tierra y las unidades de aire pre-acondicionado, estas no se encuentran en todos los aeropuertos, por lo que la utilización de estas por parte de las aerolíneas dependerá de su disponibilidad en cada aeropuerto. En el Aeropuerto de Seattle se estima una reducción anual de combustible cercana a 5 millones de galones de combustible gracias a esta medida.

3.2.2. No Cuantificadas

1. **Aeropuertos secundarios:** Consiste en una mayor utilización de aeropuertos secundarios por parte de las aerolíneas, para evitar saturaciones en los aeropuertos de alto tráfico y evitar retrasos. Ryanair es una de las aerolíneas que optan por esta medida para reducir su consumo de combustible.
2. **End Around Taxiway:** Consiste en realizar el taxeo de las aeronaves que acaban de aterrizar, recorriendo hasta el final de la pista para luego tomar el camino hacia el terminal, en lugar de cruzar la pista paralela desde donde se realizan los despegues. Esto permite realizar el movimiento hacia el terminal sin retrasar a las aeronaves que están en pista para despegue, reduciendo el consumo de combustible por tener los motores encendidos en espera.
3. **Operaciones en CSPR:** En el año 2013, la FAA implementó un nuevo procedimiento para los vuelos que aterrizan en el Aeropuerto de San Francisco. Dicho procedimiento fue diseñado para aeropuertos con pistas paralelas estrechamente

espaciadas (CSPR), lo cual permite una mejor utilización de las pistas de aterrizaje cuando hay malas condiciones climáticas. Estas maniobras mejoradas permiten reducir los retrasos causados por mal tiempo, evitando así el consumo de combustible extra generado por dichos retrasos.

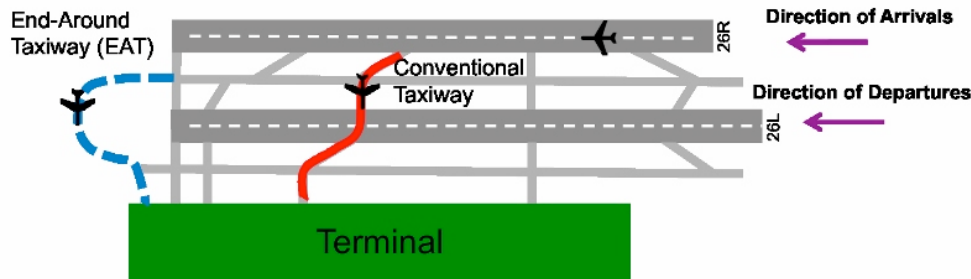


Figura 3.7: Comparación entre EAT (línea celeste) y la forma convencional (línea roja). En esta imagen se puede apreciar que el EAT permite cruzar hacia el terminal desde la pista 26R sin interrumpir los despegues en la pista 26L.

4. **Planificación de movimientos en tierra:** Lograr optimizar el movimiento de vehículos en tierra por medio de un mejor conocimiento de la estructura del aeropuerto puede ayudar a reducir las distancias recorridas por dichos vehículos, reduciendo el combustible que consumen. **American Airlines** reposicionó los puntos de acceso y optimizó las rutas que seguían los vehículos de catering, logrando reducir anualmente la distancia recorrida por los vehículos en 263.000 millas.
5. **Optimización del embarque de pasajeros³:** La agilización del proceso de embarque ayuda a reducir el tiempo de turnaround de las aeronaves, además de prevenir los retrasos, reduciendo el consumo de combustible. En el año 2008 Jason H. Steffen propuso un modelo matemático para optimizar el embarque de pasajeros, el cual minimizaba el tiempo de embarque por medio de la asignación de prioridad de ingreso a la aeronave entre pasajeros, dependiendo si estos tenían asiento en ventana (mayor prioridad) o pasillo (menor prioridad) (Steffen). Sin embargo, este método no toma en cuenta otras restricciones como aquellos pasajeros que viajan en grupo o la cantidad de equipaje de mano que lleva cada pasajero, por lo que este método no es utilizado por las aerolíneas, ya que no se ajusta a las necesidades reales. Debido a esto, las aerolíneas tienden a tener procesos mucho más ineficientes para poder cumplir con las restricciones antes mencionadas. Algunos modelos propuestos actualmente permiten optimizar el tiempo de embarque, considerando tanto las prioridades del modelo de Steffen y

³Si bien estas medidas deben ser adoptadas por aerolíneas, se considera dentro del ámbito de infraestructura, ya que ayuda a reducir retrasos y agilizar el *turnaround*, generando un beneficio para las operaciones dentro del aeropuerto

las restricciones mencionadas, como lo son el modelo DOB (Dinamically Optimized Boarding) (Zeineddine, 2017), el cual se enfoca en pasajeros que viajan en grupo, y el modelo de Milne y Kelly , que se enfoca en la distribución de equipaje (Milne and Kelly, 2014), entre otros.

3.3. Medidas o Planes de acción en el ámbito de la Tecnología

Se considera como medida tecnológica todo aquello que se desarrolla principalmente por medio de los fabricantes de aeronaves y/o componentes, como el desarrollo de motores, estructuras, combustibles, etc. Son principalmente aquellas medidas que buscan mejorar la eficiencia de las aeronaves.

3.3.1. Cuantificadas

1. **Dispositivos de punta de ala:** En el ala de las aeronaves se produce un fenómeno conocido como *vórtice de punta de ala* (*wingtip vortex*), los cuales se producen por la diferencia de presión entre el lado superior e inferior de estas. Los vórtices producidos generan una estela turbulenta y producen mayor resistencia aerodinámica en el avión. Los dispositivos de punta de ala, también conocidos como *Winglets* o *Sharklets*, son dispositivos ubicados en cada extremo de las alas, los que buscan reducir la producción de dichos vórtices, generando menor resistencia aerodinámica, y como consecuencia, menor consumo de combustible.



(a) Wingtip Fence. Fuente: Emil Dyulgerov.



(b) Blended Winglet. Fuente: Wikimedia.



(c) Sharklet. Fuente: Aerospace Technology.



(d) Scimitar. Fuente: United Airlines.

Figura 3.8: Algunos tipos de dispositivos de punta de ala.

Algunas aerolíneas que utilizan winglets:

- **Alaska Air**, utiliza winglets Scimitar, con lo que ahorró 627.437 galones de combustible el 2016.
- **Ryanair** ha alcanzado un 4 % de reducción de combustible por medio del uso de winglets.
- **All Nippon Airways y LATAM** utilizan winglets en los aviones B767, con lo que reportan reducciones de 5 % y 4 %, respectivamente.
- **Copa Airlines** utiliza B737-700 y 800 con winglets, reduciendo en 5 % el consumo de combustible.
- **JetBlue y Qatar Airways** han actualizado sus A320, instalándoles *Sharklets*. Jetblue obtiene un 3 % de ahorro de combustible, mientras que Qatar Airways indica un ahorro de 493 toneladas de combustible en 2016.
- **Norwegian** indica que con la aplicación de Winglets en sus B737-800 obtienen una reducción del 2 % de combustible por avión.
- **Air Canada** actualizó sus B767-300ER y les añadió winglets.
- **Volaris y Vueling** adquirieron A320 con sharklets de fábrica, aunque no indican el beneficio obtenido.
- **easyJet** cuenta con sharklets en sus aviones de la familia A320.

2. **Herramientas informáticas de análisis:** Consiste en la utilización de herramientas informáticas, como el Internet de las Cosas, para obtener información precisa a través de sensores, lo cual es gestionada a través de software para entregar recomendaciones sobre eficiencia energética, así como el análisis de tendencias estadísticas. **Alitalia**, en cooperación con General Electric logró reducir en un 1,5 % su consumo de combustible en su primer año de utilización, por medio de la recomendación de ajustes en vuelo, como la óptima utilización de flaps en aterrizajes. Otro ejemplo de esto es *Flight Pulse App*, una aplicación desarrollada en conjunto por General Electric y **Qantas**, la cual entrega información directamente a los pilotos sobre el consumo de combustible durante las distintas etapas del vuelo y genera recomendaciones para reducir el consumo de combustible.

3. **Modernización de flota:** Reemplazo de las aeronaves utilizadas por las aerolíneas, por nuevos modelos que puedan entregar mayor eficiencia y mejores performances en general.

Algunos modelos utilizados actualmente:

- **Familia A320Neo:** Versión renovada de aeronaves de la clásica familia A320 de Airbus. Esta nueva versión tiene la opción de elegir entre dos

motores: el PW1100G, con tecnología de turbofan engranado de Pratt & Whitney; o el CFM LEAP-1A, además de la incorporación de fábrica de Sharklets. Con estas innovaciones Airbus proyecta que los A320 alcancen una eficiencia un 20 % superior. Algunos usuarios que han hecho pedidos y/o operan esta aeronave son: Volaris, Alaska Airlines, Sky Airline y Virgin America.

- **B737 MAX:** El B737 MAX es la actualización de los modelos B737 de Boeing. Equipados con motores LEAP-1B con aspas de carbono y winglets Scimitar, este modelo entrega mayor eficiencia que sus predecesores, entregando entre un 13 % y un 16 % de eficiencia en consumo de combustible. Algunos usuarios son Alaska Air y Ryanair.
 - **Mitsubishi Regional Jet (MRJ):** Aeronave desarrollada por el fabricante japonés Mitsubishi. Este avión, equipado con motores de turbofan engranado de Pratt & Whitney, entrega una eficiencia de un 20 % de consumo de combustible comparado a modelos similares anteriores. All Nippon Airways es una de las aerolíneas que utilizan este modelo.
 - **A350 XWB:** Este modelo ha sido construido con más de un 70 % de materiales avanzados, combinando un 53 % de compuestos de carbono, junto con titanio y aleaciones modernas de aluminio, lo cual lo hacen más liviano y más costo-eficiente. Además, cuenta con un motor Rolls-Royce Trent XWB, lo que junto con las características anteriores, entrega una eficiencia de 25 % de combustible, comparado con modelos anteriores. Algunos usuarios son Qatar Airways, Malaysia Airlines y Cathay Pacific.
 - **B787 "Dreamliner":** Es el primer avión comercial fabricado en un 50 % con materiales compuestos (plásticos reforzados con fibra de carbono), los cuales conforman las principales secciones: fuselaje, cola y alas. Estos materiales lo hacen más liviano y eficiente. Además, sus nuevos motores y aerodinámica moderna hacen que consuma un 20 % menos de combustible que otros aviones de tamaño similar. Algunos usuarios: Etihad, British Airways, All Nippon Airways, Air Europa, Air Canada, China Southern y Air New Zealand.
4. **Asientos:** La gran cantidad de asientos que tienen los aviones comerciales hace que la disminución en el peso de los asientos sea una de las formas más importantes de generar eficiencia en la aeronave.
- **Ryanair** indica que ha cambiado sus asientos por los nuevos *Slimline*, con lo cual reducen en 850 kg el peso de cada avión, ahorrando un 1 % de combustible por avión.



Figura 3.9: Asientos Slimline en un avión de Ryanair. Fuente: Ryanair.

- **Iberia** implementó asientos *Slim*, con lo que ahorran 44 toneladas por avión al año, mientras que **Ryanair** logró una reducción del 1 % de consumo de combustible por avión.
- **All Nippon Airways** trabajó con *Toyota Boshoku* para fabricar asientos más livianos, logrando un ahorro de 15.000 litros de combustible por avión.
- Otras aerolíneas que han reducido el peso de sus asientos son **Air France** (reducción de 5 kg por asiento en B777), **easyJet** (*Recaro Seats*), **KLM** (B787), **Brussels Airlines** (A320/319), **Aegean Airlines**, **Norwegian** y **Finnair**.

3.3.2. No Cuantificadas

1. **Vehículos eléctricos:** Para las operaciones de apoyo en tierra se utiliza una variada cantidad de vehículos que cumplen distintas funciones, como la carga de equipaje, catering, remolque, entre otras. Contar con vehículos eléctricos ayuda a disminuir el consumo de combustible en estas operaciones.

- **Remolque:** Vehículos utilizados para el remolque de aeronaves en tierra. Algunos casos: British Airways (*Mototok*) y Lufthansa (*eTug*).



(a) Remolque Mototok. Fuente: Mototok.



(b) Remolque eTug. Fuente: Electrive.

Figura 3.10: Algunos tipos de vehículos eléctricos.

- **Vehículos de carga:** Vehículos utilizados para la carga de la aeronave. Algunos casos: KLM (*TXL-838-reGen*, para carga), Lufthansa (*eLift*, para carga de catering), Finnair (Montacargas eléctrico).
 - **No especificado:** Aerolíneas que utilizan vehículos eléctricos, sin especificar: All Nippon Airways, Qantas, Air New Zealand.
2. **Pinturas:** La pintura de aeronave tiene importancia por diversas razones. Principalmente, el poder aplicar pintura a la aeronave en menores cantidades ayuda a reducir el peso de esta, reduciendo el consumo de combustible. Por otra parte, la pintura puede tener distintas características que entreguen menor rugosidad a la superficie o la hagan más resistente a las condiciones atmosféricas.
- **Iberia** empezó a implementar un sistema de pintura que permite aplicar esta sin necesidad de aplicar varias capas. El sistema consiste de dos partes: *Basecoat*, que es la pintura que se aplica en una sola capa; y *Clearcoat*, que es un barniz aplicado encima que le da mayor brillo a la superficie. En general, el peso total de la pintura aplicada es menor a los métodos convencionales, entregando una mayor eficiencia en combustible.
 - **All Nippon Airways** reduce el peso de la aeronave por medio de su *Next-generation Paint System*, el cual ofrece mayor resistencia al clima y contiene pocos componentes orgánicos volátiles.
3. **Optimización de combustible:** Algunas aerolíneas están implementando sistemas de gestión de información, los cuales utilizan macrodatos para analizar estadísticas y tendencias de consumo de combustible, además de información sobre las rutas, para entregar información precisa sobre los requerimientos de combustible que tendrá la aeronave durante cada vuelo, sin poner en riesgo la seguridad de las operaciones. Algunas aerolíneas que utilizan esto son: Delta, Brussels Airlines, EVA Air, Ethiopian Airlines (*Safran SFCO2*), Singapore Airlines (*VisiumFuel*), Lufthansa (*Fuel Order Model*) y Qantas.
4. **Mejoras a motores:** Realizar mejoras o *upgrades* a los motores actuales de ciertas aeronaves puede aumentar su eficiencia. Esta medida puede ser adoptada en lugar de la sustitución de las aeronaves por nuevos modelos más eficientes. **Austrian Airlines** ha aplicado una mejora a la turbina de alta presión de los motores PW4060-3 de sus B767-300ER, reduciendo su consumo de combustible. Por su parte, **Lufthansa** ha aplicado mejoras a los motores Trent 500 (A340) y Trent 700 (A330).

3.3.3. En Desarrollo

1. **Asientos corredizos (Side-Slip):** Consiste en un sistema de asientos, en que los asientos de la fila del pasillo se levantan y se deslizan hacia el asiento contiguo, de manera de aumentar el espacio en el pasillo durante el desembarque de los pasajeros. Esto permite reducir los tiempos de desembarque, lo que se traduce en menos consumo de combustible. Durante el desembarque los pasajeros pueden mover el asiento por sobre el asiento contiguo, aumentando el espacio disponible en el pasillo. Al desplegar el asiento para que todos los pasajeros tomen asiento, una luz avisará si el asiento se encuentra debidamente posicionado. Este asiento es compatible con cualquier método de embarque (Schultz, 2017).



Figura 3.11: Los asientos Side-Slip aumentan el espacio disponible en el pasillo: A la derecha se muestra el asiento en condición inicial, y a la izquierda se muestra el asiento posicionado en su forma operacional. Fuente: Molon Labe Seating.

2. **Piel de tiburón:** La tecnología conocida como *Sharkskin* (Piel de tiburón), consiste en crear una especie de surcos (*Riblet surface*) en la superficie que está en contacto con el fluido, imitando la superficie observada en la piel de ciertos tiburones, la cual no es lisa. Esto permite disminuir el efecto de arrastre generado por la generación de vórtices en la superficie, los cuales se producen debido a la componente de la velocidad perpendicular al flujo. Esta estructura permite reducir el tamaño de los vórtices generados, impidiendo que estos generen mayor turbulencia (Stenzel et al., 2011).

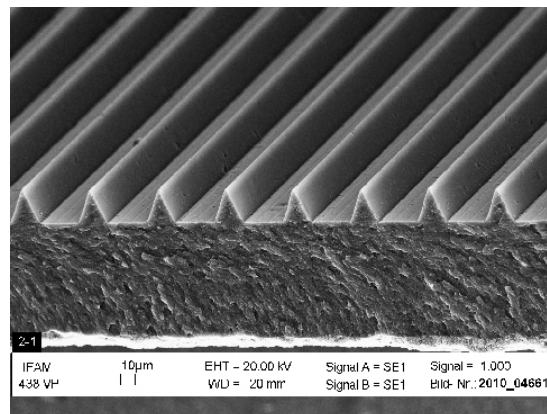


Figura 3.12: Microestructura de la superficie con recubrimiento de piel de tiburón. Fuente: Fraunhofer IFAM.

4

Caracterización de evaluación de medidas

Para esta sección del trabajo, se evaluó la situación de la aerolínea nacional Sky Airline respecto de las medidas recopiladas, de manera de determinar cuales de estas podrían ser aplicadas en dicha aerolínea y realizar una evaluación a grandes rasgos sobre la implementación de las mismas, considerando su costo y el beneficio esperado en reducción de consumo de combustible.

Debido a que parte de la información obtenida corresponde a números estimados de la industria, esta sección no pretende servir como una evaluación concreta del costo-beneficio de cada medida, sino que es una más bien una guía aproximada sobre la rentabilidad de cada una de estas. En cuanto a la información obtenida de primera fuente desde proveedores, no se incluirán nombres de marcas, ni modelos, debido a solicitudes de estos mismos respecto a la confidencialidad de la información entregada, además de que no se busca beneficiar o perjudicar la imagen de cada empresa respecto a sus competidores.

La **Tabla 6.1** (Anexos) muestra la comparación de Sky Airline respecto a las medidas recopiladas, de las cuales se encontraron 5 potenciales medidas para considerar en este capítulo. Sin embargo, debido a la falta de información sobre algunas de estas, las que se considerarán en este trabajo son las siguientes:

1. Pintura Basecoat - Clearcoat
2. Optimización del proceso de embarque de pasajeros
3. Contenedores de carga livianos

Las medidas mencionadas anteriormente serán las que formen parte del desarrollo de este capítulo, por medio de un análisis de costo-beneficio, comparandolas con la situación actual de la aerolínea.

4.1. Pintura Basecoat - Clearcoat

Como se ha mencionado durante la recopilación de medidas, el sistema de pinturas Basecoat - Clearcoat (BC/CC) permite aplicar la pintura a una aeronave en una menor cantidad de capas, permitiendo reducir el peso total que se le agrega a la aeronave. Dentro de los beneficios mencionados por distintos proveedores de esta tecnología, se puede mencionar:

- Proceso completo de pintura es realizado en menor tiempo, reduciendo costos de mano de obra y el tiempo en tierra de la aeronave (Business Wire, 2009; Cancilla, 2015).
- Reducción en peso de pinturas entre un 15 % y un 35 % (Business Wire, 2009).
- Vida útil de la pintura incrementado desde 5 años promedio hasta 10 años con este sistema (Business Wire, 2009; Cancilla, 2015).

Debido a que no se ha podido determinar el costo total de la aplicación de este tipo de pinturas, se trabajará con una estimación según lo siguiente:

- En el caso de que el costo de ambos sistemas de pintura fuesen similares, las diferencias en costos operacionales ayudarían a ilustrar cual sistema es más conveniente.
- Si el sistema BC/CC tiene menores costos operacionales, habría que hacer una estimación con un costo de implementación mayor, para poder tener una idea del rango de la inversión hasta el cual sería conveniente esta alternativa.

Considerando lo anterior, se asumirá que el costo total de ambos sistemas es similar, por lo que para facilitar el cálculo se establecerá como iguales.

El costo total aproximado de la aplicación de pintura para un avión Airbus A320 se estima en el orden de 50 mil dólares (AirlinerWatch, 2018; Carey, 2013), por lo que este será el costo que se utilizará para el sistema BC/CC. Además, la reducción de peso esperada para un avión comercial de menor tamaño, es cercana a 100 libras (Business Wire, 2009), 45,36 kg aproximadamente.

La reducción de peso esperada puede ser cercana a un 15 % para colores claros, llegando hasta un 35 % para colores oscuros (Business Wire, 2009). Tomando en cuenta que el diseño de la aeronave es predominantemente blanco, con colores oscuros en menor proporción, si se considera una reducción cercana al 20 %, equivalente a 45,46 kg, el

peso total de la pintura original sería de 226,8 kg, mientras que el peso final de la pintura BC/CC sería de 181,4 kg.

Existe una relación aproximada, la cual indica que por cada 1.000 kg adicionales de peso en la aeronave, se consumen 40 kg de combustible extra por hora (Nordisk Aviation, 2018). Si bien este número puede variar por diversas razones, es un factor utilizado en la industria para este tipo de cálculos. Finalmente, tomando en cuenta el precio del combustible a 550,6 pesos chilenos por litro (1,045USD por kg) (ENAP, 2018), y que en promedio los aviones de Sky Airline volaron cerca de 4.000 horas durante el 2017, se puede calcular el costo de transportar un kilogramo extra durante un año (CE_{anual}) de la siguiente forma:

$$CE_{anual} = 4.000 [h] \cdot \frac{40}{1000} \left[\frac{1}{h} \right] \cdot 1,045 \left[\frac{USD}{kg} \right] \approx 167,33 \left[\frac{USD}{kg} \right]$$

Por otra parte, se debe tener en consideración que la vida útil del sistema BC/CC se estima en 10 años (podría disminuir a 7 años en entornos abrasivos o húmedos), mientras que la pintura estándar tendría una vida útil de 5 años en promedio, información importante para tener en cuenta los costos de depreciación. Con estos datos se puede hacer una estimación de los costos de ambas alternativas, lo cual se resume en la **Tabla 4.1**.

	Pintura Estándar		BC/CC		Diferencia
Peso total [kg]		226,80		181,44	45,36
Costo por peso	\$	37.951	\$	30.361	\$ 7.590
Depreciación	\$	10.000	\$	7.500	\$ 2.500
Costo total de operación	\$	47.951	\$	37.861	\$ 10.090

Tabla 4.1: Resumen de costos asociados a utilización de pinturas, en USD. Elaboración propia.

Bajo la suposición de que el costo de cada sistema fueran los mismos, la información resumida en la **Tabla 4.1** indicaría que usando el sistema BC/CC, los beneficios se obtendrían desde el primer año. Sin embargo, considerando que los costos de la pintura BC/CC podrían ser mayores, si se simula un precio para este que sea un 50 % más caro que la pintura estándar (un porcentaje bastante generoso), la diferencia en costos sería de US\$7.719 a favor del BC/CC. La **Tabla 4.2** muestra una proyección de los beneficios entregados en 5 años por la diferencia en costos de ambos tipos de pintura, al tomar en cuenta este nuevo precio.

En este caso, el periodo de recuperación de la inversión, respecto a la pintura estándar, es cercano a 2 años y 6 meses. Junto con esto, se debe considerar que la vida útil esperada para esta pintura es de 10 años, por lo que el beneficio entregado por reducción

		Años				
	Inversión	1	2	3	4	5
Estándar	50.000	97.951	145.903	193.854	241.805	289.756
BC/CC	75.000	112.861	150.722	188.583	226.444	264.305
Diferencia	(25.000)	(14.910)	(4.819)	5.271	15.361	25.451

Tabla 4.2: Proyección a 5 años de la diferencia de costos acumulada entre pintura estándar y BC/CC. Elaboración propia.

de costos se seguirá obteniendo por casi 7 años, además del ahorro por no tener que volver a pintar la aeronave al quinto año.

4.2. Optimización de embarque

Durante la revisión de la literatura, se encontró diversos estudios con modelos propuestos para la estimación del proceso de embarque que buscan minimizar el tiempo de estos. Luego de considerar las características de cada modelo de los estudiados, tomando en cuenta cuales son más fáciles de aplicar, la información disponible en los mismos estudios sobre su forma de aplicación, el modelo elegido para este caso es el de Milne & Kelly, del año 2014. Este modelo se basa en el modelo de Steffen (explicado en el capítulo anterior), al cual expande al incluir la cantidad de equipaje de mano dentro de los factores. El algoritmo asigna asientos a los pasajeros según la cantidad de equipaje de mano, de manera de distribuirlo de forma más pareja para evitar retrasos cuando los pasajeros guardan su equipaje. Finalmente, el método utilizada el algoritmo de Steffen para asignar el orden de abordaje de los pasajeros.

Durante el proceso de embarque de pasajeros, en muchos casos la energía de la que se alimenta el avión proviene del motor auxiliar (APU), mientras que en otros es obtenida por parte de GPU, por lo que de ahí se deriva que una reducción en el tiempo de embarque, producirá una reducción en el consumo de combustible en dicho motor. La reducción del tiempo de embarque puede entregar beneficios en reducción de costos en otros aspectos, pero en este caso solo se tomará en cuenta el combustible. Se deben tomar en cuenta los siguientes datos:

- Consumo de combustible APU¹ $\approx 2,17[kg/min]$
- Precio del combustible $= 1,045[USD/kg]$
- Vuelos anuales $= 31.000$

El embarque de pasajeros para una configuración de 30 filas de 6 asientos cada una, toma aproximadamente 1000 segundos para un embarque en orden aleatorio, y 546

Tiempo reducido	7,36	[min]
Consumo de combustible	2,17	[kg/min]
Combustible reducido	15,94	[kg]
Precio Combustible	1,045	[USD/kg]
Ahorro por vuelo	16,67	[USD]
Vuelos por año	31.000	
Combustible Ahorrado	494.170	[kg]
Costo ahorrado	516.820	[USD]

Tabla 4.3: Resumen del cálculo de combustible y dinero ahorrado anualmente por optimización de embarque. Elaboración propia.

¹ 130 [kg/h] en operaciones en tierra (Airbus, 2002)

segundos para el modelo de Steffen (Notomista et al., 2016). Esta configuración es muy común para aviones comerciales como B737 o A320, por lo que será considerado para este caso, tomando en cuenta que Sky opera aeronaves de la familia A320. El modelo de Milne & Kelly indica mejoras menores a 1 % respecto a Steffen para embarque por bloques², por lo que se considerará el tiempo de Steffen, ya que la diferencia es despreciable. Con estos datos se puede obtener una estimación de ahorro anual, resumido en la **Tabla 4.3**.

Si se toma en cuenta que existe la alternativa de usar energía desde GPU, tanto desde el puente de embarque como de una unidad externa y que además el uso de estos dependerá de su disponibilidad en cada aeropuerto en que se opere, el beneficio total dependerá a su vez del porcentaje de utilización de APU en las operaciones de la aerolínea, lo cual para hacerse una rápida idea se representa en la **Tabla 4.4**.

Porcentaje de Utilización	Ahorro [USD]
25 %	129.205
50 %	258.410
75 %	387.615
100 %	516.820

Tabla 4.4: Resumen de ahorro por optimización de embarque, según porcentaje de utilización de APU. Elaboración propia.

²El embarque de pasajeros por bloques o grupos es una de las restricciones necesarias para un modelo de embarque, ya que es una situación real, no así el embarque individual de pasajeros.

4.3. Contenedores de carga

Para el caso de los aviones de la familia Airbus A320, el uso de contenedores de carga no es muy común, siendo incluso la existencia de contenedores para estos aviones algo desconocido para muchas personas y operadores dentro de la industria. Normalmente, los aviones de esta familia transportan la carga “a granel” dentro del compartimiento de carga, manteniéndola separada y ordenada por medio de las mallas de seguridad con que cuentan estas aeronaves en dicho compartimiento. Para el transporte de carga por medio de contenedores, la opción en la familia A320 son los contenedores AKH (LD3-45), de los cuales pueden ser transportados 4 en los compartimientos de carga de un A319, 7 en un A320 y 10 en un A321. Un contenedor AKH estándar, puede pesar cerca de 85 kg, lo cual si se lleva a toda una flota, puede generar un consumo considerable en combustible, por lo que en este aspecto su utilización no es atractiva. En específico, Sky Airline no utiliza contenedores de carga en sus aeronaves, por lo que adoptar esta medida podría no ser atractiva, además que no generaría una disminución en consumo de combustible, sino que la aumentaría. Sin embargo, existen ciertos beneficios del uso de contenedores, los cuales dependiendo de la realidad de cada aerolínea, podrían ser suficientes para justificarlo. Algunos beneficios de utilizar contenedores pueden ser:

- Manejo operacional más fácil, al poder acomodar la carga fuera del avión.
- Menor tiempo de turnaround.
- Menos daño a carga y maletas, debido a menor movimiento.
- Protección ante condiciones climáticas.
- Mayor seguridad ante robos.
- Menos personas requeridas para su manejo.

Sin embargo, además del peso agregado, entre sus contras hay que considerar que se debe adaptar el compartimiento de carga para el sistema de rieles y aseguramiento de contenedores, lo cual obviamente tiene un costo asociado. Existen aviones de la familia A320 que vienen de fábrica con este sistema, y en ambos casos se puede optar por cambiar a la otra opción. Además, se debe contar con vehículos para la carga de los contenedores dentro de la aeronave, agregando más costos.

Considerando la información disponible, es poco probable que un operador busque cambiar desde la operación de carga a granel, hacia la utilización de contenedores de carga. Sin embargo, de todas formas se incluirá en este trabajo una comparación de costos entre la utilización de contenedores estándar y distintas opciones de contenedores más livianos, en el caso hipotético de que optaran por esta medida. En el peor de los casos, este análisis podría tomarse para el caso general de una aerolínea que sí utilice

contenedores y contemple la posibilidad de cambiar a otros de materiales livianos. La **Tabla 4.5** resume los datos recabados respecto a las distintas opciones.

Contenedor	Estándar	Contenedor A	Contenedor B	Contenedor C
Peso [kg]	85	53	72	56
Precio [USD]	1.400	1.500	1.500	2.000
Costo de Mantenimiento [USD]	120	130	140	130
Nº de reparaciones por año	3	2	2,86	0,35
Vida útil estimada (años)	6	10	10	10

Tabla 4.5: Especificaciones técnicas y costos de cada contenedor. Elaboración propia.

Con la información de la **Tabla 4.5**, se puede elaborar un resumen de la estructura de costos asociados a la operación de cada tipo de contenedor, lo cual es representado en la **Tabla 4.6**.

Contenedor	Estándar (Aluminio)	Cont. A	Cont. B	Cont. C
Peso [kg]	85	53	69	56
Precio	1.400	1.500	1.500	2.050
Costo anual de combustible por posición	14.223	8.869	11.546	9.371
Costo anual de combustible por contenedor³	4.064	2.534	3.299	2.677
Costo de Mantenimiento	120	130	140	130
Nº de reparaciones por año	3	2	3	0
Costo de Mantenimiento Anual	360	260	400	46
Vida útil (años)	6	10	10	10
Depreciación	233	150	150	205
Costo total anual	4.657	2.944	3.849	2.928

Tabla 4.6: Estructura de costos de cada tipo de contenedor, por unidad. Elaboración propia.

Finalmente, considerando los costos asociados y la inversión necesaria, se obtiene que los costos totales a 10 años serán US\$23.022, US\$29.686 y US\$22.963, para los contenedores A, B y C, respectivamente. De igual forma, para cada uno de estos el periodo de recuperación se estima en 1, 2 y 6 meses, respecto a un contenedor estándar, según se muestra en la **Tabla 4.7**

Contenedor	Contenedor A	Contenedor B	Contenedor C
Diferencia Precio de Compra	100	100	650
Ahorro anual respecto a estándar	1.713	808	1.729
Periodo de recuperación (meses)	1	1	5
Costo a diez años	30.939	39.993	31.328

Tabla 4.7: Ahorros esperados, periodo de recuperación y costo a diez años de los tres tipos de contenedores, respecto a uno estándar. Elaboración propia.

³Dentro de la industria, se utilizan en promedio 3,5 contenedores por posición. Esto quiere decir que por cada espacio disponible para contenedores dentro de la aeronave, se debe contar con 3,5 unidades.

4.4. Comentarios

Respecto al uso de nuevos sistemas de pintura, en el caso de que los costos sean similares a los que se han considerado aquí, los resultados serían bastante ventajosos, ya que gracias a los ahorros que se generen por medio de la reducción de combustible, una mayor inversión podría recuperarse en un tiempo relativamente corto en comparación a la vida útil esperada para el tipo de pintura Basecoat - Clearcoat. En el caso de que se pudiera maximizar la vida útil del sistema de pintura, no solo se ahorraría el costo de combustible, sino que se generaría un ahorro en la inversión de volver a pintar las aeronaves, por lo que esto lo hace más atractivo.

En cuanto a la optimización de embarque, en este caso los beneficios podrían superar con creces la inversión necesaria para implementar un nuevo sistema, debido a que en su forma más simple, consistiría de la implementación de un código informático que complemente a los sistemas ya existentes. Si se considera que con un uso de 25 % total de APU los beneficios podrían ser cercanos a US\$130 mil anual, difícilmente la inversión podría tener un costo que sea relevante como para no adoptar esta medida.

Respecto a los conenedores de carga, considerando lo que se ha mencionado respecto a su uso y los costos asociados a cambiar un avión desde operación de carga a granel hacia uso de contenedores, difícilmente podría ser adoptada esta medida por Sky Airline. Sin embargo, si se consideran los beneficios que podría generar en el punto de vista operacional, podría existir la posibilidad de que se adopten parcialmente, dependiendo de las necesidades que puedan surgir a futuro, como por ejemplo, si se empezaran a operar nuevas rutas internacionales o con más escalas.

5

Conclusiones

Como se ha mencionado ya en este trabajo, el tema económico es quizás el principal motivador para las aerolíneas al momento de buscar la reducción de combustibles. Sin embargo, ante el desarrollo de las políticas y tratados internacionales, así como los compromisos tomados a nivel de industria respecto al cambio climático, la protección ambiental una razón importante para perseguir una mayor eficiencia energética en las aerolíneas. En este sentido, durante la investigación de medidas se pudo observar una tendencia en la forma en que la información era presentada por cada aerolínea. Muchas de las aerolíneas de relevancia tanto regional como mundial, que presentan sus esfuerzos en reducción de combustible, generalmente lo hacen considerando a la eficiencia de combustible como una arista más que forma parte de un esfuerzo mayor en cuanto a la gestión ambiental de la propia aerolínea. Esto se ve reflejado principalmente en el hecho de que las aerolíneas no solo destacan la reducción de combustible, sino que además indican las cantidades de GEI que se han logrado reducir por medio de estas acciones, lo cual podría ser percibido como el resultado natural del trabajo desarrollado por los organismos internacionales de la industria por concientizar sobre el cambio climático y limitar las emisiones contaminantes.

A pesar de lo acabado de la información entregada por algunos operadores, un problema presente dentro de esta materia, es el hecho de que muchas veces la información no está disponible públicamente. Si bien la mayoría de las aerolíneas buscan difundir sus planes de acción en reducción de combustible y protección del medioambiente, muchas otras -de las cuales varias son aerolíneas importantes- no entregan información en esta materia. En este sentido, es importante destacar que muy probablemente, la mayoría de las medidas recopiladas en este trabajo sean usadas por muchas más aerolíneas que las que se han nombrado acá para cada una de ellas. Esto podría deberse a diversas causas, como por ejemplo, el hecho de que cada operador haga énfasis solamente en aquellas medidas que han sido más importantes en su caso específico, o incluso aquellas que

hayan sido desarrolladas por ellos mismos. Un problema que se deriva de esta poca divulgación de las propias prácticas, es que puede haber algunos casos específicos de medidas que no sean promovidas por algún operador, pero que podrían potencialmente tener un beneficio importante para otros.

En cuanto a la literatura disponible, este trabajo se basó principalmente en la información entregada por las aerolíneas en sus propios sitios web, ya que la disponibilidad de artículos académicos en esta materia no se encontraron en cantidades significativas. En su mayoría, la información disponible en este formato respecto a la reducción de combustibles, se centran en mostrar el impacto de este y la relación del transporte aéreo con el cuidado del medioambiente, así como explicar los factores que se relacionan con la eficiencia energética y las emisiones. Aquellos artículos donde se menciona alguna medida para la reducción del consumo de combustible son principalmente de materias en desarrollo, donde se muestra el potencial de cada una de estas, por lo que se puede entender que los trabajos científicos encontrados en esta materia hablen principalmente del desarrollo de nuevas tecnologías (como el concepto *sharkskin*) o la optimización de procesos complejos (como el desarrollo de algoritmos para el embarque de pasajeros), por lo que difícilmente se podrían encontrar trabajos recopilatorios en dicho formato.

Considerando lo mencionado anteriormente, el trabajo realizado aquí logró recopilar y explicar las que probablemente sean las medidas más importantes adoptadas por las principales aerolíneas en el mundo. Considerando los desafíos del futuro respecto a la protección del medioambiente y la eficiencia energética en particular, el fomentar y divulgar aquellas prácticas que están siendo utilizadas en la industria puede tener un impacto positivo en el desarrollo sustentable de esta, ya que la cooperación entre los distintos actores del sector es necesaria para cumplir con los objetivos existentes. Además, muchas de estas medidas pueden contar con alternativas análogas para otras industrias en las cuales podrían ser aplicadas, por lo que su divulgación no sería beneficiosa solo para el sector aeronáutico, sino que para muchos otros. En este sentido, se puede mencionar por ejemplo, que la utilización de pinturas Basecoat - Clearcoat se aplican también en automóviles, o que el desarrollo de las superficies *sharksin* se están desarrollando no solo para la aviación, sino que también para el transporte marítimo, lo que es un ejemplo del beneficio mutuo que pueden generar ciertas medidas.

Respecto a las medidas operacionales recopiladas en este trabajo, se pudo observar que la mayoría de las aerolíneas siguen las mismas acciones y en pocos casos hay alguna que quede fuera dentro de lo que desarrolla cada operador. Estas medidas son las más difundidas, lo cual entendiendo la naturaleza de estas, comprenden en su mayoría planes de acción asociados a la eficiencia de recursos en general, los que podrían replicarse en otros sectores. Muchas de las medidas en este aspecto suelen ser mencionadas en

artículos de diarios, lo cual puede deberse a que son cosas más fáciles de comprender por el público general, ya que no requieren un entendimiento profundo del campo para explicarlas.

En cuanto a las medidas asociadas a la infraestructura, no hay mucho que se pueda decir de parte de las aerolíneas. Como se pudo ver, principalmente las medidas tienen que ver con la gestión y planificación aeroportuaria, lo cual pasa principalmente por las autoridades, pero también puede ser promovido por las aerolíneas. Por esto mismo, se entiende que en este aspecto la información difundida por las aerolíneas sea mucho más escasa, ya que en la mayoría de los casos escapa de su alcance. Sin embargo, hay un grupo de medidas que si es mencionada por las aerolíneas, y son las que tienen que ver con la utilización eficiente del espacio aéreo. La modernización del espacio aéreo por parte de los estados, permite a los operadores adoptar tecnologías que ayuden a optimizar sus vuelos, lo que se vio reflejado en la implementación de rutas dinámicas y nuevos procedimientos de aterrizaje y despegue continuos. Si bien los recursos necesarios para poder realizar estos procedimientos son parte de la infraestructura (espacio aéreo y aeropuertos), la incorporación de estas finalmente es por parte de las aerolíneas, ya que estas deben contar con la tecnología necesaria para explotar estos beneficios.

En el ámbito tecnológico, se observa claramente que hay una gran cantidad de información disponible respecto a las nuevas aeronaves y motores desarrollados en los últimos años. Si bien los operadores indican la modernización de sus flotas y componentes, son los fabricantes los que proveen del grueso de esta información, por lo que esta está disponible de fácil acceso. Por el otro lado, la información concerniente al desarrollo de nuevas tecnologías es más escasa. Una búsqueda rápida por internet mostrará muchos artículos sobre nuevas tecnologías para la aviación, las cuales son en su mayoría prototipos de aeronaves y motores que mayoritariamente se espera que estén disponibles para la segunda mitad del siglo. En cuanto a tecnologías que estén siendo desarrolladas para el mediano plazo, hay mucho menos información, lo cual se ha visto reflejado en la reducida cantidad de estas medidas que fueron recopiladas en este trabajo.

Finalmente, respecto a la situación de la aerolínea chilena Sky Airline en comparación con las medidas recopiladas en este trabajo, se puede observar que esta se encuentra en un escenario bastante positivo. De las cerca de cuarenta medidas recopiladas en este trabajo, sólo tres de estas no se han aplicado en la aerolínea, lo cual es un reflejo de la gestión positiva que ha tenido la empresa en este aspecto. En algunos casos, la creencia popular tiende a decir que el desarrollo sustentable no va de la mano con la reducción de costos. Sin embargo, en una industria donde el combustible tiene tanta relevancia en los costos operacionales, la experiencia dice todo lo contrario. La situación de Sky respecto a la implementación de estas medidas es coherente con su modelo de

negocios. Una aerolínea *low cost* intenta recortar costos lo más posible, por lo que la eficiencia en consumo de combustible debe ser uno de los aspectos más importantes en este sentido. Ryanair, una de las aerolíneas *low cost* más importantes del mundo, fue en 2011 considerada en la mejor posición dentro las aerolíneas según emisiones de GEI (Kling and Hough, 2011), lo cual es un caso similar al de Sky, ya que utilizan prácticamente todas las medidas posibles para reducir combustible.

En cuanto al futuro, la reducción de combustibles por si sola no es suficiente para cumplir con las metas de la industria en materia medioambiental. El desarrollo de nuevas tecnologías es importante, sobre todo considerando que el transporte aéreo es un medio de movilización que es cada vez más accesible para las personas. Dentro de la industria se reconoce la necesidad de tener fuentes de energía limpia (como los biocombustibles) y lograr aumentar su utilización hacia el futuro, de manera de generar una industria sustentable y segura, que logre posicionarse como líder ante los desafíos de una sociedad globalizada.

Fuentes de recopilación de medidas

Aplicado Por	Enlace
Aegean Airlines	https://en.about.aegeanair.com/corporate-responsibility/environment/
Aeropuerto de Atlanta	http://www.atl.com/community/sustainability/#1513974064098-6bbcafab-fe8a
Aeropuerto de San Francisco	http://media.flysfo.com/media/sfo/community-environment/2015-sfo-climate-action-plan.pdf
	http://media.flysfo.com/media/sfo/community-environment/sfo-2014-sustainability-report.pdf
Aeropuerto de Seattle	https://www.portseattle.org/environment/climate-air-quality
	https://www.portseattle.org/environment/climate-air-quality
Air Astana	https://ar2017.airastana.com/en/management-report/environment
Air Canada	https://leaveless.aircanada.com/content/leaveless/ca/en/index.html#!/less-carbon/fleet-renewal-and-innovation
Air China	https://www.sita.aero/pressroom/news-releases/air-china-to-cut-us\$8-million-in-fuel-costs-with-sita-technology
Air Europa	http://agencias.aireuropa.com/grupos_webv2/comercial/pdf/boeing-787-dreamliner.pdf
	http://www.eleconomista.es/especial-america/noticias/9171019/05/18/Air-Europa-sube-el-liston-con-la-flota-mas-moderna-y-eficiente.html
Air France	http://corporate.airfrance.com/en/csr-strategy?_ga=2.168003812.490728505.1529042383-1912450895.1529042383
Air India	https://economictimes.indiatimes.com/industry/transportation/airlines/-aviation/air-india-saved-rs-46-cr-by-implementing-fuel-efficiency-progs/articleshow/4388486.cms
	https://www.treehugger.com/aviation/air-indias-fuel-efficiency-efforts-save-9-million-in-six-months.html
Air New Zealand	https://www.airnewzealand.co.nz/press-release-2017-air-new-zealand-makes-the-switch
	https://www.airnewzealand.com/sustainability-carbon-reduction-management

Aplicado Por	Enlace
Alaska Air	https://www.alaskaair.com/content/about-us/sustainability-report?lid=vanity-sustainability
Alitalia	http://www.technologyinvestor.com/wp-content/uploads/2014/09/internet-of-Things-2.pdf
	https://www.ibm.com/case-studies/alitalia
American Airlines	https://www.aa.com/i18n/aboutUs/corporateResponsibility/environment.jsp
All Nippon Airways	https://www.ana.co.jp/group/en/csr/environment/effort.html
Austrian Airlines	https://www.austrianairlines.ag/AustrianAirlinesGroup/Environment %20New.aspx?sc_lang=en
	https://www.lufthansagroup.com/fileadmin/downloads/en/responsibility/balance-2018-epaper/#54
British Airways	http://mediacentre.britishairways.com/pressrelease/details/86/2017-228/8826
Brussels Airlines	https://www.brusselsairlines.com/en-be/corporate/corporate-social-responsibility/bggreen.aspx
Cathay Pacific	http://downloads.cathaypacific.com/cx/aboutus/sd/2016/wp-content/uploads/2017/03/CX_SDR2016_D_Climate_change.pdf
China Airlines	https://calec.china-airlines.com/csr/environment/en/action-flight.html
China Southern	https://www.csair.com/en/tourguide/flight_service/A380experience/index/index.shtml
Comair	http://www.comair.co.za/corporate-responsibility/environmentally-responsible
Copa	https://www.copaair.com/en/web/us/actions-environment
Delta	https://news.delta.com/what-does-fuel-efficiency-mean-delta
easyJet	http://www.easyjet.com/en/orange-spirit/environment
Emirates	https://www.emirates.com/us/english/about-us/environment/sustainability-operations.aspx
Ethiopian Airlines	http://www.mro-network.com/manufacturing-distribution/ethiopian-targets-fuel-efficiency-safran-s-sfco2-service
Etihad	http://www.etihad.com/en-us/about-us/etihad-news/archive/2017/etihad-airways-continues-sustainability-drive-across-its-global-airline-fleet/
	http://www.greenaironline.com/news.php?viewStory=2349
	https://www.etihad.com/en-us/about-us/etihad-news/archive/2018/etihad-airways-eliminates-195000-tonnes-of-carbon-emissions-in-2017/
EVA Air	http://www.evacsr.com/pages/en-us/ch4/saving-measures.aspx
Finnair	http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:ViPEzs4Cw8EJ:finnaircargo.fi/ja/terminal-operations/environment.html+&cd=11&hl=es&ct=clnk&gl=cl
Garuda Indonesia	https://www.garuda-indonesia.com/id/en/csr/garuda-indonesia-green-efforts/aviation-operations/index.page?
Hainan Airlines	https://www.hainanairlines.com/go/2017.6-6/DOCS/Responsibilities_and_Prospects/HNA_CSR-Report_2015_EN-2.pdf
Iberia	http://megustavolar.iberia.com/2013/12/influye-la-pintura-de-los-aviones-en-el-consumo-de-combustible/
	http://www.eleconomista.es/iberia/noticias/7974769/11/16/Aviones-mas-eficientes-para-una-nueva-Iberia.html
	https://www.elconfidencialdigital.com/dinero/Iberia-quita-aviones-ahorrar-combustible_0_2384161576.html
	https://www.tendencias21.net/La-optimizacion-de-rutas-transoceanicas-reduce-el-consumo-de-combustible_a9952.html

Aplicado Por	Enlace
JAL	http://www.jal.com/en/csr/environment/ecofirst/
	http://www.aviationtoday.com/2017/01/26/japan-airlines-taps-honeywell-for-its-fuel-efficiency-software/
	https://www.jal.com/en/csr/environment/conservation/detail01.html
JetBlue	http://www.greenaironline.com/news.php?viewStory=2079
Jetstar	https://newsroom.jetstar.com/facts-and-stats/
KLM Royal Dutch Airlines	https://buyingbusinesstravel.com/news/1328681-klm-reveals-new-business-class-seat
	https://www.elektormagazine.com/news/Flying-high-on-fuel-efficiency
	https://www.klm.com/travel/nl_en/prepare_for_travel/fly_co2_neutral/klm-doing/plan.htm
	https://www.klmtakescare.com/en/content/lower-emissions-thanks-to-electrical-loaders
	https://www.klmtakescare.com/en/content/sustainability-in-the-cockpit-conscious-captains
LATAM Airlines	https://www.latam.com/content/dam/LATAM/latam-marca-unica/footer/sostenibilidad/Sustainability-Report-2014-EN.pdf
Lufthansa	https://www.lhsystems.com/solutions-services/operations-solutions/lidoflightplanning/lidoflight4D
	https://www.lufthansagroup.com/fileadmin/downloads/en/responsibility/balance-2018-epaper/#52
	https://www.lufthansa-technik.com/cycleclean-old
Malaysia Airlines	https://www.malaysiaairlines.com/au/en/news-article/2017/steady-progress-in-Q3-2017.html
Norwegian	https://www.norwegian.com/en/about/company/corporate-responsibility/environment/
Qantas	https://www.ge.com/reports/want-better-way-fly-jet-qantas-pilots-now-app/
	https://www.qantas.com/travel/airlines/reducing-fuel-emissions/global/en
Qatar Airways	http://www.gulf-times.com/story/579735/A350-1000-has-best-fuel-consumption-per-seat-mile-
	https://www.qatarairways.com/content/dam/documents/environmental/sustainability-report-2016-2017.pdf
Ryanair	https://investor.ryanair.com/governance/esg/#1467712637141-d166d878-7a66
South African Airways	https://www.flysaa.com/sa/it/flyingSAA/News/Exceptional-environmental-efforts-place-SAA-as-one-of-only-two-global-carriers-to-achieve-IEEnvA-Stage-2-recognition.html
Scot	https://www.theverge.com/2012/6/4/3062767/scott-ipad-rental-fuel-consumption
Singapore Airlines	https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/press-releases/2015/pr-17a-06-15-rr-and-singapore-airlines-extend-totalcare-partnership-to-reduce-fuel-consumption.aspx
	https://www.singaporeair.com/en_UK/es/media-centre/press-release/article/?q=en_UK/2017/April-June/jr1117-170503
Sky Airline	https://www.cfmaeroengines.com/press-articles/sky-airline-signs-mou-leap-1a-rpfh-agreement/
SpiceJet	https://www.economist.com/the-economist-explains/2015/12/17/how-airlines-cut-costs
SWISS	https://www.lufthansagroup.com/fileadmin/downloads/en/responsibility/balance-2018-epaper/#54
	https://www.swiss.com/corporate/en/company/responsibility/ecological-responsibility#t-page=pane3

Aplicado Por	Enlace
Turkish Airlines	http://investor.turkishairlines.com/documents/ThyInvestorRelations/download/icerikler/2016-Environmental-Performance-Report.pdf
	http://www.defenceturkey.com/en/content/turkish-airlines-to-cut-fuel-costs-using-innovative-honeywell-connected-aircraft-software-2500#.WzgKDtL0nIU
United Airlines	http://www.foxnews.com/travel/2018/01/21/united-airlines-saves-170000-gallons-fuel-by-printing-inflight-magazine-on-lighter-paper.html
	https://www.united.com/ual/en/us/fly/company/global-citizenship/environment/fuel-efficiency-and-emissions-reduction.html
Vietnam Airlines	http://www.genewsroom.com/press-releases/vietnam-airlines-chooses-more-fuel-efficient-and-environmentally-friendly-engines-ge
	https://www.vietnamairlines.com/vn/en/about-us/press-room/press-release/2017/1112-EN-VI-PR-VNA-ky-ket-mua-va-bao-duong-dong-co-may-bay-cua-Pratt-Whitney
Virgin America	https://www.cfmaeroengines.com/press-articles/virgin-america-takes-delivery-first-leap-1a-powered-a321neo/
Volaris	http://www.notimex.gob.mx/ntxnotaLibre/521338/volaris-presents-new-aircraft-that-reduces-fuel-consumption
	https://cms.volaris.com/en/traveling-with-volaris/social-responsability/for-a-clean-sky/
Vueling	http://www.asetma.com/index.php/20-vueling-estrena-los-airbus-con-sharklets

Comparación de la situación de Sky Airline

Medidas operacionales	Aplicada
Aumentar densidad de asientos	Sí
Uso de GPU y PCA	Sí
Optimización de factor de ocupación	Sí
Lavado de motores	Sí
Utilización de vehículos de remolque	Sí
Taxeo con un motor	Sí
EFB	Sí
Reducción de agua potable	Sí
Carga (Reducción de peso en seguros, contenedores más livianos)	No
Revistas	Sí
Optimización de productos y alimentos	Sí
Reemplazo de sistema de entretenimiento empujado por iPads	No aplica
Optimización de Flyaway kits (kit de mantenimiento)	No aplica
Optimización de combustible de contingencia	Sí
Lavado de Aeronaves	Sí
Vuelos directos (menos escalas)	Sí
Bajar cortinas durante desembarque	Sí
Optimización de centro de gravedad	No
Medidas en Infraestructura	
Navegación satelital	Sí
CDA y CCO	Sí
Optimized enroute flight (FTS, UPR, DARP)	Sí
Estaciones de carga para vehículos eléctricos	No aplica
Instalación de GPU y PCA	No aplica
Utilización de aeropuertos secundarios	No aplica
End Around Taxiway	No aplica
Operaciones en CFSR	No aplica
Planificación óptima de movimientos en tierra	No aplica
Optimización de embarque de pasajeros	No
Medidas tecnológicas	
Dispositivos de punta de ala	Sí
Software de análisis de vuelo	No
Modernización de flota	Sí
Asientos nuevos (más livianos)	Sí
Vehículos eléctricos	Sí
Pinturas	No
Software de optimización de combustible	Sí
Mejoras o upgrades a motores	Sí

Tabla 6.1: Comparación de Sky Airline respecto a las medidas recopiladas. Elaboración propia.

Bibliografía

- Air Transport Action Group. Beginner's Guide to Aviation Biofuels. (May), 2009.
- A. Air Transport Action Group. Beginner's Guide to Aviation Biofuels, 2011. URL <http://safug.org/assets/docs/beginners-guide-to-aviation-biofuels.pdf>.
- Airbus. Flight Preparation 2. In *A319/A320/A321 Flight Crew Operating Manual*, page 285. 2002.
- Airbus Deutschland GmbH. Liquid Hydrogen Fuelled Aircraft – System Analysis. 2003. URL <http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text/20040226Cryoplane.pdf>.
- AirlinerWatch. Inside the painting hangars of Airbus, 2018. URL <https://airlinerwatch.com/inside-the-painting-hangars-of-airbus/>.
- Y. Araghi, M. Kroesen, E. Molin, and B. van Wee. Do social norms regarding carbon offsetting affect individual preferences towards this policy? Results from a stated choice experiment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 26: 42–46, jan 2014. ISSN 1361-9209. doi: 10.1016/J.TRD.2013.10.008. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920913001338?via=ihub>.
- S. Asencio. Buses sufren merma del 20 % de sus pasajeros tras arremetida de los vuelos low cost | Economía | BioBioChile, 2017. URL <https://www.biobiochile.cl/noticias/economia/negocios-y-empresas/2017/09/25/buses-experimentan-baja-del-20-en-pasajeros-tras-aumento-en-oferta-de-vuelos-low-cost.shtml>.
- B. Z. Bello. Captured CO₂ to Grow Microalgae for Bio-jet Fuel Production. 2012. URL <https://www.geos.ed.ac.uk/ccs/Meetings/19B.Z.Bello-UKCCSC2012WinterSchool.pdf>.
- T. Benyo. How does a jet engine work?, 2014. URL <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/UEET/StudentSite/engines.html>.

- B. Boundy, S. W. Diegel, L. Wright, and S. C. Davis. *Biomass Energy Data Book*. 4th edition, 2011. ISBN 1800553684.
- P. Brimblecombe. Attitudes and Responses Towards Air Pollution in Medieval England. *Journal of the Air Pollution Control Association*, pages 941–945, 1976. URL <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00022470.1976.10470341>.
- K. L. Brito Pérez. *Estudio del impacto económico de la nuevas regulaciones ambientales post 2012 para una aerolínea chilena*. PhD thesis, 2010.
- Business Wire. PPG Aerospace Basecoat/Clearcoat System Saves Weight and Time, Adds Life | Business Wire, 2009. URL <https://www.businesswire.com/news/home/20090310006152/en/PPG-Aerospace-BasecoatClearcoat-System-Saves-Weight-Time>.
- M. Cancilla. Aerospace: Base Coat-Clear Coat System Offers Benefits for Aircraft : Products Finishing, 2015. URL <https://www.pfonline.com/articles/aerospace-base-coat-clear-coat-system-offers-benefits-for-aircraft>.
- S. Carey. American Airlines Gets Paint Job - WSJ, 2013. URL <https://www.wsj.com/articles/SB10001424127887323968304578247681812331570>.
- S. Carey. Airlines Pull Back on Hedging Fuel Costs - WSJ, 2016. URL <https://www.wsj.com/articles/airlines-pull-back-on-hedging-fuel-costs-1458514901>.
- S. A. Cohen and J. E. Higham. Eyes wide shut? UK consumer perceptions on aviation climate impacts and travel decisions to New Zealand. *Current Issues in Tourism*, 14 (4):323–335, may 2011. ISSN 1368-3500. doi: 10.1080/13683501003653387. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13683501003653387>.
- College of the Desert. Hydrogen Fuel Cell Engines, 2001. URL <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/fcm01r0.pdf>.
- CSGNetwork. Aviation Fuel - Jet Fuel Information, 2011a. URL <http://www.csgnetwork.com/jetfuel.html>.
- CSGNetwork. Aviation Fuel - AvGas Information, 2011b. URL <http://www.csgnetwork.com/avgas.html>.
- David Suzuki Foundation. Carbon offsets | Climate change basics | Climate change | Science & policy | Climate change basics | Issues, 2017. URL <http://www.davidsuzuki.org/issues/climate-change/science/climate-change-basics/carbon-offsets/>.
- ENAP. Informe Semanal de Precios - Año 2018, 2018. URL https://www.enap.cl/pag/675/1818/ano{__}2018.

- European Biofuels. Fatty Acid Methyl Esters (FAME) Comparison of Fuel Properties. 2011. URL <http://www.etipbioenergy.eu/images/fame-fact-sheet.pdf>.
- Exxon Mobil. Aviation fuel – Jet A/Jet A-1 | ExxonMobil aviation, 2018. URL <https://www.exxonmobil.com/en/aviation/products-and-services/products/jet-a-jet-a-1>.
- A. Faaij and M. van Dijk. White Paper on Sustainable Jet Fuel. *SkyNRG*, 2012. URL <http://skynrg.com/wp-content/uploads/2013/11/White-paper-on-sustainable-jet-fuel-June-2012-Faaij-van-Dijk-copy.pdf>.
- Fuel Economy. Alternative Fuels, 2017. URL <https://www.fueleconomy.gov/feg/current.shtml>.
- L. Gari. Arabic Treatises on Environmental Pollution up to the End of the Thirteenth Century. *Environment and History*, 8(4):475–488, nov 2002. ISSN 09673407. doi: 10.3197/096734002129342747. URL <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article{&}issn=0967-3407{&}volume=8{&}issue=4{&}spage=475>.
- GE Aviation. New GENx Engine Advancing Unprecedented Use of Composites in Jet Engines | GE Aviation, 2004. URL <https://www.geaviation.com/press-release/genx-engine-family/new-genx-engine-advancing-unprecedented-use-composites-jet-engines>.
- GE Aviation. The GENx Engine | GE Aviation, 2017. URL <https://www.geaviation.com/commercial/engines/genx-engine>.
- S. Gössling, L. Haglund, H. Kallgren, M. Revahl, and J. Hultman. Swedish air travellers and voluntary carbon offsets: towards the co-creation of environmental value? *Current Issues in Tourism*, 12(1):1–19, jan 2009. ISSN 1368-3500. doi: 10.1080/13683500802220687.
- Green Facts. Glosario: Forzamiento radiativo, 2018. URL <https://www.greenfacts.org/es/glosario/def/forzamiento-radiativo.htm>.
- C. Hagmann, J. Semeijn, and D. B. Vellenga. Exploring the green image of airlines: Passenger perceptions and airline choice. *Journal of Air Transport Management*, 43: 37–45, mar 2015. ISSN 0969-6997. doi: 10.1016/J.JAIRTRAMAN.2015.01.003. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969699715000046>.
- Honeywell UOP. Honeywell Green Jet Fuel™, 2018. URL <https://www.uop.com/processing-solutions/renewables/green-jet-fuel/>.
- IATA. AIRLINE FUEL AND LABOUR COST SHARE, 2010. URL <http://www.iata.org/publications/economic-briefings/Airline{ }Labour{ }Cost{ }Share{ }Feb2010.pdf>.

- IATA. IATA - Environmental Assessment, 2017a. URL <http://www.iata.org/whatwedo/environment/Pages/environmental-assessment.aspx>.
- IATA. IATA - CORSIA, 2017b. URL <http://www.iata.org/policy/environment/pages/corsia.aspx>.
- IATA. IATA - Economics & Analysis, 2018. URL <http://www.iata.org/publications/economics/Pages/index.aspx?menu=Outlook{&}cat=IndustryEconomicPerformance>.
- International Organization for Standardization. ISO 14001 Revision, 2018. URL <https://www.iso.org/iso-14001-revision.html>.
- C. Jasper and A. Rothman. Airbus A380 Cut May Mark Beginning of End for Superjumbo - Bloomberg, 2016. URL <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-07-12/airbus-plans-to-cut-annual-a380-deliveries-to-12-as-of-2018>.
- Junta de Aeronáutica Civil. Informe Estadístico: Totales por operadores nacionales 2005-2014, por año, 2015.
- Junta de Aeronáutica Civil. Informe Estadístico: Totales por operadores nacionales 2015, por mes, 2016.
- Junta de Aeronáutica Civil. Informe Estadístico: Totales por operadores nacionales 2016, por mes, 2017.
- Junta de Aeronáutica Civil. Estadísticas Históricas | JAC Chile, 2018. URL <http://www.jac.gob.cl/estadisticas/estadisticas-historicas/>.
- M. Kling and I. Hough. AIR TRAVEL EFFICIENCY CARBON AND ENERGY. Technical report, Brighter Planet, 2011. URL <https://www.ryanair.com/doc/about/ryanair{ }brighter{ }planet{ }2011.pdf>.
- B. Lajo Bertran. *BIODIESEL COST ANALYSIS IN SPAIN AND TURKEY*. PhD thesis, 2009. URL <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/9147/Blanca{ }Lajo{ }Bertran{ }PFC.pdf>.
- B. Metz and O. Davidson. Mitigation of Climate Change, 2007.
- R. J. Milne and A. R. Kelly. Journal of Air Transport Management A new method for boarding passengers onto an airplane. *Journal of Air Transport Management*, 34:93–100, 2014. ISSN 0969-6997. doi: 10.1016/j.jairtraman.2013.08.006. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2013.08.006>.

Ministerio del Medio Ambiente. Cambio Climático, 2017a. URL <http://portal.mma.gob.cl/cambio-climatico/>.

Ministerio del Medio Ambiente. Presidenta Michelle Bachelet y Ministro del Medio Ambiente Marcelo Mena firman promulgación de Acuerdo Climático de París – MMA, 2017b. URL <http://portal.mma.gob.cl/presidenta-michelle-bachelet-y-ministro-del-medio-ambiente-marcelo-mena-firman-promulgacion->

S. Mora. Bajan los pasajes aéreos: Gobierno anuncia reducción inmediata de las tasas de embarque - Economía - 24horas, 2018. URL <https://www.24horas.cl/economia/bajan-los-pasajes-aereos-gobierno-anuncia-reduccion-inmediata-de-las-tasas-de-embarque-280430>

Naciones Unidas. Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el ...*, 62301:3, 1992. URL <http://scholar.google.com/scholar?hl=en{&}btnG=Search{&}q=intitle:Convenci?n+marco+de+las+naciones+unidas+sobre+el+cambio+clim?tico{#}1>.

S. Nair and H. Paulose. Emergence of green business models: The case of algae biofuel for aviation. *Energy Policy*, 65:175–184, feb 2014. ISSN 03014215. doi: 10.1016/j.enpol.2013.10.034. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421513010562>.

Nordisk Aviation. Weight Saving Calculator, 2018. URL <http://www.nordisk-aviation.com/Calculator.aspx>.

G. Norris. Sonic Cruiser is dead - long live Super Efficient?, 2003. URL <https://www.flightglobal.com/news/articles/sonic-cruiser-is-dead-long-live-super-efficient-159915/>.

G. Notomista, M. Selvaggio, F. Sbrizzi, G. Di Maio, S. Grazioso, and M. Botsch. A fast airplane boarding strategy using online seat assignment based on passenger classification. *Journal of Air Transport Management*, 53:140–149, 2016. ISSN 09696997. doi: 10.1016/j.jairtraman.2016.02.012. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.02.012>.

OACI. Manual on the Regulation of International Air Transport. page 170, 2004.

OACI. Environmental Protection, 2017a. URL <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/default.aspx>.

OACI. About ICAO, 2017b. URL <https://www.icao.int/about-icao/Pages/default.aspx>.

OACI. Environmental Protection, 2017c. URL <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/default.aspx>.

OACI. The Postal History of ICAO, 2017d. URL <https://www.icao.int/secretariat/PostalHistory/annex{ }16{ }environmental{ }protection.htm>.

A. P. P. Pires, Y. Han, J. Kramlich, and M. Garcia-Perez. Chemical Composition and Fuel Properties of Alternative Jet Fuels. 2018. URL <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2018/02/BioRes{ }13{ }2{ }2632{ }Pires{ }HKG{ }Chem{ }Compos{ }Fuel{ }Props{ }Aternative{ }Jet{ }F.pdf>.

PwC. Fuel price volatility: How are airlines responding to the challenge? Technical report, 2015. URL <https://www.pwc.com/us/en/industrial-products/publications/assets/pwc-airline-fuel-price-volatility.pdf>.

Ryanair. Ryanair | Environmental & Social, 2017. URL <https://investor.ryanair.com/governance/esg/{ }1467712637141-d166d878-7a66>.

J. Sánchez Tirado and C. Puentes Márquez. TECNOLOGÍAS PARA LA DISMINUCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LAS AERONAVES. 2012.

M. Schultz. Dynamic change of aircraft seat condition for fast boarding. *Transportation Research Part C*, 85(May):131–147, 2017. ISSN 0968-090X. doi: 10.1016/j.trc.2017.09.014. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2017.09.014>.

SendecO2. Precios CO2 - Sendeco2, 2018. URL <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>.

S. Sibdari, I. Mohammadian, and D. F. Pyke. On the impact of jet fuel cost on airlines' capacity choice: Evidence from the U.S. domestic markets. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 111(December 2017):1–17, 2018. ISSN 13665545. doi: 10.1016/j.tre.2017.12.009. URL <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.12.009>.

J. H. Steffen. Optimal boarding method for airline arXiv : 0802 . 0733v2 [physics . soc-ph] 19 Mar 2008. (March 2008):1–14.

V. Stenzel, Y. Wilke, and W. Hage. Progress in Organic Coatings Drag-reducing paints for the reduction of fuel consumption in aviation and shipping. *Progress in Organic Coatings*, 70(4):224–229, 2011. ISSN 0300-9440. doi: 10.1016/j.porgcoat.2010.09.026. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2010.09.026>.

W.-H. Tsai, Y.-C. Chang, S.-J. Lin, H.-C. Chen, and P.-Y. Chu. A green approach to the weight reduction of aircraft cabins. *Journal of Air Transport Management*, 40: 65–77, aug 2014. ISSN 0969-6997. doi: 10.1016/J.JAIRTRAMAN.2014.06.004. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969699714000787>.

- UACH. Bosques PROcarbono - Economía del Carbono, 2017. URL [http://www.uach.cl/procarbono/huella\[_\]de\[_\]carbono.html](http://www.uach.cl/procarbono/huella[_]de[_]carbono.html).
- UNFCCC. PROTOCOLO DE KYOTO DE LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO, 1998. URL <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpsan.pdf>.
- UNFCCC. Paris Agreement Spanish, 2015. URL [https://unfccc.int/sites/default/files/spanish\[_\]paris\[_\]agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/spanish[_]paris[_]agreement.pdf).
- UNFCCC. Kyoto Protocol, 2017a. URL [http://unfccc.int/kyoto\[_\]protocol/items/2830.php](http://unfccc.int/kyoto[_]protocol/items/2830.php).
- UNFCCC. Paris Agreement - Status of Ratification, 2017b. URL [http://unfccc.int/paris\[_\]agreement/items/9444.php](http://unfccc.int/paris[_]agreement/items/9444.php).
- United. Sustainable fuel sources, 2018. URL <https://www.united.com/ual/en/us/fly/company/global-citizenship/environment/sustainable-fuel-sources.html>.
- US EPA. Clean Alternative Fuels: Fischer-Tropsch One in a series of fact sheets. 2002. URL <http://infohouse.p2ric.org/ref/22/21676.pdf>.
- M. US EPA, REG 06. Learn About Environmental Management Systems. 2017. URL <https://www.epa.gov/ems/learn-about-environmental-management-systems{#}what-is-an-EMS>.
- H. Zeineddine. Journal of Air Transport Management A dynamically optimized aircraft boarding strategy. *Journal of Air Transport Management*, 58:144–151, 2017. ISSN 0969-6997. doi: 10.1016/j.jairtraman.2016.10.010. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.10.010>.