



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID ESCUELA DE
INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Organización Industrial

TITULO

COORDINACIÓN DE FRANJAS HORARIAS EN
VARIOS AEROPUERTOS

Autora:

Coco Alberto, Isabel María

Tutor:

Araúzo Araúzo, José Alberto

Departamento de Organización de Empresas y CIM

Valladolid, Enero 2020

Índice

CAPÍTULO 1: Introducción	10
1.1 Antecedentes.....	11
1.1.1. Evolución internacional del transporte aéreo.....	12
1.1.2. Evolución en Europa del transporte aéreo y su coordinación.	13
1.1.3. Evolución en España del transporte aéreo y su coordinación.	14
1.2 Objetivos.....	16
1.3. Contenido del documento.....	17
CAPÍTULO 2: Descripción del problema, normativa y planes de navegación.	19
2.3 Conceptos básicos.....	20
2.4 Situación actual tráfico aéreo	22
2.5 Directrices mundiales de slots	24
2.5.1. Stakeholders en un aeropuerto Coordinado.....	25
2.5.2. Designación del nivel de un aeropuerto	25
2.5.3 Principios clave para la coordinación de aeropuertos.	26
2.5.4. Gestión de la capacidad y la demanda	28
2.6 Plan mundial de navegación aérea 2016/2030	29
2.6.1. Metodología de mejoras por bloques del sistema de aviación.....	31
2.7. Plan Europeo (SESAR).	34
2.7.1. Origen	34
2.7.2. SESAR	35
2.8. Normativa asignación slot	38
2.8.1. Normativa común Europea	38

Índice: Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos

2.8.2 Normativa complementaria española	40
2.9. Factores para determinar la capacidad de las Terminales, pistas y plataformas de un aeropuerto.....	40
2.10. Conclusión	46
CAPÍTULO 3: Tipos de subastas y Subastas Combinatorias.....	47
3.1. Introducción.....	48
3.2. Definición de subasta	48
3.3. Tipos de subasta	48
3.4. Definición y tipos de subastas combinatorias	50
3.5. Subastas Combinatorias para la asignación de franjas horarias en aeropuertos coordinados.	52
CAPÍTULO 4: Redes de aeropuertos	53
4.1. Relevancia de la coordinación entre aeropuertos.	55
4.2. Regulaciones de ATFM (gestión del flujo de tráfico aéreo).	55
CAPÍTULO 5: Descripción del modelo.....	57
5.1. Modelo de Simulación.....	58
5.2. Parámetros generales.....	60
5.3. Parámetros de los vuelos.	60
5.4. Parámetros sobre el aeropuerto.	61
5.5. Variables del problema.....	62
5.6. Función objetivo.	63
5.7. Restricciones.....	63
5.7.1. Restricciones de Capacidad.	64
5.7.2. Modelo Completo.....	65

CAPÍTULO 6: Resultados de los experimentos.	67
6.1. Caso 1: Dos aeropuertos.....	69
6.2. Caso 2: Dos aeropuertos.....	72
6.3. Caso 3: Dos aeropuertos.....	78
6.3. Caso 4: Cuatro aeropuertos.....	83
6.4. Conclusión.	93
CAPÍTULO 7: Conclusiones y Futuros trabajos.	95
CAPÍTULO 8: Bibliografía	97

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Avión de la Primera Guerra Mundial (Wikipedia).	12
Ilustración 2: Aeródromos por países Unión Europea (Europea U. , European Union Aviation Safety Agency).....	14
Ilustración 3: Primeros vuelos comerciales en España. (Fomento M. d., Fomento, aviación civil).	15
Ilustración 4: Mapa de Aeropuertos Coordinados y con Horarios Facilitados en 2010. Fuente: (AECFA, 2019).....	22
Ilustración 5: Crecimiento del tráfico internacional de pasajeros (RPK) en 2018. Fuente: (ICAO, 2019).....	24
Ilustración 6: Desarrollo de la afluencia de tránsito aéreo en 2010. Fuente (ICAO, 2019).....	29
Ilustración 7: Previsión del desarrollo de la afluencia de tránsito aéreo en 2020. Fuente (ICAO, 2019).....	30
Ilustración 8: Previsión del desarrollo de la afluencia de tránsito aéreo en 2030. Fuente (ICAO, 2019).....	30

Índice: Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos

Ilustración 9: Leyenda Previsiones del desarrollo de la afluencia de tránsito aéreo. Fuente (ICAO, 2019).	30
Ilustración 10: Mejoras por bloques. Fuente (Doc 9750-AN/963 Quinta edición – 2016).	31
Ilustración 11: Módulos ABSU. Fuente (Doc 9750-AN/963 Quinta edición – 2016).....	32
Ilustración 12: Definición, desarrollo y aplicación SESAR. Fuente (2019, https://ec.europa.eu/transport).	34
Ilustración 13: Mapa aeropuertos Coordinados y con Horarios facilitados (Aena 2019).	40
Ilustración 14: Configuración Pistas aeródromo. (ICAO, Organización de aviación civil internacional).....	43
Ilustración 15: Configuración pistas aeródromo. (ICAO, Organización de aviación civil internacional).....	44
Ilustración 16: Parámetros de Capacidad aeroportuaria V2019 (Fomento M. d.).	45
Ilustración 17: Parámetros de Capacidad aeroportuaria V2019 (ministerio de fomento 2019).....	46
Ilustración 18: Lógica general del modelo de simulación. (R. Herranz, 2015).	59
Ilustración 19: diagrama de vuelo caso1.....	69
Ilustración 20: diagrama de vuelo caso1, resultados.....	69
Ilustración 21: Mejores objetivos conseguidos frente a los Objetivos Relajados.....	71
Ilustración 22: Mejor objetivo conseguido frente al GAP de dualidad.	71
Ilustración 23: diagrama de rutas, caso 2.....	72
Ilustración 24: Evolución de los precios de la franja 3 del aeropuerto 1	75
Ilustración 25: evolución del precio de la franja 4 en el aeropuerto 2.	75
Ilustración 26: precios franjas aeropuerto 1 (Caso 2).	76

Índice: Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos

Ilustración 27: Precios franjas aeropuerto 2 (caso 2).....	76
Ilustración 28: Mejor Objetivo frente a Objetivo relajado.....	77
Ilustración 29: Mejor objetivo conseguido frente al GAP de dualidad.	78
Ilustración 30: Diagrama rutas solicitadas, caso 3.	78
Ilustración 31: Caso 3- Aeropuerto 1.....	79
Ilustración 32: Caso 3- Aeropuerto 2.....	79
Ilustración 33: Evolución de los precios de la franja 4, aeropuerto 1 (caso 3).	80
Ilustración 34: precios finales franjas aeropuerto 1.....	81
Ilustración 35: Precios finales franjas aeropuerto 2.....	81
Ilustración 36: Mejores objetivos conseguidos frente a los Objetivos Relajados.....	82
Ilustración 37: Mejor objetivo conseguido frente al GAP de dualidad.	83
Ilustración 38: Esquema de rutas entre los aeropuertos, caso 4.....	84
Ilustración 39: Diagrama de rutas, caso 4.	85
Ilustración 40: Diagrama de llegadas y salidas del aeropuerto 1.....	86
Ilustración 41: Diagrama de llegadas y salidas del aeropuerto 2.....	86
Ilustración 42: Diagrama de llegadas y salidas del aeropuerto 3.....	87
Ilustración 43: Diagrama de llegadas y salidas del aeropuerto 4.....	87
Ilustración 44: Aeropuerto 1, evolución de los precios de la franja horaria 2.	88
Ilustración 45: Aeropuerto 1, evolución de precios de la franja horaria 3.	89
Ilustración 46: Aeropuerto 1, evolución de precios de la franja horaria 4.	89
Ilustración 47: Aeropuerto 1, evolución de precios de la franja horaria 5.	90
Ilustración 48: Precios finales de las franjas horarias del aeropuerto 1.	90
Ilustración 49: Precios finales de las franjas horarias del aeropuerto 2.	91
Ilustración 50: Precios finales de las franjas horarias del aeropuerto 3.	91

Índice: Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos

Ilustración 51: Precios finales de las franjas horarias del aeropuerto 4.	92
Ilustración 52: Mejores objetivos conseguidos frente a los Objetivos Relajados.....	92
Ilustración 53: Mejor objetivo conseguido frente al GAP de dualidad.	93

Introducción: Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos

CAPÍTULO 1: Introducción

Debido al creciente desequilibrio que ha surgido en los últimos años entre la demanda de tráfico aéreo y la capacidad aeroportuaria existente, se ha hecho necesaria la coordinación de franjas aéreas para optimizar el uso de los recursos aeroportuarios. Dado que la ampliación de la infraestructura ya existente en los aeropuertos es muy costosa y en ocasiones no es posible llevarla a cabo.

Por este motivo, desde la unión europea y otras instituciones se están implementando programas y planes maestros a medio y largo plazo con el fin de mejorar la fluidez del tráfico aéreo, intentar facilitar la coordinación entre aeropuertos de distintos estados, mejorar la eficiencia de los aterrizajes y despegues, reducir el impacto ambiental en la medida de lo posible y aumentar la seguridad en todas las operaciones aeroportuarias.

Estas posibles mejoras, tienen como fin optimizar los recursos disponibles de cada aeropuerto, tanto a nivel operativo como medio ambiental. Lo que permitirá aumentar la capacidad de ciertos aeropuertos con unos costes menores que si hubiese que ampliar las instalaciones.

En este TFG se implementará la coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos, mediante subastas combinatorias, con el fin de optimizar los recursos existentes y dar la máxima utilidad a las infraestructuras aeroportuarias.

Además, gracias a este tipo de subastas se podrá apreciar la fluctuación de los precios de cada franja horaria en cada aeropuerto, dependiendo de la capacidad del aeropuerto y de la demanda que exista de dicha franja horaria.

1.1 Antecedentes

La optimización de las franjas horarias en un aeropuerto mediante técnicas de programación lineal ya ha sido tratada con anterioridad en otros TFG del departamento de Organización, sin embargo, se han centrado solo en la optimización de los recursos de un aeropuerto. Basándonos en los mismos (Pascual Pulido, 2018) (de la Fuente Miguel, 2016), trataremos de ampliar el problema e intentar optimizar los recursos en varios aeropuertos.

Estos proyectos se han ayudado de software de programación con el fin de optimizar los cálculos. Además, tendremos también en cuenta las subastas

combinatorias como medio de optimizar los usos de las franjas horarias por las distintas compañías aéreas.

El modelo de gestión de aeropuertos y servicios de navegación aérea ha sufrido cambios con el aumento de la demanda aérea y la necesidad de optimizar el uso de los recursos disponibles.

Es importante tener una visión de la evolución del transporte aéreo en las últimas décadas, con el fin de poder percibir los enormes cambios que ha sufrido este sector.

1.1.1. Evolución internacional del transporte aéreo.

Los primeros vuelos de aeronaves más pesadas que el aire se realizaron entre los años 1900 y 1914. Gracias a los hermanos Wright (existe cierta controversia sobre si fueron los primeros o fue Dumont), aviadores e ingenieros, quienes construyeron y volaron el primer aeroplano con éxito. Otro reconocido pionero fue Alberto Santos Dumont.

En la primera guerra mundial (1914-1918), el avión empezó a ser usado por los militares. El primer país en usarlo con fines bélicos fue Bulgaria (en la Guerra de los Balcanes).



Ilustración 1: Avión de la Primera Guerra Mundial (Wikipedia).

En este período la tecnología relacionada con la aviación evolucionó rápidamente. Puesto que antes de la Primera Guerra Mundial el avión solo era capaz de cargar con el piloto. Mientras que al finalizar la misma, el avión era

capaz de cargar con el piloto, un segundo pasajero y alcanzaba unas velocidades muy superiores, gracias a los avances realizados en este período.

Posteriormente, en el período entre guerras (1918-1939) se realizaron importantes avances en la aviación que permitieron la aparición de las primeras líneas aéreas.

A partir de la década de 1930, las mejoras técnicas permitieron la construcción de aviones cada vez más grandes, rápidos, con mayor autonomía y que eran capaces de ascender a más altitud lo que contribuyó a poder transportar con ellos carga y pasajeros.

Durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), el número de aeronaves aumento exponencialmente, gracias al impulso recibido por las tecnologías relacionadas con la aviación. Durante la guerra se desarrollaron los primeros bombarderos, aviones reacción y cazas con reactores.

Cuando finalizó la Segunda Guerra Mundial las empresas especializadas en el diseño y fabricación de aviones se dedicaron a crear modelos para el transporte de pasajeros.

Cabe destacar la creación en 1944 de La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). Dicha organización, fue creada con el fin de promover el desarrollo ordenado y seguro de la aviación civil en el mundo. Es un organismo especializado que establece las normas internacionales de aviación para asegurar la eficacia y la seguridad.

Posteriormente, surgió la coordinación de franjas horarias en la década de los 60 con el objetivo de reducir los periodos de congestión de los principales aeropuertos y los retrasos que sufrían las compañías.

En el año 1979, La Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) publica los procedimientos recomendados para la coordinación de franjas horarias y prioridades de asignación.

1.1.2. Evolución en Europa del transporte aéreo y su coordinación.

No fue hasta la década de los 90, que los países de la Unión Europea publicaron un reglamento para la coordinación y asignación de franjas horarias

Introducción: Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos

(Reglamento CEE Nº 95/93) en el cual se establecían las bases legales de esta actividad para los aeropuertos de la Unión Europea.

Posteriormente, desde el año 2004 la unión europea ha ido adquiriendo competencias en la gestión del tráfico aéreo gracias al programa “cielo único europeo” (en el capítulo 2 se explicará en profundidad).

En la actualidad, se siguen implementando y desarrollando las sucesivas versiones del SESAR (cielo único europeo). Gracias al cual, la Unión Europea es el ejemplo más grande y exitoso del mundo de “integración del mercado regional y liberalización en el transporte aéreo” (Europa C. , Movilidad y Transporte).

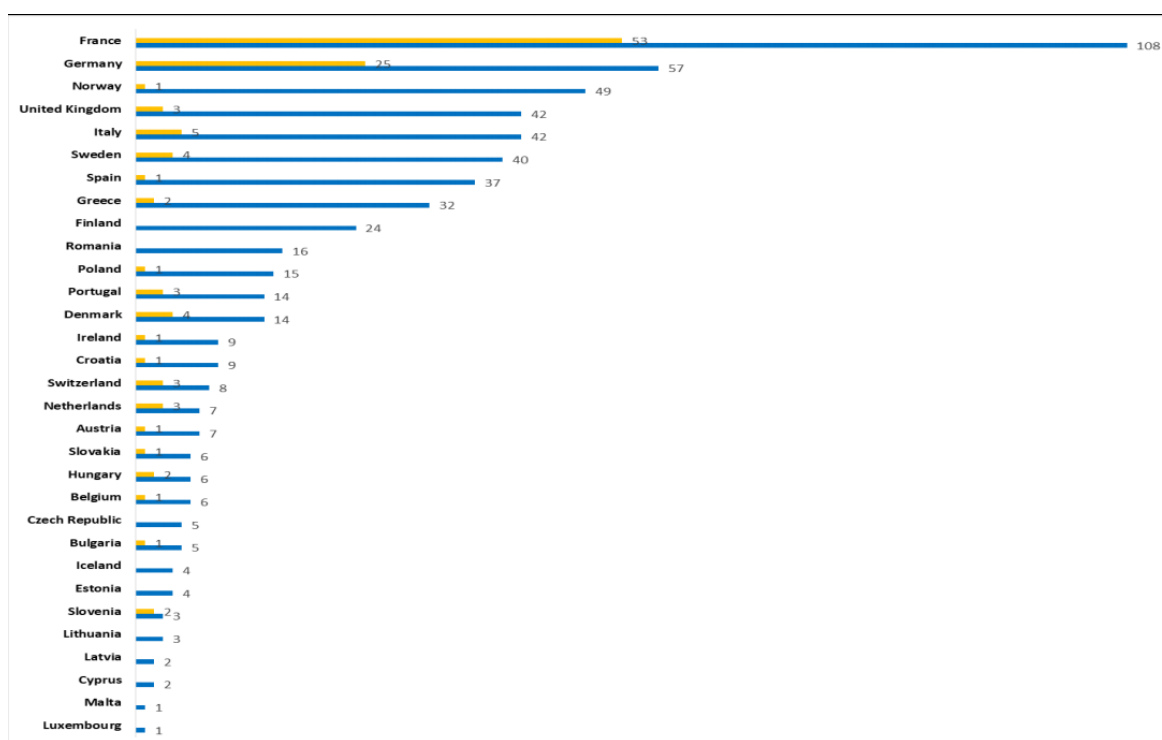


Ilustración 2: Aeródromos por países Unión Europea (Europa U. , European Union Aviation Safety Agency).

1.1.3. Evolución en España del transporte aéreo y su coordinación.

En 1910 a través de la Comisión de experiencias (dependiente del Ministerio de la guerra) se adquirieron en Francia los primeros aeroplanos que volaron en España. Unos meses después (12 marzo de 1911) se realizó el primer vuelo desde Ciudad Lineal a Carabanchel.

Introducción: Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos

Sin embargo, el nacimiento del transporte aéreo en España ocurrió el 1 de septiembre de 1919, cuando se inauguró la ruta aerpostal entre Toulouse y Casablanca, con escalas técnicas en Barcelona, Alicante y Málaga. Esto marcó el inicio del ordenamiento del transporte aéreo en España con La Real Orden de 29 de agosto de 1919.

Ese mismo año se promulga el primer Reglamento de la Navegación Aérea Civil que sentará los cimientos de lo que hoy en día es la aviación española.



Ilustración 3: Primeros vuelos comerciales en España. (Fomento M. d., Fomento, aviación civil).

En la década de los años 20 se esbozaron las primeras indicaciones técnicas de lo que debía ser un aeropuerto de uso comercial y un aeródromo. Empezando, en esta década a surgir las primeras compañías aéreas (tales como, compañía Aérea Española (UAE) y Compañía Aeromarítima Mallorquina (CAMSA)).

Siguiendo la corriente europea, en España, se sacan a concurso público por primera vez (en modo de concesión) en el año 1929. Más tarde se nacionalizarán estos servicios de transporte aéreo creando LAPE (Líneas Aéreas Postales Españolas).

En el año 1928, la mujer se incorporó a la historia de la aeronáutica gracias a María Bernaldo de Quirós y Bustillo que fue la primera mujer en obtener su licencia de piloto. Este año también fue muy importante en la historia de la aeronáutica española por la fundación de la compañía Iberia.

La primera conexión internacional (España-Portugal) se produjo después de la guerra civil, el 1 de mayo de 1939. Siete años después, la compañía aérea

española Iberia se convierte en la primera compañía europea en enlazar Europa con América latina.

A partir de la década de los 60 en España se impulsa el transporte aéreo con fines turísticos a través de la Ley 197/1963.

Fue la entidad pública Aena, por designación del ministro de fomento, la que ha desarrollado las funciones de Coordinador y Facilitador de franjas horarias en los aeropuertos españoles entre los años 1993 y 2014. Desde septiembre de 2014 es AECFA (Asociación Española para la Coordinación y Facilitación de Franjas Horarias) quien desarrolla estas funciones.

1.2 Objetivos

El objetivo de este TFG es la coordinación y gestión de franjas horarias entre aeropuertos coordinados o en horario habilitado, con el fin de maximizar la utilización de las instalaciones de estos aeropuertos obteniendo un mayor rendimiento.

La necesidad de optimizar el uso de las franjas horarias de varios aeropuertos, nos lleva a realizar experimentos en los que se intentará simular lo que sucede en la realidad con la coordinación de los vuelos entre varios aeropuertos. Dado que para operar un vuelo, se necesitaran al menos dos aeropuertos, es decir, una franja horaria de despegue y otra de aterrizaje en el aeropuerto de destino. Nuestro modelo intentará simular de la forma más aproximada la realidad.

Para ello, se generaran varios problemas de asignación de franjas horarias mediante un método de programación de Java, en el cual se utilizan las subastas combinatorias para obtener el mejor resultado de utilidad posible y mayor beneficio posible. Posteriormente se realizarán pruebas con los distintos problemas. Viendo que sucede con las variables cuando los aeropuertos están más o menos saturados.

Con estos problemas se pretende mostrar lo que sucede en los distintos aeropuertos a una escala menor con el fin de que sea más fácil percibir la saturación de los mismos y lo que sucede con los precios de las franjas dependiendo del nivel de saturación de los aeropuertos.

1.3. Contenido del documento

En el capítulo 2 se introducirán conceptos básicos para facilitar la lectura del TFG, puesto que se utilizarán a lo largo de todo el trabajo. Asimismo, se analizará el tráfico aéreo actual, su posible evolución futura y los problemas existentes debido al enorme crecimiento en la demanda del mismo.

Además, se analizará la dificultad de coordinar varios aeropuertos, viendo las directrices mundiales de franjas horarias, y en concreto la normativa vigente de la unión europea, que intenta crear un “cielo único” que facilite la gestión del transporte aéreo entre los aeropuertos de los países miembros.

Esta metodología europea se desglosa en varios programas como el Plan Europeo SESAR, cuyas versiones llevan implementándose ya varios años. También se explicarán algunos de los factores utilizados para medir la capacidad de un aeropuerto.

En el capítulo 3 se explicaran los diferentes tipos de subastas existentes y en concreto las subastas combinatorias mediante las cuales se realiza la asignación de las franjas horarias a las compañías aéreas. Siendo estas, las más adecuadas para dicho fin, debido a su carácter iterativo.

En el capítulo 4 se hablará del análisis que realizan las compañías aéreas de las franjas horarias por las que pujaran. Para realizar este análisis tienen que tener en cuenta distintos factores con el fin de optimizar sus beneficios. Para ello, en España cuentan con la información facilitada por AENA (principal coordinador de la red de aeropuertos españoles). También se explicarán algunas de las regulaciones para la gestión del flujo del tráfico aéreo y que relevancia tienen en la coordinación de aeropuertos.

En el capítulo 5 se describirá el modelo utilizado para la realización de los experimentos (tomando como base (Araúzo, 2018)), es decir, la definición de los parámetros de los aeropuertos, de los vuelos y las restricciones a las cuales están sometidos los vuelos debido a la capacidad de los aeropuertos y a restricciones lógicas de tiempo.

En el último capítulo se explicaran varios ejemplos en los cuales, se verá la diferencias entre los aeropuertos menos saturados a los más saturados a través de gráficas y tablas. Se implementarán tres ejemplos sencillos con el fin de que sea fácilmente apreciable y un ejemplo más complejo para poner en evidencia

Introducción: Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos

la dificultad de coordinar múltiples aeropuertos. Tendrán unas restricciones similares y un mismo número de franjas horarias para facilitar la comparativa.

CAPÍTULO 2: Descripción del problema, normativa y planes de navegación.

En este capítulo se explicarán conceptos básicos, necesarios para entender el contenido del TFG. También se explicará la situación actual del tráfico aéreo y la problemática a la que los aeropuertos se enfrentan y se enfrentarán en un futuro. Además de las directrices europeas y los distintos planes que se han desarrollado y se siguen desarrollando para intentar mejorar la utilización de las instalaciones de los aeropuertos y reducir dicho problema.

Tanto a nivel europeo como las adaptaciones de estos planes europeos a España. Dado que dichos planes abarcan la optimización de las operaciones aeroportuarias a nivel operativo, de seguridad y medioambiental.

2.3 Conceptos básicos

Slot o franja horaria: es el tiempo que una aeronave ocupa en las maniobras de aproximación, aterrizaje o despegue y subida inicial, manteniendo ocupada una zona del aeropuerto y su área terminal.

Coordinador de slots: persona o institución encargada de correcta asignación de franjas horarias en aeropuertos coordinados y del cumplimiento del uso de las mismas. Es el representante del aeropuerto en las subastas y debe velar por la competitividad, imparcialidad y el acceso de nuevos entrantes a las mismas.

Facilitador de slots: persona encargada de mediar en la asignación de franjas horarias. Su meta es facilitar la colaboración en la asignación de slot entre las compañías, evitando así las “horas puntas”.

Vuelo: operación realizada por las compañías para la cual es necesaria la asignación de al menos dos franjas horarias.

Temporadas: son los períodos de programación en los que se divide un ciclo, normalmente son dos, la temporada de verano y la de invierno. Generalmente se programan con 6 meses de antelación.

Capacidad: número máximo de recursos que posee un aeropuerto para realizar sus actividades (aterrizaje y despegue de vuelos, además de las operaciones que van unidas a las dos anteriores).

Compañías aéreas: organizaciones con autorización o licencia pertinente dedicadas a la carga de mercancías y al transporte de pasajeros en avión. Son las que deciden las franjas horarias “preferidas”, en caso de no obtener beneficio con la operación no pujaran.

Nuevo entrante: compañía que solicite una o serie de franjas horarias, que en caso de concedérsele la solicitud, disponga de menos de cinco franjas horarias en dicho aeropuerto.

Si la compañía dispone de más del 5% del total de franjas horarias disponibles en un aeropuerto, o más del 4% del total de franjas horarias disponibles en un sistema de aeropuertos ese día, no se considerará un nuevo entrante.

Stakeholders: personas o entidades que son parte interesada de una compañía, actividad ó asociación.

Aeropuertos No coordinados (nivel 1): son aquellos aeropuertos cuya capacidad no está sobrepasada por la demanda de transporte de las compañías aéreas, en cualquier franja horaria.

Aeropuertos con horarios facilitados (nivel 2): aeropuertos cuya demanda de transporte está cerca de su capacidad aeroportuaria y donde existe el peligro de saturación en periodos o franjas puntuales. En estos aeropuertos existe una persona encargada (facilitador de horarios) de ordenar y propiciar el ajuste de programa para evitar la congestión.

Aeropuertos Coordinados (nivel 3): aeropuertos cuya demanda corre el riesgo de ser significativamente mayor que la capacidad aeroportuaria durante periodos significativos de tiempo y resulta imposible resolver la situación a corto plazo. En estos aeropuertos no es posible, para cualquier operador aéreo, aterrizar y despegar sin tener una franja horaria autorizada por parte del Coordinador de Franjas horarias. Con excepción de aterrizajes de emergencia, vuelos de estado y vuelos de carácter humanitario.

Coordinación de aeropuertos: es un método de gestión de la capacidad de los aeropuertos, mediante la aplicación de un conjunto de normas contenidas en las directrices mundiales de slots (WSG, Worldwide Slot Guidelines). La coordinación conlleva la asignación de la capacidad aeroportuaria a las compañías aéreas y otros operadores de aeronaves para garantizar el funcionamiento viable del aeropuerto. Tiene como principal objetivo incrementar los beneficios para todos los usuarios y optimizar el uso de la infraestructura aeroportuaria. No es una solución al problema de capacidad de los aeropuertos, sino una solución provisional para gestionar las infraestructuras de los mismos.

GANP: metodología estratégica en la que se aprovechan las tecnologías existentes y se prevén los futuros avances. Además, se tiene en cuenta la necesidad de que la planificación estatal y regional estén más integradas.

ATM: Gestión del tráfico aéreo.

ATFM: gestión de flujo del tráfico aéreo.

En España existen los tres tipos de aeropuertos como podemos apreciar en la siguiente Ilustración 4 (no coordinados, coordinados, en horario facilitado) que hay en España. Como se puede apreciar, existen 11 aeropuertos coordinados lo que requiere la existencia de coordinadores aeroportuarios.



Leyenda:

- Aeropuertos Coordinados ◆
- Aeropuertos Coordinados en Temporada de Verano y con Horarios Facilitados en Temporada de Invierno ■
- Aeropuertos con Horarios Facilitados ●

Ilustración 4: Mapa de Aeropuertos Coordinados y con Horarios Facilitados en 2010. Fuente: (AECFA, 2019).

2.4 Situación actual tráfico aéreo

En 2018, los servicios aéreos regulares transportaron 4300 millones de pasajeros. Esto supone un crecimiento del 6,1% del tráfico aéreo respecto al año anterior. Este aumento de pasajeros es una tendencia que lleva dándose ya

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Descripción del problema

varios años (en 2017 fue de 7,1% respecto al 2016), se debe en gran medida a la multitud de ofertas de compañías low cost.

Todas las regiones experimentaron un menor crecimiento en 2018 que el año anterior, excepto Norteamérica donde la mejora se debió al fortalecimiento de su economía y la expansión de los transportistas canadienses (paso de un 4,9% en 2017 a un 5,2% en 2018). La región Pacífico/Asia, sigue siendo el mercado con el crecimiento más rápido, sin embargo fue menor que el del año anterior (pasó de un 10,5% a un 7,3% este año). Europa/Rusia es segunda en términos de crecimiento con un 6,7% y es el mayor mercado internacional con una participación de un 37%.

Por otra parte, los mercados de servicios interiores de transporte de pasajeros tuvieron un crecimiento global de 7,3%, superior al del año anterior 7,1%. Esta ligera mejora se debió al aumento de la demanda interna de Norteamérica. Además, el crecimiento del segundo mercado más importante, Asia/Pacífico, se mantuvo gracias a la demanda de China e India.

Este crecimiento se debe en gran parte, a las líneas de bajo costo. También aumentaron los coeficientes de ocupación, alcanzando récords (81,9%, lo que supone una mejora de 0,6 puntos).

Todo lo expuesto en este apartado queda claramente reflejado en la Ilustración 5. Diferenciando el crecimiento por continentes y el crecimiento global al pie de la imagen.

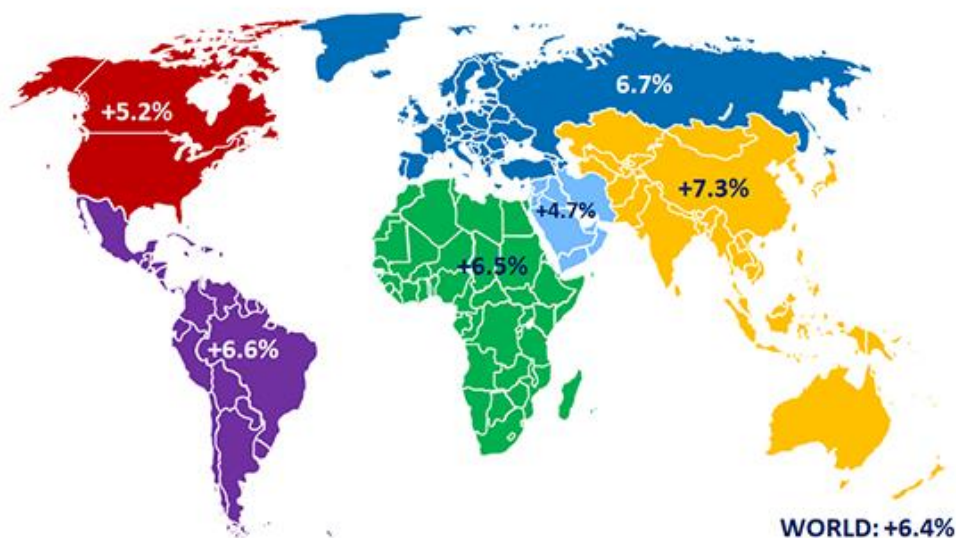


Ilustración 5: Crecimiento del tráfico internacional de pasajeros (RPK) en 2018. Fuente: (ICAO, 2019).

2.5 Directrices mundiales de slots

El 43% de los pasajeros que viajan en avión (645 mil millones) a nivel mundial, lo hacen a través de vuelos que utilizan tan solo 200 franjas horarias, las cuales pertenecen a aeropuertos coordinados que siguen las directrices fijadas por la Asociación internacional del transporte (IATA, Worldwide Airport Slots).

La IATA (International Air Transport Association) publica las directrices mundiales de slots (WSG) con el fin de proporcionar a la comunidad global un conjunto único de estándares para la gestión de slot en aeropuertos coordinados y en horario facilitado.

Estas directrices son elaboradas, desde 1974, por las compañías aéreas miembros de la IATA y la comunidad de coordinadores de aeropuertos de todo el mundo. Se organizan en secciones que abordan los principios, la política y el procedimiento. Son un conjunto de estándares y buenas prácticas. Las cuales intentan mejorar la coordinación de franjas horarias en los aeropuertos más congestionados del mundo, de la manera más efectiva e imparcial posible y son actualizadas con regularidad. (IATA, Directrices mundiales de slot, 2019).

En dichas directrices se fijan los criterios para la designación de cada tipo de aeropuerto, esto significa que marcan las pautas para que un aeropuerto pueda ser designado de nivel 1,2 ó 3.

Además, también se encargan de fijar las pautas para que los aeropuertos midan su capacidad y la comparen con la demanda esperada. Puesto que los aeropuertos deben informar públicamente de cuál es su capacidad máxima (en cada estación).

Este análisis de la capacidad se debe realizar cada vez que exista un cambio, por mínimo que sea, de las condiciones en la infraestructura del aeropuerto. Asimismo, el análisis debe tener en cuenta las restricciones medioambientales de cada zona y las limitaciones funcionales (número de pistas, terminales y espacio aéreo).

La unión europea toma una gran parte de estas directrices para su normativa. Un ejemplo de ello serían los principios de asignación de slot.

2.5.1. Stakeholders en un aeropuerto Coordinado.

Las “partes interesadas” (stakeholders) en un aeropuerto coordinado son:

- Las aerolíneas y otros operadores aéreos que usen o planeen usar el aeropuerto.
- La entidad gestora del aeropuerto que se encarga de administrar y gestionar las instalaciones del mismo.
- Las autoridades responsables de controlar el aeropuerto y su espacio aéreo.
- El coordinador o facilitador responsable de la coordinación del aeropuerto.
- Las autoridades gubernamentales encargadas de dicho aeropuerto.

2.5.2. Designación del nivel de un aeropuerto

Para designar el nivel de un aeropuerto, se debe hacer un análisis exhaustivo de la capacidad del aeropuerto y de la demanda estimada, a través de métodos comúnmente reconocidos como mejores prácticas.

El análisis debe completarse de manera que se pueda hacer una declaración oficial de la capacidad del aeropuerto (capacidad máxima disponible para asignación de slot considerando las limitaciones funcionales del aeropuerto y las restricciones ambientales).

Un aeropuerto puede ser designado de nivel dos cuando los análisis demuestran que puede sufrir congestión en determinados períodos (del día, de la semana o de la estación).

Para que un aeropuerto pueda ser designado de nivel tres es necesario que estos análisis demuestren un riesgo de que la demanda pueda llegar a ser significativamente mayor que la capacidad máxima del aeropuerto. Además, las autoridades correspondientes deben asegurarse de que solo es designado con nivel tres cuando cumpla los requisitos expuestos.

2.5.3 Principios clave para la coordinación de aeropuertos.

Los principios clave para la facilitación de slot en un aeropuerto de nivel dos son:

- La facilitación de franjas horarias se basa en un ajuste de horarios acordado entre el facilitador y las aerolíneas para evitar exceder la capacidad del aeropuerto.
- Los conceptos de derecho histórico y serie de slots no se aplicaran en un aeropuerto de nivel dos.
- Los facilitadores deben ser independientes y actuar de la forma más imparcial, no discriminatoria y transparente posible.
- Las compañías aéreas u otros operadores deberán informar, antes de operar en dichos aeropuertos, al facilitador de todas las operaciones que prevean realizar y de los posibles cambios en las mismas. Algunos vuelos como vuelos de estado o vuelos humanitarios podrán estar exentos de estas medidas, dependiendo de la legislación del estado en el que se produzcan.
- Las compañías aéreas deberán operar los vuelos ciñéndose lo máximo posible a los horarios facilitados y a lo acordado con el facilitador.
- Los tiempos planeados de las operaciones están basados en el bloque planeado (llegada) y en los horarios fuera de bloque (salidas).
- Los facilitadores y las aerolíneas deben usar los manuales de información sobre estándares de horarios (SSIM) de la IATA.

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Descripción del problema

Los principios clave para la facilitación de slot en un aeropuerto de nivel tres son:

- Los slots solamente serán asignados por un coordinador debidamente nombrado para fines de planificación.
- Los slots sólo se asignarán a compañías aéreas y otros operadores de aeronaves.
- Las compañías aéreas deberán tener un slot asignado antes de operar en un aeropuerto de nivel tres. Algunos vuelos como vuelos de estado o vuelos humanitarios podrán estar exentos de estas medidas, dependiendo de la legislación del estado en el que se produzcan.
- Serie de slot solicitados: consiste en como mínimo 5 slot solicitados en la misma hora y día, que además están distribuidos regularmente en la misma temporada.
- Una compañía puede basarse en su derecho histórico para seguir usando una serie de slots.
- Este derecho se aplica a una serie de slot que se hayan utilizado por la compañía, como mínimo el 80% del tiempo durante el período asignado en la temporada anterior.
- No se puede retirar los slots históricos a una compañía aérea para dar cabida a otra categoría de operador o a un nuevo entrante. Sólo se podrán confiscar slots por el uso indebido de los mismos de forma intencionada y demostrada.
- Con sujeción a estas normas y reglamentos, los slots podrán ser intercambiados o transferidos entre compañías aéreas o usarse como parte de una operación conjunta.
- Los coordinadores tienen que ser financieramente y funcionalmente independientes de las partes implicadas en este proceso, así como actuar de manera transparente, no discriminatoria e imparcial.
- La asignación de slots será independiente de la asignación de derechos de tráfico derivados de acuerdos bilaterales.

2.5.4. Gestión de la capacidad y la demanda

El gestor aeroportuario deberá realizar periódicamente un análisis exhaustivo de la capacidad y la demanda (basado en métodos generalmente reconocidos). Especialmente, la capacidad y la demanda deberán ser evaluadas cuando existan cambios significativos en las infraestructuras del aeropuerto, en los patrones de demanda o en las prácticas operativas.

Además, este análisis deberá evaluar de manera objetiva la aptitud de la infraestructura para satisfacer la demanda en los niveles de servicio deseados (teniendo en cuenta los tiempos de espera y los niveles de retrasos o congestión). Así mismo, deberá tener en cuenta los condicionantes operativos, medioambientales y de infraestructura que impidan satisfacer la demanda.

El principal objetivo de este análisis es mejorar la capacidad del aeropuerto y evitar, si es posible, que el aeropuerto pase del nivel uno al dos y del dos al tres. Es más, si es posible, sería recomendable que se buscasen métodos para evitar la necesidad de que un aeropuerto deba ser coordinado.

A continuación se explicara qué requisitos son necesarios para que un aeropuerto pase de nivel 1 a nivel 2:

Principalmente este cambio se produce cuando la infraestructura del aeropuerto ya no es suficiente para satisfacer toda la demanda. Para poder realizar el cambio de nivel es necesario que la autoridad responsable establezca el cambio, por iniciativa propia o tras recibir la solicitud del gestor aeroportuario o de las compañías aéreas que operen en dicho aeropuerto (y que representen el 50% del tráfico).

Para dicho cambio, la autoridad aeroportuaria tendrá en cuenta que se haya realizado un análisis completo de la capacidad y la demanda y que se hayan realizado consultan con todas las partes interesadas, teniendo en cuenta sus opiniones.

De la misma forma, se explicara qué requisitos son necesarios para que un aeropuerto pase de nivel 2 a nivel 3:

Principalmente este cambio se produce cuando la demanda supera considerablemente la capacidad de la infraestructura, la ampliación de la misma es inviable a corto plazo, no es posible resolver el problema mediante ajustes en la programación.

Para llevarlo a cabo, es necesario el mismo procedimiento que para pasar de un aeropuerto de nivel 1 a nivel 2.

2.6 Plan mundial de navegación aérea 2016/2030

Es un marco de gran alcance que trata de definir principios clave para las políticas de aviación civil con el fin de ayudar a las regiones y Estados. Su objetivo es aumentar la capacidad y mejorar la eficiencia del sistema mundial de aviación civil, manteniendo o mejorando la seguridad operacional. Este marco abarca un amplio conjunto de mejoras y objetivos estratégicos.

Con el fin de ver las dimensiones del problema de congestión aérea que se trata de solucionar, podemos apreciar los movimientos de aeronaves en 2010 frente a lo que se prevé en 2020 y 2030. En las siguientes imágenes (Ilustración 6, Ilustración 7, Ilustración 8):

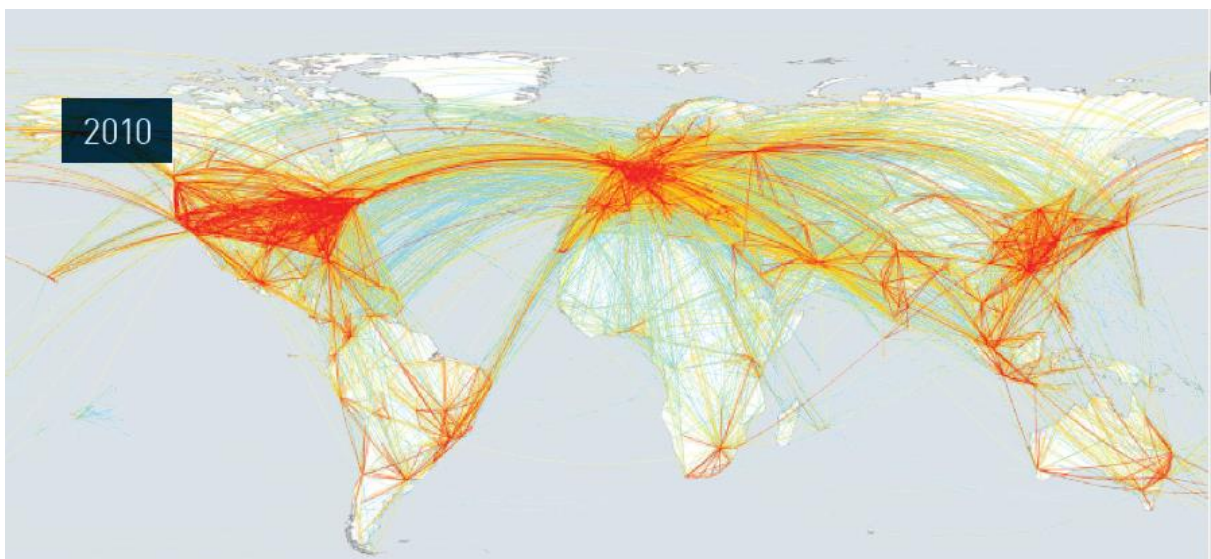


Ilustración 6: Desarrollo de la afluencia de tránsito aéreo en 2010. Fuente (ICAO, 2019).

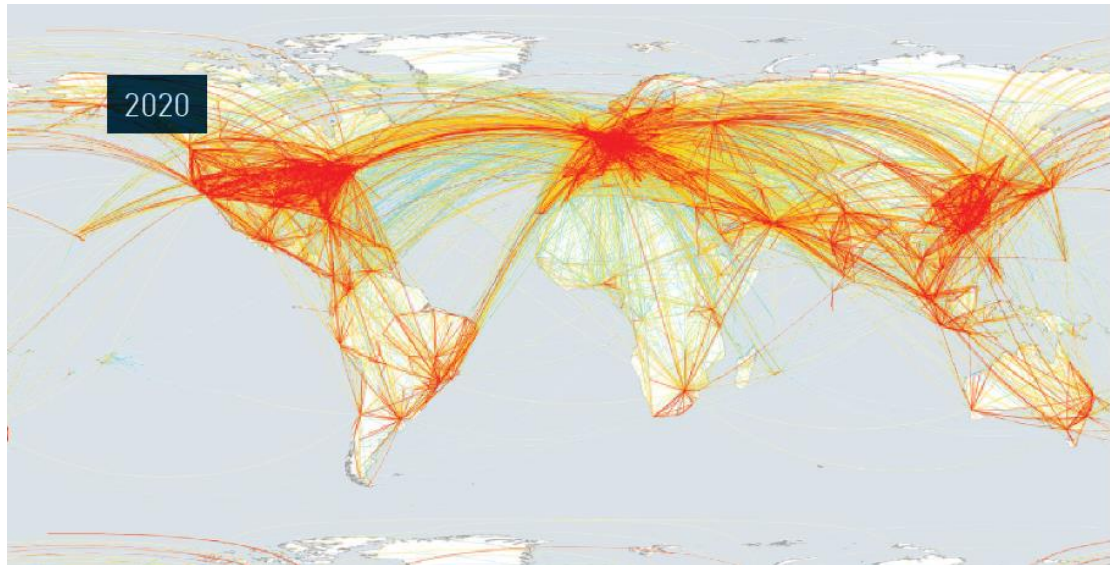


Ilustración 7: Previsión del desarrollo de la afluencia de tránsito aéreo en 2020. Fuente (ICAO, 2019).

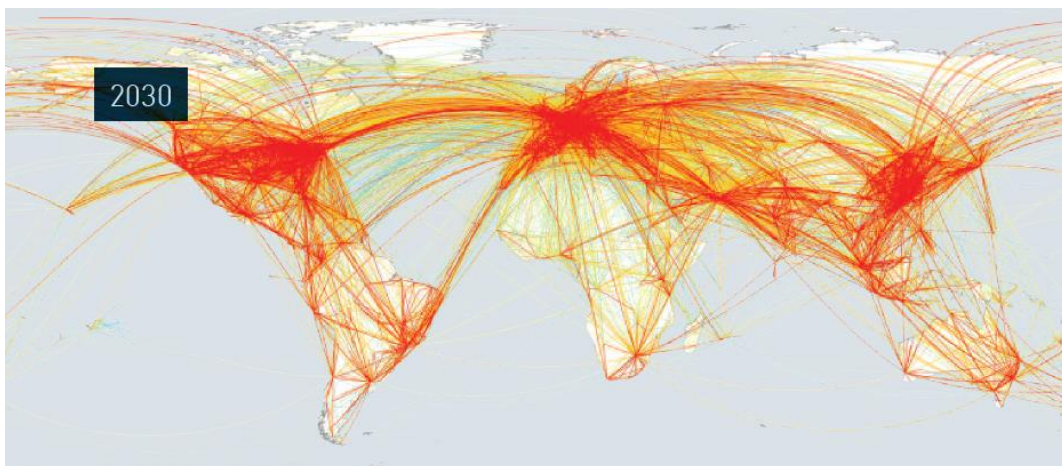


Ilustración 8: Previsión del desarrollo de la afluencia de tránsito aéreo en 2030. Fuente (ICAO, 2019).



Ilustración 9: Leyenda Previsiones del desarrollo de la afluencia de tránsito aéreo. Fuente (ICAO, 2019).

Los datos sobre movimientos de aeronaves en las ilustraciones anteriores, están agrupados en 32 flujos principales.

2.6.1. Metodología de mejoras por bloques del sistema de aviación.

La ICAO estructura las mejoras en bloques (Ilustración 10), los cuales representan los plazos de disponibilidad previstos para cada grupo de mejoras operacionales.

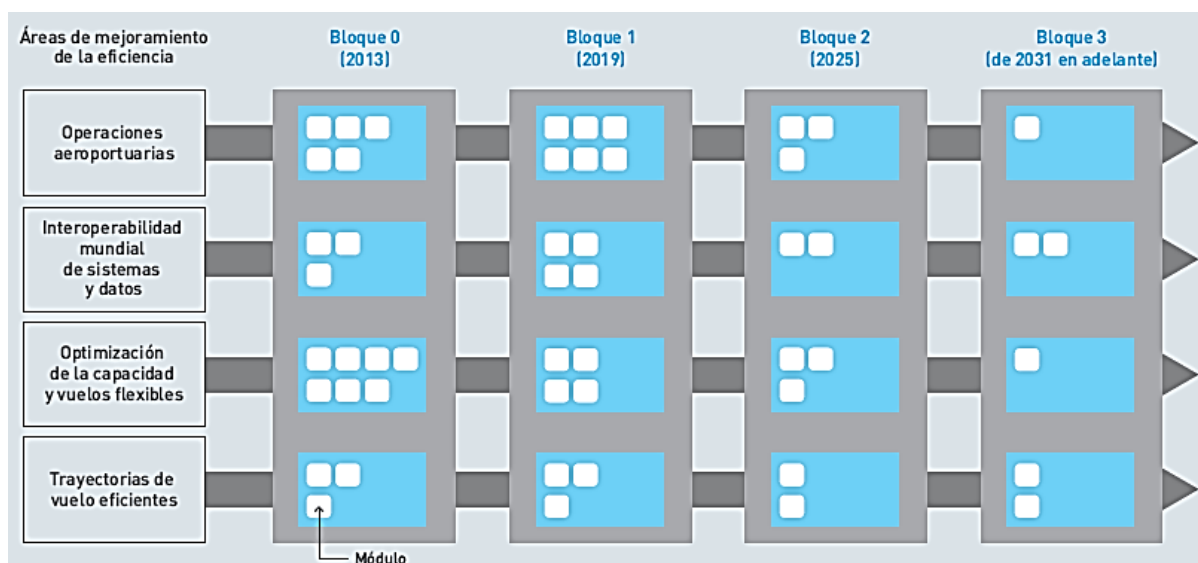


Ilustración 10: Mejoras por bloques. Fuente (Doc 9750-AN/963 Quinta edición – 2016).

Las principales áreas de mejora de la eficiencia son: Operaciones aeroportuarias; Interoperabilidad mundial del sistema de datos; Optimización de la Capacidad y vuelos flexibles; Trayectorias de vuelo eficientes.

La implantación de los módulos (Ilustración 11) del Bloque 1 está prevista para 2019. Se comentarán algunas de las mejoras más relevantes para el desarrollo de este trabajo.

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Descripción del problema

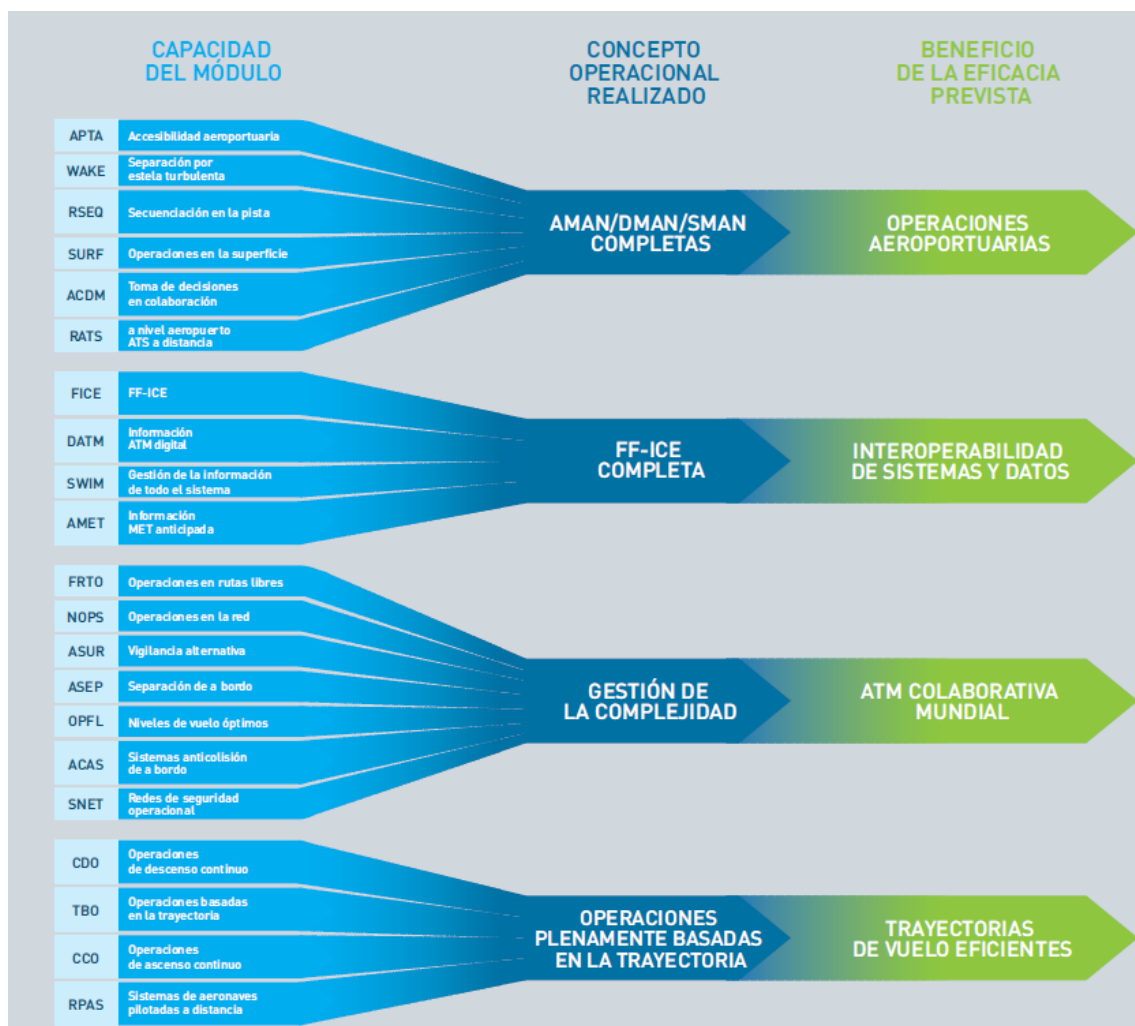


Ilustración 11: Módulos ABSU. Fuente (Doc 9750-AN/963 Quinta edición – 2016).

Mejoras en Operaciones aeroportuarias:

APTA (accesibilidad aeroportuaria óptima): Los procedimientos PBN y GLS mejorarán la fiabilidad y previsibilidad de las aproximaciones a las pistas, aumentando la seguridad operacional, accesibilidad y eficiencia.

WAKE: mayor rendimiento de las pistas de salida y llegada, gracias a una gestión dinámica por estela turbulenta. Uno de sus principales beneficios es un aumento en la capacidad del aeródromo y en los índices de llegada, gracias a la mejor información sobre los vientos en la zona que ayudaran a aplicar medidas para atenuar la estela turbulenta.

RSEQ: Operaciones aeroportuarias mejoradas mediante la gestión de salidas, superficies y llegadas. Consiste en ampliar las mediciones para las llegadas y en la integración de la gestión de superficie con la secuencia de salidas. Los beneficios más reseñables son la optimización en la utilización de la capacidad

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Descripción del problema

del espacio aéreo del aeropuerto y reducción del tiempo de ocupación de pistas, además de la reducción en las demoras y esperas.

SURF: Seguridad Operacional y eficiencia en las operaciones en la superficie y sistemas de visión mejorada (EVS). Ayuda a controlar los movimientos en el aeropuerto, proporcionando vigilancia y alerta en el movimiento de las aeronaves y vehículos del aeródromo. Los beneficios de este sistema son: sostiene los niveles de capacidad del aeropuerto incluso cuando las condiciones de visión son malas; reduce los tiempos de esperas intermedias lo que reduce el tiempo de rodaje y mejora la respuesta a situaciones no seguras.

ACDM: Operaciones aeroportuarias optimizadas mediante una gestión aeroportuaria total con A-CDM. Da como resultado una mejor planificación y gestión aeroportuarias, que se gestionarán integradas con el tránsito aéreo. Para lo que es necesario incorporar la planificación de operaciones aeroportuarias colaborativa (AOP) y un centro de operaciones aeroportuarias. Beneficios: Se espera lograr una importante reducción de esperas en tierra y en vuelo.

RATS: Control de aeródromo a distancia. Esta medida mejoraría la capacidad gracias al uso de medios digitales avanzados en condiciones de escasa visibilidad. También aumentaría la flexibilidad al aumentar las posibilidades de ampliar el horario de funcionamiento con servicios a distancia.

Mejoras en la eficiencia: Optimización de la capacidad y vuelos flexibles

FRTO: Mejora de las operaciones mediante optimización de las rutas ATS. Consigue mediante navegación basada en la performance (PBN) separaciones más pequeñas y coherentes entre rutas y dimensiones reducidas del área de espera. Gracias a esta mejora, se reducirá la congestión en rutas troncales y puntos de cruce con mucho movimiento reduciendo la carga de trabajo para los controladores. Además mejorará la eficiencia debido a que las trayectorias serán más parecidas al óptimo para cada vuelo. Esto se debe a la reducción de las limitaciones impuestas por un diseño fijo.

NOPS: Mayor eficiencia para manejar la afluencia mediante la planificación operacional de la red.

Con el fin de ser capaces de medir las mejoras que se irán implantando en las áreas mencionadas, la ICAO ha definido algunos KPI (indicadores clave de rendimiento) como son: KPI02 Tiempo adicional de rodaje de salida; KPI13

Tiempo adicional de rodaje de llegada; KPI15 Variabilidad del tiempo de vuelo etc.

2.7. Plan Europeo (SESAR).

2.7.1. Origen

El Cielo único europeo (SES) es una iniciativa puesta en marcha por la Comisión Europea en 2004 para reformar la arquitectura de la ATM europea. Propone un enfoque legislativo para satisfacer las futuras necesidades de capacidad y seguridad.

El marco legislativo del SES consta de cuatro Reglamentos Básicos (N ° 549/2004, 550/2004, 551/2004 y 552/2004) que cubren la prestación de servicios de navegación aérea (ANS), la organización y el uso del espacio aéreo y la interoperabilidad de la Red Europea de Gestión del Tráfico Aéreo (EATMN). Estos reglamentos se revisaron y ampliaron en 2009 con el objetivo de aumentar el rendimiento general.



Ilustración 12: Definición, desarrollo y aplicación SESAR. Fuente (2019, <https://ec.europa.eu/transport>).

Sus objetivos clave son:

- Reestructurar el espacio aéreo europeo.
- Crear capacidad adicional.
- Aumentar la eficiencia global del sistema de gestión de tráfico aéreo.

Para cumplir estos objetivos se establecieron medidas como aumentar 3 veces la capacidad (reduciendo también los retrasos); mejorar la seguridad; reducción de un 10% de los efectos sobre el medio ambiente; y proporcionar servicios de cajeros automáticos reduciendo el costo un 50%.

El marco del SES se ha completado con un enfoque integrado hacia la seguridad a través de una empresa conjunta (JU) en investigación y desarrollo. SESAR JU (Single European Sky ATM Research) y un administrador de implementación. Fundada por la comisión Europea y Europol.

2.7.2. SESAR

El marco legislativo del programa SESAR está formado por cuatro Reglamentos básicos (N ° 549/2004, 550/2004, 551/2004 y 552/2004), estos cuatro reglamentos conforman el SESAR I. En 2009, se revisan y amplían con el Reglamento (CE) n ° 1070/2009 con el fin de aumentar el rendimiento general del sistema de gestión del tráfico aéreo (SESAR II).

Los programas SESAR I y II (Programa de investigación ATM de European Single Sky) que son la base del programa actual SESAR 2020 se desarrollaron de 2008 a 2016. El SESAR I entregó más de 90 prototipos industriales, así como 63 soluciones operativas o técnicas nuevas o mejoradas.

Los principales dominios de actividades del SESAR I son:

- **Plan Maestro ATM:** es la principal herramienta de planificación para definir las prioridades para la modernización del sistema de gestión del tráfico aéreo (ATM) y para garantizar que el futuro SESAR sea una realidad. Es una hoja de ruta y el pilar tecnológico de la iniciativa de Cielo Único Europeo.

El ATM (Sistema de gestión de tráfico aéreo) es un elemento crítico en la cadena de valor del transporte aéreo y es la clave para conectar las distintas regiones.

En la última edición del Plan Maestro ATM (2015) se introducen nuevos elementos con el fin de seguir mejorando la gestión del tráfico aéreo europeo. Estos son: detallar las áreas clave de las actividades de I+D (SESAR 2020); hace referencia a los sistemas de aeronave dirigidos por control remoto y a las aeronaves de alas giratorias como usuarios del espacio aéreo; elementos de ciberseguridad del ATM; y refleja sinergias que son consistentes con el Programa de despliegue y con el Plan estratégico de red.

- **Arquitectura y gestión de información de cajeros automáticos:** estas actividades de arquitectura y gestión de la información de ATM se centran en el desarrollo y soporte de un entorno de información digital, confiable y rentable para todo ATM.
- **Construyendo la red del futuro:** desarrollo de nuevas herramientas y procedimientos a través de actividades de investigación, desarrollo y validación. Este trabajo abarcó desde la investigación exploratoria, el modelo inicial y la creación de prototipos hasta la validación, la demostración y el apoyo al despliegue.
- **Futuras operaciones aeroportuarias:** la unidad de investigación de Eurocontrol de Aeropuertos y SESAR trabaja para validar las nuevas mejoras operativas. Ofrecen prototipos maduros y material de orientación en seguridad, eficiencia, medio ambiente y capacidad.

El objetivo del SESAR es lograr un sistema ATM de alto rendimiento basado en permitir a los usuarios del espacio aéreo volar sus trayectorias óptimas.

Los cambios se categorizan a través de las características clave del ATM:

- Servicios ATM de red optimizados
- Servicios de tránsito aéreo avanzados
- Operaciones aeroportuarias de alto rendimiento
- Futura infraestructura de aviación

La Comisión europea propuso una actualización al SESAR II, la cual está en proceso de aprobación por el Parlamento Europeo Y el Consejo, llamada Single European Sky 2+.

Esta actualización se centra en siete áreas principales:

1. **Independencia y recursos de las autoridades nacionales de supervisión (ANE):** el objetivo de esta área es corregir las deficiencias detectadas por las auditorías en la supervisión de los proveedores de servicios de navegación.

2. **Servicios de soporte:** se aplicaran las normas comunes de contratación pública para garantizar una selección transparente de los proveedores y evitar así los monopolios.
3. Enfoque en el cliente.
4. Esquema de rendimiento y el organismo de revisión del rendimiento (PRB).
5. **Bloques funcionales de espacio aéreo (FAB):** Eran estructuras inflexibles. El SES2+ los hará más flexibles y más enfocadas en el rendimiento.
6. Administrador de red (NM).
7. **EASA, Eurocontrol y el panorama institucional:** se dividirá el trabajo entre las tres organizaciones a nivel europeo (EASA, Comisión y Eurocontrol) con el fin de evitar responsabilidades superpuestas.

Para hacer más evidente la enorme labor que realiza la Unión Europea con este programa, cabe destacar las siguientes estadísticas (Europea C. , Movilidad y Transporte):

- El sistema ANS europeo cubre 37 proveedores de servicios de navegación aérea (ANSP).
- El sistema europeo de cajeros automáticos controlaba de promedio 26800 vuelos diarios en 2014.
- Gracias a la política del SES los retrasos para la gestión del flujo aéreo están casi en 0.5 minutos por vuelo.
- El espacio aéreo europeo abarca 10,8 millones de kilómetros cuadrados divididos en 60 centros de control.
- Los cinco servicios de navegación más grandes (DFS para Alemania, ENAIRE para España, DSNA para Francia, NATS para el Reino Unido y ENAV para Italia) operan el 54% del tráfico aéreo.

2.8. Normativa asignación slot

La asignación de franjas horarias en los aeropuertos saturados (Coordinados) debe basarse en normas transparentes, imparciales y no discriminatorias.

El Estado miembro debe velar por la imparcialidad y transparencia del proceso, así como por la imparcialidad del coordinador aeroportuario. Además debe ser garante de la ausencia de desigualdades en la competencia por las franjas horarias.

Para que un aeropuerto sea declarado como coordinado, es necesario realizar un análisis detallado de la capacidad del mismo, con métodos comúnmente reconocidos.

2.8.1. Normativa común Europea

Los parámetros para la asignación de franjas horarias se determinaran dos veces al año, teniendo en cuenta todos los condicionantes operativos, técnicos y medioambientales pertinentes, así como los posibles cambios que puedan surgir.

Para realizar esta asignación será necesario un análisis en el que se tengan en cuenta los distintos tipos de tráfico del aeropuerto, el grado de congestión del espacio aéreo durante el período de coordinación y la capacidad del aeropuerto.

Procedimiento de asignación de franjas horarias:

Partiendo del fondo de reserva de franjas horarias, se asignarán las series de franjas horarias a las compañías aéreas solicitantes en forma de permisos de utilización de la infraestructura aeroportuaria para aterrizar o despegar durante el período de programación de horarios solicitado. Una vez terminado este período las franjas se devolverán al fondo de reserva.

Excepto si la compañía ha utilizado la serie de franjas horarias más de un 80% del tiempo programado para explotar servicios aéreos regulares y no regulares programados.

En tal caso, esa serie de franjas horarias dará derecho a la compañía aérea a la misma serie de franjas horarias en el siguiente período equivalente de

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Descripción del problema

programación de horarios, siempre que dicha compañía aérea lo solicite en el plazo estipulado.

Cuando sea posible atender todas las solicitudes de franjas horarias se dará preferencia a los servicios aéreos comerciales, en particular a los servicios regulares y no regulares programados. Se dará prioridad a las operaciones previstas para todo el año, en caso de competencia entre diversas solicitudes dentro de la misma categoría de servicios.

El coordinador debe tener en cuenta las reglas y directrices adicionales establecidas por el sector del transporte aéreo comunitario o mundial, así como las directrices locales aprobadas por el Estado miembro o por cualquier otro órgano competente.

Cuando no sea posible atender una solicitud de franja horaria, el coordinador informará de los motivos a la compañía aérea solicitante y le indicará la alternativa más próxima disponible.

Movilidad de franjas horarias:

Las franjas horarias pueden ser:

- 1) Transferidas por una compañía aérea de un tipo de servicio a otro o de una ruta a otra, siempre que las siga explotando ella misma.
- 2) Transferirse entre empresa matriz y filiales, o entre filiales y empresas matriz; como parte de la adquisición del control del capital de una compañía aérea; ó en el caso de una adquisición total o parcial, cuando las franjas estén directamente relacionadas con la compañía aérea adquirida.
- 3) Intercambiarse una a una entre compañías aéreas.

Las transferencias e intercambios mencionados, deben comunicarse al coordinador debiendo este confirmar el cambio. El coordinador no confirmará las transferencias o intercambios cuando estos no sean conformes a los requisitos del Reglamento y no tenga la certeza de que:

- 1) Las operaciones aeroportuarias no sufren perjuicios.
- 2) Se respetan las limitaciones antes mencionadas.

Además, las franjas asignadas a un nuevo entrante no podrán ser transferidas.

2.8.2 Normativa complementaria española

En el siguiente mapa podemos ver los aeropuertos españoles coordinados, facilitados y los que son coordinados en una temporada y facilitados en otra (Ilustración 13).

Mapa de Aeropuertos Coordinados y con Horarios Facilitados

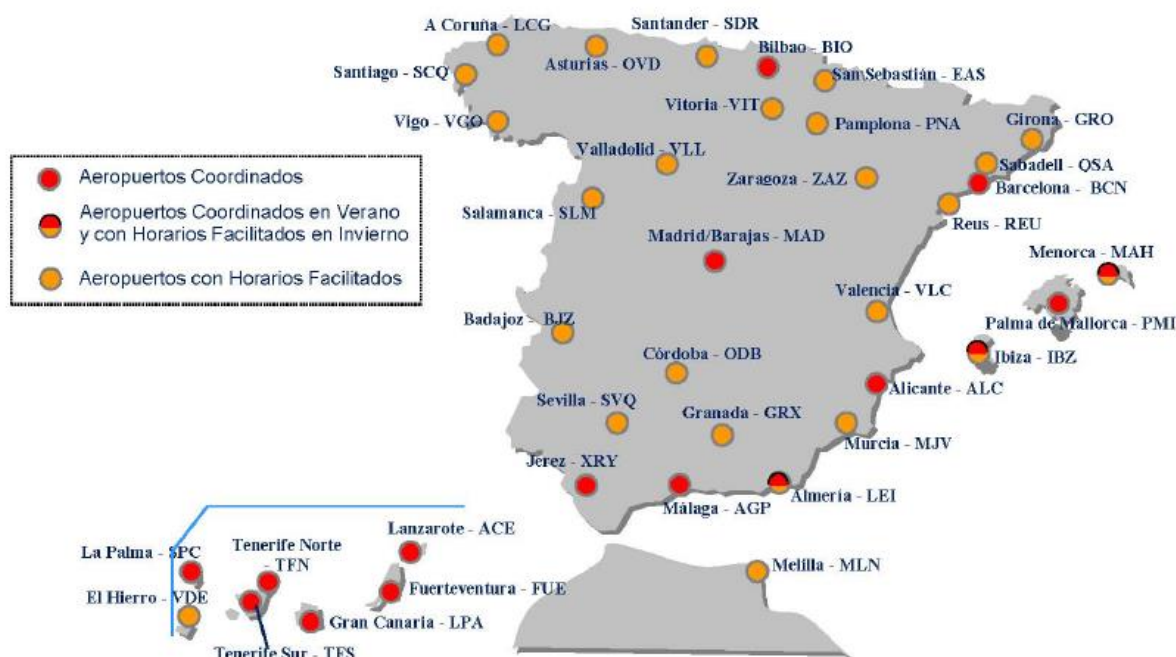


Ilustración 13: Mapa aeropuertos Coordinados y con Horarios facilitados (Aena 2019).

2.9. Factores para determinar la capacidad de las Terminales, pistas y plataformas de un aeropuerto.

Determinación de la capacidad aeroportuaria y designación de aeropuertos coordinados y facilitados:

El gestor aeroportuario es el responsable, con la colaboración de los proveedores de servicios de navegación, de la realización de un análisis detallado de la capacidad disponible para la asignación de franjas horarias en el aeropuerto.

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Descripción del problema

Estos análisis determinarán los problemas de capacidad y las limitaciones medioambientales del aeropuerto. Dichos análisis se remitirán a las partes previstas en el reglamento, así como al Director de Coordinación, a la Dirección General de Aviación civil y al Comité de Coordinación de Franjas horarias que ejerza sus funciones sobre el aeropuerto. Con el fin de garantizar la imparcialidad, transparencia y no discriminación del proceso.

Los factores que se tienen en cuenta en estos análisis son los siguientes:

- Factores Humanos.
- Tipo de aeropuerto (terminal o hub).
- Número de pistas, longitud, orientación y estrategias de operación.
- Condiciones topográficas del entorno.
- Número y condiciones de calles de rodaje y apartaderos.
- Tipo y características de las aeronaves que pueden aterrizar y despegar.
- Condiciones meteorológicas.
- Categoría de la pista y ayudas a la navegación disponibles.
- Situaciones especiales (emergencias).

La Dirección General de Aviación civil propone las categorías de los aeropuertos, previo informe del gestor aeroportuario, al titular del Ministerio de Fomento quién designará o excluirá a los aeropuertos en las respectivas categorías previstas en el reglamento.

Comités de Coordinación de Franjas Horarias y Subcomités de Seguimiento del uso de franjas horarias:

El Comité Estatal de Coordinación de Franjas Horarias ejercerá las funciones de asesoramiento para el Coordinador, la Agencia Estatal de Seguridad Aérea y a la Dirección General de Aviación Civil y mediación entre las partes afectadas en las reclamaciones sobre la asignación de franjas horarias. En todos los aeropuertos designados como coordinados en los que no exista un Comité específico de Coordinación de Franjas Horarias del aeropuerto.

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Descripción del problema

Podrá constituirse un Comité de coordinación específico en un aeropuerto cuando el aeropuerto supere las 200.000 operaciones al año.

Composición de los comités de Coordinación de Franjas Horarias:

- Aena Aeropuertos, S.A
- Los gestores de los aeropuertos coordinados.
- Las compañías aéreas que operen en los aeropuertos coordinados.
- Las organizaciones representativas de dichas compañías aéreas.
- Las empresas agentes-handling más representativas en cuanto al volumen de tráfico tratado en los aeropuertos coordinados.
- La entidad pública empresarial Aena Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea (AENA).
- Los proveedores de servicios de navegación.
- Los representantes de la aviación general.

Parámetros para la asignación de franjas horarias para la temporada de verano 2019:

Los parámetros para la asignación de franjas horarias se determinan por temporadas (temporada de verano y temporada de invierno), siempre de acuerdo con el Reglamento (CEE) n° 95/93 del Consejo, de 18 de enero, relativo a normas comunes para la asignación de franjas horarias en los aeropuertos comunitarios.

Con estos datos se informa a las compañías aéreas de las capacidades de las pistas y las terminales y plataformas de cada aeropuerto, es decir, de los vuelos que pueden aterrizar y despegar en cada franja horaria (slot).

Para poder entender los parámetros de capacidad fijados para el verano 2019 primero es necesario saber la diferencia entre capacidad de pista, capacidad de terminal y capacidad de plataforma:

- Capacidad de plataforma: número de operaciones (entendiendo como operación llegada más salida de la aeronave al estacionamiento) por hora

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Descripción del problema

a los que una plataforma es capaz de dar servicio, depende del tipo de las aeronaves.

- Capacidad de pista: número de aviones que pueden aterrizar o despegar de una pista en una hora. Depende en gran medida de la configuración de las pistas y el tipo de aeronave:

Existen varias configuraciones de pistas posibles, principalmente siete: Las cuatro primeras (un pista o más de una en paralelo, Ilustración 14: Configuración Pistas aeródromo..) la capacidad de movimientos en las pistas aumenta a medida que la separación entre las misma aumenta, siendo las que mayor capacidad tienen las que mayor separación poseen. Sin embargo, si el aeropuerto no posee demasiado espacio es recomendable que sus pistas tengan una configuración similar a alguna de las tres últimas (Ilustración 15: Configuración pistas aeródromo.). Además estas últimas configuraciones, tienen una ventaja fundamental y es que al no ser paralelas, los vuelos pueden aterrizar en una u otra sin depender exclusivamente del viento que sopla en una dirección, por ejemplo.

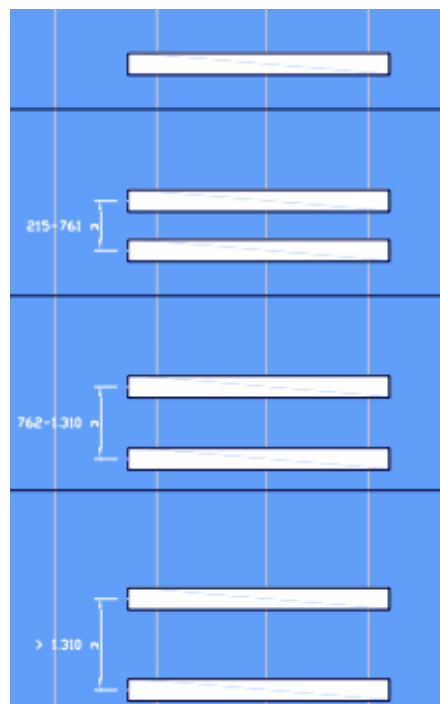


Ilustración 14: Configuración Pistas aeródromo. (ICAO, Organización de aviación civil internacional).

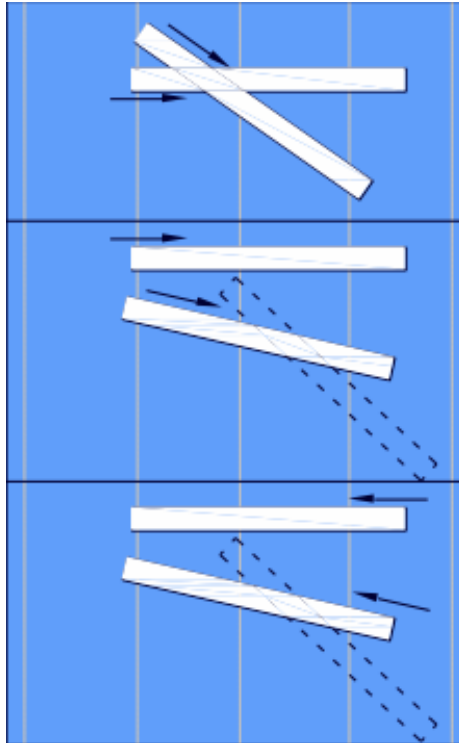


Ilustración 15: Configuración pistas aeródromo. (ICAO, Organización de aviación civil internacional).

- Capacidad de terminal: número de pasajeros que embarcan desde el edificio (terminal).

Para los aeropuertos coordinados son los siguientes:

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Descripción del problema

PARAMETROS DE CAPACIDAD AEROPORTUARIA

temporada verano 19
Edición: Septiembre 2018

AEROPUERTOS NIVEL 3 - AEROPUERTOS COORDINADOS													
CÓDIGO	AEROPUERTO	CAPACIDAD DE PISTA						CAPACIDAD DE TERMINAL					
		MOVIMIENTOS / HORA			MOVIMIENTOS / SLOT			MOVIMIENTOS / HORA			PAX / HORA		
		LLEGADA	SALIDA	TOTAL	LLEGADA	SALIDA	TOTAL	LLEGADA	SALIDA	TOTAL	LLEGADA	SALIDA	
ACE	LANZAROTE	L, X, S			3	3	5				Tráfico No Interinsular		
		12	12	22							2700	1600	
AGP	MÁLAGA-COSTA DEL SOL	M, J, V, D			5	5	8				Tráfico Interinsular		
		14	14	24							500	400	
ALC	ALICANTE-ELCHE	00.00 - 04.29			4	4	7	4 No UE	17 No Sch		-4650	3600	
		04.30 - 05.59			4	6	7						
BCN ¹	BARCELONA-EL PRAT	06.00 - 23.59			4	4	7				2650 No Sch	2750 No Sch	
		24	24		4	4							
BIO	BILBAO	00.00 - 03.59			4	4	7				1500 Sch	1600	
		18	30		4	6							
FUE	FUERTEVENTURA	05.00 - 20.59			7	8 ^(A)	7				600 No Sch	700 No Sch	
		26	22		5	4							
IBZ	IBIZA	21.00 - 23.59			3	3	4				2500	2750	
		14	14	22	3	3	5						
LPA	GRAN CANARIA	L, X, S			3	3	5				2700	2000	
		14	14	24									3
MAD ²	ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS	M, J, V, D			5	5	7	11	13	2 No UE	9 No Sch	1750 No Sch	1750 No Sch
		16	16	28									
MAH	MENORCA	L, M, X, J, V			5	5	7	7 UE No Sch	16 No Sch		7200	3400	
		24	24	36									7 UE No Sch
PMI	PALMA DE MALLORCA	S, D			13	15		9 No UE No Sch			1050 No UE No Sch	1000	
		25	25	40									13
TFS	TENERIFE SUR	00.00 - 03.59			4	4	7	2 No UE No Sch			3000	3000	
		20	20	34	5	5	7						
VLC ³	VALENCIA	04.00 - 04.59			6	6	9	6 No UE	15 No Sch		600 No UE No Sch	3000	
		19	29		6	6	9						
VLC ³	VALENCIA	05.00 - 20.59			11 ^(B)	11 ^(C)	-	6 No UE	15 No Sch		1200 No Sch	1800	
		48	52		6	6	9						
VLC ³	VALENCIA	21.00 - 21.59			6	6	9	6 No UE	15 No Sch		600 No UE	1800	
		28	22		4	4	7						
VLC ³	VALENCIA	22.00 - 23.59			4	4	7	6 No UE	15 No Sch		1200 No Sch	1800	
		20	20	34	5	5	6						

Ilustración 16: Parámetros de Capacidad aeroportuaria V2019 (Fomento M. d.).

Para explicar los parámetros vamos a tomar como ejemplo el aeropuerto de Lanzarote, en este aeropuerto pueden aterrizar un máximo de 12 vuelos por hora, despegar como máximo 12 vuelos, o una combinación de ambas, siempre y cuando el número máximo de aterrizajes y despegues por hora no supere la capacidad total que son 22 aterrizajes y despegues. Si estos movimientos los contamos por slot (15 min aprox. por slot) tendremos que pueden aterrizar o despegar un máximo de 5 vuelos por slot.

En cuanto a la capacidad de la terminal, dividida entre llegadas y salidas, es de 2700 pasajeros llegadas y 1600 salidas (exteriores a España y posiblemente fuera del espacio schengen) y de 500 pasajeros en llegadas y 400 en salidas desde España.

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Descripción del problema

PARÁMETROS DE CAPACIDAD AEROPORTUARIA Edición: Septiembre 2018

CAPACIDAD DE PLATAFORMA

AEROPUERTOS	Aerobus																		Regional										Multiusos				Otros				Aeropuerto	Capacidad											
	A320						A321						A320neo						ATR 72-600		ATR 72-500		ATR 42-500		ATR 42-300		ATR 42-240		ATR 42-200																				
	A-320-1	A-320-2	A-320-3	A-320-4	A-320-5	A-320-6	A-321-1	A-321-2	A-321-3	A-321-4	A-321-5	A-321-6	A-321-7	A-321-8	A-321-9	A-321-10	A-321-11	A-321-12	A-321-13	A-321-14	A-321-15	A-321-16	A-321-17	A-321-18	A-321-19	A-321-20	A-321-21	A-321-22	A-321-23	A-321-24	A-321-25	A-321-26	A-321-27	A-321-28	A-321-29	A-321-30			A-321-31	A-321-32	A-321-33	A-321-34	A-321-35	A-321-36	A-321-37	A-321-38	A-321-39	A-321-40	
AEROPUERTOS OPERATIVOS										Ver AIP - España																																							
ACN	LANZAROTE																																								4								
AGP	MÁLAGA-COSTA DEL SOL																																								37								
ALC	ALICANTE-EL CHE																																								12								
BCN	BARCELONA-EL PRAT																																								43								
IBD	BILBAO																																								7								
FUE	FUERTEVENTURA																																								58								
IBZ	IBIZA																																								4								
LPA	GRAN CANARIA																																								4								
MAD	ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARCELAS																																								4								
MIA	MÉRIDA																																								4								
PNI	PALMA DE MALLORCA																																								49								
TFS	TENERIFE SUR																																								5								
VLC	VALENCIA																																								76								
AEROPUERTOS INACTIVOS																																																	
EAS	SAY DEVIATION																																								7								
GRO	GIRONA-COSTA BRAVA																																								13								
ORK	FERDINAND VON DRONKOW ORMAIZTEGUI																																								20								
LEO	LEÓN																																								19								
ALC	ALICANTE																																								10								
MAV	MURCIA SAN JAVIER																																								10								
AST	ASTURAS																																								6								
PNA	PAMPLONA																																								1								
REU	REUS																																								1								
SOR	SANTANDER																																								1								
SPC	LA PALMA																																								2								
SVQ	SEVILLA																																								1								
TNA	TENERIFE NOROCCIDENTAL																																								2								
JER	JEREZ																																								2								
AEROPUERTOS NO OPERATIVOS (del Sur de España)																																																	
BIZ	BIZKAIA																																								1								
MLN	MELLELA																																								1								
COG	CÓRDOBA																																								1								
SDG	SANTAGO DE CALERÍA																																								1								
SLM	SALAMANCA																																								1								
EBE	EL BERRIO																																								1								
VLL	VALLADOLID																																								1								
VGO	VIGO																																								3								
VIT	VITORIA																																								1								
ZAZ	ZARAGOZA																																								8								
BRN	REGION BURGOS																																								4								

Ilustración 17: Parámetros de Capacidad aeroportuaria V2019 (ministerio de fomento 2019).

En cuanto a la capacidad de plataforma, está dividida en cada aeropuerto por tipos de aeronaves que podrían aterrizar en cada aeropuerto dependiendo del tamaño de las pistas y las características de cada aeronave.

2.10. Conclusión

Todas estas mejoras para optimizar las capacidades de los aeropuertos, las eficiencias de las operaciones en las terminales y en las pistas de los aeropuertos de los distintos países, necesitan ir unidas a un sistema de optimización de la asignación de las franjas horarias, para ello se utiliza el sistema de subastas combinatorias.

Dicho sistema, ayuda a los coordinadores de los aeropuertos a aprovechar al máximo las franjas horarias y a adaptar la capacidad del aeropuerto a la demanda existente.

CAPÍTULO 3: Tipos de subastas y Subastas Combinatorias.

3.1. Introducción

Para el funcionamiento de los aeropuertos coordinados, es necesario un método efectivo para la asignación de franjas horarias con el fin de que las compañías aéreas tengan disponibles las mismas para el despegue y aterrizaje de sus vuelos en diferentes aeropuertos coordinados. Esta asignación es un problema de asignación combinatoria formado por sistemas complejos en los que se ven involucrados varios aeropuertos.

En este documento se propone una subasta combinatoria con un proceso iterativo para la asignación primaria de franjas horarias. Existen diversos tipos de subastas dependiendo del número de participantes, sus características, el tipo de objetos o bienes a subastar, la manera en la cual se realiza las pujas, el precio, etc. , sin embargo, este capítulo se centrará en las subastas combinatorias.

3.2. Definición de subasta

La subasta es una institución de mercado que está constituida por una serie de reglas empleadas para la asignación de recursos y precios basada en las pujas de los participantes.

Las subastas se utilizan cuando quieres vender un bien o servicio o adquirir un bien o servicio. Existen varios tipos de subastas que explicaremos en los siguientes apartados.

3.3. Tipos de subasta

Existen múltiples tipos de subastas dependiendo de las características que se quiera analizar y de los servicios o bienes a subastar.

Según sus características:

- Inversa: en este tipo de subasta solo hay un comprador y muchos vendedores.
- Directa: hay un vendedor y varios compradores.
- Doble: participan varios compradores y vendedores.

Dependiendo del tipo de artículo a subastar:

- Varios artículos (en este caso se subastan varios artículos a la vez, siendo necesario comprar todos, es decir, el lote).
- Un solo artículo

Según la manera en la cual se puja:

- Cerradas: La puja de cada comprador no la conoce el resto de los participantes, es el caso de la subasta a sobre cerrado.
- Abiertas: Los compradores pujan en público por lo que todos conocen lo que puja cada uno (estas subastas suelen ser más dinámicas).

Dependiendo del precio al que se intercambian los bienes:

- Al precio más alto.
- Al segundo precio más alto.

Estas características dan lugar a los siguientes tipos de subastas:

- **Subastas a sobre cerrado:** los compradores solo pujan una vez por el bien o producto, sin que los demás postores sepan lo que puja cada uno. Existen dos opciones, la primera es que el ganador de la puja paga el precio más alto pujado y la segunda es que este ganador paga el segundo mejor precio.
- **Subasta dinámica:** todos los postores conocen las pujas de todos y pueden pujar mientras la subasta esté abierta. Estas subastas pueden ser de tres tipos Inglesa (la puja es ascendente, partiendo de un precio de reserva), Holandesa (se parte de un precio superior al esperado para vender el bien o producto y este va bajando hasta que uno de los compradores lo acepta) y Americana (todos los compradores deben pagar su puja pero solo el comprador con la puja más alta se lleva el producto).
- **Subasta Concurso:** normalmente suele darse entre la Administración pública y empresas privadas. Consiste en que se oferta una obra o licencia, teniendo que pujar por ella las empresas que cumplan con los

requisitos fijados en los pliegos de la misma. La empresa que ofrezca el precio más bajo es la que se queda con la obra o licencia.

- **Subasta Combinatoria:** es una subasta dinámica múltiple, es decir, es una subasta abierta en la que se puja por lotes.

3.4. Definición y tipos de subastas combinatorias

Para poder resolver los numerosos problemas de asignación de recursos como redes de ferrocarriles, aterrizajes y despegues de aeronaves y flujos de mercancías, se ha utilizado la asignación de precios basada en subastas.

Existen multitud de tipos de subastas dependiendo de lo que sea necesario analizar, (Anandalingam, Day, & Raghavan, 2005).

Pero, en definitiva, una subasta es una institución de mercado constituido por una serie de reglas empleadas para la asignación de recursos y precios que se basa en las pujas de los participantes (McAfee & McMillan, 1987).

El tipo de subastas en el que nos centraremos en este capítulo son las subastas combinatorias, las cuales son un tipo de subasta múltiple cuyos bienes son adquiridos por lotes. Es decir, el valor de cada artículo viene determinado por el resto de los que forman el lote.

Con este tipo de subasta se pueden tener en cuenta las restricciones de capacidad de los aeropuertos. Además, se pueden utilizar como modo de coordinación para la asignación de franjas horarias.

Las subastas combinatorias se pueden dividir principalmente en dos tipos, dependiendo de las veces que los compradores pueden enviar sus propuestas de adquisición de bienes (Lavios Villahoz, 2013).

- **De una ronda:** subastas a sobre cerrado, es decir, los compradores sólo pueden enviar una vez las diferentes valoraciones de bienes. Posteriormente, el coordinador asigna las franjas horarias de manera que se maximice el beneficio.

- **Iterativas:** Los participantes pujan en cada iteración, no siendo necesario pujar por una combinación para todo el conjunto. Se dividen en dos tipos:
 - **Con fijación de cantidad:** los compradores proponen un precio que están dispuestos a asignar los bienes en función de las pujas, de manera provisional.
 - **Con fijación de precios:** Los subastadores asignan un precio para cada bien y los compradores indican que bien y en qué cantidad quieren comprar. Las formas de establecer los precios son mediante subasta ascendente o subasta dependiente del exceso de demanda.
 - **La subasta ascendente:** Consiste en que el subastador asigna un precio de partida a un bien y los compradores deciden si quieren comprarlo por dicho precio, en caso de que existan varios interesados, van pujando con cantidades cada vez más elevadas hasta que se lo queda uno de los pujadores.
 - **Subasta dependiente del exceso de demanda:** los precios de los bienes varían en función de la oferta o de la demanda.

Para llevar a cabo la resolución del problema que plantearemos en el apartado 5, realizaremos un modelo matemático de programación lineal entera. En el cual utilizaremos las subastas combinatorias iterativas para poder llegar a una solución óptima del problema de asignación de franjas horarias entre aeropuertos.

3.5. Subastas Combinatorias para la asignación de franjas horarias en aeropuertos coordinados.

Las subastas son utilizadas como mecanismos para la asignación de slot aeroportuarios (franja horaria) en los aeropuertos coordinados. Las subastas combinatorias son apropiadas para este tipo de problemas, dado que respetan las restricciones rodantes de los mismos.

La asignación de slot aeroportuarios (franja horaria) es un problema de asignación combinatoria que puede desarrollarse con diferentes métodos, siendo las subastas combinatorias iterativas uno de los métodos de resolución.

CAPÍTULO 4: Redes de aeropuertos

Las compañías aéreas realizan un minucioso análisis de los mercados con el fin de optimizar sus vuelos y definir en qué aeropuertos, rutas y franjas horarias están interesadas. Para ello analizan el histórico de rutas, entorno competitivo, previsiones estratégicas y otros parámetros.

Para poder operar un vuelo, necesitan tener una franja horaria asignada en el aeropuerto de partida y como mínimo otra en el de llegada (si el vuelo tiene conexiones, serán necesarias más franjas horarias y una mayor coordinación). Por este motivo, las compañías deben coordinar muy bien sus franjas horarias, puesto que si pierden una, deben esperar a la siguiente que tengan asignada para aterrizar o despegar.

Además, las compañías aéreas deben tener en cuenta las limitaciones de aterrizaje y despegue de sus aeronaves en determinados aeropuertos, puesto que debido al tamaño de las pistas y a las características de algunas aeronaves, hay aeropuertos en los que no pueden aterrizar ni despegar.

En España, las compañías aéreas cuentan con la ayuda de AENA (principal coordinador de la red de aeropuertos españoles) que se encarga de coordinar 46 aeropuertos en territorio español.

AENA es uno de los gestores de aeropuertos más importantes del mundo, su labor consiste en:

- Mejorar la gestión del tráfico aéreo compartiendo información precisa y actualizada, con el fin de optimizar los procesos de planificación de los vuelos. Para ello, utiliza la herramienta ACDM mencionada anteriormente dentro del programa europeo SESAR.
- Implantación de sistemas de información técnico-operativos y de comunicaciones integradas. Que incrementan los niveles de calidad, seguridad y eficiencia en la gestión y prestación de servicios en los aeropuertos de la red.
- Proporcionar información gráfica de interés aeronáutico y aeroportuario desde cualquier punto de su red. Con este fin, han implantado la plataforma SAOS (Sistema Aeroportuario de Ortoimágenes Satélite), sus principales características son: integrar fuentes de información; centralización, difusión y explotación de imágenes de los aeropuertos; tratamiento eficiente de la información e incrementar la efectividad en la gestión.

Consta de más de 10 módulos (Genérico, Operaciones, Servidumbres, Planes Directores, Servidumbres Radioayudas, Planes Autoprotección, Instalaciones Navegación Aérea, Medio Ambiente, Espacios Naturales, 3D, Administración, etc.).

4.1. Relevancia de la coordinación entre aeropuertos.

Es sumamente importante la coordinación entre aeropuertos, siendo el transporte aéreo uno de los sistemas logísticos más grandes e importantes del mundo.

Solo en Europa se prevé que en 2035, habrá una demanda anual excedente de unos 2 millones de vuelos que los aeropuertos europeos no serán capaces de asumir. Esto podría llegar a costar 434000-818000 empleos y pérdidas de 28-52 mil millones de euros del PIB (Europa C.) .Lo que demuestra la gran importancia de los programas puestos en marcha por la Unión Europea y otros organismos internacionales (mencionados en capítulos anteriores).

4.2. Regulaciones de ATFM (gestión del flujo de tráfico aéreo).

El sistema ATFM trata de asegurar la seguridad de los vuelos, para ello, cuando existe congestión (sobrecarga) del espacio aéreo se fija un tiempo de despegue calculado (CTOT, o “ranura”) para que el avión sea capaz de incorporarse al nuevo flujo de forma segura.

En la Unión Europea el Reglamento que regula el ATFM es (Europa U. , Reglamento (UE) 255/2010, 2010) . Los requisitos para la gestión de afluencia del tránsito aéreo recogidos en este documento son:

Los planes de vuelo deben ser coherentes con las franjas aeroportuarias:

- Antes del vuelo, los operadores facilitarán la información necesaria de la salida y llegada del vuelo a los aeropuertos. Dicha información debe permitir una correlación entre el designador del vuelo (indicado en el plan de vuelo) y el notificado para la franja.

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Redes de aeropuertos

- Cualquier operador podrá notificar al coordinador de franjas la operación de servicios aéreos en horas significativamente distintas de las franjas horarias asignadas o con la utilización de franjas de una forma distinta a la indicada en el momento de su asignación para evitar perjuicios a operaciones aeroportuarias o de tráfico aéreo.
- Los Estados tienen que garantizar que la unidad central de ATFM notifique a los coordinadores de franjas horarias lo expuesto en el punto anterior. Con el fin de evitar perjuicios a la ATFM.

Obligaciones en situaciones críticas:

- La unidad central de ATFM establecerá y publicará sus procedimientos de gestión en situaciones críticas con la colaboración de los Estados.
- Las unidades ATS y los organismos gestores de los aeropuertos coordinarán el contenido de los procedimientos de contingencia, incluidas las posibles modificaciones de las normas de prioridad.

Los procedimientos de contingencia incluirán:

- Acuerdos de organización y coordinación.
- Medidas ATFM para gestionar el acceso de las zonas afectadas (para evitar que la demanda de tráfico aéreo sea excesiva en comparación con la capacidad declarada).
- Condiciones, circunstancias y procedimientos para la aplicación de normas de prioridad de los vuelos con el fin de que se ajusten a las políticas de defensa y seguridad de los Estados miembros.
- Acuerdos de recuperación.

El cumplimiento de las medidas ATFM será garantizado por los Estados miembros. Si el respeto a las franjas de salida ATFM es de un 80% o inferior durante 1 año, la unidad ATS del aeropuerto pasará la información sobre el incumplimiento y las medidas adoptadas a la Comisión.

CAPÍTULO 5: Descripción del modelo

Para llevar a cabo la resolución del problema que plantearemos en el apartado 5, realizaremos un modelo matemático de programación lineal entera, basado en el modelo de programación lineal entera para un solo aeropuerto (Araúzo, 2018).

Los parámetros necesarios para definir el problema se pueden clasificar en varias categorías: parámetros generales, parámetros sobre los vuelos, parámetros sobre el aeropuerto y parámetros de conexión entre los aeropuertos.

5.1. Modelo de Simulación.

A continuación se describirá la lógica utilizada para el modelo de simulación utilizado para la resolución de los experimentos de este TFG:

La estructura general del modelo consta de tres partes principales: (i) las entradas al modelo; (ii) la simulación del modelo; y (iii) las salidas del modelo:

- Las entradas al entorno de simulación son las combinaciones de los mecanismos de asignación primaria y secundaria de franjas horarias. Es posible simular diferentes combinaciones de entradas debido a la existencia de diferentes escenarios (variación en el número de aeropuertos, en el número de vuelos, en la demanda de viajes o en el precio del combustible).
- El núcleo del modelo de simulación está compuesto por un modelo basado en un agente (ABM) que comprende a 4 tipos de agentes: el coordinador de asignación de franjas horarias; los aeropuertos; las aerolíneas y los pasajeros.
- Las salidas del modelo son un conjunto de indicadores (KPIs) que están influenciados por los mecanismos de asignación de las franjas horarias, cuyo fin es facilitar la evaluación y comparación de los diferentes escenarios.

La lógica del modelo de simulación viene determinada por el siguiente diagrama:

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Descripción del modelo

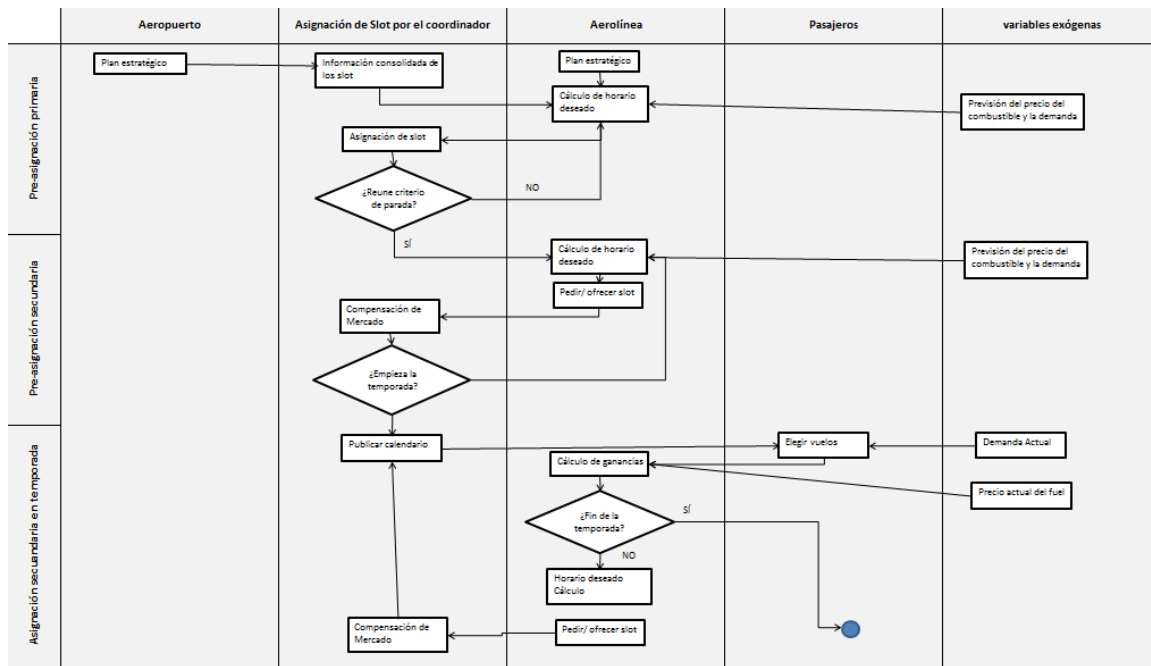


Ilustración 18: Lógica general del modelo de simulación. (R. Herranz, 2015).

El programa que permite la simulación de diferentes escenarios incluye subastas con diferentes mecanismos de actualización de precios walrasiano. En las subastas walrasianas, los precios suben si la demanda es mayor que la capacidad y baja si la demanda es menor que la capacidad.

Para los aeropuertos coordinados, hay dos conjuntos de restricciones de capacidad: (i) número máximo de llegadas, salidas y total por slot a lo largo del periodo establecido, y (ii) número máximo de slot de llegada, salida y total durante varios intervalos de tiempo de coordinación (sucesivos).

En cada paso de la simulación las aerolíneas toman las siguientes decisiones y acciones: (i) calcular su horario deseado, es decir, un conjunto de rutas que la aerolínea le gustaría volar; (ii) definir las tarifas para ese horario establecido; (iii) estimar la cuota de mercado que capturará (por tanto el beneficio esperado); y (iv) decidir que slot solicitaran y a qué precio máximo.

Los resultados finales del modelo son unos indicadores que evaluarán las utilidades, beneficios y el desempeño de los mecanismos de asignación de slots.

5.2. Parámetros generales.

T: este parámetro indica el número de franjas horarias o slots disponibles en cada aeropuerto para programar las operaciones. Cada franja horaria será $t=(0,1,2,\dots,T-1)$.

5.3. Parámetros de los vuelos.

- M: indica el número de vuelos que las compañías solicitan operar en un aeropuerto. Se denominan por $m= (1,2,\dots, M)$. Necesitarán dos franjas horarias, una para la salida y otra para la llegada.
- gu_m: Indica la Utilidad bruta que se obtiene en cada vuelo m. La aerolínea obtendría esta utilidad si el vuelo se programase en sus franjas preferidas (franjas solicitadas).
- lart_m: es la franja horaria mínima solicitada por la aerolínea para la llegada del vuelo m.
- rart_m: indica la franja horaria máxima solicitada por la aerolínea para el aterrizaje del vuelo.
- ldrt_m: es la franja horaria mínima solicitada por la aerolínea para la salida del vuelo m.
- rdrt_m: indica la franja horaria máxima solicitada por la aerolínea para el despegue del vuelo.
- mtb_m: es el tiempo mínimo (en franjas horarias) que tiene que pasar entre la salida y la llegada de un vuelo.
- cab_m: indica la penalización (coste) que tendrá un vuelo por programar su llegada antes de la franja horaria mínima deseada para el aterrizaje.
- caa_m: indica la penalización (coste) que tendrá un vuelo por programar su llegada después de la franja horaria máxima deseada para el aterrizaje.
- cdb_m: indica la penalización (coste) que tendrá un vuelo por programar su salida antes de la franja horaria mínima deseada para la salida.

- **cda_m**: indica la penalización (coste) que tendrá un vuelo por programar su salida después de la franja horaria máxima deseada para la salida.

Los costes de programar las operaciones se podrán calcular teniendo en cuenta los tiempos de llegada y salida de cada vuelo y los costes por adelantar o retrasar las llegadas o salidas de los mismos, denominado a estos costes como dca_{mt} (coste de desviación de llegada) y dcd_{mt} (coste de desviación de salida). De esta manera, en la subasta iterativa, cada compañía además de ver la demanda para cada franja horaria, podrá ver si le interesa operar un vuelo.

$$dca_{mt} = \begin{cases} cab_m \times (lart_m - t) & \text{si } t < lart_m \\ 0 & \text{si } lart_m \leq t \leq rart_m \\ caa_m \times (t - rart_m) & \text{si } t > rart_m \end{cases}$$

$$dcd_{mt} = \begin{cases} cdb_m \times (ldrt_m - t) & \text{si } t < ldrt_m \\ 0 & \text{si } ldrt_m \leq t \leq rdrt_m \\ cda_m \times (t - rdrt_m) & \text{si } t > rdrt_m \end{cases}$$

5.4. Parámetros sobre el aeropuerto.

Sobre el aeropuerto tendremos restricciones en el número de vuelos que pueden aterrizar y despegar por franja horaria, es decir, habrá una capacidad máxima de llegadas para una franja; una capacidad máxima de salidas y una capacidad máxima total (capacidad de movimientos).

- **H**: indica el número de restricciones de capacidad rodantes que se pueden aplicar sobre los intervalos de coordinación. Se indican por $h=(1,2,\dots H)$ y afecta a T_h franjas consecutivas.
- **ac_{ht}**: indica el número máximo permitido de llegadas en un conjunto de intervalos (t hasta $t+T_h-1$). Si $T_h=1$, solo se referirá a un intervalo.
- **dc_{ht}**: indica el número máximo permitido de salidas en un conjunto de intervalos (t hasta $t+T_h-1$). Si $T_h=1$, solo se referirá a un intervalo.

- **tc_{ht}**: indica el número máximo permitido de llegadas y salidas en un conjunto de intervalos (t hasta t+T_h-1). Si T_h= 1, solo se referirá a un intervalo.

5.5. Variables del problema

Con el fin de resolver el problema, se necesitarán las siguientes variables:

- **A**: indica el número de aeropuertos del problema.
- **ta_m**: es la franja horaria asignada para el aterrizaje del vuelo m.
- **td_m**: es la franja horaria asignada para el despegue del vuelo m.
- **σa_{tm}**: es una variable binaria que tomará el valor 1 cuando la llegada del vuelo m este programada en la franja t, y el valor 0 en el resto de franjas horarias.
- **σd_{tm}**: es una variable binaria que tomará el valor 1 cuando la salida del vuelo m este programada en la franja t, y el valor 0 en el resto de franjas horarias.

Estas dos últimas variables están relacionadas con las variables temporales:

$$\sum_{t=0}^{T-1} t * \sigma a_{tm} = ta_m$$

$$\sum_{t=0}^{T-1} t * \sigma d_{tm} = td_m$$

Dado que en este modelo la demanda no estará limitada y por tanto puede sobrepasar la capacidad de las franjas horarias de los aeropuertos, existirá la posibilidad de rechazar vuelos (programando los vuelos que den una mayor utilidad bruta y rechazando los vuelos que no sea posible programar y cuya utilidad sea baja):

- **σ_{tm}**: es una variable binaria que valdrá 1 si el vuelo es aceptado y 0 si no lo es.

5.6. Función objetivo.

La función objetivo es lineal, en ella se tratará de maximizar la utilidad total de los vuelos programados en cada aeropuerto (y la utilidad total de los aeropuertos que se programen). La utilidad total vendrá dada por la suma de todas las utilidades de los vuelos programados menos las penalizaciones o costos derivados de las desviaciones de programar los vuelos.

$$U = \sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^M \left(gu_m * \sigma_m - \sum_{t=0}^{T-1} (dca_{mt} * \sigma a_{mt} + dcd_{mt} * \sigma d_{mt}) \right)$$

A esta ecuación se le introduce un término de penalización (ctb_m) que tiene que ver con el tiempo que transcurre entre las dos operaciones, será tomado como una variable (tb_m) y para cada vuelo m cumplirá:

$$\sum_{t=0}^{T-1} t * \sigma d_{mt} - \sum_{i=0}^{T-1} t * \sigma a_{mt} - fk_m * tb_m = 0$$

Se considerará un coste por franja horaria ctg_m asociado al tiempo que permanezca el avión en el aeropuerto. Por tanto, la utilidad total será:

$$U = \sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^M \left(gu_m * \sigma_m - \sum_{t=0}^{T-1} (dca_{mt} * \sigma a_{mt} + dcd_{mt} * \sigma d_{mt}) - ctb_m * tb_m \right)$$

El precio de cada franja crece o disminuye dependiendo de la demanda que tenga dicha franja horaria frente a la capacidad de la misma. Si aumenta la demanda, aumenta el precio de la franja. Gracias a esto se puede recoger información sobre la demanda de cada recurso (y las compañías pueden ver en cada iteración de la subasta si les sigue interesando el slot o no).

5.7. Restricciones

Será necesario tener en cuenta ciertas restricciones para que el problema se ajuste lo más posible a la realidad:

La primera será la obligación de que todos los vuelos cuenten con un aeropuerto de salida y otro de llegada:

$$\sigma_m = \sum_{t=0}^{T-1} \sigma a_{mt} = \sum_{t=0}^{T-1} \sigma d_{mt}$$

Para $m=\{1,2,\dots,M\}$

En la siguiente restricción se obligará a que la resta entre la hora de la segunda operación con el tiempo de estancia en el aeropuerto y con la hora de llegada sea cero.

$$\sum_{t=0}^{T-1} t * \sigma d_{mt} - \sum_{i=0}^{T-1} t * \sigma a_{mt} - fk_m * tb_m = 0$$

Para $m=\{1,2,\dots,M\}$

5.7.1. Restricciones de Capacidad.

El número máximo de salidas, llegadas y operaciones totales en un slot o en una serie de slot estará condicionado por las características físicas del aeropuerto. Para que las restricciones se cumplan es necesario que:

El número máximo de llegadas en una serie de slot consecutivos en cada uno de los aeropuertos (desde t hasta $t+T-1$) podrá ser como máximo ac_{ht} .

$$\sum_{m=1}^M \sum_{T=t}^{t+T_h-1} \sigma a_{mt} \leq ac_{ht}$$

Para $h= 1,2,\dots,H$; $t= 0,1,2,\dots, T-T_h$

Del mismo modo, el número máximo de salidas en una serie de slot consecutivos en cada uno de los aeropuertos (desde t hasta $t+T-1$) podrá ser como máximo dc_{ht} .

$$\sum_{m=1}^M \sum_{T=t}^{t+T_h-1} \sigma d_{mt} \leq dc_{ht}$$

Para $h=1,2,\dots,H$; $t=0,1,2,\dots,T-T_h$

Y finalmente, el número máximo de movimientos totales en una serie de slot consecutivos en cada uno de los aeropuertos (desde t hasta $t+T-1$) podrá ser como máximo tc_{ht} .

$$\sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^{t+T_h-1} (\sigma a_{mt} + \sigma d_{mt}) \leq tc_{ht}$$

5.7.2. Modelo Completo

Agrupando las restricciones y la función objetivo en todos los aeropuertos, y tras realizar la relajación lagrangiana descrita en (Araújo, 2018), el modelo queda:

$$\begin{aligned} \max_{\sigma_m, \sigma a_m, \sigma d_m} L_m \\ &= gu_m * \sigma_m - ctb_m * tb_m \\ &\quad - \sum_{t=0}^{T-1} ((dca_{mt} + pa_t) * \sigma a_{mt}, + (dcd_{mt} + pd_t) * \sigma d_{mt}) \end{aligned}$$

$$\sigma_m = \sum_{t=0}^{T-1} \sigma a_{mt}$$

$$\sigma_m = \sum_{t=0}^{T-1} \sigma d_{mt}$$

$$\sum_{t=0}^{T-1} t * \sigma d_{mt} = td_m$$

$$\sum_{t=0}^{T-1} t * \sigma a_{mt} = ta_m$$

$$td_m - ta_m - fk_m * tb_m = 0$$

$$tb_m - mtb_m * \sigma_m \geq 0$$

$$\sigma a_{mt}, \sigma d_{mt}, \sigma_m \in \{0,1\} \quad t=\{1,2,\dots, T-1\}$$

CAPÍTULO 6: Resultados de los experimentos.

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Resultados

En este apartado realizaremos varios ejemplos del problema planteado, con el fin de poder apreciar cómo afecta el aumento de vuelos en un aeropuerto al precio de las franjas horarias y a la utilidad del aeropuerto.

Se han realizado tres experimentos sobre dos aeropuertos, dichos aeropuertos tienen la misma capacidad, la diferencia entre los experimentos es el nivel de saturación del aeropuerto.

Los parámetros y restricciones para estos aeropuertos, en los tres primeros problemas son:

Datos	
Nº de franjas horarias	6
Nº de aeropuertos	2

Tabla 1: Datos

Aeropuerto 1			Aeropuerto 2		
Restricciones			Restricciones		
	franjas	vuelos		franjas	vuelos
Llegadas	1	2	Llegadas	1	2
	3	4		3	4
Salidas	1	2	Salidas	1	2
	3	4		3	4
Totales	1	3	Totales	1	3
	3	6		3	6

Tabla 2: Restricciones en las franjas horarias

Las compañías aéreas solicitan para cada vuelo dos franjas, dependiendo de las necesidades que estiman o pueden tener.

Cada vuelo tiene un coste dependiendo del tiempo que el avión este volando; un coste por las franjas aéreas que solicita en cada aeropuerto y en caso de que el aeropuerto no le asigne la franja horaria preferida, tendrá un coste de adelantar la salida y/o la llegada del vuelo.

Por lo que la compañía aérea, teniendo estos datos en cuenta verá si tiene beneficio o no le interesa operar ese vuelo. También es posible que debido a la saturación del aeropuerto, no sea posible programar todos los vuelos.

6.1. Caso 1: Dos aeropuertos.

En este ejemplo se van a programar seis rutas (vuelos). Las rutas solicitadas por las compañías aéreas son las siguientes:

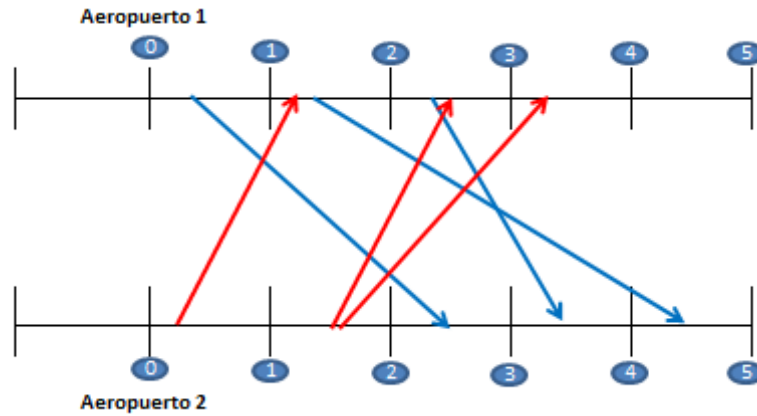


Ilustración 19: diagrama de vuelo caso1.

Sin embargo después de realizar las subastas combinatorias (ejecutando el programa) el resultado de asignación de las rutas es el siguiente:

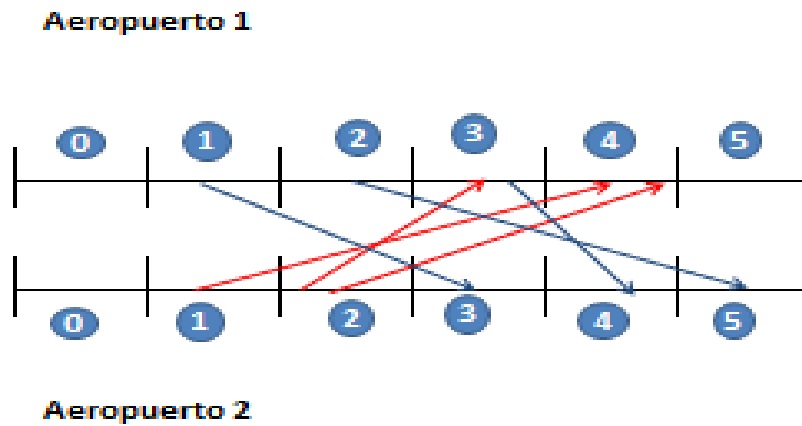


Ilustración 20: diagrama de vuelo caso1, resultados.

A pesar que los vuelos solicitados por las compañías aéreas en cada franja cumplían las restricciones de capacidad, al realizar la subasta el diagrama ha cambiado ligeramente puesto que la mayor utilidad y el mayor beneficio se consigue programando las operaciones como aparecen en Ilustración 20: diagrama de vuelo caso1, resultados. Y en Tabla 3:Caso1-aeropuerto1Tabla 4: Caso 1-Aeropuerto 2.

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Resultados

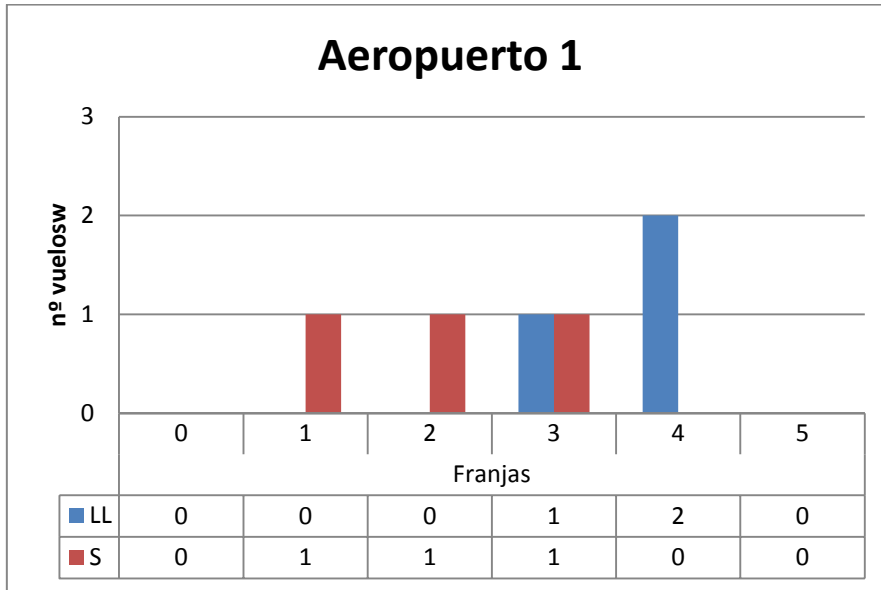


Tabla 3: Caso 1-aeropuerto 1

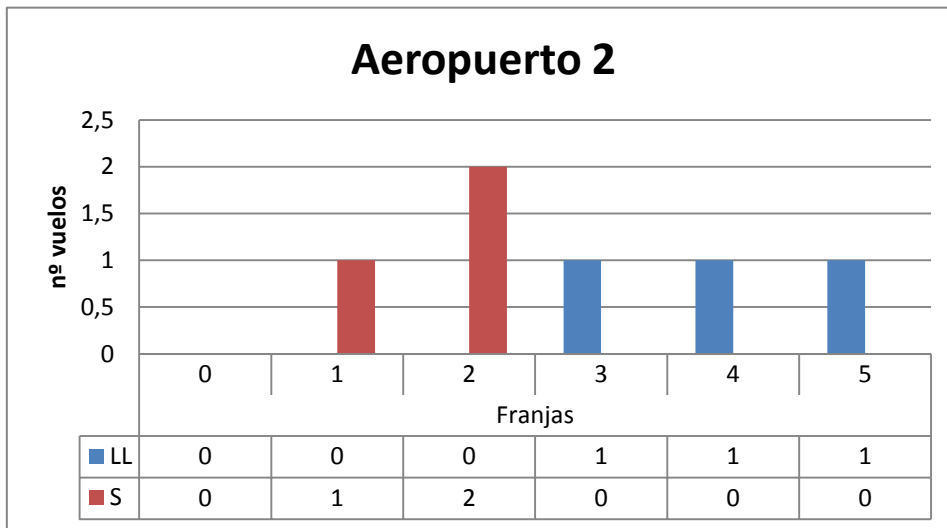


Tabla 4: Caso 1-Aeropuerto 2

Como podemos apreciar en las gráficas, los aeropuertos tienen capacidad suficiente para operar los seis vuelos programados. Esto significa que la oferta es mayor que la demanda, por tanto, el precio de las franjas horarias se mantiene muy bajo (0,0).

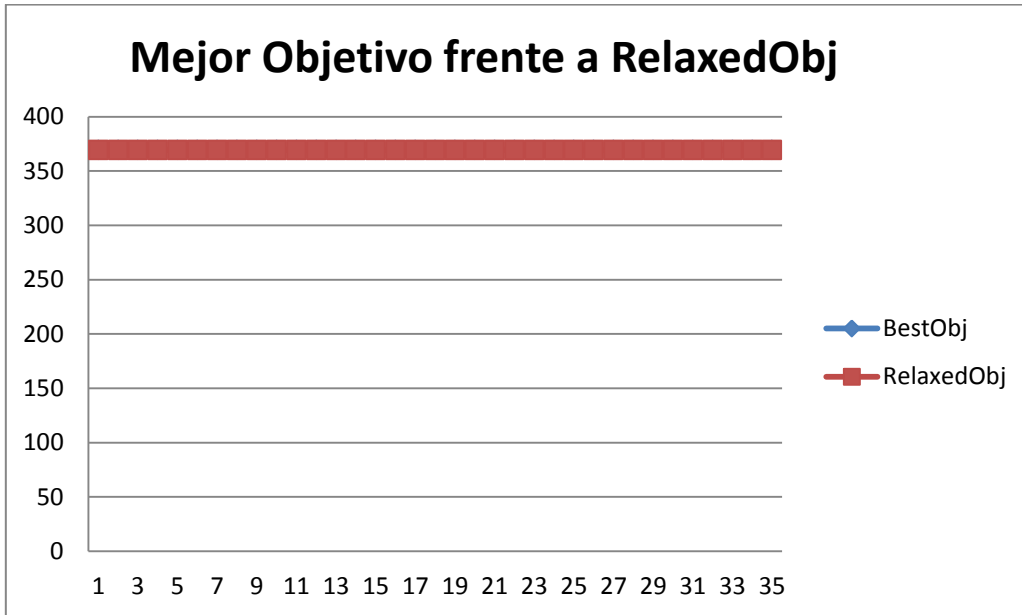


Ilustración 21: Mejores objetivos conseguidos frente a los Objetivos Relajados.

En la ilustración 20 se puede ver la diferencia entre el mejor objetivo en cada paso de la iteración y el objetivo relajado. Como se puede observar esta diferencia (GAP de dualidad) es cero lo que indica que se ha alcanzado la solución óptima. Al tratarse de un ejercicio sencillo (2 aeropuertos con pocos vuelos) es fácil obtener la solución óptima.

Si se compara el mejor objetivo con el Gap en porcentaje se puede apreciar que como el gap siempre es cero el mejor objetivo se mantiene constante (Ilustración 22: Mejor objetivo conseguido frente al GAP de dualidad.)



Ilustración 22: Mejor objetivo conseguido frente al GAP de dualidad.

La utilidad total de los aeropuertos (suma las utilidades de cada vuelo) es 402,0 y el objetivo de beneficio es de 369,5.

6.2. Caso 2: Dos aeropuertos.

En este ejemplo se programarán 10 rutas. Lo que provocará que ambos aeropuertos estén saturados. Además, el objetivo de beneficio es mayor (482), al operar más vuelos, y también la utilidad total (617), que es casi el doble (puesto que cuanto más se acerque el aeropuerto a su punto de saturación, en el cual la demanda es muy superior a la capacidad, mayor será su beneficio y la utilidad del aeropuerto).

Las rutas solicitadas por las compañías aéreas son las siguientes:

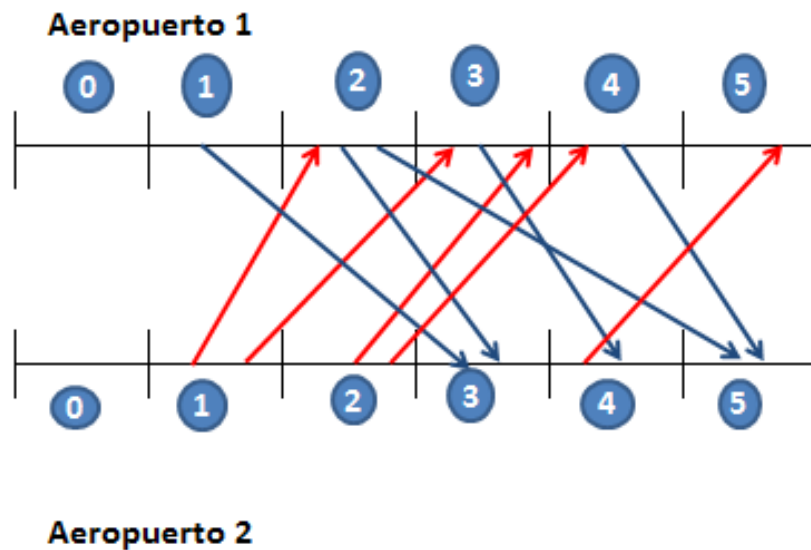


Ilustración 23: diagrama de rutas, caso 2.

Sin embargo, este diagrama no es posible puesto que no cumple las restricciones de capacidad en las franjas horarias dos y tres del aeropuerto 1. Mediante subastas combinatorias sucesivas, el resultado final de las rutas programadas cuyo beneficio y cuya utilidad son máximos es:

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Resultados

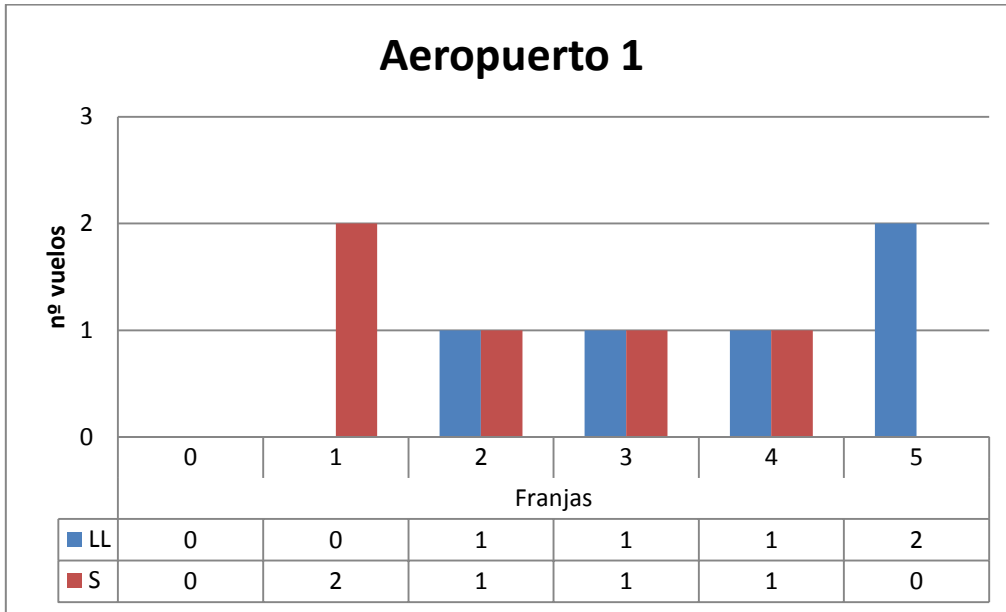


Tabla 5: Caso 2-Aeropuerto 1

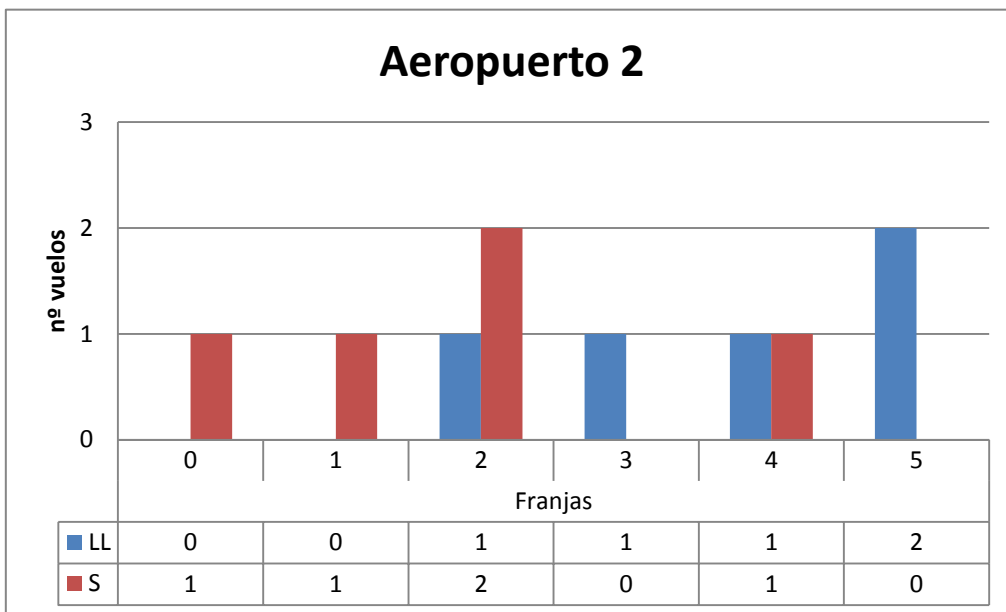


Tabla 6: Caso 2- Aeropuerto 2

Teniendo en cuenta las restricciones y viendo los gráficos de ambos aeropuertos, podemos apreciar que en el aeropuerto 1 las franjas más saturadas son: la dos, tres, cuatro y cinco.

En el siguiente gráfico podemos ver la evolución del precio de la franja dos en las sucesivas rondas de la subasta hasta que llega a su precio final, en el que la capacidad de la franja se iguala a la demanda. Además, con este precio (8,393) se maximiza la función objetivo y se consigue una buena utilidad. Se puede ver

en el gráfico que el precio de esta franja es igual para las salidas que para las llegadas. Sin embargo, esto no tiene por qué ser así.

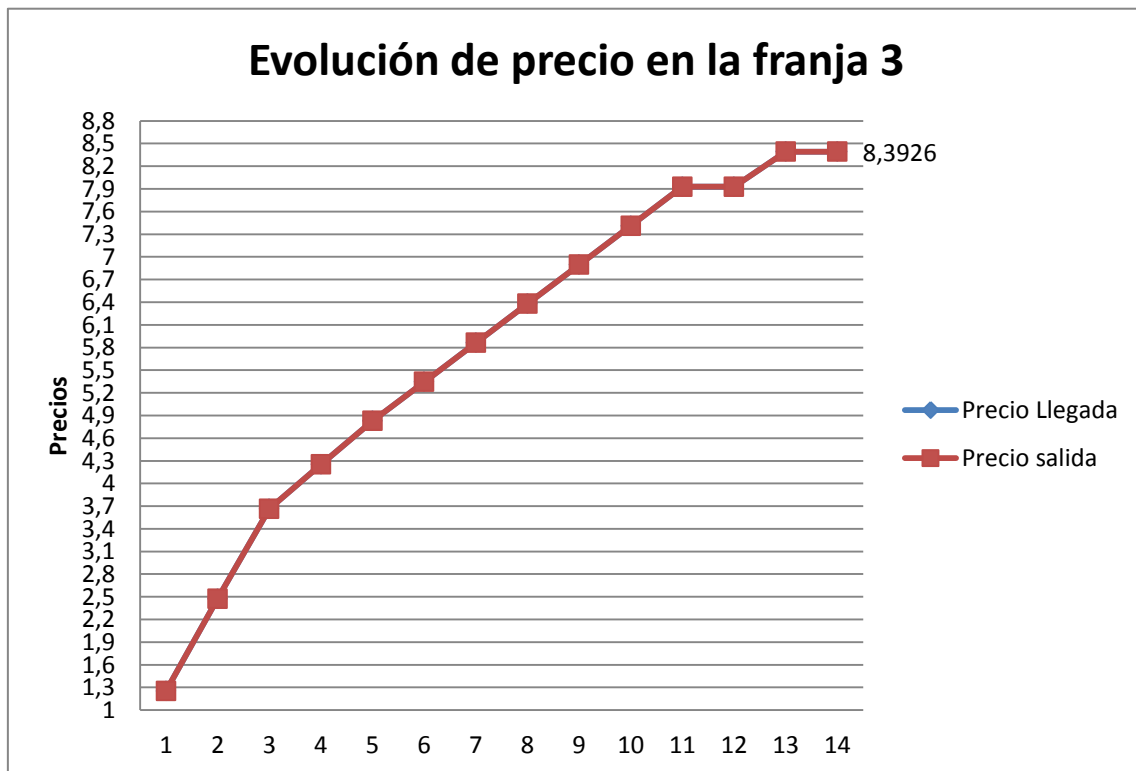


Tabla 7: evolución de los precios de la franja 3 del Aeropuerto 1.

Las franjas centrales del aeropuerto uno están bastante saturadas, esto lo podemos apreciar en la tercera, que es una de las franjas en las que el precio de las salidas y las llegadas es más alto. Además, se puede apreciar que el precio de llegada es distinto al de salida. Y, a diferencia de la franja anterior cuya tendencia crece o se mantiene en ciertos tramos, en la franja tres podemos ver que en la ronda doce tiene un pequeño descenso. Este descenso puede deberse a que en un momento dado la capacidad ha superado la demanda en dicha franja.

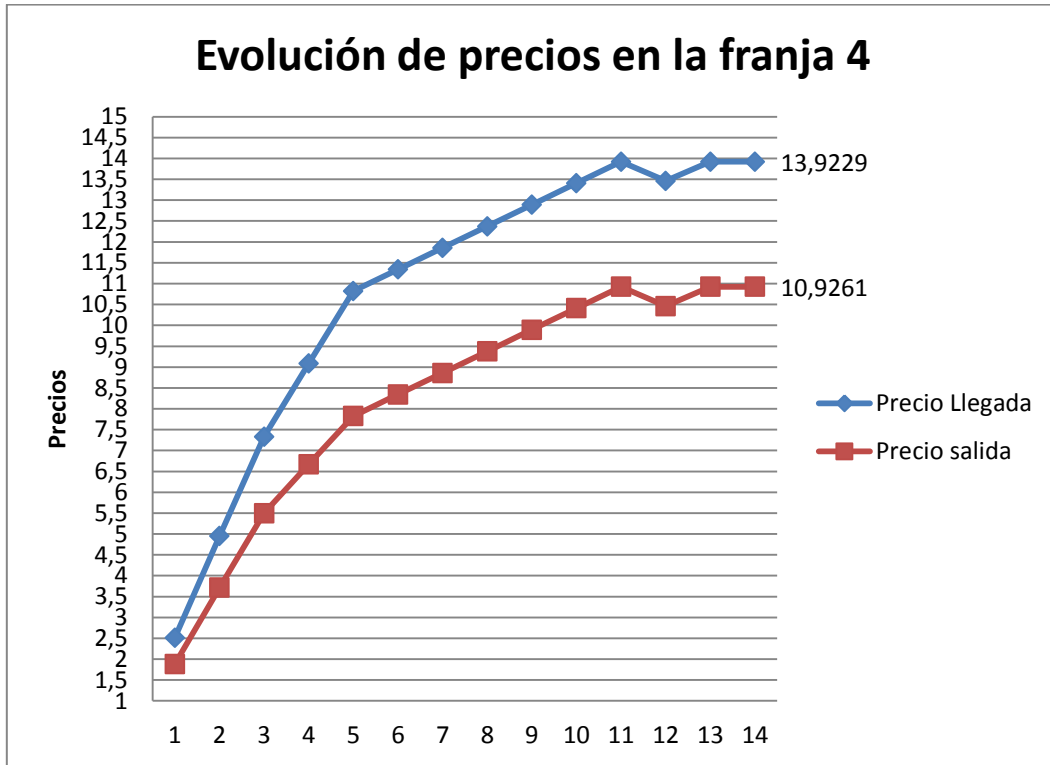


Ilustración 24: Evolución de los precios de la franja 3 del aeropuerto 1

Por último, en el aeropuerto dos se puede apreciar que existe poca saturación por lo que el precio de las franjas, sube poco y se mantiene bastante constante. Se puede apreciar que el precio de la mayor parte de las franjas del aeropuerto dos es inferior al precio de las mismas franjas en el aeropuerto tres.

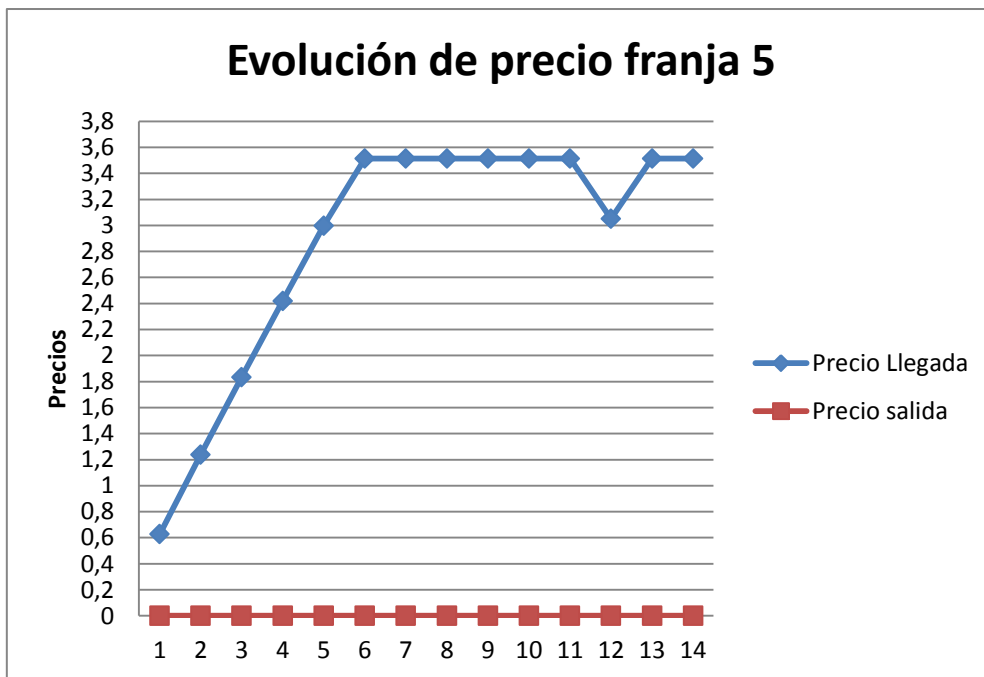


Ilustración 25: evolución del precio de la franja 4 en el aeropuerto 2.

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Resultados

Los precios finales de las franjas en el aeropuerto uno quedan:

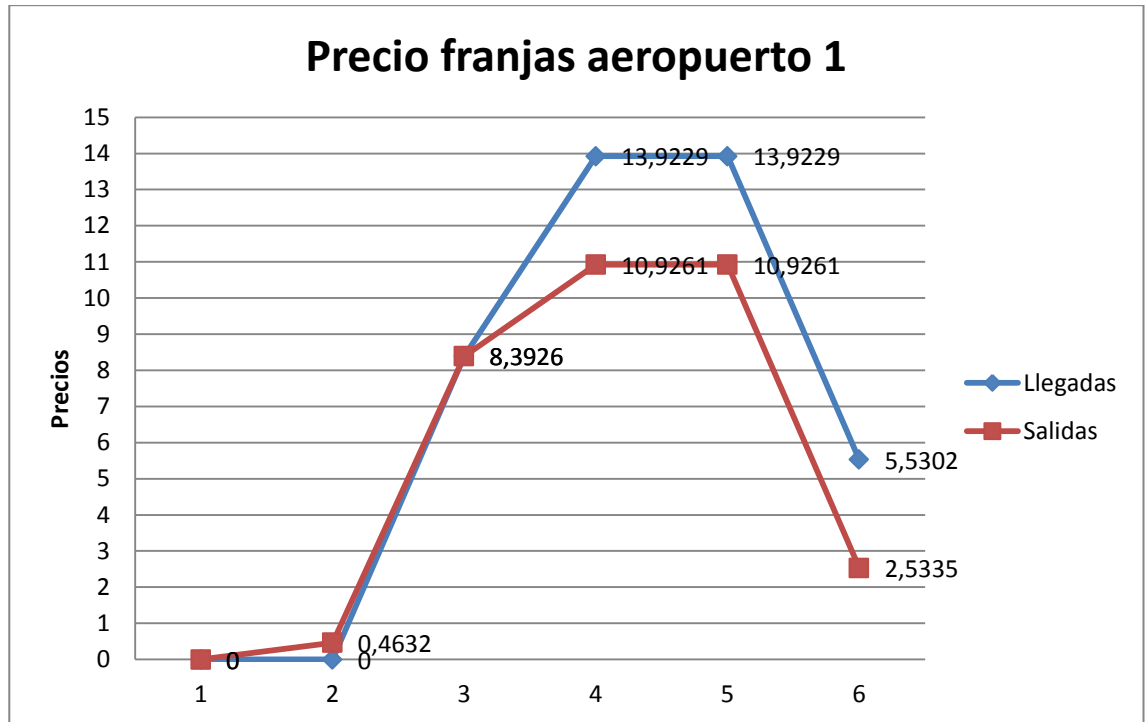


Ilustración 26: precios franjas aeropuerto 1 (Caso 2).

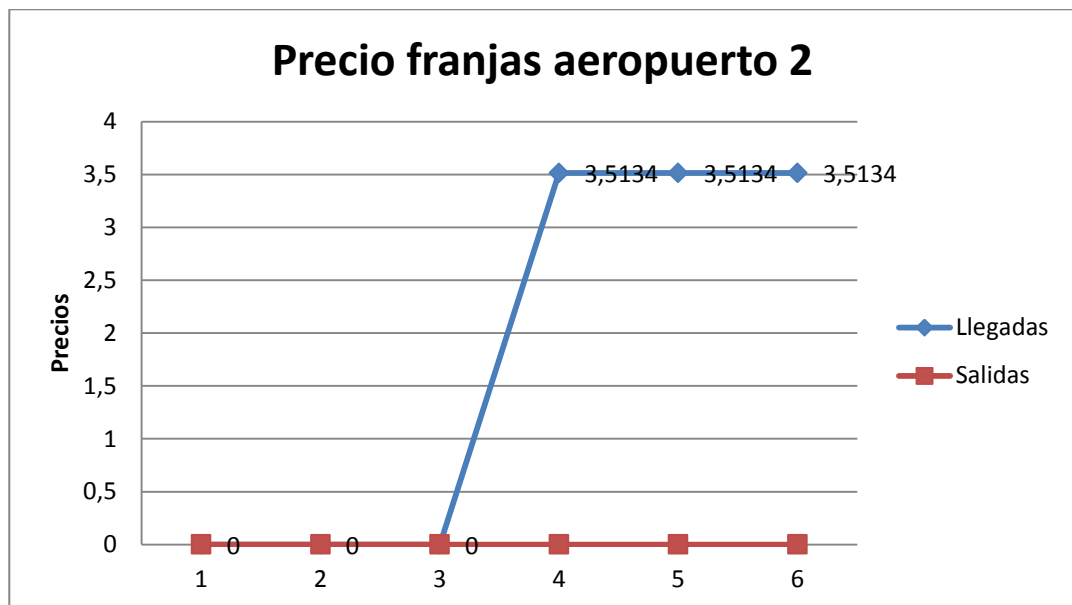


Ilustración 27: Precios franjas aeropuerto 2 (caso 2).

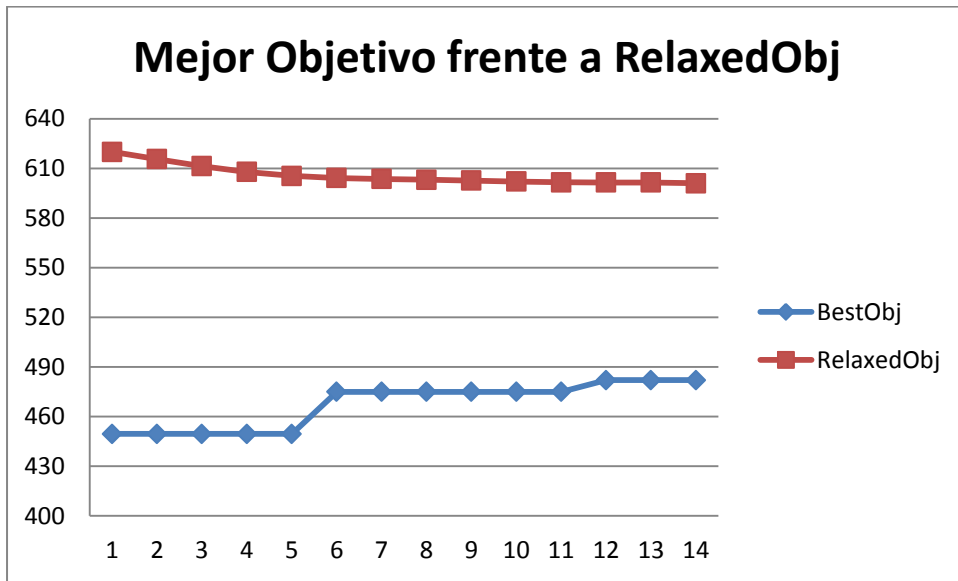


Ilustración 28: Mejor Objetivo frente a Objetivo relajado

En la ilustración anterior se puede ver la diferencia entre el mejor objetivo en cada paso de la iteración y el objetivo relajado. Como se puede observar esta diferencia (GAP de dualidad) es más grande al inicio de las iteraciones y va disminuyendo, lo que indica que se acerca a la solución óptima, sin embargo no llega a ser cero.

Como este problema es un poco más complicado que el anterior, no se llega a la solución óptima, esto da una idea de la complejidad que implica coordinar múltiples aeropuertos y vuelos.

Si se compara el mejor objetivo con el Gap en porcentaje se puede apreciar que cuando el mejor objetivo aumenta el gap disminuye (no llega a ser cero por lo que no se alcanza la solución óptima si no la mejor solución que el programa ha sido capaz de encontrar).

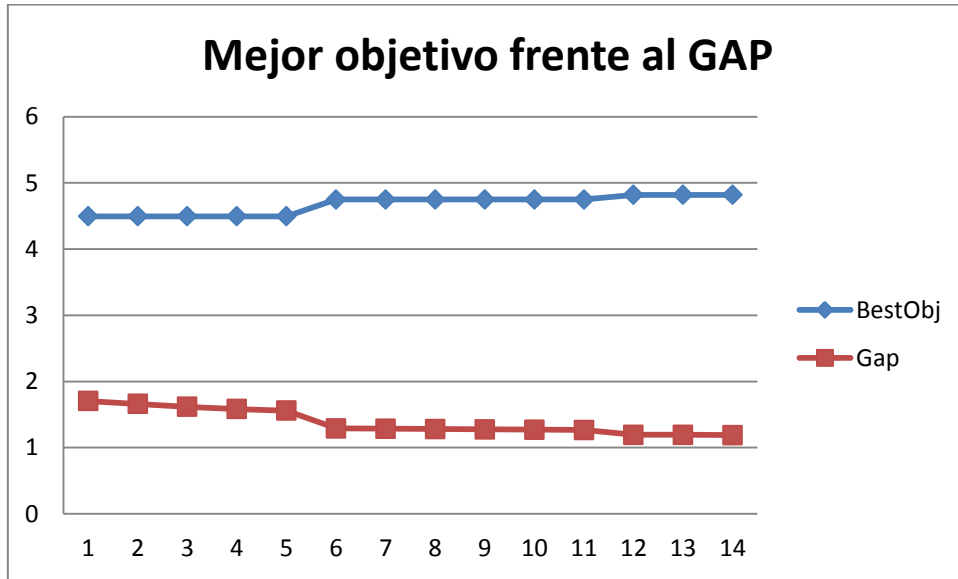


Ilustración 29: Mejor objetivo conseguido frente al GAP de dualidad.

6.3. Caso 3: Dos aeropuertos.

En este ejemplo se programarán 11 rutas. Lo que provocará que ambos aeropuertos estén más saturados. Dado que debido a la saturación el precio de las franjas horarias ha subido demasiado para algunas aerolíneas y estas no pueden asumir seguir pujando por su franja horaria preferida.

Las rutas solicitadas por las compañías aéreas son las siguientes:

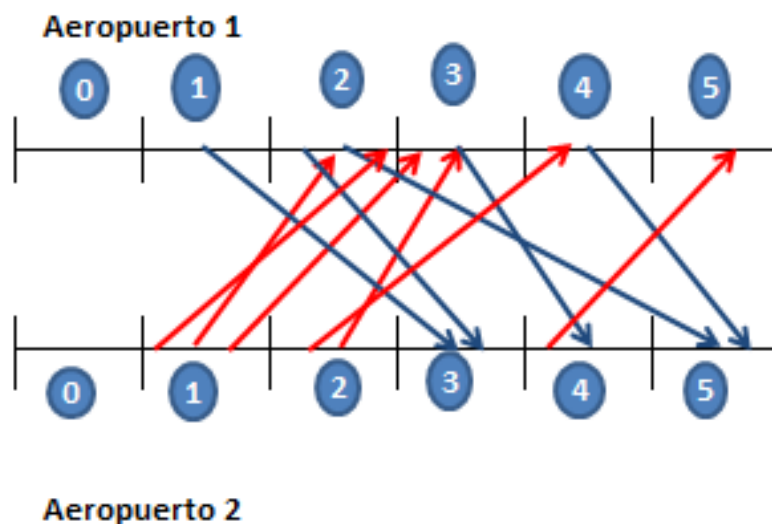


Ilustración 30: Diagrama rutas solicitadas, caso 3.

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Resultados

Sin embargo, este diagrama no es posible puesto que no cumple las restricciones de capacidad en las franjas horarias dos y tres del aeropuerto 1 y en la franja 1 del aeropuerto 2. Mediante subastas combinatorias sucesivas, el resultado final de las rutas programadas cuyo beneficio y cuya utilidad son máximos es:

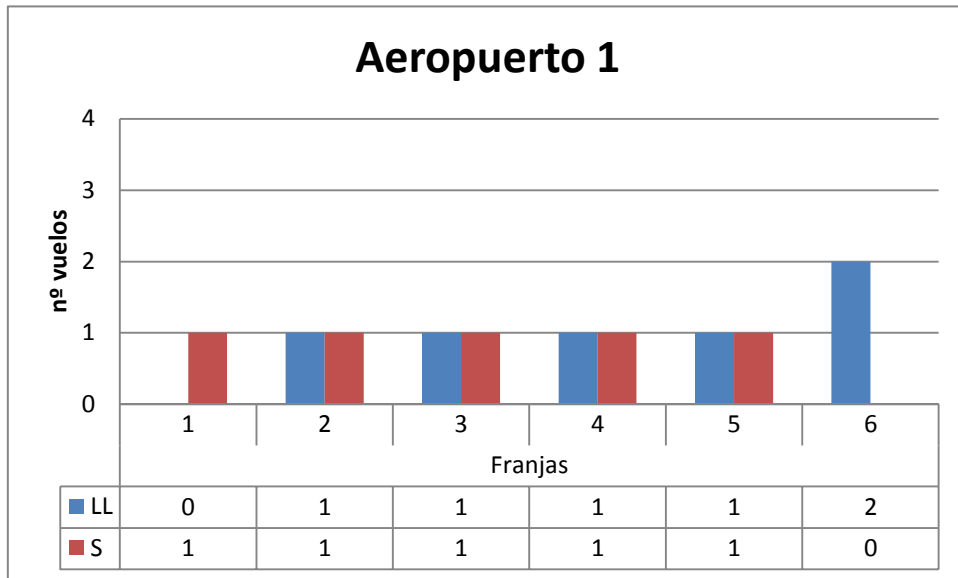


Ilustración 31: Caso 3- Aeropuerto 1.

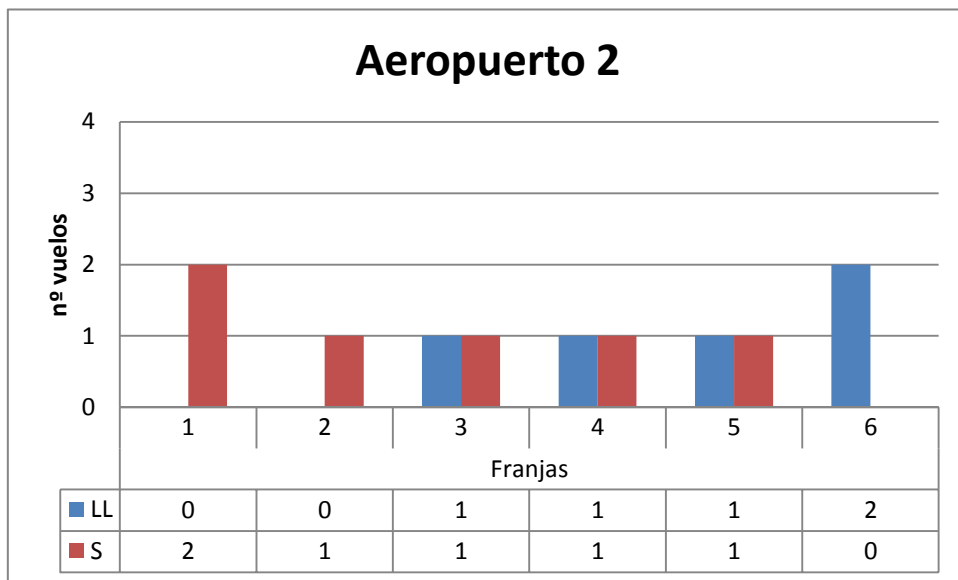


Ilustración 32: Caso 3- Aeropuerto 2.

Los vuelos cancelados serán: ruta 5 (vuelo que sale del aeropuerto 2, de la franja 5 y llega al aeropuerto uno a la franja 6) y el vuelo de la ruta 9 (vuelo que sale del aeropuerto 1, de la franja 4 y llega al aeropuerto uno a la franja 5).

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Resultados

Como podemos apreciar en el gráfico la franja más saturada es la franja 4 del aeropuerto 1. Los precios que tienen sus aterrizajes y despegues son los más elevados de ambos aeropuertos.

En la siguiente gráfica se puede apreciar la evolución de los precios en la franja 4 del aeropuerto 1:

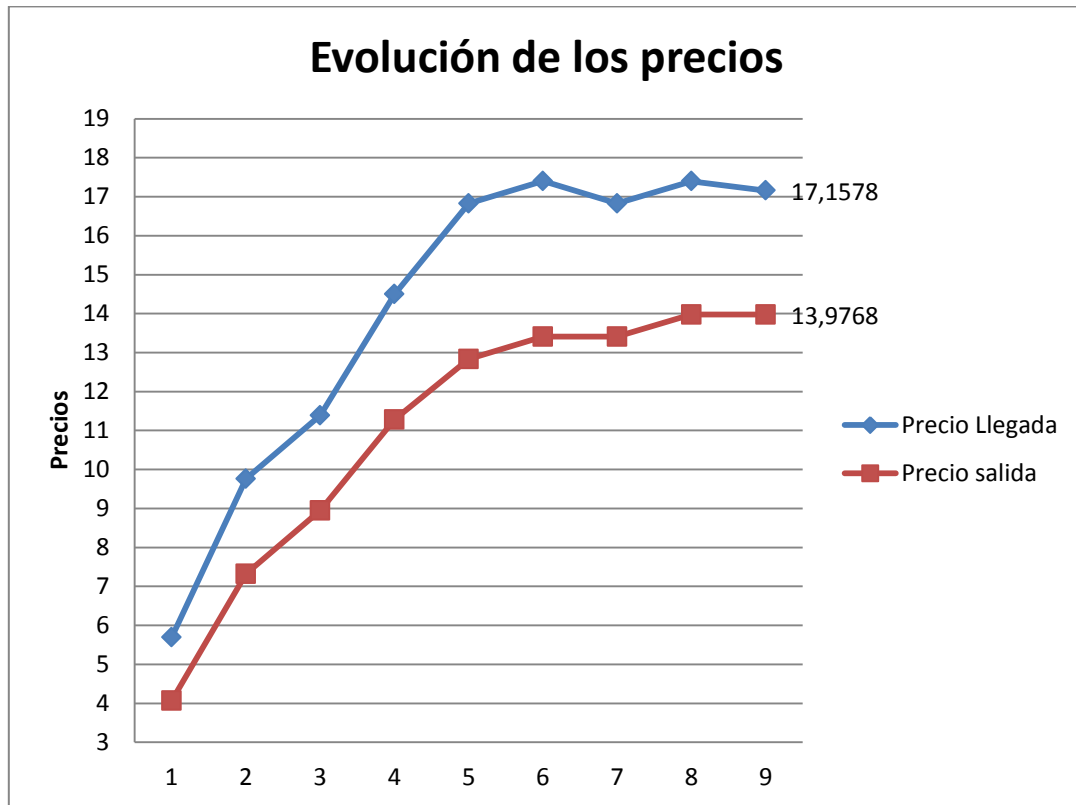


Ilustración 33: Evolución de los precios de la franja 4, aeropuerto 1 (caso 3).

En las dos siguientes gráficas se puede ver a través de los precios el nivel de saturación de cada franja en ambos aeropuertos:

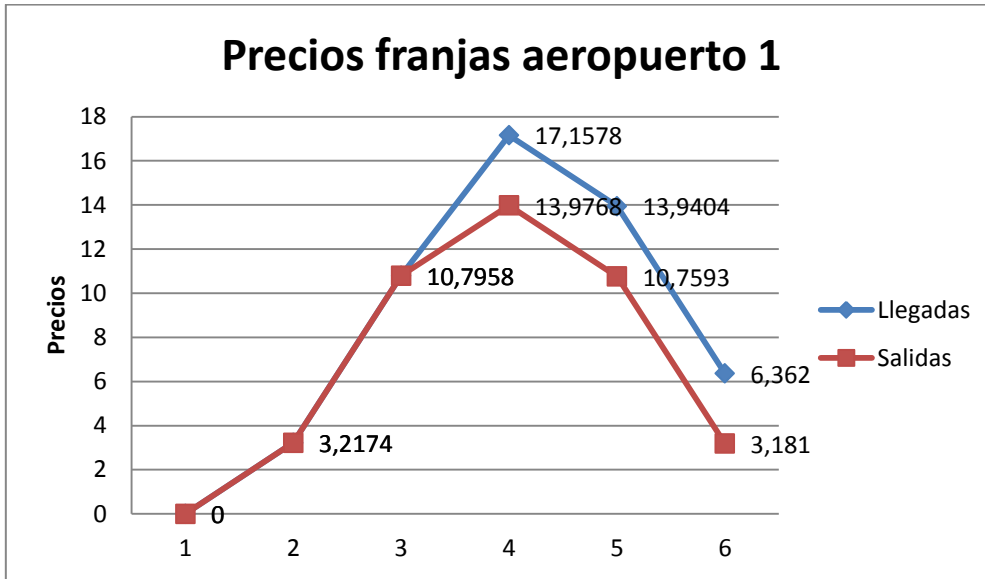


Ilustración 34: precios finales franjas aeropuerto 1.

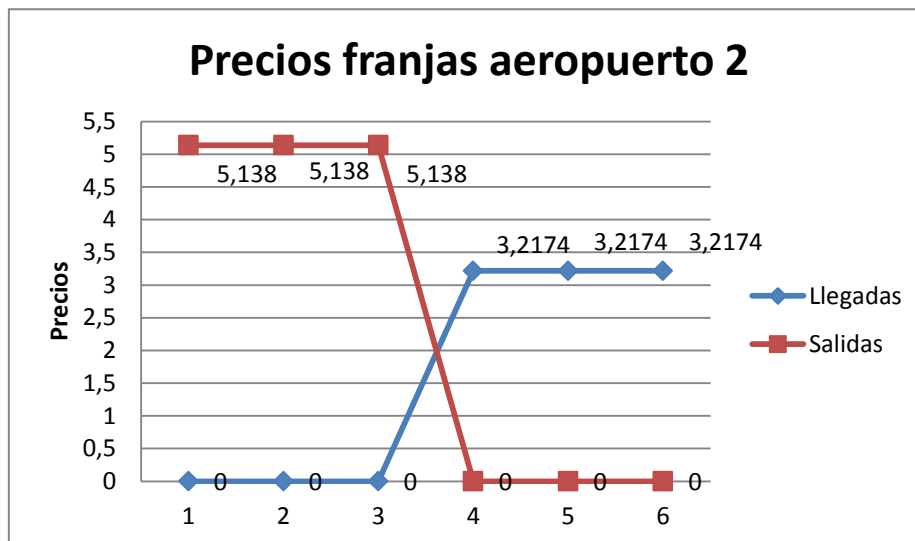


Ilustración 35: Precios finales franjas aeropuerto 2.

En el aeropuerto dos existe menos saturación que en el aeropuerto uno, sobre todo en las primeras franjas para las llegadas y en las últimas para las salidas.

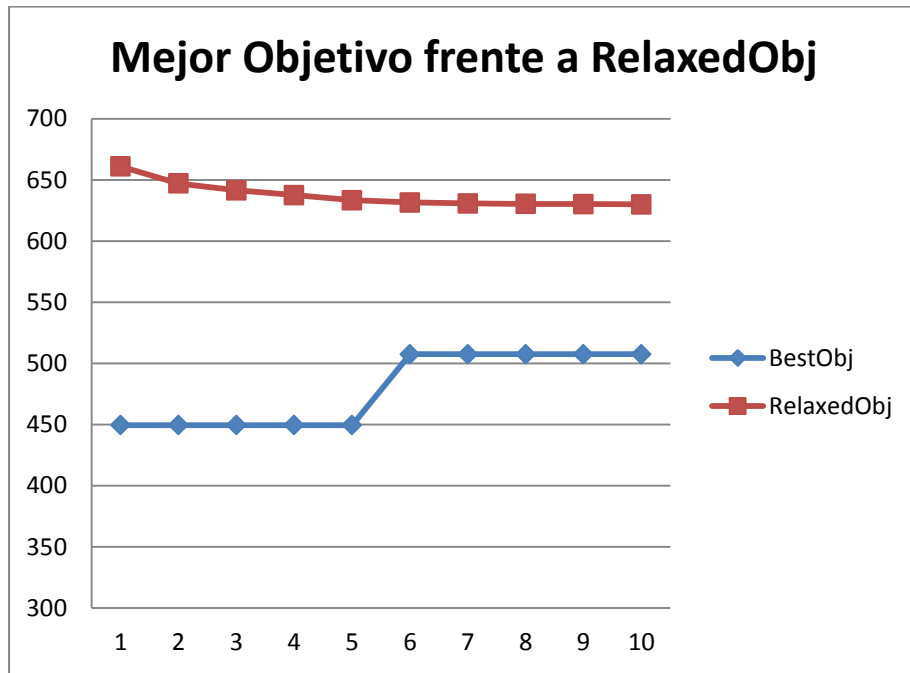


Ilustración 36: Mejores objetivos conseguidos frente a los Objetivos Relajados.

En la ilustración 35 se puede ver la diferencia entre el mejor objetivo en cada paso de la iteración y el objetivo relajado. Como se puede observar esta diferencia (GAP de dualidad) es más grande al inicio de las iteraciones y va disminuyendo, lo que indica que se acerca a la solución óptima, sin embargo no llega a ser cero.

Como este problema es un poco más complicado que el anterior, no se llega a la solución óptima, esto da una idea de la complejidad que implica coordinar múltiples aeropuertos y vuelos.

Si se compara el mejor objetivo con el Gap en porcentaje se puede apreciar que cuando el mejor objetivo aumenta el gap disminuye (no llega a ser cero por lo que no se alcanza la solución óptima si no la mejor solución que el programa ha sido capaz de encontrar).

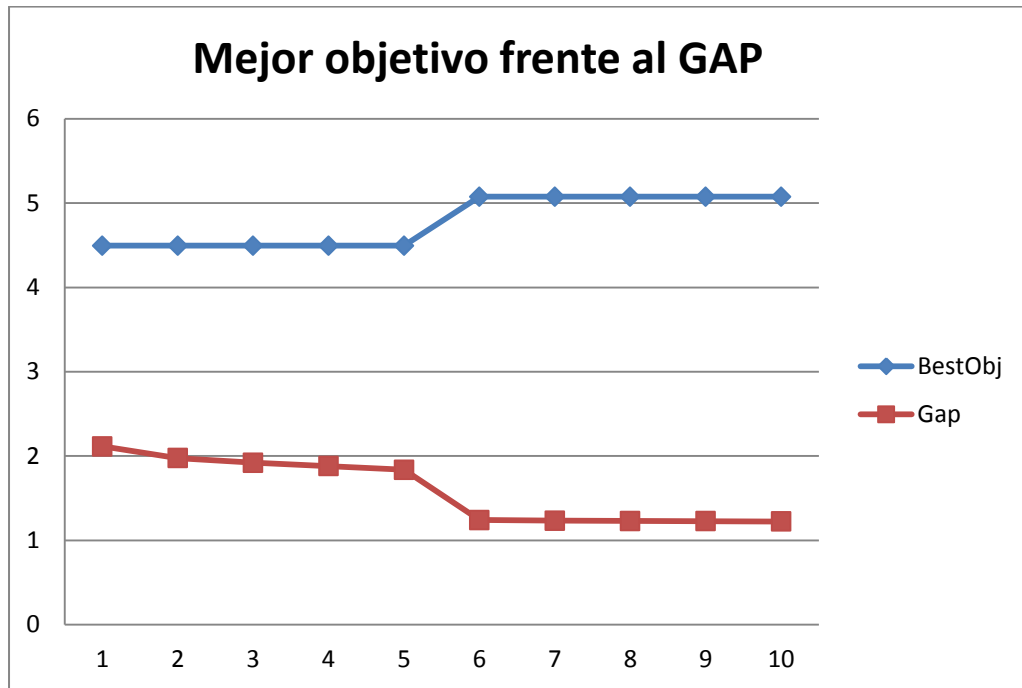


Ilustración 37: Mejor objetivo conseguido frente al GAP de dualidad.

6.3. Caso 4: Cuatro aeropuertos.

En el siguiente experimento plantaremos un problema más grande, con cuatro aeropuertos. El aeropuerto uno será el principal (el aeropuerto con más tráfico) y los otros tres aeropuertos (secundarios) tendrán la mayor parte de sus rutas con el aeropuerto 1 y alguna entre ellos.

Los parámetros y datos para estos cuatro aeropuertos para este caso son:

Datos	
Nº de franjas horarias	6
Nº rutas/vuelos	19
Nº de aeropuertos	4

Tabla 8: Datos generales del caso 4.

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Resultados

Aeropuerto 1			Aeropuerto 2		
Restricciones			Restricciones		
	franjas	vuelos		franjas	vuelos
Llegadas	1	2	Llegadas	1	2
	3	5		3	4
Salidas	1	2	Salidas	1	2
	3	5		3	4
Totales	1	3	Totales	1	3
	3	7		3	6

Tabla 9: Restricciones de los aeropuertos 1 y 2, caso 4.

Aeropuerto 3			Aeropuerto 4		
Restricciones			Restricciones		
	franjas	vuelos		franjas	vuelos
Llegadas	1	2	Llegadas	1	2
	3	4		3	4
Salidas	1	2	Salidas	1	2
	3	4		3	4
Totales	1	3	Totales	1	3
	3	6		3	6

Tabla 10: Restricciones de los aeropuertos 3 y 4, caso 4.

Las rutas posibles entre los aeropuertos vienen indicadas por el esquema de la siguiente ilustración, en la cual se basan las compañías aéreas para solicitar las rutas que necesitan programar:

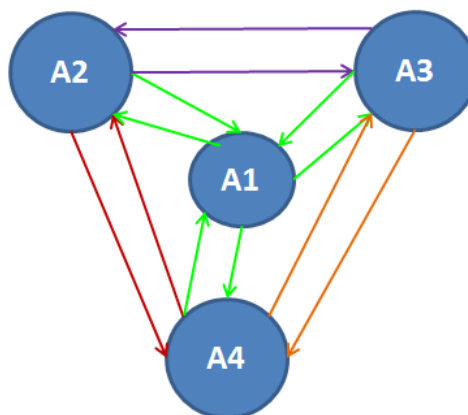


Ilustración 38: Esquema de rutas entre los aeropuertos, caso 4.

Las rutas solicitadas por las compañías aéreas están reflejadas en el siguiente diagrama en el que aparecen los cuatro aeropuertos:

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Resultados

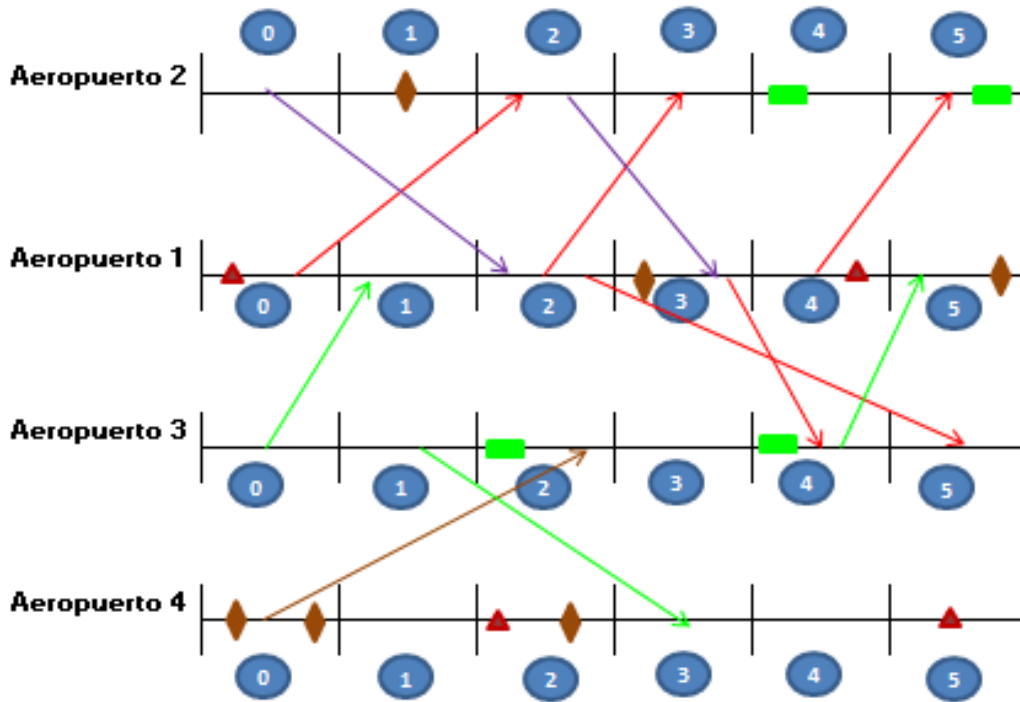


Ilustración 39: Diagrama de rutas, caso 4.

Leyenda	
vuelos que salen del A1	▲
vuelos que salen del A2	●
vuelos que salen del A3	■
vuelos que salen del A4	◆

Tabla 11: Leyenda diagrama de rutas, caso 4.

Como se puede apreciar en el diagrama (teniendo en cuenta las restricciones de: Tabla 9: Restricciones de los aeropuertos 1 y 2, caso 4. Tabla 10: Restricciones de los aeropuertos 3 y 4, caso 4.) Hay ciertas franjas de los aeropuertos secundarios que están saturadas, lo que se verá reflejado en los precios y podemos ver que el aeropuerto 1 (principal) está bastante saturado puesto que en la mayoría de sus franjas la demanda supera a la capacidad del mismo.

Sin embargo, este diagrama no es posible puesto que no cumple las restricciones de capacidad en varias franjas horarias de los aeropuertos 1, 2, 3 y 4. Mediante subastas combinatorias sucesivas, el resultado final de las rutas programadas cuyo beneficio y cuya utilidad son máximos (cumpliendo las restricciones) es:

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Resultados

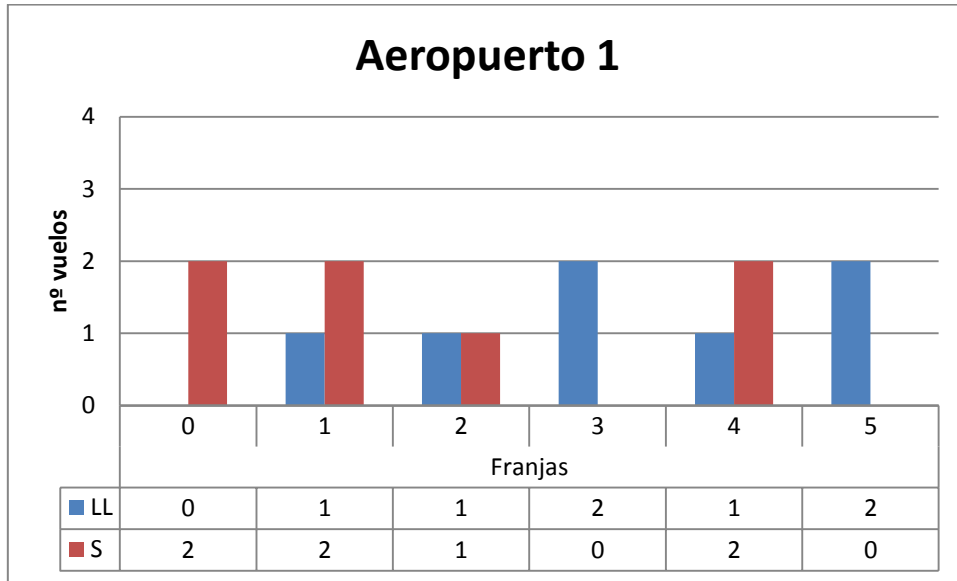


Ilustración 40: Diagrama de llegadas y salidas del aeropuerto 1.

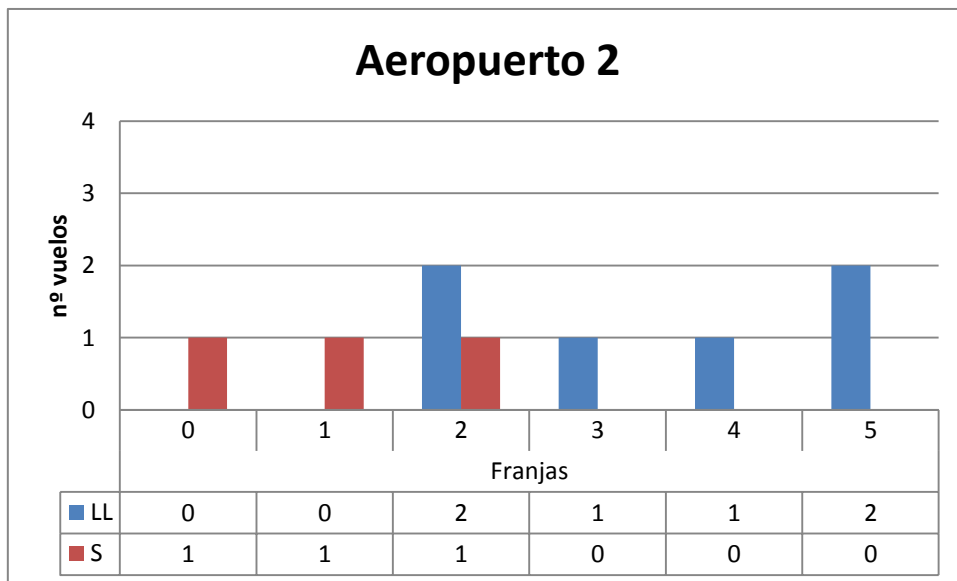


Ilustración 41: Diagrama de llegadas y salidas del aeropuerto 2.

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Resultados

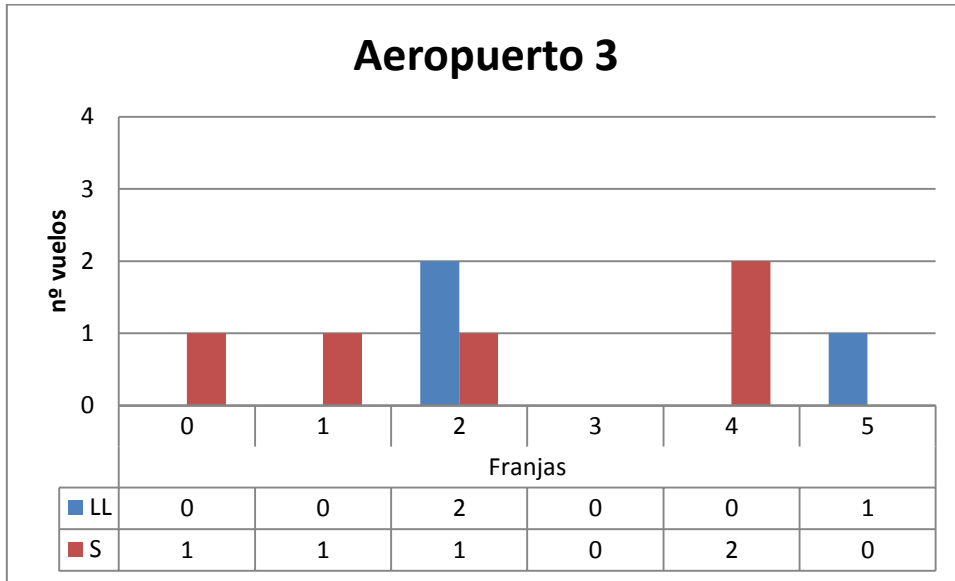


Ilustración 42: Diagrama de llegadas y salidas del aeropuerto 3.

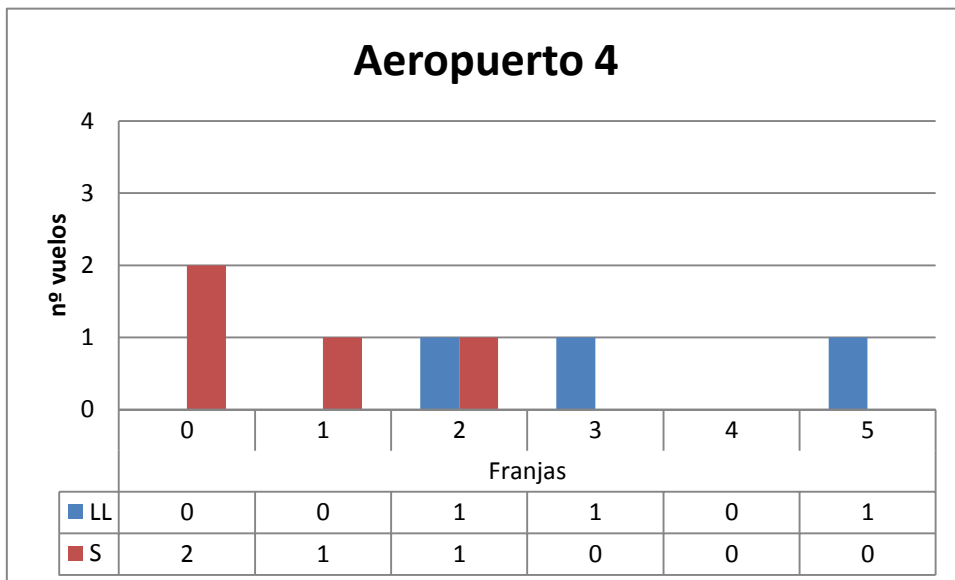


Ilustración 43: Diagrama de llegadas y salidas del aeropuerto 4.

Con los 4 gráficos anteriores nos podemos hacer una idea del nivel de saturación de las franjas horarias en cada aeropuerto: se puede apreciar que el aeropuerto 1 está al máximo de su capacidad (teniendo en cuenta las restricciones mencionadas anteriormente), las franjas horarias más saturadas del aeropuerto dos son la 2 y la 4, del aeropuerto 3 las más saturadas son la 2 y la 4 y del aeropuerto 4 (el menos saturado) son las franjas 0 y 2.

La saturación de estas franjas mencionadas con anterioridad se puede ver reflejada en los precios de dichas franjas horarias (en cómo evolucionan en las sucesivas subastas):

Respecto al aeropuerto 1 las franjas 2,3,4 y 5 han sufrido un gran aumento de sus precios (tanto de slot para aterrizaje como para despegue, en algunos de los gráficos coinciden los precios de llegada y salida) debido a que las solicitudes por parte de las compañías aéreas de estas franjas es superior a su capacidad.

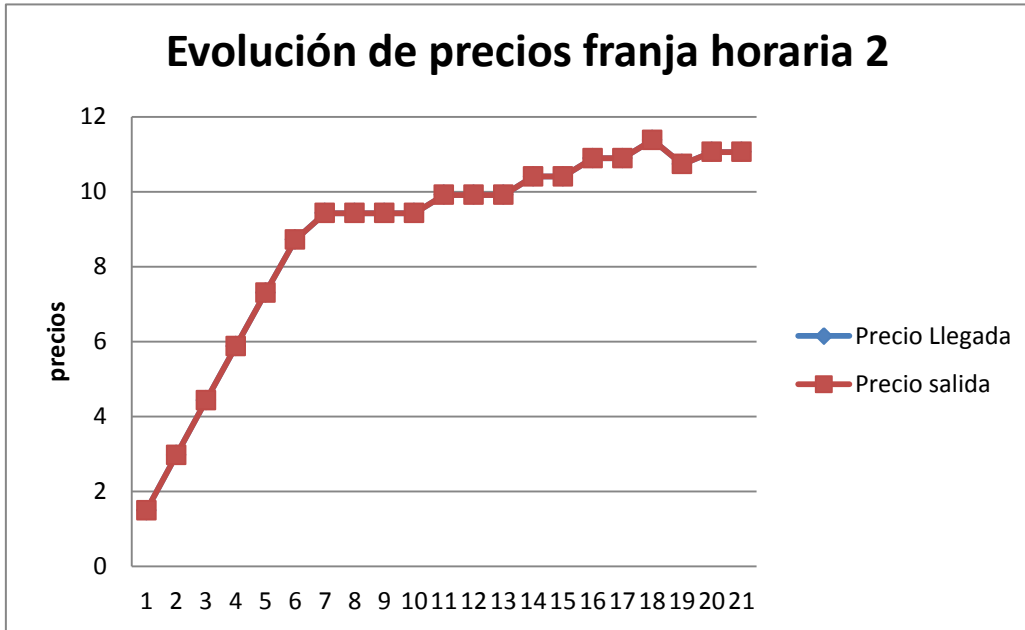


Ilustración 44: Aeropuerto 1, evolución de los precios de la franja horaria 2.

Se puede apreciar que los precios van ascendiendo poco a poco, esto se debe a un factor que hemos llamado gamma. Este factor es un factor de actualización de precios, al que hemos dado el valor 1. Esto quiere decir que cuando la demanda el paso de actualización del precio es 1, sin embargo si pusiéramos un gamma muy elevado, los precios oscilarían mucho en vez de ir aumentando paulatinamente. Es por esta razón por la que hemos escogido un gamma igual a uno.

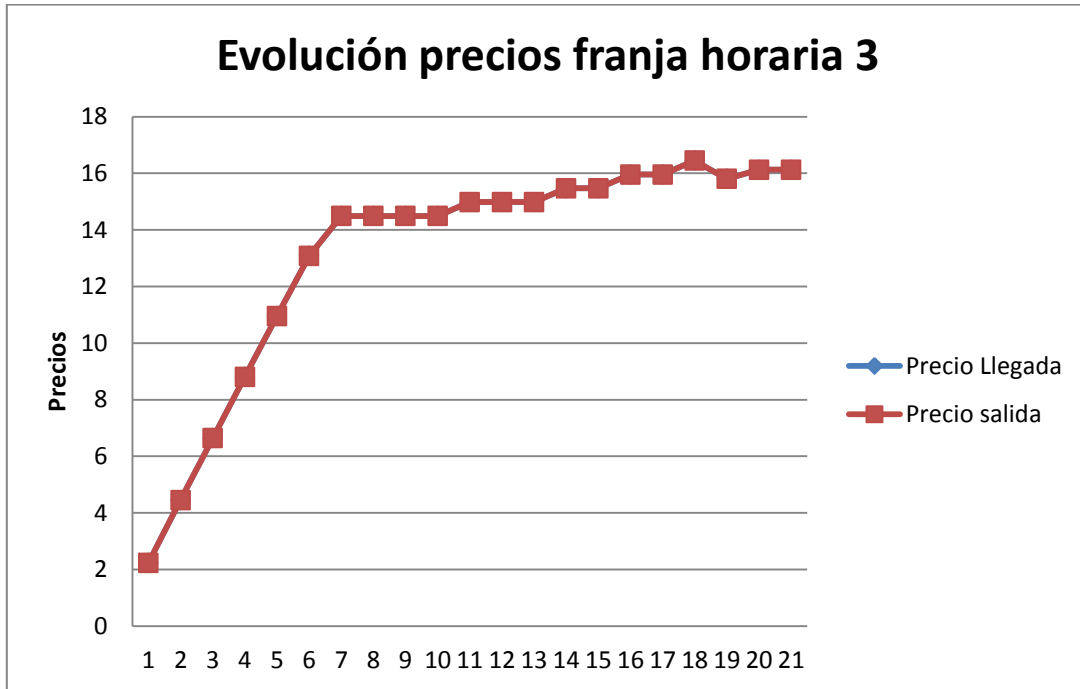


Ilustración 45: Aeropuerto 1, evolución de precios de la franja horaria 3.

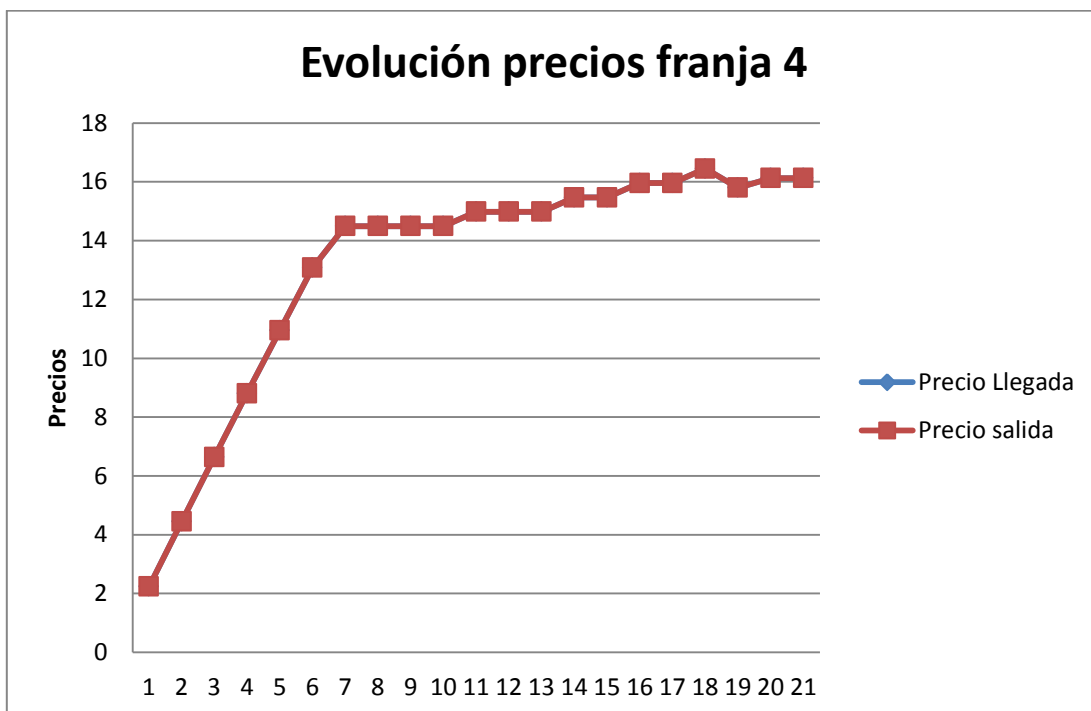


Ilustración 46: Aeropuerto 1, evolución de precios de la franja horaria 4.

En esta última franja del aeropuerto 1 podemos ver que los precios de llegadas y salidas de la franja no tienen por qué coincidir.

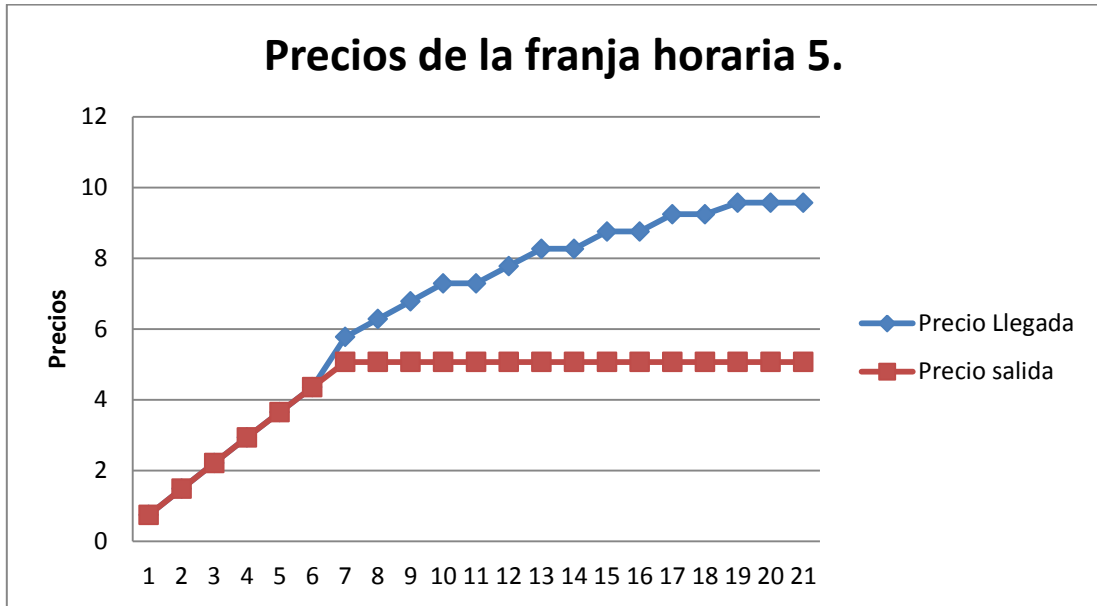


Ilustración 47: Aeropuerto 1, evolución de precios de la franja horaria 5.

Finalmente, en el último gráfico (Ilustración 48: Precios finales de las franjas horarias del aeropuerto 1.) se pueden ver los precios finales de todas las franjas horarias del aeropuerto 1.

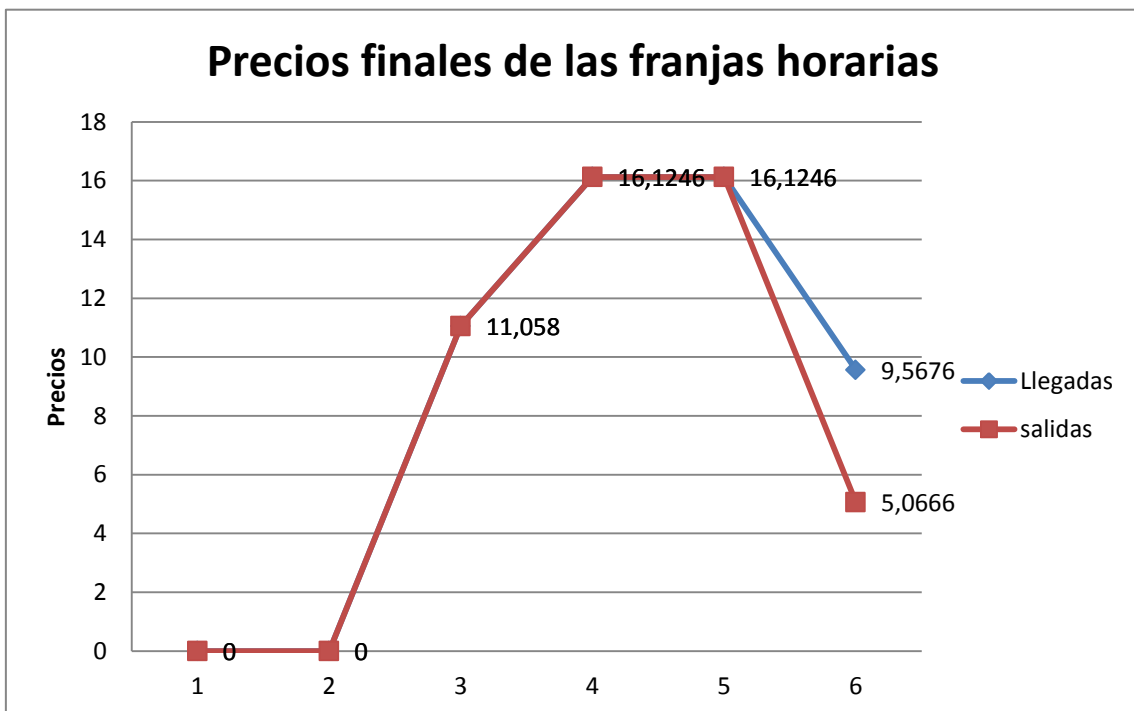


Ilustración 48: Precios finales de las franjas horarias del aeropuerto 1.

En los aeropuertos 2,3 y 4 los precios de las franjas horarias son mucho menores a los del aeropuerto 1 puesto que su nivel de saturación es mucho menor,

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Resultados

llegando incluso a tener un valor de 0 en algunas franjas horarias (Puesto que la demanda es igual o inferior a la oferta).

A continuación se ven los gráficos de los precios finales de las franjas horarias de los aeropuertos 2,3 y 4:



Ilustración 49: Precios finales de las franjas horarias del aeropuerto 2.

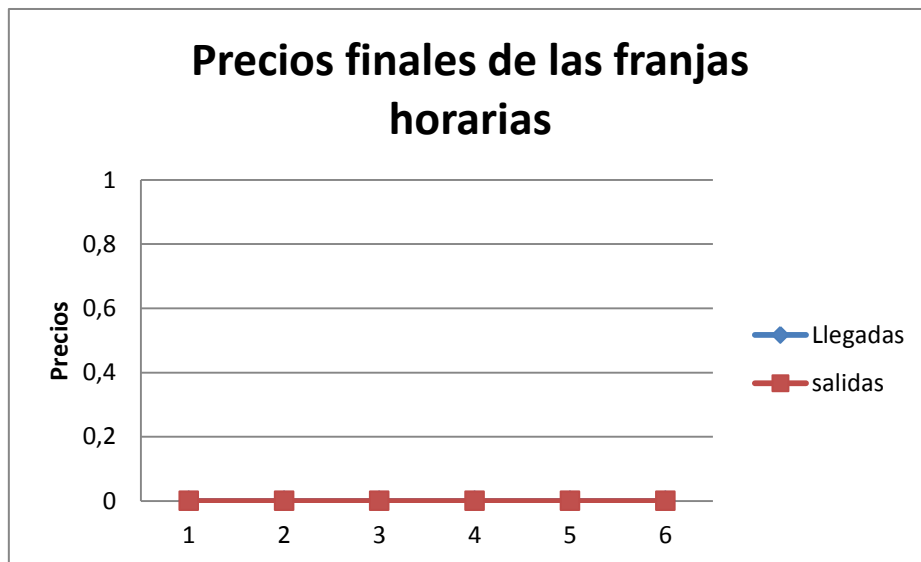


Ilustración 50: Precios finales de las franjas horarias del aeropuerto 3.



Ilustración 51: Precios finales de las franjas horarias del aeropuerto 4.

Contrariamente a lo que pasa en el aeropuerto 1 (el principal) en los aeropuertos 2,3 y 4 los precios de las franjas horarias son muy bajos debido a que la demanda es muy inferior a la capacidad de dichos aeropuertos (secundarios). Esto queda claramente reflejado en los tres últimos gráficos.

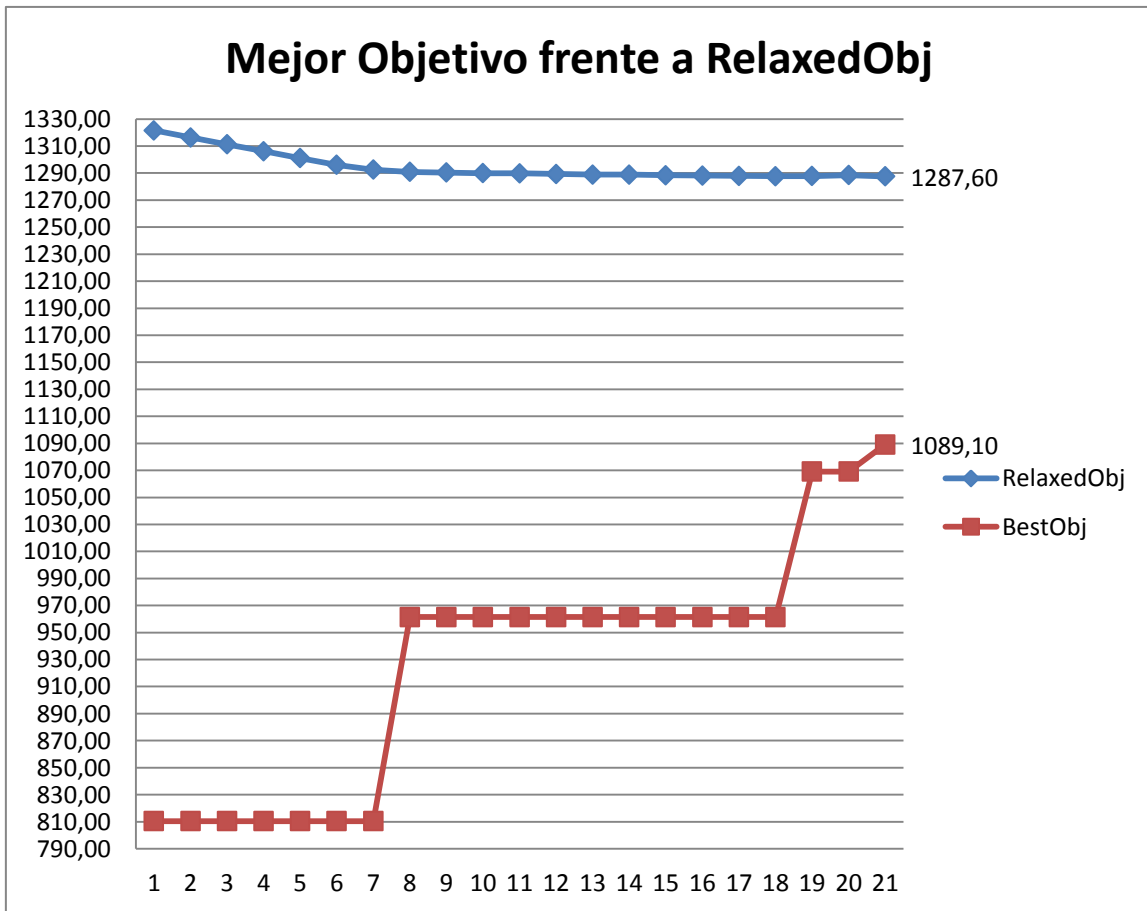


Ilustración 52: Mejores objetivos conseguidos frente a los Objetivos Relajados.

En la ilustración 45 se puede ver la diferencia entre el mejor objetivo en cada paso de la iteración y el objetivo relajado. Como se puede observar esta diferencia (GAP de dualidad) es bastante grande al principio y va disminuyendo con cada iteración lo que nos indica que se va acercando a la solución óptima.

Si se compara el mejor objetivo con el Gap en porcentaje se puede apreciar que cuanto más disminuye el Gap, mejor es la solución obtenida (Ilustración 53: Mejor objetivo conseguido frente al GAP de dualidad.).

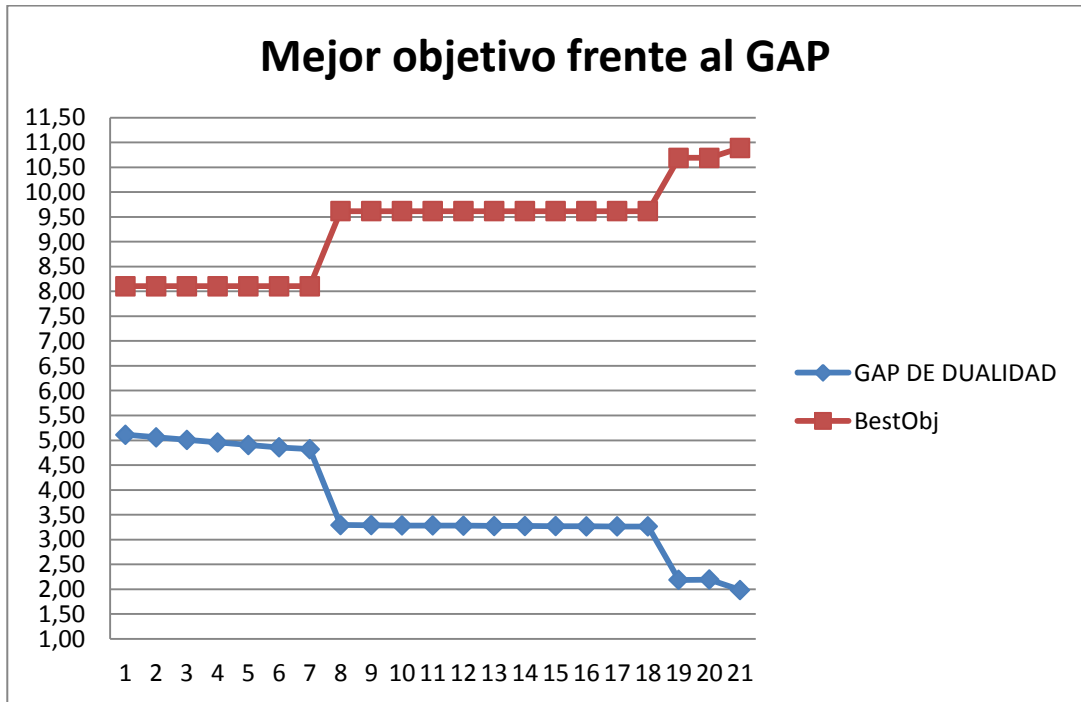


Ilustración 53: Mejor objetivo conseguido frente al GAP de dualidad.

6.4. Conclusión.

Gracias a los cuatro ejercicios realizados anteriormente se puede observar las diferencias entre aeropuertos más y menos saturados. También se puede apreciar la enorme dificultad que supone gestionar franjas horarias en los distintos aeropuertos para los coordinadores aéreos y otros organismos que se dedican a ello, en los distintos países.

CAPÍTULO 7: Conclusiones y Futuros trabajos.

Existen múltiples opciones que intentan solucionar o disminuir la congestión en aeropuertos saturados, sin embargo, ninguna es claramente la mejor, dado que es un problema complicado que implica muchas variables y stakeholders.

Los distintos programas puestos en marcha para la coordinación de aeropuertos a nivel europeo e internacional son una solución a medio plazo (en algunos casos incluso a largo plazo puesto que no es posible ampliar algunos aeropuertos debido su ubicación y las posibles restricciones del país en el que se encuentre).

La coordinación de aeropuertos es una de las soluciones más asequibles encontradas hasta la fecha puesto que tratan de optimizar el uso de los aeropuertos y su tráfico aéreo dando el mejor uso posible a los recursos disponibles.

A través de los cuatro ejercicios realizados en el capítulo 6 se puede apreciar que la coordinación de aeropuertos es un problema complejo, puesto que en el único ejercicio que el programa consigue llegar a la solución óptima es el primer ejercicio, el más sencillo (2 aeropuertos y 6 vuelos). Según se van añadiendo vuelos y aeropuertos, el problema se vuelve mucho más complejo, debido a lo cual la mejor solución que encuentra el programa no es la solución óptima. Teniendo esto en cuenta, podemos hacernos una idea de lo difícil que es coordinar más aeropuertos con infinidad de vuelos.

Gracias a los ejercicios realizados con la programación en Java se ha podido comprobar que el modelo de simulación no presenta incoherencias, puesto que observando la evolución de los indicadores para los distintos experimentos realizados se aprecia que los resultados son coherentes y concuerdan con lo planteado en el modelo que se ha planteado.

En cuanto a la continuación de la investigación, este TFG puede servir de base para probar experimentos con redes de aeropuertos mucho mayores con el fin de que estas redes se acerquen lo máximo posible a la realidad. Y de esta forma se pueda continuar avanzando con las mejoras en coordinación de aeropuertos.

CAPÍTULO 8: Bibliografía

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Bibliografía

- AECFA. (s.f.). *Cordinación de franjas horarias en aeropuertos españoles*. Recuperado el Septiembre de 2019, de <https://www.slotcoordination.es/csee/Satellite/Slots/es/Page/1237544440299/Circulares.html>
- AENA. (s.f.). *AENA*. Recuperado el Noviembre de 2019, de <http://www.aena.es/csee/Satellite/Slots/es/Page/1237544440811/1237544440201/Breve-historia.html>
- AENA. (s.f.). *AENA* . Recuperado el Septiembre de 2019, de <http://www.aena.es/es/corporativa/gestion-aeroportuaria.html>
- Araújo, J. A. (2018). *Relajación Lagrangiana para la asignación de slots aeroportuarios. Informe Interno, Escuela de Ingenierías Industriales, Dpto. de Organización de Empresas y CIM*. Universidad de Valladolid.
- civil, D. g. (27 de Septiembre de 2018). *Ministerio de Fomento*. Recuperado el Septiembre de 2019, de https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/comodin/recursos/dgac_resolucion_s19.pdf
- Commission, E. (s.f.). *MOBILITY AND TRANSPORT*. Recuperado el Junio de 2019, de SESAR: <https://ec.europa.eu/transport/modes/air>
- Coordinador y facilitador de franjas horarias*. (s.f.). Recuperado el junio de 2019, de <https://www.slotcoordination.es/csee/Satellite/Slots/es/Page/1237544440229//Coordinacion-y-seguimiento-de-franjas-horarias.html>
- de la Fuente Miguel, M. (Julio de 2016). *ALGORITMO DE RELAJACIÓN LAGRANGIANA PARA LA ASIGNACIÓN DE FRANJAS HORARIAS A VUELOS*. Valladolid, España.
- eATM PORTAL Master SESAR*. (s.f.). Recuperado el Julio de 2019, de <https://www.atmmasterplan.eu/>
- Europea, C. (s.f.). *European Union*. Recuperado el junio de 2019, de https://ec.europa.eu/transport/modes/air/single_european_sky/ses_2_en

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Bibliografía

- Europea, C. (s.f.). *Movilidad y Transporte*. Recuperado el 1 de 2020, de https://ec.europa.eu/transport/modes/air/international_aviation_en
- Europea, C. (s.f.). *Una estrategia para la aviación europea*. Recuperado el 1 de 2020, de <https://ec.europa.eu/transport/modes/air/aviation-strategy/growth>
- Europea, U. (25 de 3 de 2010). *Reglamento (UE) 255/2010*. Recuperado el 8 de 1 de 2020, de https://www.seguridadaaerea.gob.es/media/4344692/reg_255_2010_gestion_de_afluencia_de_transito_aereo.pdf
- Europea, U. (27 de Junio de 2014). *Comisión Europea*. Recuperado el Junio de 2019, de <https://www.boe.es/doue/2014/190/L00019-00044.pdf>
- Europea, U. (s.f.). *European Union Aviation Safety Agency*. Recuperado el 1 de 2020, de https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/List%20of%20aerodromes%20falling%20in%20the%20scope%20of%20R%28EU%29%202018_1139.pdf
- Fomento, M. d. (s.f.). Recuperado el Mayo de 2019, de https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/comodin/recursos/dgac_resolucion_s19.pdf
- fomento, M. d. (18 de Enero de 1993). *Ministerio de fomento disposición 508*. Recuperado el Septiembre de 2019, de <https://www.fomento.gob.es/areas-de-actividad/aviacion-civil/legislacion-del-sector-aereo/normativa-basica-del-sector-aereo-estructura/aeropuertos-y-aerodromos/asignacion-de-franjas-horarias-slots/reglamento-cee-n-9593del-consejode-18-de-enero-de-1993-rel>
- Fomento, M. d. (14 de Enero de 2014). *Agencia estatal Boletín oficial del estado*. Recuperado el Septiembre de 2019, de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2014/01/17/20/con>
- Fomento, M. d. (18 de Enero de 2014). *Boletín oficial del estado*. Recuperado el Septiembre de 2019, de https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/pdf/4EFB79B4-FC5D-42BF-A982-7D2EB81FC7D0/123065/Real_Decreto_20_2014.pdf

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Bibliografía

- Fomento, M. d. (18 de Enero de 2014). *Boletín Oficial del Estado*. Recuperado el Junio de 2019
- Fomento, M. d. (27 de Enero de 2017). *Gobierno de España*. Recuperado el Septiembre de 2019, de <https://www.fomento.gob.es/aviacion-civil/politicas-aeroportuarias/planificacion-aeroportuaria/dora>
- Fomento, M. d. (s.f.). *Fomento, aviación civil*. Recuperado el Noviembre de 2019, de <https://www.fomento.gob.es/aviacion-civil/centenario-transporte-aereo-espania#Historia>
- IATA. (agosto de 2019). *Directrices mundiales de slot*. Recuperado el Diciembre de 2019, de <http://www.iata.org/wsg>
- IATA. (s.f.). *Worldwide Airport Slots*. Recuperado el Diciembre de 2019, de <https://www.iata.org/en/policy/slots/>
- ICAO. (2016). *Air Navigation Report*. Recuperado el Junio de 2019, de https://www.icao.int/airnavigation/Documents/ICAO_AN%202016_final_19July.pdf
- ICAO. (s.f.). *ICAO Capacidad y eficiencia*. Recuperado el Septiembre de 2019, de https://www.icao.int/publications/Documents/9750_cons_es.pdf
- ICAO. (s.f.). *Organización de aviación civil internacional*. Recuperado el Diciembre de 2019, de <https://www.icao.int/SAM/Documents/NAIDP-AMP1/MASTER%20PLAN%203.pdf>
- Márquez, S. A. (2015). *Sistemas de Gestión Aeroportuaria*. Sevilla.
- Organization, I. C. (s.f.). *ICAO*. Recuperado el Junio de 2019, de <https://www.icao.int/airnavigation/Pages/default.aspx>
- Pascual Pulido, L. F. (Julio de 2018). *Modelos de Programación Lineal para la Asignación de Franjas Horarias a Vuelos*. Valladolid, España.
- R. Herranz, D. T. (diciembre de 2015). *Price-Setting Auctions for Airport Slot Allocation: a Multi-Airport Case Study. An Agent-Based Computational Economics Approach to Strategic Slot Allocation* .

Coordinación de franjas horarias entre varios aeropuertos: Bibliografía

SESAR JU. (s.f.). Recuperado el mayo de 2019, de <http://www.sesarju.eu>

Wikipedia. (s.f.). *Historia de la aviación*. Recuperado el 12 de 2019, de https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_aviaci%C3%B3n#1914-1918:_Primera_Guerra_Mundial