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

PROPUESTA DE MODELO DE GESTIÓN DE ITINERARIOS PARA AEROPUERTO ARTURO MERINO BENÍTEZ

JAVIER IGNACIO OLAVE IBÁÑEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO EN AVIACIÓN COMERCIAL

PROFESOR GUÍA : SR. CRISTIAN CARVALLO G.
PROFESOR CORREFERENTE : SR. JOSÉ PATRICIO MONTERROSA P.

MARZO 2021

Dedicado a

mi familia

Resumen

La Gestión de Afluencia del Tráfico Aéreo (ATFM) es una metodología basada en herramientas enfocadas en compartir información, con el fin de mantener niveles de demanda acordes a la capacidad de la infraestructura del espacio aéreo y de los aeropuertos, permitiendo una operación segura y eficiente.

En el Capítulo 1, se señala en un principio la relevancia que tiene el Aeropuerto de Santiago en el tráfico aéreo nacional, concentrando un 34 % de las operaciones durante el año 2019. Desde el 2012 ha alcanzado niveles de crecimiento promedio de 3,9 % en términos de operaciones, y superiores a un 10 % en términos de pasajeros. Este crecimiento debe adecuarse a la infraestructura disponible, la cual permite un máximo de 40 operaciones por hora (20 salidas y 20 llegadas), cantidad de operaciones alcanzada por lo menos en 3 días de temporada alta del año 2019.

En el Capítulo 2, se presentan los antecedentes correspondientes a la Toma de Decisiones en Colaboración (CDM) y cómo esta herramienta se puede utilizar en la Gestión de Afluencia del Tráfico Aéreo (ATFM) y en la Toma de decisiones en Colaboración a Nivel Aeropuertos (A-CDM). Luego, se presentan los antecedentes de la gestión de itinerarios a nivel nacional, y las definiciones que hace la DGAC al respecto. Junto con eso, se presenta al *cost index* como el elemento fundamental de la teoría a presentar, y su forma de relacionar costos relativos del tiempo con los costos operativos de una aerolínea.

En el Capítulo 3 se señalan los supuestos, conjuntos, parámetros, variables, función objetivo y las restricciones del modelo presentado. Se explica el desarrollo del cálculo y finalmente se exponen los resultados y los beneficios que trae consigo la gestión de los itinerarios para el principal terminal aéreo del país.

Palabras clave: Aeropuerto, Itinerarios, Aerolíneas, CDM, ATFM

Abstract

The Air Traffic Flow Management (ATFM) is a methodology based in sharing information, focused on keeping demand levels according to the air space and airport capacity, allowing a safe and efficient operation.

In the Chapter 1, the relevance of Santiago Airport in the domestic traffic is indicated, concentrating 34% of the total operations during 2019. Since 2012, it has reached average growth levels of 3,9% in terms of operations, and over 10% in terms of passengers. This growth must be adapted to the available infrastructure, which allows a maximum of 40 operations per hour (20 departures and 20 arrivals). This amount of operations has been reached at least 3 days during 2019.

In the Chapter 2 is explained how the Collaborative Decision Making (CDM) tool can be used in the Air Traffic Flow Management (ATFM) and the Airport - Collaborative Decision Making (A-CDM). Then, the Air Traffic Schedules National Management is explained, and the definitions of the DGAC are presented. As a fundamental pillar of this theory to be presented, the cost index is presented as the way to compare the relative time costs with the operative costs of an airline.

In the Chapter 3, the assumptions, sets, parameters, variables, objective function and the restrictions of the model are presented. Finally, the procedure of the calculation, the results and the main benefits of the schedules management for the main airport of the country are exposed.

Keywords: Airport, Schedule, Airlines, CDM, ATFM

Índice

Acrónimos **10**

Definiciones **12**

Introducción **14**

1. Antecedentes Generales **16**

1.1. Justificación 16

1.2. Objetivos 18

1.2.1. Objetivo General 18

1.2.2. Objetivos Específicos 18

1.3. Metodología 19

1.4. Alcance 20

2. Estado del Arte **21**

2.1. Antecedentes 21

2.1.1. Toma de Decisiones en Colaboración (CDM) 22

2.1.2. Gestión de Afluencia del Tráfico Aéreo (ATFM) 24

2.1.3. Toma de Deciciones en Colaboración a Nivel Aeropuertos (A-CDM) 26

2.1.4. Gestión de itinerarios a nivel nacional 28

2.1.5. El *Cost Index* y su aplicación en el modelo 33

2.2. Marco Teórico 37

2.2.1. Estratégias de implementación de ATFM 37

2.2.2. Problema de espera en tierra para un aeropuerto (SAGHP) 38

2.2.3. Problema de espera en tierra para múltiples aeropuertos (MAGHP) 40

2.3. Propuesta Metodológica 44

3. Desarrollo **45**

3.1. Modelo 48

3.1.1. Supuestos 49

3.1.2. Conjuntos 51

3.1.3. Parámetros 51
3.1.4. Variables 52
3.1.5. Función objetivo 53
3.1.6. Restricciones 53
3.2. Cálculo 54
3.3. Resultados 58

4. Beneficios **60**

5. Conclusiones **62**

Referencias **65**

A. Cantidad de operaciones en los principales aeropuertos del país **66**

B. Cantidad de pasajeros nacionales e internacionales en Chile **66**

C. Diagrama de flujo de módulos ASBU **67**

D. Formato de envío de itinerario mensual a DGAC (ad. coordinados) **68**

E. Niveles de puntualidad en llegadas y salidas en AMB **68**

F. Evaluación de capacidad durante hora móvil **69**

Índice de figuras

1.1. Capacidad declarada AMB (DGAC, 2020). 16
1.2. Máximos diarios de operaciones por hora en Aeropuerto de Santiago (SCNP S.A., 2020). 17
1.3. Destinos internacionales atendidos desde AMB durante el año 2019 (Fuente: SCNP S.A.). 20
2.1. Marco de funcionamiento de la metodología de mejoras por bloque del sistema de aviación (ASBU) (OACI, 2016). 22
2.2. Los módulos ASBU convergen con el tiempo hacia los conceptos operacionales y las mejoras de rendimiento previstos (OACI, 2016). 23
2.3. Concepto operacional y alcance del ATFM (OACI, 2018). 25
2.4. Distribución de los principales costos operacionales de Latam Airlines (Latam, 2020). 34
2.5. Distribución de los principales costos operacionales de Sky Airline (Malabrán, 2015). 34
2.6. Variación del precio del galón de Jet-A1 desde enero de 2016 (Index Mundi, 2021). 35
2.7. Variación de los *cost index* por tipo de avión y situación del vuelo (TOGA, 2018). 37
3.1. Vuelos afectados por causa del año 2019 (Sky Airline, 2020). 47
3.2. Minutos de retraso por causa del año 2019 (Sky Airline, 2020). 48
3.3. Distribución de STA/STD del lunes 14 de enero de 2019 (SCNP S.A., 2020). 54
3.4. Múltiples vuelos con misma hora de itinerario antes y después de modificación del programa (Elaboración propia, 2021). 55
3.5. Mútltiples vuelos en mismas horas de itinerario antes y después de modificación del programa (Elaboración propia, 2021). 55
3.6. Itinerarios de llegada entre las 10:46 y las 11:45 del día tipo (Elaboración propia, 2021). 57

3.7. Itinerarios de salida entre las 10:45 y las 11:44 del día tipo (Elaboración propia, 2020). 57
3.8. Distribución de nuevas STA/STD del lunes 14 de enero de 2019, bajo parámetros ingresados al 80 % de la capacidad declarada (Elaboración propia, 2021). 59
A.1. Evolución de total de operaciones de los principales aeródromos del país (JAC, 2020). 66
B.1. Evolución de total de pasajeros nacionales e internacionales en Chile (JAC, 2020). 66
C.1. Los módulos ASBU convergen con el tiempo hacia los conceptos operacionales y las mejoras de rendimiento previstos (OACI, 2016). 67
D.1. Formato de envío de itinerario mensual a DGAC, bajo procedimiento de aeródromo coordinado por Covid-19 (DGAC, 2021). 68
E.1. Minutos de diferencia entre ATA c/r STA (SCNP S.A., 2020). 68
E.2. Minutos de diferencia entre ATD c/r STD (SCNP S.A., 2020). 69
F.1. Extracto del resultado del proceso de gestión de itinerarios de AMB (Elaboración propia, 2021). 70

Índice de tablas

2.1. Cost index para familia A320 [kg/min] (Airbus, 1998). 36
2.2. Cost index para familia A330 y A340 [kg/min] (Airbus, 1998). 36
3.1. Cost index de referencia utilizados en el modelo [kg/min] (Elaboración propia, 2021). 51

Acrónimos

ACI Consejo Internacional de Aeropuertos

ACC Centro de Control de Área

A-CDM Toma de Decisiones en Colaboración a Nivel de Aeropuertos

AIC Circular de Información Aeronáutica

AIP Publicación de información aeronáutica

AMAN Gestor de llegadas

AMB Aeropuerto Arturo Merino Benítez de Santiago

ANSP Proveedor de servicios de navegación aérea

AO Proveedor de espacio aéreo

ASBU Mejoras por bloques del sistema de aviación

ATC Control de tránsito aéreo

ATFM Gestión de la afluencia del tránsito aéreo

ATM Gestión del tránsito aéreo

ATS Servicios de tránsito aéreo

AU Usuario del espacio aéreo

CCO Operaciones de ascenso continuo

CDM Toma de decisiones en colaboración

CDO Operaciones de descenso continuo

CFMU Dependencia central de gestión de afluencia

DCB Equilibrio entre demanda y capacidad

DGAC Dirección General de Aeronáutica Civil

DMAN Gestor de salidas

EIBT Hora de puesta de calzos

EOBT Hora de salida de calzos

FF-ICE Información de vuelo y flujo para el entorno colaborativo

FIR Región de información de vuelo

FMP Puesto de gestión de afluencia

FMU Unidad de gestión de afluencia

FUA	Uso flexible del espacio aéreo
GANP	Plan mundial de navegación aérea
GDP	Programa de espera o demora en tierra
IATA	Asociación del transporte aéreo internacional
JAC	Junta de Aeronáutica Civil
LCC	Aerolíneas de bajo costo
NAS	Sistema de espacio aéreo nacional
NOTAM	Información para aviadores
OACI	Organización de aviación civil internacional
PBN	Navegación basada en la performance
TFM	Gestión de la afluencia del tránsito

Definiciones

Aeródromo Nivel 1

Aeródromo o Aeropuerto donde las capacidades de la infraestructura aeroportuaria son, por lo general, suficientes para satisfacer la demanda de los usuarios en cualquier franja horaria.

Aeródromo Nivel 2

Aeródromo o aeropuerto donde existe una probabilidad de congestión durante algunos periodos del día, la semana o la temporada, la cual puede resolverse mediante ajustes de la programación establecida de mutuo acuerdo entre las aerolíneas y el facilitador.

Aeródromo Nivel 3

Un aeropuerto donde es necesario que todas las aerolíneas y demás operadores de aeronaves dispongan de un slot asignado por un coordinador para poder aterrizar o despegar en el aeropuerto durante los periodos en que tiene lugar la asignación del slot. Se debe someter a las directices mundiales de slots (IATA, 2015) de la IATA.

Cancelación de Vuelo

La no realización de un vuelo en la fecha programada.

Coordinación

Término genérico que engloba la asignación de slots en un aeropuerto de Nivel 3 o Coordinado.

Facilitación

Término genérico que engloba la facilitación en un aeropuerto de Nivel 2 o Monitoreado.

Gestión de Tráfico Aéreo (ATM)

Servicio que comprende la gestión del espacio aéreo, la gestión de afluencia del tránsito aéreo y los servicios de tránsito aéreo.

Gestión de Afluencia de Tránsito Aéreo (ATFM)

Servicio establecido con el objetivo de contribuir a una circulación segura, ordenada y expedita del tránsito aéreo asegurando que se utiliza al máximo posible la capacidad ATC, y que el volumen de tránsito es compatible con las capacidades declaradas por la autoridad ATS competente.

Hora Punta

Hora(s) en el día con altos niveles de demanda y mayor afluencia de tráfico de aeronaves en un aeropuerto, en las que se utilizan todos los recursos disponibles (terminales, plataformas, pista y espacio aéreo), a su máxima capacidad.

Infraestructura Aeroportuaria

Parte de la infraestructura aeronáutica enmarcada dentro de un aeropuerto que es necesaria para la partida y llegada de aeronaves y para la atención de pasajeros o carga; incluyendo pistas, calles de rodaje, plataformas, instalaciones, terminales de pasajeros y carga, instalaciones y servicios para la navegación aérea, instalaciones para mantenimiento, aprovisionamiento y despacho de aeronaves.

Itinerario

Horario prefijado definido para operaciones sistemáticas.

Nivel de Aeropuerto

La clasificación de los aeropuertos en función de su Nivel de congestión, la cual puede ser: Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3. Este se realiza mediante una evaluación establecida por la IATA.

Oficina de Itinerarios

Dependencia de la DGAC encargada de gestionar la asignación de itinerarios y horarios de operaciones aéreas en los aeropuertos Nivel 2 (o Facilitados) y la asignación de slots en un aeropuerto Nivel 3 (o Coordinados).

Slot o Franja Horaria

Es el permiso dado por un Coordinador en un aeropuerto Coordinado, para utilizar toda la infraestructura aeroportuaria necesaria con fines de aterrizaje o despegue en una fecha y hora determinadas.

Slot de Oportunidad

Es el que se genera al momento de cancelarse un vuelo con un slot previamente aprobado, slot que puede ser reasignado a otro operador.

Vuelos Regulares / No Regulares

Son “Regulares” aquellos realizados en forma continua y sistemática de acuerdo con condiciones prefijadas, tales como itinerarios y horarios. Los demás son “No Regulares”.

Introducción

La aviación ha demostrado ser un medio de transporte rápido y seguro, tanto para pasajeros como para carga, para desplazarse a nivel mundial y que por diversos otros medios conlleva más tiempo o simplemente es inviable. Esto hace de la aviación una industria esencial para el desarrollo de las economías. Juega un rol vital en la conectividad de los países, la creación de empleos, el transporte de carga, el turismo y un sinnúmero de otras actividades.

El aumento de la actividad aeronáutica ha presentado un inmenso desafío para los estados, quienes deben velar por la seguridad de las operaciones aéreas desarrolladas al interior de sus fronteras y espacios aéreos. Desde la década de 1980, y producto de un aumento en los niveles de vuelos, tanto en los Estados Unidos como en Europa se comienza con el desarrollo de sistemas tecnológicos que buscan optimizar el uso de los aeropuertos y el espacio aéreo, con el fin de hacer más segura y eficiente la operación aérea.

Los primeros indicios de la necesidad de implementar un sistema de control de tráfico aéreo se remontan hacia febrero de 1920, bajo el contexto de los últimos meses de la Primera Guerra Mundial y dado un aumento en los servicios de transporte aéreo de pasajeros, cuando en el que era en ese entonces el principal Aeropuerto de Londres se levantaba la primera torre de control aéreo del mundo. Fue en el pequeño municipio de Croydon a unos 20 km al sur de la capital donde se desarrollaron las principales actividades aéreas en el periodo entre guerras, destacando la carga, el correo y el servicio de pasajeros. Al término de la Seguda Guerra Mundial, el papel del principal aeropuerto de la ciudad pasa a manos del Aeropuerto de Heathrow, el que actualmente moviliza a más de 80 millones de pasajeros al año, lo que se traduce en más de 475 mil vuelos (UK Civil Aviation Authority, 2020). Ordenar tal magnitud de operaciones de por sí presenta un desafío estratosférico, a lo que se le agregan restricciones de horarios por su cercanía con barrios residenciales, multiplicidad de tipos de aeronaves (todos con velocidades de aproximación y estelas turbulentas distintas), convergencia de aerovías provenientes de todas direcciones, preferencias de las aerolíneas por operar a ciertos horarios y hacer compatibilizar los itinerarios con otros aeropuertos, roles de tripulaciones y mantenimiento de aeronaves, y

desafiantes condiciones meteorológicas, solo por mencionar algunas.

Si bien en Chile no hay aeropuertos con los números de pasajeros ni operaciones de Heathrow, tampoco cuenta con un sistema que ordene y planifique con una visión estratégica la conformación de los distintos itinerarios y que realice una gestión del flujo del espacio aéreo local.

En esta memoria se pretende hacer una propuesta de un modelo de gestión de itinerarios para el Aeropuerto Arturo Merino Benítez de Santiago, con el fin de logar un equilibrio entre la capacidad y la demanda de las instalaciones, reduciendo así los tiempos de espera tanto en aire como en tierra, disminuyendo la huella de carbono de la industria producto de un menor consumo de combustible y haciendo del viajar una mejor experiencia para el pasajero.

1. Antecedentes Generales

1.1. Justificación

El Aeropuerto Arturo Merino Benítez (AMB) durante el año 2019 concentró un 34 % de las operaciones aéreas totales del país, superando las 170.000 operaciones de aeronaves comerciales, privadas y militares. Entre el 2012 y el 2019, ha tenido un aumento anual promedio de un 3,9 % en movimiento de aeronaves que contrasta con un crecimiento nacional de tan solo un 0,5 % (ver Apéndice A).

Si bien a nivel nacional no se presenta un aumento significativo en número de operaciones, la cantidad de pasajeros ha aumentado desde cerca de 15 millones de pasajeros anuales el 2012, a más de 26 millones de pasajeros el 2019, con crecimientos anuales de hasta un 10 % en algunos aeropuertos. En parte se atribuye a la irrupción del modelo de las LCC presente desde el año 2015 en el país, disminuyendo los precios de los pasajes aéreos y democratizando el transporte aéreo (ver Apéndice B).

Con el fin de gestionar los itinerarios con miras a un largo plazo, los aeropuertos deben definir una capacidad máxima de operaciones (capacidad declarada), considerando aterrizajes y despegues durante un periodo de tiempo, generalmente definido por hora. Esta capacidad puede variar durante un mismo día por restricciones operacionales en ciertas pistas, como control de niveles de ruido por poblados colindantes, cambio de configuraciones de pista activa por horarios, mantención de pistas, condiciones meteorológicas adversas, etc; o puede variar en el mediano o largo plazo debido a construcción de nievas pistas o calles de rodaje, incorporación de nuevas tecnologías o procedimientos, o restricciones operacionales mayores aplicadas al aeropuerto, entre otras. La Oficina de ATFM dependiente del Subdepartamento de Tránsito Aéreo de la DGAC, reglamentada en el AIP Volumen 1 (DGAC, 2020), define la capacidad de AMB para operar un máximo de 40 operaciones por hora (ver Figura 1.1), considerando ambas pistas operativas distribuidas en 20 salidas y 20 llegadas.

Aeropuertos (AP) Aeródromos (AD)	Pista	Código		Capacidad horaria		
		IATA	OACI	DEP	ARR	TOTAL
AP Arturo Merino Benítez/Santiago SCEL	17R	SCL	SCEL	14	15	29
	17L			14	15	29
	AMBAS			20	20	40

Figura 1.1: Capacidad declarada AMB (DGAC, 2020).

La distribución que presentan los itinerarios de las operaciones entrantes y salientes de AMB (ver Figura 1.2) durante el año 2019 habla de un aeródromo que alcanza, por lo menos en 3 oportunidades y sobre todo en los meses de verano, su capacidad declarada por hora. Gran parte de los máximos diarios muestran un número de operaciones superior al 80 % de la capacidad del aeródromo, por lo que se deben realizar ajustes en los itinerarios para evitar desequilibrios entre la capacidad y la demanda de los aeropuertos y del sistema de tráfico aéreo (ATC).

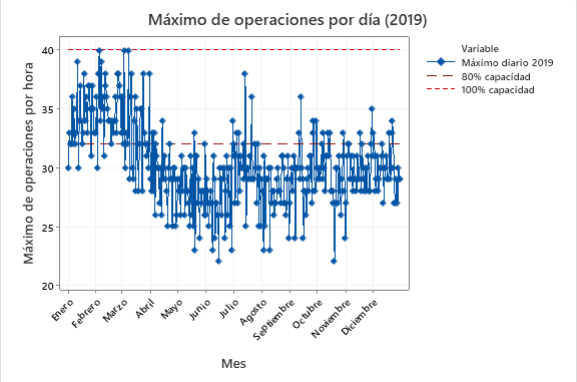


Figura 1.2: Máximos diarios de operaciones por hora en Aeropuerto de Santiago (SCNP S.A., 2020).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Proponer un sistema de gestión de itinerarios para AMB, según el criterio de no superar, durante cada hora móvil, la capacidad declarada del propio aeropuerto.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Describir el proceso de la toma de decisiones a nivel espacio aéreo y relacionarlo con la toma de decisiones a nivel aeropuerto.
- Mencionar teorías que den solución al problema de equilibrio entre capacidad y demanda de aeropuertos y espacios aéreos, sobre las cuales se basa el modelo a presentar.
- Desarrollar un modelo de gestión de itinerarios que evite los excesos de demanda del aeropuerto a nivel pre-táctico.
- Identificar los principales beneficios en la implementación de un sistema de gestión de itinerarios, enfocado en situaciones de exceso de demanda.

1.3. Metodología

Durante el trabajo, la metodología a desarrollar responde en grandes rasgos a la siguiente estructura:

- Definir los principales conceptos de la toma de decisiones en colaboración (CDM), la gestión de afluencia del tráfico aéreo (ATFM) y la coordinación a nivel aeroportuario de la toma de decisiones (A-CDM).
- Presentar los antecedentes pertinentes sobre la actual gestión de los itinerarios en Chile.
- Mencionar teorías para darle solución al equilibrio de capacidad y demanda de los espacios aéreos y aeropuertos, sobre las cuales se desarrolla el modelo a proponer.
- Evaluación del *Cost Index* como indicador ponderante a la hora de organizar los itinerarios.
- En el desarrollo se presentan supuestos, conjuntos, parámetros, variables y restricciones del modelo propuesto para gestionar de manera pre-táctica los itinerarios a nivel nacional e internacional de AMB.
- A partir de este modelo, se utilizan datos reales para evaluar y comparar el itinerario propuesto por las aerolíneas y el itinerario óptimo resultante de la solución del modelo, minimizando los costos de retrasar los itinerarios de los vuelos.
- Finalmente, se señalan los beneficios que implica el uso de un sistema de equilibrio de capacidad y demanda en el país, considerando el crecimiento del tráfico aéreo de los últimos años.

1.4. Alcance

El desarrollo del trabajo se basa en la búsqueda de información referente a un tema poco explorado y desarrollado en Chile, como son los sistema de gestión de itinerarios, con un alcance descriptivo y exploratorio. Al tener un impacto en la alfuencia del tráfico aéreo, se estudia desde la perspectiva de un ATFM.

La Administración Federal de Aviación de EEUU (FAA) y Eurocontrol, por realidades de sus propias jurisdicciones, han estudiado la coordinación y gestión de sus espacios aéreos y aeropuertos desde la década de 1980. La OACI y la IATA, velando por los intereses de diferentes actores de la actividad aérea comercial, presenta documentación de una organización del tráfico aéreo desde cerca de 1990.

Los datos provenientes de la JAC son desde el año 2012 y fueron solicitados mediante ley de transparencia. Se ultiliza información proveniente de la Sociedad Concesionara Nuevo Pudahuel S.A. corresponde al año 2019. Cabe señalar que el tráfico aéreo del 2020 no es considerado dentro del análisis realizado, y solo se considera este año en el marco de la presentación de los antecedentes con respecto a la gestión de itinerarios a nivel nacional, la cual tuvo un fuerte impulso producto de la pandemia del Covid-19.

Con respecto a los límites geográficos, se consideran los itinerarios de aeronaves que hagan uso del espacio aéreo chileno, teniendo como origen o destino AMB.

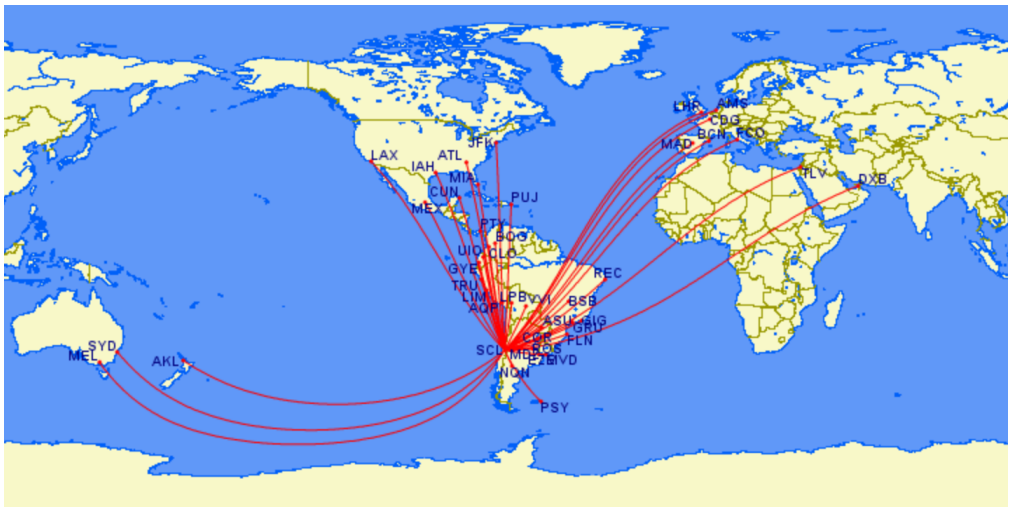


Figura 1.3: Destinos internacionales atendidos desde AMB durante el año 2019 (Fuente: SCNP S.A.).

2. Estado del Arte

En el presente capítulo se hace un razonamiento inductivo, considerando desde la hoja de ruta de los enfoques estratégicos de la OACI, sus metodologías para una implementación flexible y acorde a las necesidades de cada país, la relevancia de la toma de decisiones en colaboración (CDM) en la gestión de afluencia del tráfico aéreo (ATFM) y la toma de decisiones en colaboración a nivel aeroportuario (A-CDM), la forma en que se lleva a cabo actualmente la gestión de los itinerarios a nivel nacional, sus formas de priorizar vuelos programados de manera simultánea que por temas de capacidad deban ser reprogramados, y finalmente, la propuesta del *cost index* como un ponderador a la hora de gestionar los itinerarios.

2.1. Antecedentes

El Plan Mundial de Navegación Aérea 2016-2030 (GANP) (OACI, 2016) de la OACI establece una hoja de ruta a nivel estratégico, fomentado desde la OACI, para que los estados puedan llevar a cabo una armonización del sistema mundial de navegación aérea. Este obliga a los estados a correlacionar sus programas nacionales o regionales con el GANP armonizado, pero les proporciona una certeza en la inversión mucho mayor que si no lo hicieran bajo un marco de acuerdos internacionales basados en la eficiencia. Requiere de una colaboración activa entre los estados por medio de los Grupos Regionales de Planificación y Ejecución (PIRG), con el fin de coordinar las iniciativas en el marco de los planes regionales de navegación. Además, proporciona una visión de la evolución del sistema ATM mundial y de los posibles requisitos para la industria, para que ésta haga las previsiones necesarias para sus productos. Su objetivo es aumentar la capacidad y mejorar la eficiencia del sistema mundial de aviación civil, manteniendo en todo momento la seguridad operacional.

El GANP incluye la metodología de las mejoras por bloque del sistema de aviación (ASBU) (ver Figura 2.1), en cual se basa en una serie de módulos que ofrecen un enfoque mundial de ingeniería de los sistemas, de naturaleza pragmática y flexible, que permite que todos los estados logren avances en sus capacidades de navegación aérea de acuerdo con

sus necesidades operacionales particulares.

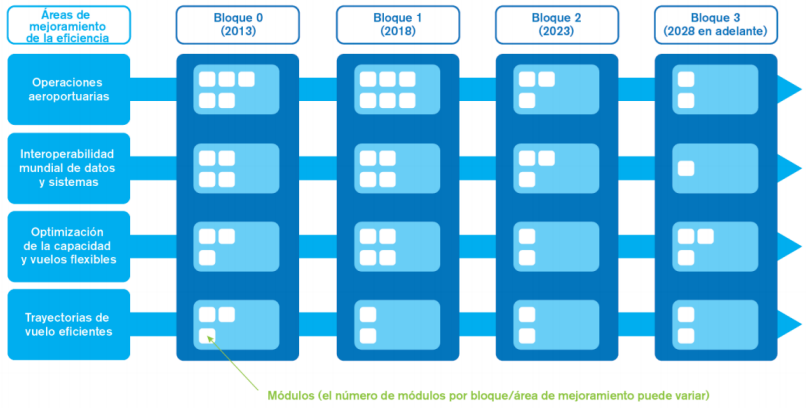


Figura 2.1: Marco de funcionamiento de la metodología de mejoras por bloque del sistema de aviación (ASBU) (OACI, 2016).

En el corto plazo, la OACI señala que centrará sus esfuerzos en desarrollar e implantar la navegación basada en la performance (PBN), las operaciones de descenso continuo (CDO), las operaciones de ascenso continuo (CCO) y la gestión de la afluencia del tránsito aéreo (ATFM), incluidas las capacidades de secuenciación de pistas (AMAN/DMAN).

En el marco del ASBU, cada módulo converge hacia los conceptos operacionales fundamentales que pretenden eficientarse (ver Figura 2.2). En el Apéndice C se detallan las dependencias y vinculaciones intermodales de acuerdo a los 4 bloques. Los módulos en particular que abarca la gestión de itinerarios desde la perspectiva del ATFM y de las operaciones aeroportuarias son los siguientes:

- RSEQ - Relativo a secuenciación en las pistas (AMAN/DMAN).
- ACDM - Toma de decisiones en coaboración a nivel aeropuerto (A-CDM).
- SWIM - Gestión de la información de todo el sistema.
- NOPS - Operaciones en la red (ATM/ATFM).

2.1.1. Toma de Decisiones en Colaboración (CDM)

El año 2003, durante el desarrollo de la 11ª Conferencia de la Navegación Aérea en Montreal, Canadá, se acuña formalmente el concepto de toma de decisiones en colaboración

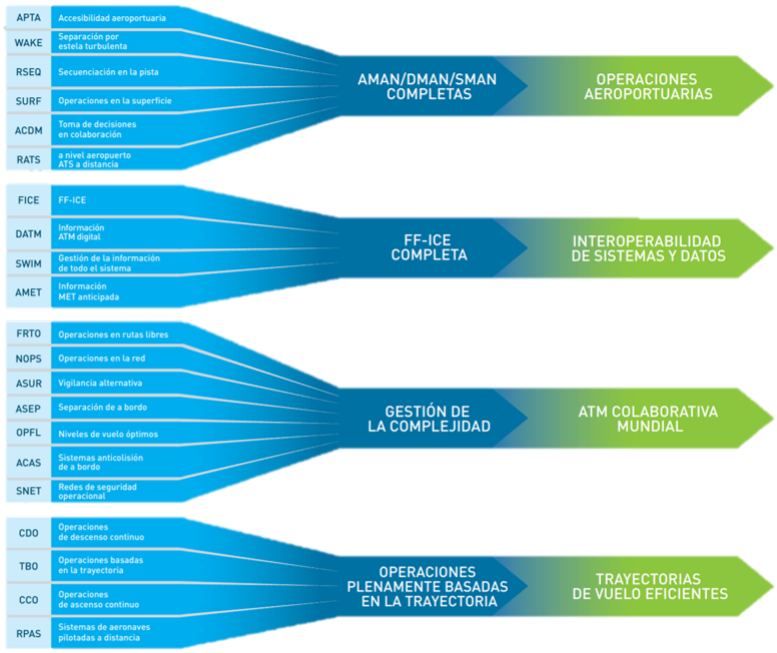


Figura 2.2: Los módulos ASBU convergen con el tiempo hacia los conceptos operacionales y las mejoras de rendimiento previstos (OACI, 2016).

de los distintos actores participantes en la operación aérea. Su objetivo es mejorar la gestión de afluencia y la capacidad del tránsito aéreo mediante el desarrollo de nuevas tecnologías y procedimientos, resguardando la seguridad y eficiencia de la operación.

La OACI define la CDM como un *"...proceso enfocado en apoyar otras actividades, tales como el equilibrio entre la capacidad y la demanda. Puede ser aplicado tanto en la planificación estratégica, tales como inversiones de nueva infraestructura, como en operaciones en tiempo real..."* (OACI, 2018). Es importante destacar que la CDM no es un objetivo en sí, si no que una herramienta para poder lograrlos. Desde el punto de vista operativo, la CDM define el curso de acción articulado entre dos o más miembros de una comunidad. De esta manera, su aplicación compromete a sus miembros a compartir información en tiempo real con el fin de tomar medidas en beneficio colectivo.

La CDM puede ser aplicada como herramienta tanto para implementar un sistema ATFM , que gestiona la afluencia del tránsito aéreo, como para la implementación de un sistema A-CDM, que vela por el equilibrio entre la capacidad y la demanda en las instalaciones aeroportuarias. Debido al carácter de la información manejada, su posición

debe ser imparcial con respecto a los demás participantes para evitar cualquier tipo de discriminación o mal uso en su aplicación y las reglas bajo las que se lleven a cabo las decisiones deben estar claras y preestablecidas.

2.1.2. Gestión de Afluencia del Tráfico Aéreo (ATFM)

La gestión de afluencia del tráfico aéreo (ATFM) es un factor habilitante de la eficiencia y eficacia de la gestión del tránsito aéreo (ATM). Contribuye a la seguridad operacional, a la sostenibilidad ambiental, a la eficiencia y a la rentabilidad del sistema ATM. La ATFM tiene por objeto mejorar la seguridad operacional garantizando densidades seguras de tránsito y reduciendo al mínimo los aumentos de tránsito. Su objeto es equilibrar, cuando se necesite, la demanda de tránsito y la capacidad disponible (OACI, 2016).

Para la implantación exitosa del ATFM es fundamental la coordinación entre todas las partes interesadas. Se espera que los aeródromos, los provedores de servicios de navegación aérea (ANSP), los usuarios del espacio aéreo (AU), entre otros, sean partícipes del proceso de toma de decisiones en colaboración, marco en el cual se espera que se desarrolle el ATFM.

El objetivo inicial de la implantación de un ATFM es de gestionar los excesos de demanda de control de tráfico aéreo (ATC). La evolución del concepto involucra facilitar la afluencia del tránsito aéreo de forma segura, ordenada y fluída, no solo velando por la optimización de la capacidad ATC y su utilización en la mayor medida de lo posible, si no también armonizando la demanda de tráfico con la capacidad ATC.

El alcance de la ATFM considera una fase estratégica, por medio de la utilización a largo plazo del espacio aéreo; la fase pretáctica, donde se evalúan restricciones de carácter variable como condiciones meteorológicas o eventuales restricciones de capacidad en zonas o aeropuertos puntuales, considerando planes de mitigación; la fase táctica, que comprende eventuales retrasos debido a la propia operación; y finalmente la fase post-operacional, donde se evalúan los indicadores obtenidos y se toman medidas para una mejora continua en los procedimientos (ver Figura 2.3).

Los objetivos de establecer un ATFM son:

- Aumentar la seguridad operacional del sistema ATM garantizando la entrega de

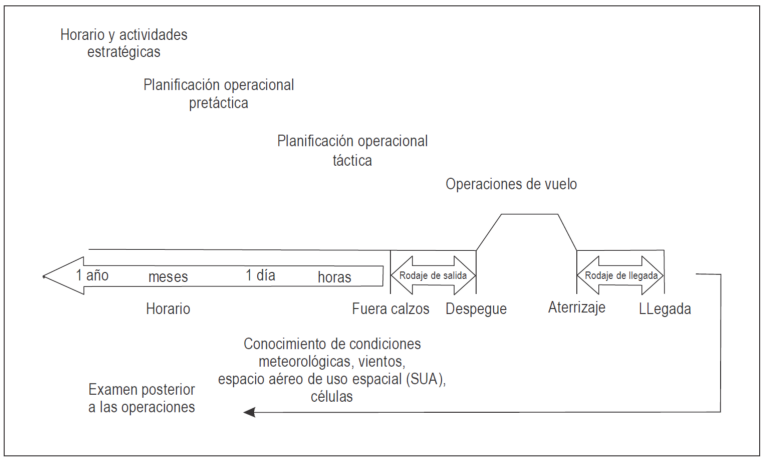


Figura 2.3: Concepto operacional y alcance del ATFM (OACI, 2018).

densidades de tránsito seguras y reduciendo al mínimo los aumentos de tránsito;

- Garantizar una afluencia óptima de tránsito aéreo en todas las fases de la operación de un vuelo equilibrando la demanda y la capacidad;
- Facilitar la colaboración entre las partes interesadas del sistema para alcanzar una afluencia eficiente del tránsito aéreo a través de múltiples volúmenes de espacio aéreo de una manera oportuna y flexible que respalde el logro de los objetivos de la actividad o la misión de los AU y ofrezca opciones operacionales óptimas;
- Equilibrar los requisitos legítimos pero, en ocasiones, opuestos de todos los AU, promoviendo así el trato equitativo;
- Conciliar las limitaciones de recursos del sistema ATM con las prioridades económicas y ambientales;
- Facilitar, mediante la colaboración con todas las partes interesadas, la gestión de las limitaciones, ineficiencias y eventos imprevistos que afectan la capacidad del sistema para reducir al mínimo los impactos negativos de las interrupciones y las condiciones cambiantes; y
- Facilitar el logro de un sistema ATM armonizado y sin discontinuidades mientras se garantiza la compatibilidad con los avances internacionales.

Los sistemas ATM han tenido históricamente una filosofía de atender a los vuelos por "orden de llegada" (*first request, first served*), buscando de esta manera brindar un acceso equitativo al espacio aéreo. Esta forma de enfrentar el ordenamiento del tráfico aéreo está migrando para incorporar principios que tengan como prioridad el uso eficiente del sistema, la disminución de emisiones contaminantes y los costos de explotación. De esta forma, el servicio ATFM debe incorporar estas nuevas consideraciones y determinar las aeronaves "más capaces" para priorizar y así lograr un rendimiento óptimo del sistema ATM.

En los países de América Latina es común el uso mixto de los aeropuertos, tanto por vuelos comerciales como por operaciones militares. El ATFM considera procesos relacionados con el uso flexible del espacio aéreo (FUA) y aeropuertos, que incluyen una coordinación civico-militar para lograr una separación adecuada y reduciendo la necesidad de una segregación permanente del espacio aéreo. Algunos aeropuertos de la región consideran un márgen de capacidad para este tipo de operaciones, junto con los vuelos ambulancias y vuelos chárter o privados, según valores históricos de tráfico que hayan presentado en el pasado.

2.1.3. Toma de Deciciones en Colaboración a Nivel Aeropuertos (A-CDM)

Así como la ATFM considera la coordinación de los actores relacionados a la operación enfocada en el vuelo, la toma de decisiones en colaboración a nivel aerpuertos (A-CDM) se enfoca en hacer más eficiente y fluída la operación en tierra. Permite el intercambio de información entre los aeródromos, explotadores de aeronaves, controladores de tráfico aéreo, servicio de *ground handling*, pilotos y el facilitador del sistema en sí.

Dentro del concepto operacional de Operaciones aeroportuarias propuesto en la GANP, la A-CDM tiene su propio módulo en los bloques B0 y B1, siendo concebidos para servir de herramienta de planificación que facilite a los Estados de manera armonizada y flexible de acuerdo con requisitos operacionales específicos.

El principal objetivo de la A-CDM es fomentar una conciencia de la situación común que facilite la mejora de la toma de decisiones, las que se toman de manera colaborativa y con reglas pre-establecidas, enmarcadas en un proceso de responsabilidad de las acciones de cada uno de los actores, debiendo estos últimos rendir cuentas por la información que

presentan.

Los beneficios de la implementación de una A-CDM existen tanto para los explotadores de aeropuertos, los operadores de aeronaves, los controladores de tráfico aéreo, los proveedores de *ground handling* y para la ATFM, y pueden ser operacionales, financieros y/o medioambientales:

- Mayor rendimiento en operaciones irregulares.
- Aumento de ingresos a raíz de la mayor capacidad declarada del aeródromo.
- Mejora de la eficacia operacional de infraestrctura aeroportuaria.
- Mayor puntualidad de los vuelos en un aeropuerto.
- Mejora de la reputación del aeropuerto desde el punto de vista de los pasajeros.
- Mejor utilización de los recursos y las capacidades disponibles.
- Reducción y mayor predectibilidad del tiempo de rodaje.
- Reducción del tiempo de espera en la pista.
- Mejora en la gestión de pasajeros.
- Mayor puntualidad en cada salida del operador aéreo.
- Mayor eficacia de los servicios de *ground handling*.
- Mejor cumplimiento de las horas de salida ATFM.
- Reducción del tiempo de rodaje.
- Reducción de la carga de trabajo de los controladores de tráfico aéreo.
- Mejora de la estabilidad en situaciones adversas (meteorológicas, contingencias).
- Menor necesidad de coordinación con los servicios ATFM.
- Mayor rendimiento aeroportuario.

- Mejor utilización de los recursos disponibles del proveedor de *ground handling*.
- Mejora de la estabilidad de las operaciones en situaciones adversas.
- Menor necesidad de coordinación de ATFM con ATC locales.
- Menor pérdida de turnos ATFM.
- Mayores capacidades de sectores de espacio aéreo.

2.1.4. Gestión de itinerarios a nivel nacional

El AIP Volumen 1 (DGAC, 2020) establece la creación de un sistema de gestión de flujo del tránsito aéreo, cuya implantación le corresponde a la Oficina de ATFM, dependiende del Sub-departamento de Tránsito Aéreo de la DGAC. Su implementación se divide en 5 etapas:

- Etapa Inicial.
- Etapa Básica.
- Etapa Intermedia.
- Etapa de Consolidación.
- Etapa de Operación.

Estas etapas son de carácter sucesiva y su implementación se realiza con el cumplimiento de hitos, siendo definido el primero de ellos con el comienzo de la Etapa Incial, el año 2010. Al momento de la redacción del presente informe, se encuentra en la Etapa Básica, que comprende desde el año 2015 hasta el inicio de la Etapa Intermedia, etapa cuya fecha de inicio aún no se encuentra definida.

Por su relevancia en el volúmen de tráfico a nivel nacional, se establece una Posición de Gestión de Flujo de Tránsito Aéreo (FMP) en el Centro de Control de Área (ACC) de Santiago denominado FMP Santiago, que queda a disposición cuando las circunstancias lo ameriten. De acuerdo a lo señalado en la publicación, durante la Etapa Básica la misma

Oficina ATFM asume las funciones de la Unidad de Gestión de Flujo de Tránsito Aéreo (FMU) a nivel nacional, la que cumple su función en el ámbito estratégico:

- La ATFM en Chile funciona como un sistema complementario a los sistemas de Control de Tránsito Aéreo propiamente tal.
- Planificará, coordinará, promulgará y ejecutará las medidas ATFM, propiciará una afluencia óptima de los flujos de Tránsito Aéreo en todas las fases de la operación de un vuelo, equilibrando la demanda y la capacidad, en la fase estratégica.
- Proporcionará reportes y estadísticas de las operaciones ATFM, de las demoras y de toda información relevante con propósitos operacionales y administrativos.
- Recibirá y dará trámite a los reportes de incidentes ATFM.
- Requerirá de los aeropuertos cálculos de capacidades horarias para; estacionamientos, Puestos AVSEC, Policía, Aduana, manejo de equipaje y cualquier parámetro que restrinja la operación aeroportuaria.
- Gestionará y procesará los itinerarios de las empresas aéreas, autorizados por DGAC, en el ámbito estratégico.
- Monitoreará y coordinará la degradación de los sistemas ATM, analizando su impacto operacional y propiciando medidas mitigadoras. Para ello monitoreará el estado operacional de la infraestructura de navegación aérea, el estado de radioayudas, pistas y dotaciones ATC, etc.
- Monitoreará las condiciones meteorológicas y analizará su impacto operacional.
- Generará medidas básicas de gestión cuando el análisis de los itinerarios indiquen congestión en los distintos aeropuertos o sectores ATC, las medidas se toman en el ámbito estratégico y se comenzará a incursionar en medidas tácticas y pre-tácticas.
- Se monitoreará el trafico y las operaciones para determinar la eficacia y eficiencia de las medidas ATFM.

- Conformará un comité CDM con los operadores aéreos, se utilizará el concepto CDM en la búsqueda de soluciones a los problemas operacionales.

Como se señala en la Justificación (Figura 1.1), la capacidad declarada de AMB es de 40 operaciones por hora, con 20 salidas y 20 llegadas y con ambas pistas operativas.

Para definir en qué situaciones es necesaria la intervención de la(s) FMP, la DGAC define 2 niveles de aeródromos según su nivel de congestión:

- **Monitoreado:** Aeródromo donde se prevea que la demanda de operaciones superará el 80 % de la capacidad de las infraestructuras en períodos determinado. Se mantendrá un proceso que determine una prioridad para la autorización del los vuelos previstos para luego asignarles las horas de operación. La declaración de un Aeródromo Monitoreado se realizará mediante NOTAM o AIC, lo que condicionará las operaciones durante la vigencia de esta medida.

- **Coordinado:** Aeródromo donde se prevea que la demanda de operaciones superará la capacidad de las infraestructuras en períodos determinados. Se aplicará un proceso que determine una prioridad para la autorización del los vuelos previstos para luego asignarles las horas de operación. Al igual que para los Aeródromos Monitoreados, la declaración de un Aeródromo Coordinado se realiza mediante la publicación de NOTAM o AIC.

En caso de operar en un Aeródromo Monitoreado durante periodos de monitoreo o en un Aeródromo de Coordinado, se debe contar con una Franja Horaria de Operación, denominada internacionalmente como slot. Esta tiene un periodo de validez que va desde 5 minutos antes hasta 15 minutos después de la hora de operación autorizada por la ATFM. Esta hora se define como la puesta de calzos para las llegadas (EIBT) o salida de calzos para salidas (EOBT). En caso de perder el slot, el operador debe solicitar uno nuevo, que será gestionado como nueva solicitud con la prioridad que le corresponda. En caso de perder un slot por condiciones meteorológicas, se le dará prioridad a la reasignación. En caso de que un slot sea cancelado, se genera un slot de oportundiad, el que puede ser reasignado a otro operador.

Cabe señalar que el enfoque que tiene la implementación del ATFM en Chile se enmarca en un proceso de CDM en la que se pretende integrar a todos los actores para compartir la información. En el AIP se desarrollan los objetivos, quienes están involucrados, los beneficios que esto trae para los diferentes actores, de qué manera se gestiona la información, de qué manera se pretende implementar, su estructura y organización, y las diferentes mediciones que se deben realizar para ir generando una mejora continua del sistema.

Producto de la pandemia del Covid-19 se hace necesaria la implementación de medidas de ATFM producto de una restricción de capacidad. Si bien esta no es la perspectiva desde la cual se fundamenta el presente trabajo, no se desarrolla en base a una filosofía CDM como tal y no se realiza por medio de sistemas alimentados directamente con parámetros a tiempo real, a continuación se explica el procedimiento utilizado en la gestión de itinerarios. La AIC más reciente y sobre la cual se basa el procedimiento de gestión de afluencia actual (DGAC, 2021) tiene como fecha de publicación el 05 de febrero de 2021, con vigencia hasta el 30 de junio del mismo año.

La medida que se establece para hacer cumplir las exigencias de la autoridad de salud, incluye la definición por medio de NOTAMs o AIC de aeródromos o aeropuertos coordinados o monitoreados, posibilidad de establecer tiempos máximos de permanencia de aeronaves en aeródromos coordinados (tiempos de *Turn Around*), y distribuir las horas de llegadas y salidas utilizando como referencia la regularidad en los vuelos desde el año 2019 y hasta octubre de 2020.

Los principios utilizados en la autorización de los horarios se basan en procesos de ajustes en las programaciones establecidos en un marco colaborativo entre las aerolíneas, ATFM y la unidad aeroportuaria local, con el fin de evitar el límite técnico del aeropuerto. En caso de no llegar a acuerdo, prevalecerá el horario establecido por la ATFM. Nótese que no se habla de capacidad declarada, ya que existe una diferencia conceptual en la aplciación de la medida al ser esta por restricción de capacidad y no por exceso de demanda.

En cuanto a las reglas de operación, antes de operar en un aeródromo coordinado, las compañías u operadores aéreos deben informar vía correo electrónico (coordinación-covid19@dgac.gob.cl) sus operaciones previstas. A lo menos dos semanas antes del mes siguiente, ATFM informará a las aerolíneas de eventuales cambios de horario en vuelos

desde o hacia aeródromos coordinados. Los cambios (CHG), nuevas solicitudes (RQST) o cancelaciones (CNL) deben ser informados al mismo correo electrónico señalado anteriormente. Estos cambios y nuevas solicitudes enviadas posterior al plazo establecido tendrán una menor prioridad y serán reubicados en los horarios disponibles más cercanos.

El procedimiento para la solicitud y aprobación de los slots obedece los siguientes criterios:

1. Operadores regulares, en los itinerarios y horarios informados y aprobados por ATFM en AP/AD coordinados con horario de servicio restringido (informado por NOTAM).
2. Operadores regulares, con modificaciones informadas y aprobadas por ATFM en AP/AD coordinados.
3. Operadores no-regulares de transporte público con aprobación ATFM en AP/AD coordinados.
4. Operadores regulares, con vuelos no informados a ATFM en AP/AD coordinados.
5. Otros.

En caso de exitir coincidencias en la evaluación de dos o más vuelos, se obedece los siguientes criterios:

1. Mayor tiempo atendiendo el destino/ruta.
2. Mayor oferta ofrecida (asientos).
3. Mayor cantidad de frecuencias operadas al destino.

En caso de detectarse alguna anomalía en algún horario o tipo de operación diferente a lo informado y acordado, la Oficina ATFM se pondrá en contacto con la compañía aérea u operador para resolverla. El uso indebido y continuo de estas prácticas podrá provocar sanciones reflejadas en la pérdida de prioridad en futuras asignaciones de horarios.

En caso de existir alguna demora generada por la propia gestión del ATC, esta no será considerada como incumplimiento de los horarios previamente autorizados.

El formato del envío de la programación de vuelo mensual se realiza por medio de *Google Sheets*, documento compartido a cada aerolínea. En este, se detalla la fecha, número de vuelo, aeródromo de salida, hora de salida, aeródromo de llegada, hora de llegada, tipo de vuelo, matrícula y alguna observación en caso de haber. En el Apéndice D se muestra el formato para enviar los itinerarios mensuales a la DGAC para operaciones en aeródromos coordinados.

Cabe señalar que el procedimiento mencionado es válido exclusivamente para la contigencia provocada por el Covid-19 y para el periodo señalado. En este sentido, Chile aún no cuenta con un sistema robusto para hacer una CDM que se alimente de datos en tiempo real, de coordinación de itinerarios y de control de afluencia del tráfico aéreo para situaciones de exceso de demanda. Tampoco cuenta aún con la estandarización de la clasificación de aeródromos según su nivel de congestión (Nivel 1, 2 y 3), por lo que aún no es considerado dentro de las directrices mundiales para la asignación de slots (IATA, 2015) de la IATA.

Si bien esa es la forma en que actualmente se gestionan los itinerarios, y como se puede suponer que seguirá funcionando luego de la contingencia, a continuación se propone al *cost index* como un indicador ponderante a la hora de gestionar los itinerarios, teniendo en consideración los costos operativos y los costos relativos del tiempo determinados por las propias líneas aéreas.

2.1.5. El *Cost Index* y su aplicación en el modelo

El ambiente competitivo fuerza a las aerolíneas a constantemente buscar reducir sus costos operativos. Los fabricantes de aeronaves han introducido el concepto de eficiencia del combustible originalmente en la *Performance Data Computer* (PDC), para luego migrar al *Flight Management System* (FMS) por medio de la creación de denominado *cost index*, que busca (a grandes rasgos) obtener el mínimo costo global del viaje para la aerolínea de acuerdo al costo relativo del tiempo que posea el vuelo en partícular, con el costo del combustible y otros costos operativos.

El costo del viaje se puede definir de la siguiente manera:

$$C = C_F * \Delta F + C_T * \Delta T + C_C \tag{1}$$

Con:

C_F = Costo del combustible por kg.

ΔF = Consumo de combustible en kg.

C_T = Costo relativo del tiempo por minuto de vuelo.

ΔT = Tiempo de vuelo en minutos.

C_C = Costos fijos independientes del tiempo.

Para un determinado segmento de la ruta, el costo mínimo del vuelo se logra a una velocidad que relacione de manera óptima tanto los costos relativos del tiempo y el costo del combustible.

Como se muestra en la Figura 2.4 y Figura 2.5, el porcentaje de los costos operacionales atribuídos al combustble ronda en torno al 25-30 %, además de ser uno de los más variables en la estructura de costos (Figura 2.6). Por esta razón se considera el costo operacional más relevante a la hora de buscar ahorros.

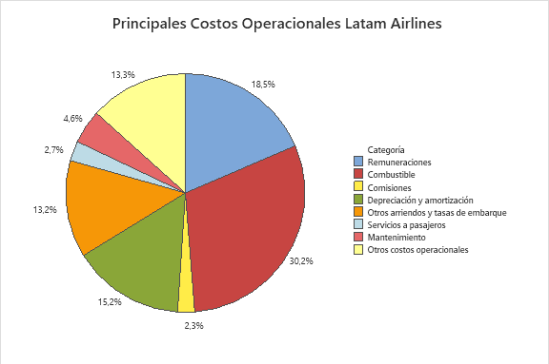


Figura 2.4: Distribución de los principales costos operacionales de Latam Airlines (Latam, 2020).

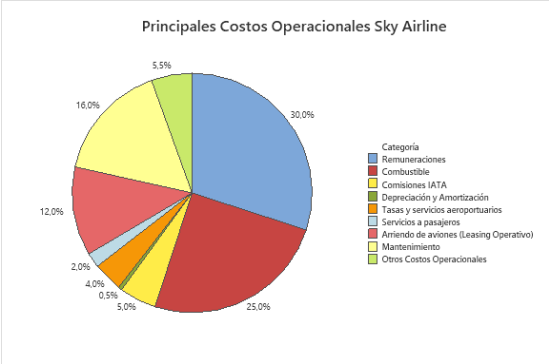


Figura 2.5: Distribución de los principales costos operacionales de Sky Airline (Malabrán, 2015).

Tan relevante como el costo del combustible es el costo relativo del tiempo. Dentro de sus principales componentes destacan los costos de mantenimiento, costos de tripulaciones, depreciación marginal y costos de arriendos de aeronaves. Adicionales a estos, existen otros

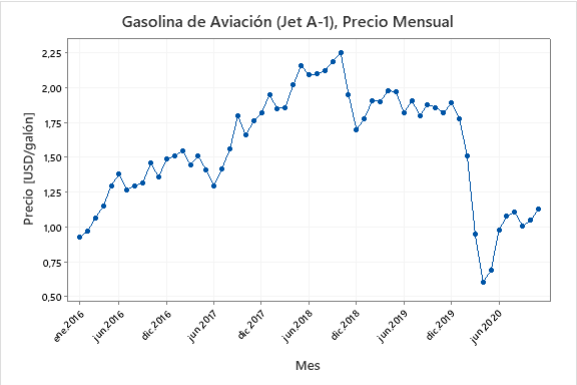


Figura 2.6: Variación del precio del galón de Jet-A1 desde enero de 2016 (Index Mundi, 2021).

costos relacionados al tiempo y que son de una medición mas indirecta o abstractos, como la insatisfacción de los pasajeros, pérdida de conexiones, o itinerarios poco óptimos.

Con el costo del tiempo, a medida que el avión vuela más rápido, menos costoso resulta ser el vuelo. Esto porque a medida que se vuela más rápido, los componentes cuyos mantenimientos dependen del tiempo pueden volar más millas entre cada inspección. Por otro lado, si el avión vuela más rápido, aumentan los costos por consumo de combustible, por lo que se debe lograr un equilibrio entre ambos valores dependiendo de la estructura de costos que presente la aerolínea. El FMS del avión combina ambos elementos y define un márgen de velocidad óptima, denominada ECON.

El concepto del *cost index* busca comparar el costo del tiempo con los costos operativos para una aerolínea:

$$Cost\ index = \frac{C_T[\frac{\$}{min}]}{C_F[\frac{\$}{kg}]} \tag{2}$$

A modo de ejemplo, a continuación se muestra una tabla con los valores de referencia del *cost index* de la familia A320 y de la familia A330/A340, de acuerdo a los distintos niveles de costos de combustible y del tiempo:

Cabe señalar que en las tablas el precio del combustible está expresado en galones americanos (USG) y los valores del *cost index* se expresan en kilógramos.

Como estos valores dependen de una infinidad de variables propias de las aerolíneas y no son de conocimiento público, en el presente trabajo se consideran valores aleatorios definidos de manera anterior al ingreso de los datos en el programa, con ciertos márgenes

C_F **[USD/USG]**$\diagdown$ C_T **[USD/min]**	**Bajo (<10)**	**Medio (10 < a < 15)**	**Alto (>15)**
Bajo (<0.7)	40	60	80
Medio (0.7 < a < 0.9)	30	45	60
Alto (>0.9)	25	40	50

Tabla 2.1: Cost index para familia A320 [kg/min] (Airbus, 1998).

C_F **[USD/USG]**$\diagdown$ C_T **[USD/min]**	**Bajo (<20)**	**Medio 20 < a < 30)**	**Alto (>30)**
Bajo (<0.7)	90	110	130
Medio (0.7 < a < 0.9)	70	100	120
Alto (>0.9)	60	80	100

Tabla 2.2: Cost index para familia A330 y A340 [kg/min] (Airbus, 1998).

dependiendo de las características de las operaciones. Es importante destacar el rol que tiene el compartir la información en el marco de la CDM para lograr un mayor provecho de la infraestructura del espacio aéreo y los aeropuertos. En el modelo en la práctica, sin el compartir la información de manera oportuna y veraz genera que el propio sistema no logre las soluciones óptimas, perjudicando a los demás actores que pueden esta transimitiendo los datos reales y de manera transparente.

Cuando un vuelo tiene un *cost index* mas elevado, significa que el costo del combustible es menos relevante que el del tiempo, gastando más combustible para alcanzar una mayor velocidad. De esta forma, hará uso del espacio aéreo circundante al aeropuerto por menos tiempo, tanto para vuelos de llegada como de salida. Si una aerolínea desea darle mayor relevancia a la puntualidad de un vuelo, esta debe disponer de un *cost index* más elevado, y viceversa. Luego, se puede utilizar esta herramienta desde un punto de vista de organización y priorización de vuelos a nivel pre-táctico y táctico para disminuir sus tiempos de espera y gastos de combustibles.

De acuerdo con datos de TOGA Projects (TOGA, 2018), basado en datos reales y de uso de simulación o para la toma de decisiones en las aerolíneas, se muestran valores del *cost index* que varían dependiendo de la fase del vuelo, y si el vuelo se encuentra en itinerario o no, entre otras cosas. De esta forma, se puede priorizar o no un vuelo dependiendo su estado según el itinerario original.

Delta Airlines

B737	CI = 13
B744	CI = 100
B757	CI = 55
B762	
→ ECON	CI = 81
→ SL1	CI = 54
→ OT1	CI = 243
B763	
→ ECON	CI = 94
→ SL1	CI = 63
→ OT1	CI = 377
B763ER	
→ ECON	CI = 113
→ SL1	CI = 75
→ OT1	CI = 377
B764	
→ ECON	CI = 107
→ SL1	CI = 71

** ECON is for maximum cost operations; SL1 is for fuel economy with tailwinds or ahead schedule; OT1 is used with headwinds and behind schedule.*

Figura 2.7: Variación de los *cost index* por tipo de avión y situación del vuelo (TOGA, 2018).

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Estratégias de implementación de ATFM

Existe una gran variedad de casos con distintas consideraciones en modelos de flujo de tránsito aéreo. En general, los autores se enfocan en la gestión desde los aeropuertos, más que en los espacios aéreos. Esto debido a que los primeros modelos nacen en EEUU, donde los problemas de congestión ocurrían en los aeropuertos más que en el aire. En una revisión de modelos de gestión de flujo de tránsito aéreo (Agustín et al., 2010), los autores se enfocan en 4: una metodología enfocada en la gestión de llegadas de un aeropuerto en particular (SAGHP), otra donde se considera una red de aeropuertos intercambiando mutuamente tráficos de salida y llegada (MAGHP), otra donde entran en consideración los espacios aéreos (ATFMP) y finalmente una que es capaz de gestionar rutas alternativas en el espacio aéreo en caso de existir excesos de demanda o condiciones meteorológicas adversas (ATFMRP). Para efectos del presente trabajo, se profundiza en las primeras dos metodologías.

2.2.2. Problema de espera en tierra para un aeropuerto (SAGHP)

Tradicionalmente, y como se comentó anteriormente, los distintos organizadores del sistema de tráfico aéreo ha priorizado los vuelos bajo el criterio de "primero en llegar, primero en ser atendido". Con la llegada del concepto CDM y la necesidad de continuar generando mayores eficiencias operacionales, las aerolíneas se han visto en la obligación de ir compartiendo mayor cantidad de información e ir migrando hacia un ambiente más colaborativo. Como uno de los pricipales y más exitosos recursos para generar eficiencias se encuentra el programa de espera o retraso en tierra (GHP), el que se aplica en redes aeroportuarias regionales con vuelos hacia un aeropuerto específico. Cuando este se declara con capacidad reducida o con exceso de demanda, se utilizan los denominados "slots de llegada" para definir los intervalos de tiempo continuos entre los límites de la contingencia.

La aplicación de un GDP tiene un efoque temporal (con horas de inicio y término) y enfoque geográfico. Habiendo definido el alcance temporal de la medida, el total de los retrasos debe ser aplicado en orden de disminuir la demanda hasta la capacidad establecida. Cabe señalar que el retraso total debe ser absorbido de manera constante e independiente del operador aéreo, además de incluir la mayor cantidad de vuelos como sea posible para no afectar solo cierto tipo de operaciones. En la práctica, el enfoque genera dos tipos de excepciones que no se someten a los retrasos: los vuelos que ya se encuentran en vuelo a la hora de establecer un GDP; y los que se encuentran fuera del alcance geográfico pre-establecido debido a la distancia del aeropuerto de origen. Los programas de gestión de afluencia de tráfico aéreo pierden precisión con vuelos más largos de 4 ó 6 horas, por lo que el alcance geográfico se limita a aeropuertos que se encuentren a menos de tal tiempo de vuelo. Lo anterior limita la aplicación de los GDP a un número reducido de vuelos, aumentando también la cantidad promedio de retraso por cada uno de ellos.

Al adentrarse en el problema surgen dos principales aristas conflicitivas: la primera involucra la determinación de políticas ó estándares para las reubicaciones de los vuelos. Esto puede resultar desafiante, ya que al existir una multiplicidad de criterios cada aerolínea puede estar de acuerdo con una política distinta que vaya mas acorde a sus intereses. Generalmente la igualdad de condiciones no es el criterio utilizado para este tipo de problemas. La segunda arista habla de la construcción del algoritmo que se vaya a utilizar,

de manera que redistribuya los vuelos en su posición ideal, pero también considerando otros objetivos y restricciones.

El modelo más simple de las metodologías de control de equilibrio entre demanda y capacidad que se identifica define una planificación óptima de aterrizajes y despegues de un respectivo aeropuerto para cierto espacio de tiempo. Algunas estratégias basadas en esta formulación se han aplicado anteriormente en aeropuertos como Chicago O´Hare y espacios aéreos metropolitanos de los Estados Unidos (Hoffman and Ball, 2000).

Gran cantidad de los modelos utilizados en optimización de las operaciones aéreas considera las salidas y las llegadas como dos variables independientes. Este es un supuesto relevante que se cumple en gran parte de los aeropuertos congestionados del mundo. Algunos autores (Dell'Olmo and Lulli, 2003) enfrentan el problema de buscar la óptima combinación de salidas y llegadas para reducir las esperas en tierra usando un estudio más detallado de la capacidad del aeropuerto o de espacios aéreos.

Como es más seguro y económico para las aerolíneas realizar las esperas en tierra que en aire, gran cantidad de los modelos se enfocan en gestionar las salidas asignándoles tiempos de espera, disminuyendo (aunque no eliminando del todo) las esperas en aire. La propia contingnencia meteorológica puede generar nuevos retrasos, los que dependiendo del modelo se pueden ir ingresando durante diferentes etapas de decisiones y así reasignar y generar mayores eficiencias.

El modelo básico del SAGHP asume una capacidad dada (k) para cierto aeropuerto, capacidad en función del tiempo conocida con anterioridad. Se asume una capacidad ilimitada del espacio aéreo y de despegues desde los aeropuertos de origen, y no se consideran rutas alternativas ni las velocidades de los vuelos. El horizonte de tiempo consta de $T + 1$ periodos de tiempo, cuya capacidad es suficiente para acomodar la totalidad de los vuelos. No se consideran preferencias de aerolíneas para asignar las esperas.

Conjuntos

F = Conjunto de vuelos.

T = Conjunto de periodos de tiempo $\{1,...,T\}$, donde $T^+ = T \cup \{T + 1\}$.

Parámetros

r_f = Itinerario de llegada al aeropuerto k para el vuelo $f, \forall f \in F$.

c_f^d = Costo unitario de espera en tierra del vuelo $f, \forall f \in F$.

R^t = Capacidad de llegada del aeropuerto k durante el periodo $t, \forall t \in T$ para el escenario dado.

Variables

x_f^t = Variable 0-1, que adquiere el valor 1 si el vuelo f está planeado para llegar al aeropuerto k durante el periodo t, y 0 si no, $\forall f \in F, t \in T^+$.

Modelo

El modelo busca planificar las llegadas de los vuelos al aeropuerto k minimizando los **costos de la espera en tierra**. Matemáticamente, la función objetivo es:

$$min \sum_{f \in F} \sum_{t \in T^+ | r_f \leq t} c_f^d x_f^t \tag{3}$$

Restricciones

$$\sum_{t \in T^+ | r_f \leq t} x_f^t = 1, \forall f \in F \tag{4}$$

$$\sum_{finF} x_f^t \leq R^t, \forall t \in T \tag{5}$$

$$x_f^t \in \{0, 1\}, \forall f \in F, \forall t \in T^+ | r_f \leq t \tag{6}$$

La Ecuación 4 obliga que todos los vuelos deben aterrizar una vez, mientras que la Ecuación 5 condiciona el número de aterrizajes por un periodo determinado a que no sea mayor a la capacidad de llegadas del aeropuerto.

Una forma de resolver este tipo de problemas de programación lineal es por medio de los algoritmos de problemas de asignación generalizado (GAP) o de minimización por medio de softwares de modelación (MS Excel, Solver), particularmente por la magnitud de los itinerarios generalmente procesados.

2.2.3. Problema de espera en tierra para múltiples aeropuertos (MAGHP)

En esta metodología se agrega la interrelación que existe entre los diferentes aeropuertos de una red. Su objetivo es buscar un itinerario que se adapte a la capacidad impuesta por las diferentes infraestructuras disponibles en los distintos aeropuertos. Algunos autores

han planteado la problemática desde el punto de vista que la congestión es causada exclusivamente por una insuficiente capacidad de arribos, con una capacidad de despegues asumida como infinita (Vranas et al., 1994). Por otro lado, también se plantea un modelo de espera en tierra para múltiples aeropuertos (Bertsimas and Stock, 1998) cuyas variables (0-1) se interpretan de una forma diferente: esta toma el valor 1 si el vuelo f llega a tiempo, y 0 si no (en el tiempo t o antes). Estos modelos consideran las respectivas capacidades de despegue y aterrizaje de los aeropuertos, y **su función onjetivo consiste en minimizar los minutos de retraso**.

El modelo básico del MAGHP asume que las capacidades de llegadas y salidas de los aeropuertos dependen del tiempo y ya están definidas con anterioridad y certeza. Además, se asume una capacidad ilimitada del espacio aéreo, donde no existen rutas ni aeropuertos alternativos. La (diferentes) velocidades de los aviones no están consideradas en el modelo. Este además considera una continuidad en los vuelos a lo largo del horizonte de tiempo en evaluación.

Conjuntos

K = Conjunto de aeropuertos, con $K = K^d \cup K^a$, donde K^d es el cojunto de aeropuertos de salida y K^a es el conjunto de aeropuertos de llegada. Un mismo aeropuerto generalmente pertenece a ambos conjuntos.

Parámetros

$d_f \in T$ = Hora de despegue por itinerario del vuelo $f, \forall f \in F$.

$r_f \in F$ = Hora de llegada por itinerario del vuelo $f, \forall f \in F$.

c_f^a = Costo de espera en aire por unidad de tiempo para el vuelo $f, \forall f \in F$.

c_f^g = Costo de espera en tierra por unidad de tiempo para el vuelo $f, \forall f \in F$.

k_f^d = Aeropuerto de origen del vuelo $f, \forall f \in F$.

k_f^a = Aeropuerto de destino del vuelo $f, \forall f \in F$.

G_f = Máximo de unidades de tiempo de retraso para espera en tierra del vuelo $f, \forall f \in F$.

A_f = Máximo de unidades de tiempo de retraso para espera en aire del vuelo $f, \forall f \in F$. Nótese que el tiempo máximo de vuelo permitido para el vuelo f es $r_f - d_t + A_f$.

s_f = Tiempo de holgura del avión después del vuelo $f, \forall f \in F$.

D_k^t = Capacidad de despegues del aeropuerto k durante el periodo $t, \forall k \in K, t \in T$ para el escenario dado.

R_k^t = Capacidad de aterrizajes del aeropuerto k durante el periodo $t, \forall k \in K, t \in T$ para el escenario dado.

Conjuntos calculados en el preprocesamiento

T_f^d = Conjunto de posibles periodos de tiempo para el despegue del vuelo f, con que $T_f^d = \{t \in T | d_f \leq t \leq min\{d_f + G_f, T\}\}, \forall f \in F$.

T_f^a = Conjunto de posibles periodos de tiempo para la llegada del vuelo f, con que $T_f^a = \{t \in T | r_f \leq t \leq min\{r_f + G_f + A_f, T\}\}, \forall f \in F$.

Variables

u_f^t = Variable 0-1, que adquiere el valor 1 cuando la hora de despegue del aeropuerto k_f^d es el tiempo t, y 0 si no, $\forall f \in F, t \in T$.

v_f^t = Variable 0-1, que adquiere el valor 1 cuando la hora de despegue del aeropuerto k_f^a es el tiempo t, y 0 si no, $\forall f \in F, t \in T$.

g_f = Variable de decisión que da el número de periodo de tiempos de retraso en tierra para el vuelo $f, \forall f \in F$.

a_f = Variable de decisión que da el número de periodo de tiempos de retraso en aire para el vuelo $f, \forall f \in F$.

Modelo

$$min \sum_{f \in F} (c_f^g u_f + c_f^a v_f) \tag{7}$$

Restricciones

$$\sum_{f \in F | k_f^d = k, t \in T_f^d} u_f^t \leq D_k^t, \forall k \in K, t \in T \tag{8}$$

$$\sum_{f \in F | k_f^a = k, t \in T_f^a} v_f^t \leq R_k^t, \forall k \in K, t \in T \tag{9}$$

$$\sum_{t \in T_f^d} u_f^t = 1, \forall f \in F \tag{10}$$

$$\sum_{t \in T_f^a} v_f^t = 1, \forall f \in F \tag{11}$$

$$g_f = \sum_{t \in T_f^d} t u_f^t - d_f, \forall f \in F \tag{12}$$

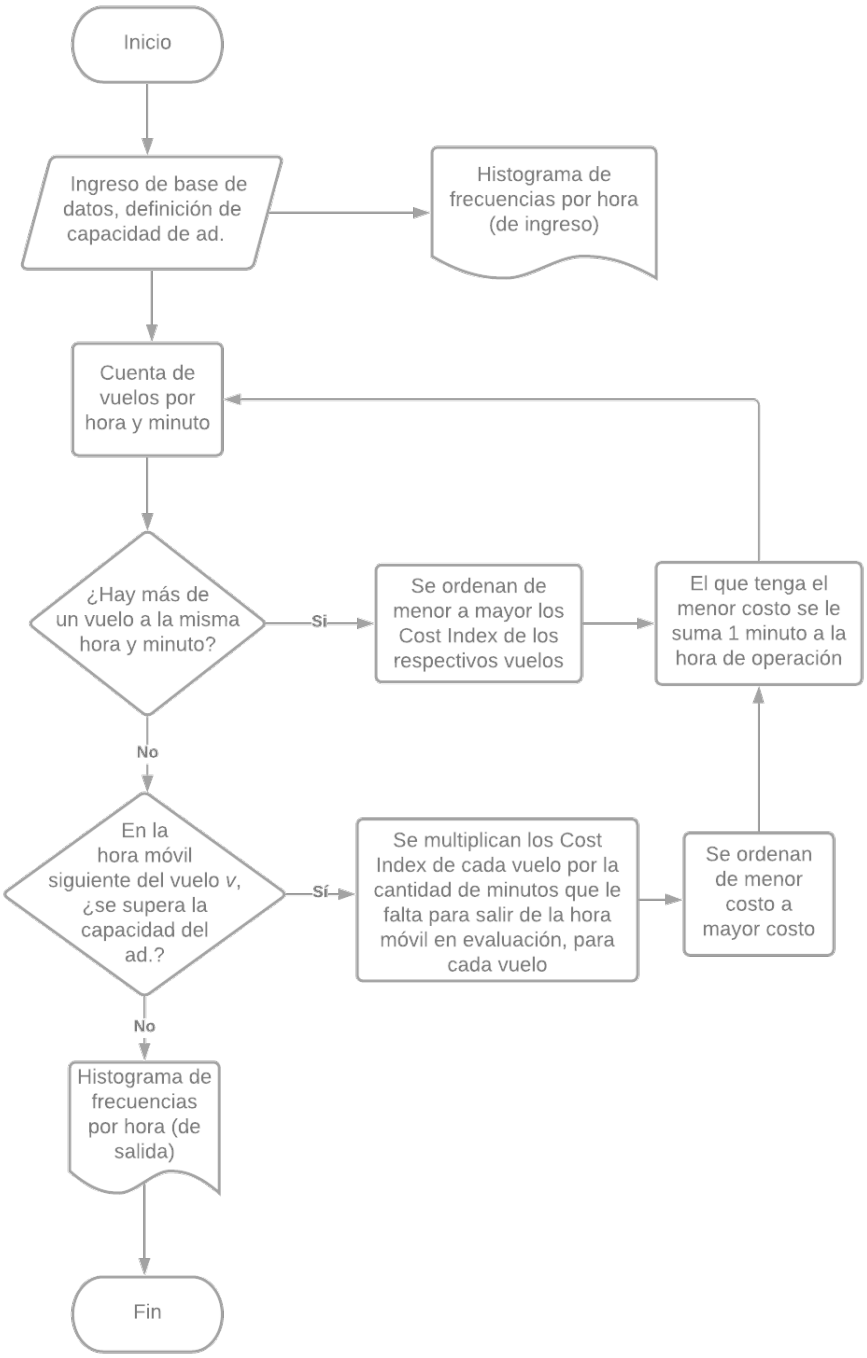
$$a_f = \sum_{t \in T_f^a} t v_f^t - r_f - g_f \geq 0, \forall f \in F \tag{13}$$

$$g_{f'} + a_{f'} - s_{f'} \leq g_g, \forall (f', f) \in C \tag{14}$$

$$u_f^t, v_f^t \in \{0, 1\}, \forall f \in F, t \in T \tag{15}$$

La función objetivo (Ecuación 7) minimiza la espera total en tierra y en aire para los vuelos en periodos de tiempo. La Ecuación 8 y Ecuación 9 fuerzan a que no se exceda la cantidad de aterriajes y despegues para cada aeropuerto de la red. La Ecuación 10 y Ecuación 11 fuerzan a que cada vuelo aterrice y despegue una vez. La Ecuación 12 y Ecuación 13 definen las esperas en tierra y en aire, respectivamente. Finalmente, la Ecuación 14 transfiere el exceso de demanda del vuelo f' al vuelo siguiente f para $(f', f) \in C$. Nótese que si el vuelo f' llega a su destino con un retraso total de $g_{f'} + a_{f'}$ mayor a la holgura de tiempo $s_{f'}$, entonces el siguiente vuelo va a tener un retraso de a lo menos $g_{f'} + a_{f'} - s_{f'}$.

2.3. Propuesta Metodológica



3. Desarrollo

Si bien anteriormente se habla de el crecimiento del número de operaciones y pasajeros en los últimos años, resulta importante profundizar en el nivel de cumplimiento de estas llegadas y salidas. Durante los últimos años los niveles de puntualidad de AMB han fluctuado entre un 70 y un 80 % de los vuelos operados entre 0 y 15 minutos de retraso. Según datos de la Sociedad Concesionaria Nuevo Pudahuel S.A., el 2019, un 74,7 % de los vuelos arribaron puntuales o antes de su itinerario (STA), un 89 % llegó con un retraso inferior o igual a 15 minutos y un 97,1 % con un retraso inferior a 60 minutos. El promedio de los vuelos llegó cerca de 5 minutos antes del itinerario a AMB, con una desviación estándar de 24 minutos. En el caso de las salidas, tan solo un 1,4 % de los vuelos salió antes o a la hora de su itinerario (STD). Un 44,4 % de los vuelos salió con un retraso igual o inferior a 15 minutos, y un 95,6 % de los vuelos salieron antes de los 60 minutos luego de su itinerario. A diferencia de las llegadas, las salidas tienen un promedio de retraso de 21 minutos, aunque con una desviación estándar levemente inferior (gráficos en Apéndice E).

De lo anterior, se puede señalar que los vuelos arribados presentan una mayor variabilidad, y por tanto menor predectibilidad, aunque en promedio llegan 5 minutos antes de su itinerario. Esto se puede atribuir a que las aeronaves recuperen minutos perdidos en el aire, o a que las aerolíneas sobre-estiman el tiempo de vuelo para poder disponer de más tiempo en caso de algun imprevisto. Los vuelos salidos, por el contrario, presentan una menor variabilidad en su itinerario, aunque en promedio despeguen más de 21 minutos luego de su itinerario.

La puntualidad y regularidad son principios fundamentales considerados dentro de las directrices mundiales de slots (IATA, 2015) para lograr una eficiencia óptima en el uso de la infraestructura aeroportuaria, con el propósito de incrementar al máximo los beneficios para la mayor cantidad de usuarios posibles del aeropuerto. El estándar de puntualidad 15 (salidas y llegadas con máximo 15 minutos de diferencia con la hora según itinerario) es el objetivo a nivel industria, por lo que es imperante asegurar a nivel estratégico y pre-táctico la capacidad del aeropuerto y del espacio aéreo para disminuir los retrasos asociados a estos factores.

Los principales motivos para el retraso o la cancelación de los vuelos son diversos, y algunos vuelos pueden estar afectados por dos o más razones:

- Aerolínea:
  - Debido a retrasos en el manejo de pasajeros y/o equipaje.
  - Debido a retrasos en el manejo de la carga o correo.
  - Debido a retrasos en el servicio de *ground handling*.
  - Debido a inconvenientes técnicos y del equipamiento de la aeronave.
  - Debido a daños a la aeronave.
  - Debido a operaciones de vuelo y tripulación.
  - Debido a otras causas relativas a la aerolínea.
- Aeropuerto:
  - Debido a restricciones ATFM en el aeropuerto de destino.
  - Debido a restricciones en las instalaciones del aeropuerto.
  - Debido a restricciones en el aeropuerto de destino.
  - Debido a restricciones en el aeropuerto de origen.
- En ruta:
  - Debido a limitaciones ATFM de capacidad o demanda de ATC.
  - Debido a limitaciones ATFM de equipos o controladores ATC.
- Gubernamentales:
  - Debido a seguridad e inmigración.
- Meteorológicos:
  - Condiciones meteorológicas en ruta.
  - Condiciones meteorológicas en aeropuerto de destino.

- Reaccionarios:
  - Debido a un retraso anterior, de aeronave, tripulación, pasajeros o carga.
- Misceláneos.

A la hora de analizar las razones de los retrasos de los datos de la Figura 3.1, se tiene que en términos de vuelos afectados, factores relacionados con ATC (restricciones en ruta o por capacidad de espacio aéreo, fallas equipos o personal insuficiente, restricciones de capacidad en destino, o atribuibles a una baja en la capacidad por condiciones meteorológicas) y capacidad aeroportuaria (como seguridad aeroportuaria, inmigración, aduanas, restricciones sanitarias, falta de infraestructura aeroportuaria como posiciones de estacionamiento, congestión en plataforma o resticciones operacionales tanto en aeropuerto de origen como de destino) corresponden a casi un 70 % del total de los retrasos. Por otro lado, el impacto que tienen estos retrasos en términos de minutos es considerablemente inferior (Figura 3.2).

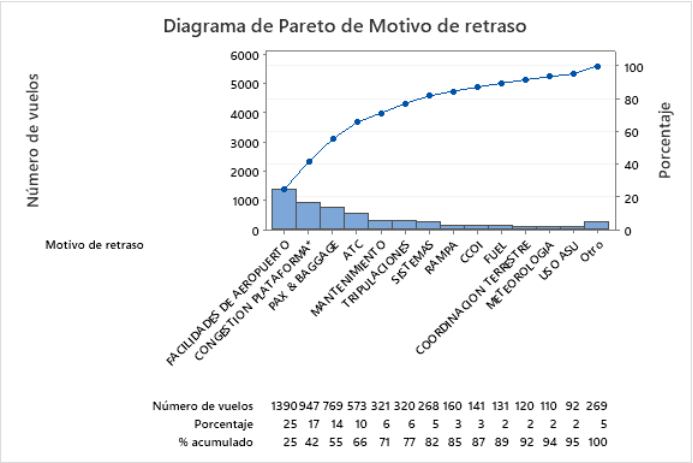


Figura 3.1: Vuelos afectados por causa del año 2019 (Sky Airline, 2020).

Con el fin de disminuir tanto los vuelos afectados como la cantidad de minutos de retraso concepto de ATC y por razones de capacidad en aeropuertos, surge la necesidad de ir en búsqueda de metodologías que permitan organizar la afuencia y evitar excesos de demanda. De esta manera, el planteamiento del modelo de SAGHP basado en generar esperas en tierra en el aeropuerto de origen hasta que haya capacidad suficiente para recibir ese vuelo en el aeropuerto de llegada resulta viable para ser aplicado en Chile. Justamente

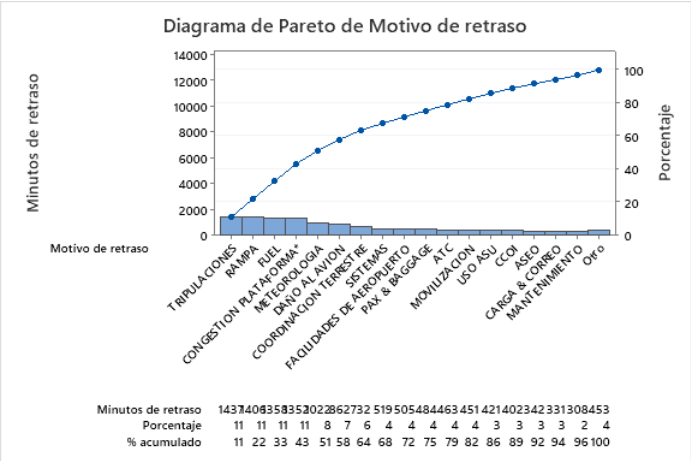


Figura 3.2: Minutos de retraso por causa del año 2019 (Sky Airline, 2020).

esta es la principal limitante del modelo, ya que dentro de su jurisdicción, el aeropuerto tiene mayor poder sobre los vuelo salientes que los entrantes. El modelo de MAGHP integra toda una red de aeropuertos para coordinar despegues y aterrizajes, con el beneficio además de considerar e impacto que tiene el retraso de un vuelo sobre otro.

Con un enfoque en disminuir los costos e integrando salidas y llegadas, se propone un modelo que asigne horarios de operación de manera equilibrada, evitando que hayan más de 2 itinerarios al mismo tiempo y que en ningún intervalo horario se supere la capacidad declarada, definiendo además un márgen para vuelos militares, emergencia y privados.

3.1. Modelo

El presente modelo busca ser implementado desde un punto de vista de la planificación operacional pre-táctica (ver Figura 2.3) de un aeropuerto. Al momento en que las aerolíneas presenten sus itinerarios para aprobación por parte de la autoridad aeronáutica, estos deben ser revisados con el fin de identificar eventuales momentos en que supere la capacidad del aeropuerto. De esta manera, es razonable que de existir estas alzas, se propongan nuevas horas de operación para los vuelos más económicos de mover y que tengan un menor impacto en la operación y planificación de las aerolíneas (o que este impacto sea de más sencilla solución). Algunas teorías realizan la reasignación de vuelos según criterios basados en el orden de llegada (*"first call, first served"*) o según los horarios de los itinerarios (*"first*

schedule, first served"), realizando simplificaciones sobre los tipos de vuelos que se abarcan en el problema según tiempo de vuelo. El presente modelo se basa en el criterio del menor *cost index*, a explicar a continuación.

Si bien en la Justificación se identificaron los máximos por hora de operaciones por los días del 2019 (ver Figura 1.2), estos consideran la cantidad de operaciones por horas fijas, dígase, por ejemplo, entre las 12:00 y las 12:59. De esta manera, no considera la distribución que estos tengan dentro de esa hora, ya que gran parte de estos vuelos pueden estar programados para operar en una ventana de tiempo más acotada durante esos 60 minutos. Esto hace que si bien hayan segmentos horarios que de manera individual no presenten un exceso de demanda, eventualmente esta demanda sea mayor en un intervalo continuo de 60 minutos distinto al considerado bajo el criterio de hora fija. En el Apéndice F se muestra un ejemplo real del escenario anterior.

Con el fin de lograr una mayor cobertura de la restricción de capacidad impuesta por la autoridad aeronáutica, este modelo considera dentro de su evaluación que esta no debe ser superada en ninguna hora móvil. En caso de superarse la capacidad del aeropuerto, el modelo evalúa qué vuelo es más económico de mover fuera de esta hora móvil en evaluación, utilizando el factor entre el *cost index* de cada vuelo y la cantidad de minutos que haya que desplazar el vuelo para que no sea considerado en la hora móvil en evaluación.

3.1.1. Supuestos

Dentro de los supuestos a considerar en el modelo es que ambas pistas de AMB se encuentran operativas, y que la capacidad se mantiene constante durante todo el periodo de evaluación, definida en la Figura 1.1. Si bien ambas pistas se encuentran habilitadas para realizar operaciones de manera simultánea, en el modelo se considera que no puede haber más de un vuelo a la misma hora. En caso de haber dos o más vuelos con itinerarios simultáneos, se evalúa qué vuelo presenta el *cost index* mas bajo, y se le suma un minuto a su hora de operación. Este proceso se hace todas las veces que sea necesario hasta que cada vuelo tenga una hora distinta.

El programa no considera diferencias entre los itinerarios de llegada o salida, nacionales o internacionales, carga o comercial (u otro), si no que se enfoca en no superar la capacidad

declarada de acuerdo del criterio señalado. Con el fin de lograr un mejor uso de la infraestructura y con un mayor control de la proporción de aeronaves entrantes y salientes, estos escenarios se corren de manera independiente, pudiendo de esta forma, tener operaciones simultáneas en ambas pistas.

Las horas de operación consideradas en el itinerario se definen como EIBT y EOBT para llegadas y salidas respectivamente, y no se considera el tiempo de rodaje entre las posiciones de estacionamiento y los umbrales de pistas en uso. Al momento de implementar un sistema de gestión de itinerarios, estos tiempos deben ser medidos e incluídos para evitar largas esperas en los cabezales de pista o en la plataforma para poder tener acceso a un lugar de estacionamiento. La forma de operación del programa considera que todos los cambios se realizan sumando minutos a los itinerarios, no restando.

Se considera que el espacio aéreo tiene una capacidad ilimitada y que no se pueden realizar esperas en aire, cambios de ruta, ni redireccionar a aeropuertos alternativos. A diferencia de los modelos presentados anteriormente, que tienen un alcance de vuelos que estén en un margen horario inferior a 5 o 6 horas, este modelo considera la totalidad de los destinos cubiertos. Para lograr una mayor precisión a la hora de estimar las horas de despegue de vuelos que provengan de destinos muy lejanos, se sugiere considerar un promedio de duración de los vuelos que históricamente han cubierto esa ruta, y eventualmente desplazar ese tipo de vuelos a horarios con menor cantidad de operaciones.

El programa funciona bajo la relación entre un número de vuelo con su hora de operación. El mismo número de vuelo no puede estar más de una vez durante el mismo escenario de evaluación, aunque si pueden haber diferentes vuelos con la misma hora de operación como parte del itinerario de ingreso. Con el fin de evitar una duplicidad en números de vuelo, se recomienda hacer funcionar el programa funciona bajo la iteración de un día, entre las 00:00 y las 23:59 horas. De igual forma, se debe validar la base de datos (o itinerario de ingreso) de manera que cada número de vuelo tenga sólo un horario de operación para evitar que en el itinerario de salida exista una duplicidad entre los dos vuelos con distintos itinerarios.

Los *cost index* utilizados en el modelo se establecen de manera aleatoria basados en valores empíricos y basados en datos de TOGA projects (TOGA, 2018):

Tipo de vuelo	Comercial	Carga	Privado/Emergencia/Militar/Otro
Nacional	15-30	10-20	30-50
Internacional	20-60	20-70	20-70

Tabla 3.1: Cost index de referencia utilizados en el modelo [kg/min] (Elaboración propia, 2021).

3.1.2. Conjuntos

Los conjuntos que se manejan en el modelo son los siguientes:

T_{arr} = Conjunto de m periodos de tiempo disponibles para llegadas, definido en minutos.

T_{dep} = Conjunto de n periodos de tiempo disponibles para salidas, definido en minutos.

H_{arr} = Conjunto de p horas móviles en evaluación para los vuelos de llegadas.

H_{dep} = Conjunto de q horas móviles en evaluación para los vuelos de salidas.

F_{arr} = Conjunto de u vuelos de llegada.

F_{dep} = Conjunto de v vuelos de salida.

3.1.3. Parámetros

Al estar ambas pistas del aeropuerto operativas, la capacidad declarada del aeropuerto es de 20 operaciones de llegada y 20 operaciones de salida. Sin embargo, y con el fin de poder realizar una operación más robusta considerando vuelos militares, vuelos ambulancia, vuelos de aviación privada o cualquier otra operación no considerada originalmente, la capacidad a considerar es de 19 operaciones, tanto de llegada como de salida.

$c_{arr} = 19$

$c_{dep} = 19$

$x_u^{m,p}$ = Vuelo u operado en el tiempo m, en la hora móvil p, con $u \in F_{arr}$, con $p \in H_{arr}$, con $m \in T_{arr}$.

$x_v^{n,q}$ = Vuelo v operado en el tiempo n, en la hora móvil q, con $v \in F_{dep}$, con $q \in H_{dep}$, con $n \in T_{dep}$.

Los valores originales del *cost index* de cada vuelo están definidos para cada vuelo por

cada aerolínea. Estos, al principio del programa, deben ser normalizados para evitar alguna tendencia a la hora de mover o mantener un itinerario de un vuelo. La generación de estos valores se realiza de manera aleatoria por medio de la función `"aleatorio.entre"` de MS Excel.

c_u = *Cost index* del vuelo u, normalizado por aerolínea, con $u \in F_{arr}$.
c_v = *Cost index* del vuelo v, normalizado por aerolínea, con $v \in F_{dep}$.

Cuando el itinerario de un vuelo debe ser postergado producto de una demanda excesiva en cierta hora móvil, es importante que el costo de haber desplazado este vuelo sea considerado en futuras horas móviles con excesos de demanda. De esta forma, este vuelo no es postergado de manera excesiva y se limita a una o dos postergaciones de itinerario.

$cr_{u,p-1}$ = Costo de haber desplazado el vuelo u hasta la hora móvil $p-1$ de evaluación, con $u \in F_{arr}$, con $p \in H_{arr}$.
$cr_{v,q-1}$ = Costo de haber desplazado el vuelo v hasta la hora móvil $q-1$ de evaluación, con $v \in F_{dep}$, con $q \in H_{dep}$.
$cr_{u,0} = 0$
$cr_{v,0} = 0$

3.1.4. Variables

Las variables con las que se deben obtener las soluciones óptimas son la cantidad de minutos de retraso de cada vuelo.

$ret_{u,p}$ = Cantidad de minutos de retraso del vuelo u en la hora móvil p, con $ret_{u,p} >= 0, \forall u \in F_{arr}, \forall p \in H_{arr}$.
$ret_{v,q}$ = Cantidad de minutos de retraso del vuelo v en la hora móvil q, con $ret_{v,q} >= 0, \forall v \in F_{dep}, \forall q \in H_{dep}$.

3.1.5. Función objetivo

La función objetivo es minimizar el costo de desplazar los vuelos en las horas móviles que superen la capacidad del aeropuerto, considerando que estos vuelos pueden haber sido desplazados anteriormente, tanto en vuelos de llegada como de salida:

$$min \sum_{u \in F_{arr}} \sum_{v \in F_{dep}} c_u * ret_{u,p} + cr_{u,p-1} + c_v * ret_{v,q} + cr_{v,q-1}, \forall p \in H_{arr}, \forall q \in H_{dep}. \quad (16)$$

3.1.6. Restricciones

No se puede superar la capacidad del aeropuerto en ninguna hora móvil, definida a partir de la hora de operación de cada vuelo más 60 minutos.

$$\sum_{u \in F_{arr}} x_u^{m,p} \leq c_{arr}, \forall p \in H_{arr} \quad (17)$$

$$\sum_{v \in F_{dep}} x_v^{n,q} \leq c_{dep}, \forall q \in H_{dep} \quad (18)$$

No puede haber más de un vuelo que esté programado a la misma hora. Como la evaluación de las salidas y llegadas se hace de manera independiente y el aeropuerto tiene dos pistas, se asegura que hayan máximo dos operaciones al mismo tiempo.

$$\sum_{u \in F_{arr}} x_u^{m,p} \leq 1, \forall m \in T_{arr} \quad (19)$$

$$\sum_{v \in F_{dep}} x_v^{n,q} \leq 1, \forall n \in T_{dep} \quad (20)$$

3.2. Cálculo

A modo demostrativo se realiza una evaluación del lunes 14 de enero de 2019, día donde según lo mostrado en la Figura 1.2 se registra un máximo de 40 operaciones entre las 11:00 y 11:59 AM, siendo esta la capacidad declarada del aeropuerto donde se pueden alcanzar importantes niveles de congestión.

La distribución de los vuelos Figura 3.3 habla de horarios con tendencias de llegadas y salidas, donde se supera la capacidad definida de 19 operaciones de llegada y salida en 3 oportunidades. Existe un primer bloque entre las 05:00 y las 09:00 con una alta cantidad de salidas alcanzando en un momento la máxima capacidad de salidas del aeropuerto. La baja cantidad de llegadas se atribuye principalmente a vuelos internacionales provenientes de norteamérica y europa. Entre las 10:00 y las 15:00 se percibe un aumento en el número de llegadas, principalmente debido a vuelos nacionales que retornan a AMB luego de los primeros vuelos de la madrugada, y debido a los vuelos regionales cuyos despegues en aeropuertos de origen se realizan en las primeras horas de la mañana. Es en este bloque horario donde se percibe la mayor cantidad de operaciones y donde se alcanza la capacidad declarada del aeropuerto. Entre las 18:00 y las 20:00 se percibe un último peak de salidas, en su mayoría de vuelos domésticos. Finalmente, desde las 21:00 hasta las 23:59 se tiene un gran número de llegadas con vuelos de pernocte.

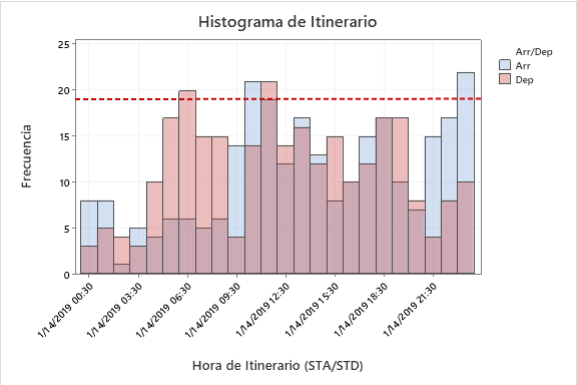


Figura 3.3: Distribución de STA/STD del lunes 14 de enero de 2019 (SCNP S.A., 2020).

Para explicar el cálculo y la deliberación que hace el programa para cambiar los itinerarios, se presenta en primera instancia la fórma de actuar frente a dos o más itinerarios con el mismo horario, y su interacción con los vuelos cercanos.

Desde un punto de vista de capacidad no pueden existir más de dos vuelos con misma hora de operación, ya que el aeropuerto solo tiene dos pistas. Desde un principio no se pueden asignar más de dos vuelos a la misma hora, ya que se parte de la base que alguno deberá retrasarse. En esta primera situación, el programa realiza una evaluación de los vuelos que se encuentren en conflicto, ordenándolos de mayor a menor *cost index*. De acuerdo con ese orden, el primero (el con mayor *cost index*) tiene una mayor urgencia en términos de tiempo (ver Ecuación 2). Así, al segundo será reasignado un minuto después, y así sucesivamente. Existe una condición en el programa que señala que mientras ambas condiciones anteriores (tanto por vuelos repetidos a la misma hora como que la cantidad de vuelos no supere la capacidad), esta iteración se continuará desarrollando.

Ingreso					
Vuelo	Cost Index	Hora Itinerario	Servicio	Dom/Int	Dep/Arr
H2120	17	14-01-2019 5:05	J	D	D
JA1001	35	14-01-2019 5:05	J	I	D
JJ8050	33	14-01-2019 5:05	J	I	A
LA142	20	14-01-2019 5:05	J	D	D

Salida					
Vuelo	Cost Index	Hora Itinerario	Servicio	Dom/Int	Dep/Arr
JJ8050	33	14-01-2019 5:05	J	I	A
JA1001	35	14-01-2019 5:05	J	I	D
LA142	20	14-01-2019 5:06	J	D	D
H2120	17	14-01-2019 5:07	J	D	D

Figura 3.4: Múltiples vuelos con misma hora de itinerario antes y después de modificación del programa (Elaboración propia, 2021).

En caso que un vuelo sea reubicado en una hora posterior a su itinerario original y esta nueva hora ya esté en uso por otro vuelo, nuevamente se hará la comparación según sus respectivos *cost index*, como se muestra en la Figura 3.5. En este caso puntual, como todos los vuelos del periodo de tiempo de esta figura solo son Salidas, no se acepta que haya más de un vuelo al mismo tiempo. Si eventualmente exisitiera un vuelo de llegada a las 05:50 (por poner un ejemplo), este puede mantenerse en la misma hora, ya que al correr los itinerarios de llegada y de salidas por separado se da la posibilidad que haya un aterriazaje y un despegue programado a la misma hora, no así dos despegues o dos aterrizajes.

Ingreso					
Vuelo	Cost Index	Hora Itinerario	Servicio	Dom/Int	Dep/Arr
CM112	50	14-01-2019 5:49	J	I	D
LA152	20	14-01-2019 5:49	J	D	D
H2170	19	14-01-2019 5:50	J	D	D
LU364	25	14-01-2019 5:50	J	D	D

Salida					
Vuelo	Cost Index	Hora Itinerario	Servicio	Dom/Int	Dep/Arr
CM112	50	14-01-2019 5:49	J	I	D
LU364	25	14-01-2019 5:50	J	D	D
LA152	20	14-01-2019 5:51	J	D	D
H2170	19	14-01-2019 5:52	J	D	D

Figura 3.5: Mútltiples vuelos en mismas horas de itinerario antes y después de modificación del programa (Elaboración propia, 2021).

Para explicar el cálculo realizado para identificar qué vuelos son desplazados y qué vuelos no a una hora móvil siguiente se presenta el análisis realizado para los vuelos arribados entre las 10:46 y 11:45 del día tipo. Al interior de este intervalo de tiempo, se tienen 23 vuelos, superando la capacidad definida de 19 llegadas por hora. De esta forma, se produce un exceso de 4 vuelos. Para determinar los vuelos que serán reprogramados, y cuanto tiempo después será este cambio, se comienza con el cálculo de minutos entre cada itinerario original y la hora de término de la hora móvil en evaluación. En este caso, la diferencia en minutos entre el itinerario de cada vuelo y las 11:45, como se muestra en la columna M1 de la Figura 3.6. En la columna M2 se tiene la cantidad de minutos en formato entero (no horas como en M1). Luego, se mutiplica el respectivo *cost index* por la cantidad de minutos de M2 para cada vuelo. De esta forma, queda un valor de costo expresado en [kg] (cuya unidad no es de mayor relevancia) de desplazar cada vuelo fuera de la hora móvil. Luego, estos valores (expresados en la columna CI*M2) son ordenados de menor a mayor, con un nivel de prioridad expresado en la columna P. En general, los vuelos que estén mas cercanos al término de la hora móvil tendrán un costo de retraso menor, expresado en un nivel de prioridad P menor (más cercano o igual a 1). Así, los vuelos que sean más económicos de desplazar fuera de esta hora móvil serán reubicados hasta que se tenga la cantidad de llegadas definidas en la capacidad.

Lo anterior se realiza de manera similar para las salidas, considerando los itinerarios entre las 10:45 y las 11:44 del mismo día. Al interior de este intervalo, se tienen 21 vuelos, por lo que para no superar la capacidad de 19 salidas es necesario desplazar los que presenten los dos índices P más bajos (1 y 2) de la Figura 3.7. Nuevamente, los vuelos con un menor índice P tienden a estar más cercanos al término de la hora móvil ya que deben ser movidos menos minutos para ser desplazados fuera de la hora móvil.

El programa realiza esta evaluación para cada uno de los vuelos ingresados, los que deben estar separados entre llegadas y salidas por motivos ya desarrollados. Para cada uno de los escenarios (llegadas y salidas), deben cumplirse tanto las restricciones de no existir dos itinerarios iguales como que no se supere la capacidad definida. Mientras alguna de estas restricciones no se esté cumpliendo, el programa continuará desarrollando los cálculos correspondientes. Cabe señalar que en caso que no se supere la capacidad definida,

el programa solo evaluará que no existan más de un itinerario a la misma hora. Finalmente, se debe consolidar un mismo archivo para tener el itinerario de llegadas y salidas final.

Vuelo	Cost Index	Hora Itinerario	Arr/Dep	M1	M2	CI*M2	P
LU202	27	14-01-2019 10:46	A	1:00:00	60	1620	22
LU230	21	14-01-2019 10:47	A	0:59:00	59	1239	18
JA87	27	14-01-2019 10:47	A	0:59:00	59	1593	21
H252	25	14-01-2019 10:50	A	0:56:00	56	1400	19
JA27	18	14-01-2019 10:53	A	0:53:00	53	954	15
LA185	15	14-01-2019 10:54	A	0:52:00	52	780	12
LA149	24	14-01-2019 10:57	A	0:49:00	49	1176	17
LU365	29	14-01-2019 10:57	A	0:49:00	49	1421	20
H272	15	14-01-2019 11:00	A	0:46:00	46	690	9
LA121	15	14-01-2019 11:01	A	0:45:00	45	675	8
KL701	59	14-01-2019 11:05	A	0:41:00	41	2419	23
H2171	29	14-01-2019 11:10	A	0:36:00	36	1044	16
LU315	18	14-01-2019 11:12	A	0:34:00	34	612	4
LU371	20	14-01-2019 11:14	A	0:32:00	32	640	6
PZ1324	25	14-01-2019 11:15	A	0:31:00	31	775	11
LU256	22	14-01-2019 11:16	A	0:30:00	30	660	7
LU343	28	14-01-2019 11:17	A	0:29:00	29	812	14
H2123	24	14-01-2019 11:20	A	0:26:00	26	624	5
LA865	40	14-01-2019 11:28	A	0:18:00	18	720	10
LA475	52	14-01-2019 11:30	A	0:16:00	16	832	13
LA131	24	14-01-2019 11:31	A	0:15:00	15	360	3
LA153	17	14-01-2019 11:35	A	0:11:00	11	187	2
LA6	16	14-01-2019 11:39	A	0:07:00	7	112	1

Figura 3.6: Itinerarios de llegada entre las 10:46 y las 11:45 del día tipo (Elaboración propia, 2021).

Vuelo	Cost Index	Hora Itinerario	Arr/Dep	M1	M2	CI*M2	P
H217	24	14-01-2019 10:45	D	1:00:00	60	1440	18
LA37	25	14-01-2019 10:51	D	0:54:00	54	1350	17
JA1042	31	14-01-2019 10:55	D	0:50:00	50	1550	19
AR1281	44	14-01-2019 10:55	D	0:50:00	50	2200	21
O11300	20	14-01-2019 11:00	D	0:45:00	45	900	14
H2150	25	14-01-2019 11:00	D	0:45:00	45	1125	16
LA122	29	14-01-2019 11:08	D	0:37:00	37	1073	15
LA1	20	14-01-2019 11:10	D	0:35:00	35	700	11
JA52	29	14-01-2019 11:15	D	0:30:00	30	870	13
LA640	57	14-01-2019 11:15	D	0:30:00	30	1710	20
JA151	26	14-01-2019 11:22	D	0:23:00	23	598	10
JJ8027	43	14-01-2019 11:25	D	0:20:00	20	860	12
LA79	26	14-01-2019 11:26	D	0:19:00	19	494	9
JA143	17	14-01-2019 11:28	D	0:17:00	17	289	6
LU302	16	14-01-2019 11:29	D	0:16:00	16	256	5
LU293	30	14-01-2019 11:29	D	0:16:00	16	480	8
H2104	22	14-01-2019 11:30	D	0:15:00	15	330	7
H2112	24	14-01-2019 11:40	D	0:05:00	5	120	4
LA57	25	14-01-2019 11:43	D	0:02:00	2	50	3
LU324	24	14-01-2019 11:44	D	0:01:00	1	24	1
LA31	25	14-01-2019 11:44	D	0:01:00	1	25	2

Figura 3.7: Itinerarios de salida entre las 10:45 y las 11:44 del día tipo (Elaboración propia, 2020).

3.3. Resultados

Durante el día tipo se evalúa un total de 536 vuelos operados originalmente entre las 00:20 y las 23:59 horas. Se evalúa un total de 264 (49,25 %) llegadas, y 272 (50,75 %) salidas. 378 vuelos no sufrieron modificaciones en su itinerario, mientras que 158 vuelos tuvieron modificaciones desde 1 minuto hasta 66 minutos, máximo registrado durante la hora móvil a partir de las 11:01 horas.

Un total de 126 vuelos (79,75 % de los vuelos que sufrieron modificaciones) tuvieron cambios en sus itinerarios inferiores a 10 minutos, atribuibles en gran medida a itinerarios duplicados en su misma categoría (duplicados en llegadas o en salidas). 154 de los 158 vuelos que tuvieron modificaciones corresponden a vuelos comerciales de pasajeros. Los 4 restantes corresponden a operaciones de carga. Esto es esperable debido a los valores de la Tabla 3.1, le dan una mayor relevancia al ahorro de combustible en operaciones de pasajeros expresado en *cost index* más bajos, y principalmente porque las aeronaves de carga tienden a ser de mayor categoría, consumiendo más combustible y siendo más caros de modificar su itinerario.

Los vuelos que presentan una diferencia de más de 20 minutos con respecto a su itinerario propuesto se encuentran entre las 06:30 y 06:31 (4 vuelos, con una diferencia entre 20 y 31 minutos), entre las 11:00 y las 12:01 (6 vuelos, con una diferencia entre 22 y 66 minutos) y entre las 23:16 y las 23:30 (7 vuelos, con una diferencia entre 20 y 44 minutos), horarios que coinciden con los máximos identificados en la Figura 3.3. La totalidad de estos vuelos son domésticos, ya que son los que se definen con un *cost index* menor por el tipo de aeronave utilizado (familia A320) debido al nivel de relevancia que tiene el costo del combustible frente al costo relativo del tiempo. Cabe señalar que a nivel táctico, estas modificaciones al itinerario pueden modificarse en caso de existir un slot de oportunidad en caso que un operador pierda o decida no utilizar su itinerario autorizado.

La distribución final de los vuelos (ver Figura 3.8) muestra que en ninguna hora fija se supera la capacidad definida de 19 operaciones para salidas y para llegadas. Analizando con mayor profundidad los periodos altamente demandados identificados en el párrafo anterior (ver Apéndice F para evaluación detallada de hora móvil entre las 10:45 y 11:44) tampoco se detectan alzas a la condición de capacidad definida, pudiendo así asegurar **a**

nivel pre-táctico que no existirá un periodo donde el aeropuerto no supere su capacidad declarada. Además, con el fin de establecer mayores garantías en el cumplimiento de los itinerarios a nivel aeropuerto y ATC, se disponde de flexibilidad de una operación de llegada y una operación de salida adicionales a las consideradas para utilizar en caso de ser necesario. Cabe señalar que esta condición de reserva de dos operaciones se realiza solo en condiciones en que se prevea que el aeropuerto estará en condiciones de alta demanda.

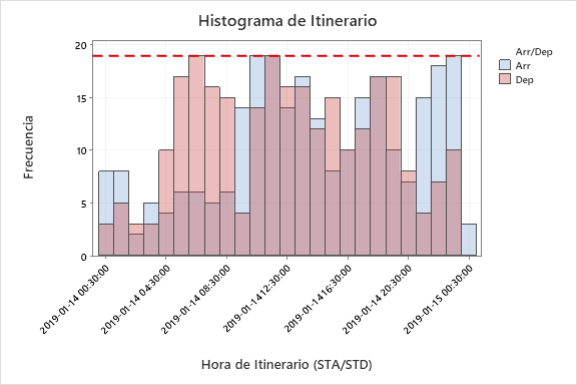


Figura 3.8: Distribución de nuevas STA/STD del lunes 14 de enero de 2019, bajo parámetros ingresados al 80 % de la capacidad declarada (Elaboración propia, 2021).

4. Beneficios

La implementación de un modelo de gestión de itinerarios para AMB trea consigo una serie de beneficios, tanto para las aerolíneas, los servicios de *ground handling*, el servicio de ATC, el mismo aeropuerto y por supuesto, los pasajeros.

A nivel de aerolíneas es donde más se exige. El mayor cumplimiento de los itinerarios, sobre todo a nivel de cumplimiento de las EOBT (ver Apéndice E), donde se llega a tener una diferencia de más de 21 minutos en promedio entre la ATD con respecto a la STD, es parte fundamental del funcionamiento de la reglamentación, sobre todo considerando que los vuelos tienen una ventana de tiempo entre 5 minutos antes y 10 minutos después de la EOBT, de otra forma se pierde el slot asignado en los aeródromos coordinados. Los principales beneficios para las aerolíneas corresponden a ahorros de combustible, que corresponden al 25-30 % de los costos operativos de las aerolíneas, ya que se disminuyen los tiempos de espera tanto en tierra como en aire.

La implementación de sistemas de optimización basados en itinerarios flexibles (puntualmente del A-CDM) en el Aeropuerto Barajas de Madrid (AENA, 2020) redujo en 2,77 minutos los tiempos de rodaje durante el año 2019, ahorrando 77.885.828 litros de combustible. El promedio de espera en la posición de estacionamiento fue de 1,33 minutos, ahorrando durante todo el año 1.535.157 minutos, lo que se traduce en ahorros de €118.207.152 en costos indirectos. En términos de beneficios al medio ambiente, se ahorraron 194.013.629 [kg] en emisiones de CO_2, 288.618 [kg] en emisiones de NO_X, 1.385.936 [kg] en emisiones de CO y 48.102 [kg] de SO_X. A nivel operativo, se redujo el cambio a último minuto de las posiciones de estacionamiento (permitiendo una mejor planificación para los equipos de *ground handling*) y se realizan importantes mejoras en las optimizaciones de los puentes de embarque, permitiendo menores tiempos de conexión para los pasajeros.

Como se muestra en la Figura 3.1 y 3.2, una implementación a nivel estratégico y pre-táctico de un sistema de gestión de itinerarios disminuiría el impacto que tendría en la cantidad de vuelos retrasados, junto con la cantidad de minutos que conllevan estos retrasos asociados a la capacidad aeroportuaria y ATC.

Aumentando los niveles de puntualidad, el sistema en su totalidad presenta una mayor

predictiblidad. Esto genera que, por ejemplo, las empresas de *ground handling* puedan generar mayores eficiencias con sus equipos, y no presenten periodos de tiempo donde se vean sobre-exigidos por un exceso de demanda, mientras que en otros periodos presenten un exceso de equipos en desuso. La propia concesionaria del aeropuerto puede generar mejores predicciones de flujos de pasajeros al interior del terminal, pudiendo así los locales comerciales generar mayores beneficios para los usuarios dependiendo de sus necesidades, adaptando su infraestructura y disposición de personal de manera de disminuir los tiempos de espera para los pasajeros.

Garantizando escenarios en donde no se supere la capacidad, aumenta la seguridad del sistema ATM, ya que los controladores de tráfico aéreo no se sobre-exigen más allá de sus capacidades, minimizando incidentes en relación al estrés.

Cabe señalar que el constante cumplimiento de los protocolos propios de la CDM es fundamental para la correcta implementación y aplicación de estas medidas de gestión. Sin el compartir la información de los itinerarios, junto con los *cost index* predefinidos para cada vuelo y una constante retroalimentación del comportamiento del sistema y del cumplimiento de los itinerarios por parte de las aerolíneas, la organización a nivel pre-táctica no resulta de utilidad.

5. Conclusiones

El principal terminal aéreo nacional ha tenido desde el año 2012 un nivel de crecimiento promedio anual de 3,9 % en el número de operaciones y de hasta un 10 % en el número de pasajeros, y durante el año 2019 alcanzó al menos en 3 oportunidades su nivel máximo de operaciones.

Durante la primera parte del trabajo se realiza una descripción de la CDM a nivel del espacio aéreo por medio de la aplicación de la ATFM y se describe su impacto y relación con la A-CDM, para luego pasar a explicar cómo se desarrolla actualmente la gestión de los itinerarios y la afluencia del tráfico aéreo en Chile.

Si bien la DGAC cuenta con un equipo responsable de la gestión de flujo del tránsito aéreo a nivel nacional, resulta preocupante el hecho que a 11 años de comenzada su Etapa Inicial, el sistema se mantenga en su Etapa Básica y no haya escalado a etapas superiores de su implementación, sobre todo considerando los niveles de crecimiento. Si bien es producto de la situación santiaria vivida desde marzo de 2020, es rescatable el desarrollo de nuevos procedimientos de coordinación para evitar aglomeraciones, aunque se vea desde el punto de restricción de la capacidad más que por exceso de demanda.

Por su rol comparativo y ponderador entre el costo relativo del tiempo y los costos operativos de las aerolíneas para cada ruta y modelo de avión, el *cost index* resulta una forma diferente de priorizar vuelos en situaciones de alta demanda, pero al ser indicadores atribuibles directamente a la estructura de costos de cada aerolínea, se debe realizar en el marco de una toma de decisiones en colaboración, con reglas claras y predefinidas tanto en su implementación como en su incumplimiento.

Se mencionan las teórías de SAGHP y MAGHP que delimitan de manera precisa la diferencia entre definir la importancia y peso de un solo aeropuerto en una red y de la interdependencia e interrelación con múltiples aeropuertos. Si bien los alcances son discutibles y son parte de las propias limitantes de los modelos para darle solución al problema de equilibrio entre la capacidad y la demanda, resulta interesante hacer la evaluación de un término medio entre ambas teorías.

A la hora de profundizar en las razones de los retrasos, llama la atención que 3 de los 4

principales fuentes de retrasos del segudo mayor operador del aeropuerto tengan que ver con las instalaciones del aeropuerto, congestión en plataforma o relacionados al ATC. Estos retrasos se buscan minimizar con la implementación de un sistema que gestione de manera pre-táctica los itinerarios asegurando por parte del aeropuerto y del ATC disponibilidad de capacidad.

Finalmente, los resultados muestran un aplanamiento de la curva y asegura a nivel pre-táctico que en ninguna hora móvil se producirán aumentos de demanda, haciendo más eficiente la actividad para todos los actores involucrados. En la última parte del trabajo se señalan beneficios cuantitativos y cualitativos con respecto a la implementación de un sistema de gestión de itinerarios basado en controlar y anteponerse a los excesos de demanda.

A modo personal, considero que la presente es una forma integral de dar término al pregrado universitario. Contenidos de asignaturas tan variadas como Programación, Gestión de Investigación de Operaciones, Gestión y Operación de Aeropuertos, Gestión Estratégica, Gestión del Espacio Aéreo, entre muchas otras, fueron fundamentales para la correcta comprensión de la teoría, e inspiraron el desarrollo del modelo.

Referencias

AENA (2020). A-cdm adolfo suárez madrid-barajas international airport. ACI-ALC Webinar.

Agustín, A., Alonso-Ayuso, A., Escudero, L. F., Pizarro, C., et al. (2010). Mathematical optimization models for air traffic flow management: A review.

Airbus (1998). Getting to grips with cost index. *Airbus Customer Service*, Issue II.

Bertsimas, D. and Stock, S. (1998). The multi airport flow management problem with en route capacities. *Operations Research*, 46(3):406–422.

Dell'Olmo, P. and Lulli, G. (2003). A dynamic programming approach for the airport capacity allocation problem. *IMA Journal of Management Mathematics*, 14(3):235–249.

DGAC (2020). *AIP - Chile*, volume 1. 03 Diciembre.

DGAC (2021). *AIC NR 04 Declara Ap/Ad coordinados y procedimiento de operación en los Ap/Ad producto de regulaciones sanitarias por pandemia de Covid-19*, volume 1. 05 Febrero.

Hoffman, R. and Ball, M. O. (2000). A comparison of formulations for the single-airport ground-holding problem with banking constraints. *Operations Research*, 48(4):578–590.

IATA (2015). Directrices mundiales de slots. *Asociación del transporte aéreo internacional*, 7a edicion.

Latam (2020). Latam airlines: Memoria integrada 2019. `http://www.latamairlinesgroup.net/static-files/b90aa28c-2a25-4c4f-b467-cf790795908d`.

Malabrán, H. (2015). Valoración sky airline s.a. `http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/145601`.

OACI (2016). Doc. 9750: Plan mundial de navegación aérea 2016-2030. *Organización de Aviación Civil Internacional*, 5a edicion.

OACI (2018). Doc. 9971: Manual de gestión colaborativa de la afluencia del tránsito aéreo (atfm). *Organización de Aviación Civil Internacional*, 3a edicion.

TOGA (2018). Cost index database. `http://a320.nexgate.ch/PDF/Cost%20Index%20Database.pdf`.

UK Civil Aviation Authority (2020). Terminal and transit passengers 2019, table 9. Technical report, UK Civil Aviation Authority.

Vranas, P. B., Bertsimas, D. J., and Odoni, A. R. (1994). The multi-airport ground-holding problem in air traffic control. *Operations Research*, 42(2):249–261.

A. Cantidad de operaciones en los principales aeropuertos del país

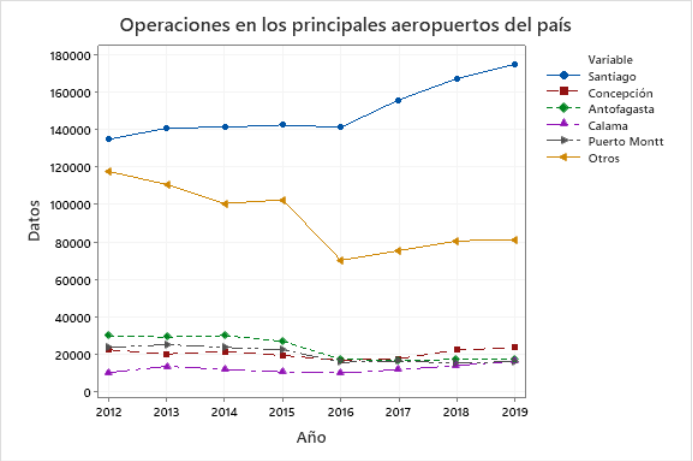


Figura A.1: Evolución de total de operaciones de los principales aeródromos del país (JAC, 2020).

B. Cantidad de pasajeros nacionales e internacionales en Chile

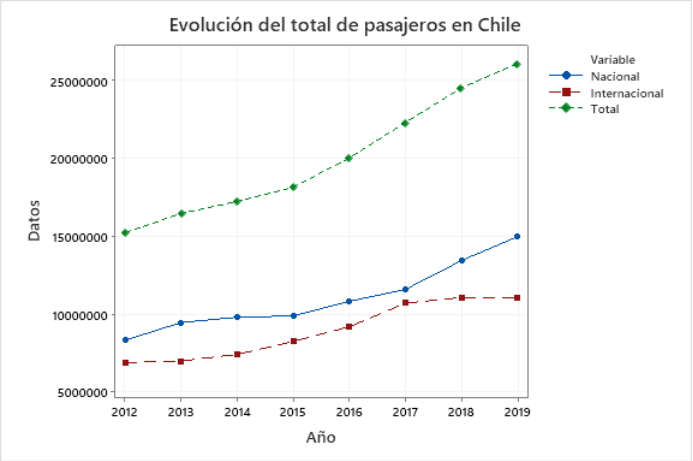


Figura B.1: Evolución de total de pasajeros nacionales e internacionales en Chile (JAC, 2020).

C. Diagrama de flujo de módulos ASBU

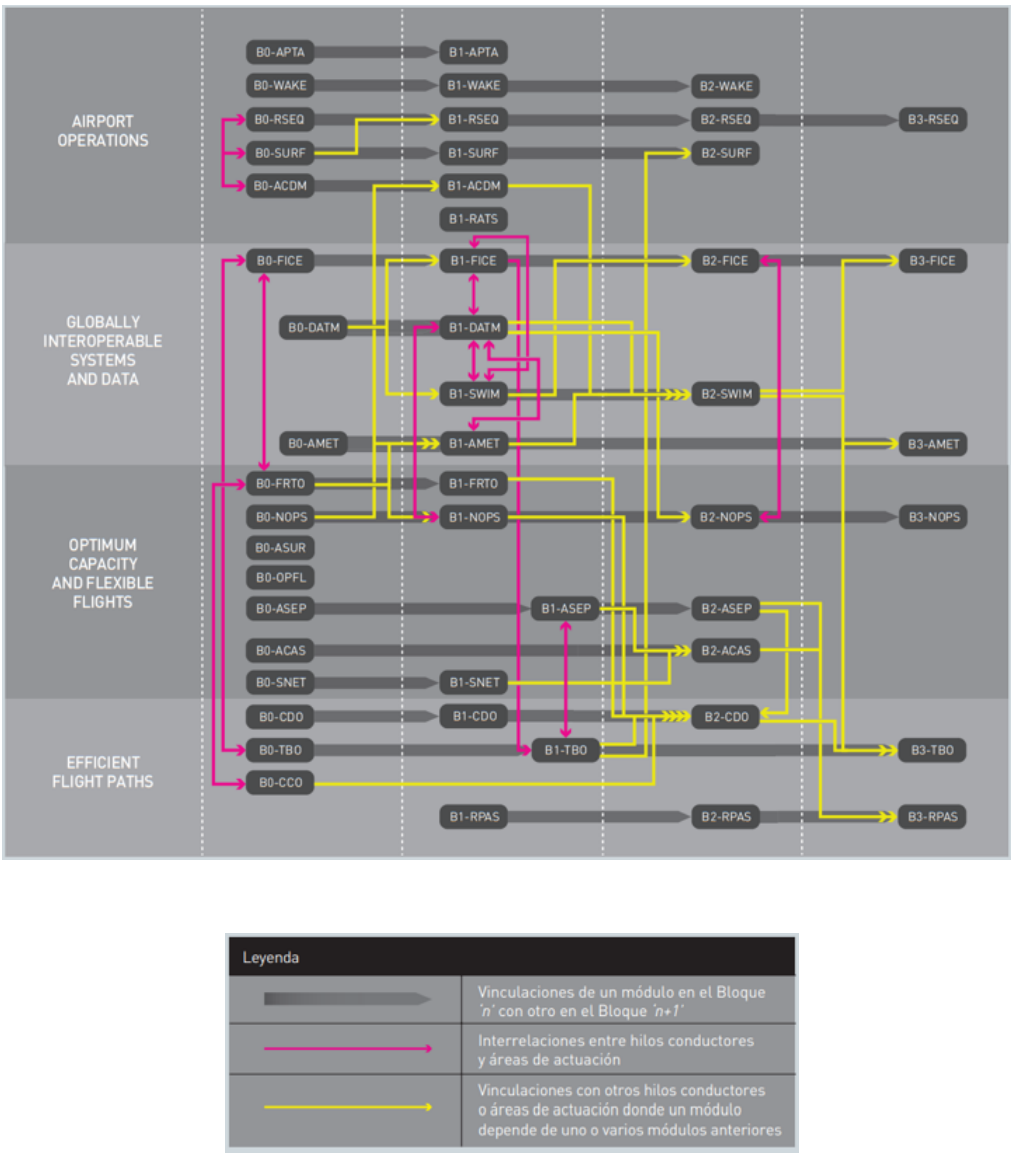


Figura C.1: Los módulos ASBU convergen con el tiempo hacia los conceptos operacionales y las mejoras de rendimiento previstos (OACI, 2016).

D. Formato de envío de itinerario mensual a DGAC (ad. coordinados)

Fecha Inicio lun, 01/02 — Registros a procesar: 8 Vuelos.
Fecha Fin lun, 01/03 — Registros que no se procesan: 3 Vuelos.
Registros Totales: 11 Vuelos.
Registros con advertencias: 5 Vuelos.

PROPUESTAS DE VUELOS [Compañia_Aérea]

FECHA	VUELO	DEP AD.	Salida Itinerario (EOBT)	ARR AD.	Llegada Itinerario (EIBT)	TIPO VUELO	Matrícula	OBSERVACIÓN
lun, 01/02	DGA0001	SCEL	9:00	SCAR	11:40	PASAJEROS	CCABC	PASAJEROS
lun, 01/02	DGA0002	SCCI	19:49	SCNT	21:30	PASAJEROS	CC	CARGA/PAX
mar, 02/02	DGA0003	SCEL	21:57	SCCF	0:04	PASAJEROS	CCBCD	CHARTER
mié, 03/02	DGA	SCEL	18:45	SCCF	20:52	PASAJEROS	CC	PASAJEROS
jue, 04/02	DGA	SCEL	12:40	SCCF	16:03	PASAJEROS	CC	CARGA
sáb, 06/02	DGA	SCEL	22:13	SCCF	0:36	PASAJEROS	CC	PASAJEROS
dom, 07/02	DGA	SCIE	11:56	SCCF	13:06	PASAJEROS	CC	PASAJEROS
jue, 11/02	DGA	SCQP	9:09	SCCF	11:16	PASAJEROS	CC	PASAJEROS
vie, 12/02	CIA0001	SCEL	13:25	SCCF	15:32	PASAJEROS	CC	PASAJEROS
sáb, 13/02	DGA	SCEL	15:33	SCTE	17:40	PASAJEROS	CC	PASAJEROS
mar, 02/03	DGA0001	SCSE	13:10	SCEL	14:05	PASAJEROS	CC	CARGA

Paso1-PropuestaVuelos · Programación Aprobada · SCQP

Figura D.1: Formato de envío de itinerario mensual a DGAC, bajo procedimiento de aeródromo coordinado por Covid-19 (DGAC, 2021).

E. Niveles de puntualidad en llegadas y salidas en AMB

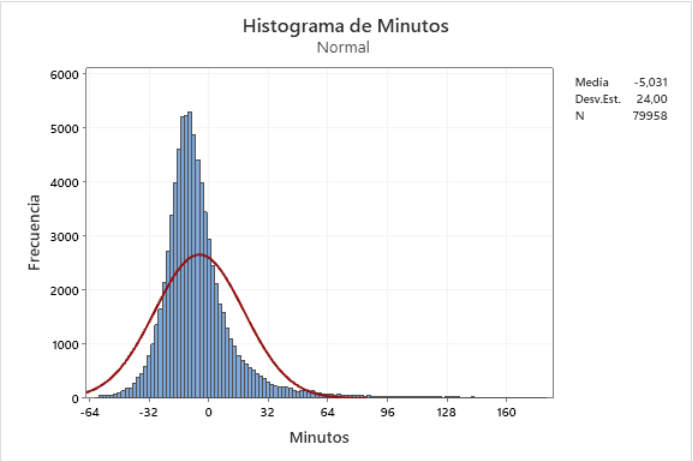


Figura E.1: Minutos de diferencia entre ATA c/r STA (SCNP S.A., 2020).

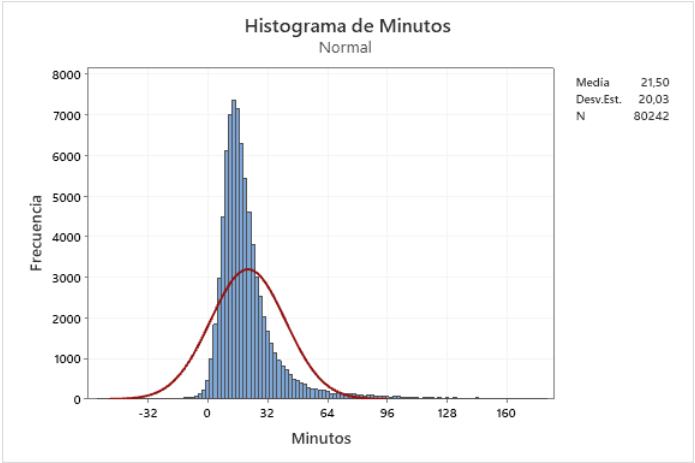


Figura E.2: Minutos de diferencia entre ATD c/r STD (SCNP S.A., 2020).

F. Evaluación de capacidad durante hora móvil

En el itinerario del lunes 14 de enero de 2019, entre las 10:00 y 10:59 se tienen programados 35 vuelos, y entre las 11:00 y 11:59 se tienen programados 40 vuelos. Bajo esta evaluación, se alcanza la capacidad declarada del aeropuerto, sin superar esta última. Sin embargo, si se considera el intervalo entre las 10:45 y las 11:44, la cantidad de operaciones asciende a 44, superándose la capacidad declarada del aeropuerto. A continuación se muestra el itinerario original (lado izquierdo) entre este útimo intervalo de tiempo, con los vuelos que presentan un conflicto y deben ser evaluados por duplicidad en rojo, los vuelos que deben ser evaluados por exceso de demanda en gris, el último vuelo figura en naranjo ya que no se considera al interior de la hora móvil pero entra en la evaluación de priorización. Los vuelos que están a la derecha son los que ya fueron evaluados por el modelo, estando en verde los que entraron a la evaluación y cuyo itinerario se cambió (o permaneció igual), en naranjo el primer vuelo que no se consideraba en la hora móvil en evaluación, y en azul los que no estaban dentro de la evaluación de la hora móvil (que pudieron haberse modificado o no, pero que no es relevante para la hora móvil en evaluación). Los vuelos que figuran con destacado amarillo son los que si bien están programados para la misma hora, uno corresponde a una salida y el otro a una llegada.

Ingreso			
Vuelo	Cost Index	Hora Itinerario	Arr/Dep
H217	24	14-01-2019 10:45	D
LU202	27	14-01-2019 10:46	A
JA87	27	14-01-2019 10:47	A
LU230	21	14-01-2019 10:47	A
H252	25	14-01-2019 10:50	A
LA37	25	14-01-2019 10:51	D
JA27	18	14-01-2019 10:53	A
LA185	15	14-01-2019 10:54	A
AR1281	44	14-01-2019 10:55	D
JA1042	31	14-01-2019 10:55	D
LA149	24	14-01-2019 10:57	A
LU365	29	14-01-2019 10:57	A
H2150	25	14-01-2019 11:00	D
O11300	20	14-01-2019 11:00	D
H272	15	14-01-2019 11:00	A
LA121	15	14-01-2019 11:01	A
KL701	59	14-01-2019 11:05	A
LA122	29	14-01-2019 11:08	D
LA1	20	14-01-2019 11:10	D
H2171	29	14-01-2019 11:10	A
LU315	18	14-01-2019 11:12	A
LU371	20	14-01-2019 11:14	A
JA52	29	14-01-2019 11:15	D
LA640	57	14-01-2019 11:15	D
PZ1324	25	14-01-2019 11:15	A
LU256	22	14-01-2019 11:16	A
LU343	28	14-01-2019 11:17	A
H2123	24	14-01-2019 11:20	A
JA151	26	14-01-2019 11:22	D
JJ8027	43	14-01-2019 11:25	D
LA79	26	14-01-2019 11:26	D
JA143	17	14-01-2019 11:28	D
LA865	40	14-01-2019 11:28	A
LU293	30	14-01-2019 11:29	D
LU302	16	14-01-2019 11:29	D
H2104	22	14-01-2019 11:30	D
LA475	52	14-01-2019 11:30	A
LA131	24	14-01-2019 11:31	A
LA153	17	14-01-2019 11:35	A
LA6	16	14-01-2019 11:39	A
H2112	24	14-01-2019 11:40	D
LA57	25	14-01-2019 11:43	D
LA31	25	14-01-2019 11:44	D
LU324	24	14-01-2019 11:44	D
UC1102	56	14-01-2019 11:45	D

Salida			
Vuelo	Cost Index	Hora itinerario	Arr/Dep
H217	24	14-01-2019 10:45	D
LU202	27	14-01-2019 10:46	A
JA87	27	14-01-2019 10:47	A
LU230	21	14-01-2019 10:48	A
H252	25	14-01-2019 10:50	A
LA37	25	14-01-2019 10:51	D
JA27	18	14-01-2019 10:53	A
AR1281	44	14-01-2019 10:55	D
JA1042	31	14-01-2019 10:56	D
LU365	29	14-01-2019 10:57	A
H2150	25	14-01-2019 11:00	D
O11300	20	14-01-2019 11:01	D
LA149	24	14-01-2019 11:02	A
KL701	59	14-01-2019 11:06	A
LA185	15	14-01-2019 11:07	A
LA122	29	14-01-2019 11:08	D
H2171	29	14-01-2019 11:10	A
LA1	20	14-01-2019 11:10	D
PZ1324	25	14-01-2019 11:15	A
LA640	57	14-01-2019 11:15	D
JA52	29	14-01-2019 11:16	D
H2123	24	14-01-2019 11:20	A
LU371	20	14-01-2019 11:21	A
LU343	28	14-01-2019 11:22	A
JA151	26	14-01-2019 11:22	D
LU256	22	14-01-2019 11:23	A
JJ8027	43	14-01-2019 11:25	D
LA79	26	14-01-2019 11:26	D
LA865	40	14-01-2019 11:28	A
JA143	17	14-01-2019 11:28	D
LU293	30	14-01-2019 11:29	D
H2104	22	14-01-2019 11:30	D
LA475	52	14-01-2019 11:31	A
LU302	16	14-01-2019 11:31	D
LA131	24	14-01-2019 11:32	A
LA153	17	14-01-2019 11:36	A
H2112	24	14-01-2019 11:40	D
LA57	25	14-01-2019 11:43	D
UC1102	56	14-01-2019 11:46	D
LA167	25	14-01-2019 11:47	A
JA336	27	14-01-2019 11:48	A
JA125	29	14-01-2019 11:49	A
LU315	18	14-01-2019 11:51	A
LA752	43	14-01-2019 11:52	D
H272	15	14-01-2019 11:54	A
LU324	24	14-01-2019 11:56	D
LA31	25	14-01-2019 11:57	D
LA147	27	14-01-2019 11:58	A
H223	26	14-01-2019 12:01	D
LA6	16	14-01-2019 12:03	A
CM118	27	14-01-2019 12:03	D
LA121	15	14-01-2019 12:07	A

Figura F.1: Extracto del resultado del proceso de gestión de itinerarios de AMB (Elaboración propia, 2021).