



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Organización Industrial

ASIGNACIÓN DE FRANJAS HORARIAS EN REDES DE AEROPUERTOS: COMPARACIÓN DE ALGORITMOS

Autor:

Jimeno Gómez, Almudena

Tutor:

Araúzo Araúzo, José Alberto
Departamento de Organización de
Empresas y CIM

Valladolid, julio 2020.

RESUMEN

RESUMEN

El transporte aéreo representa, actualmente, una importante línea de crecimiento en los países desarrollados. Con ello, la demanda de este servicio aumenta a un ritmo mucho mayor que la capacidad para satisfacerla. La asignación de slots aeroportuarios es una pieza clave a la hora de optimizar su aprovechamiento.

El presente trabajo tratará de poner a prueba alternativas a los procesos de asignación actuales. Para ello se estudiarán las propiedades de las redes aeroportuarias de la actualidad y se diseñarán escenarios simplificados representativos de las mismas. Además, se modelizarán los parámetros que definen las características de capacidad, demanda y utilidad de aeropuertos y rutas de forma que los escenarios planteados sean realistas.

Una vez diseñados los escenarios se le aplicarán dos métodos de resolución matemática. Con los resultados obtenidos se concluirá que métodos y estructuras de red son más eficaces para optimizar la asignación, así como sus puntos fuertes y débiles.

Palabras Clave:

Asignación de franjas horarias, teoría de redes, demanda de slots aeroportuarios, programación lineal, subastas combinatorias.

ABSTRACT

ABSTRACT

Air transport represents an important growth line of today's developed countries. Along with that fact, the demand of that kind of service increases in a much more quickly way than the capacity to satisfy it. The slot allocation system plays a key role for the purpose of optimizing its exploitation.

This assignment will test new alternatives to the nowadays allocation processes. Towards that, principal characteristics of airport nets will be studied and simplified scenes will be designed in order to represent them in the most faithful possible way. Further, other important parameters that affect those infrastructures such as capacity and demand characteristics will be exemplified and applied to the scenes.

Once those scenes are designed, two mathematical algorithms will be applied. Results obtained from that testing will conclude which method and scene is more efficient when optimising the slot allocation of an airport net as well as their strong and weak points.

Keywords:

Slot allocation, theory of networks, air traffic demand, linear programming, combinatorial auctions.

ÍNDICES

Índice de Contenido

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	17
1.1	Justificación	19
1.2	Objetivos y Alcance del Trabajo	19
1.3	Antecedentes	20
1.4	Contenidos de la memoria	20
CAPÍTULO 2	ASIGNACIÓN DE SLOTS AEROPORTUARIOS.....	23
2.1	Introducción	25
2.2	Situación del tráfico aéreo en la actualidad y estimaciones de futuro.....	25
2.2.1	Situación actual global	25
2.2.2	Situación actual en España.....	26
2.2.3	Previsiones de futuro a nivel europeo	27
2.3	Conceptos principales	28
2.4	Asignación de slots.....	30
2.4.1	Breve marco histórico	30
2.4.2	Principios	31
2.4.3	Procedimiento de Asignación.....	31
2.5	Principales líneas de investigación	32
2.6	Conclusiones.....	34
CAPÍTULO 3	ESTUDIO DE LAS REDES AEROPORTUARIAS.	37
3.1	Introducción	39
3.2	Teoría de Redes.....	39
3.2.1	Concepto y Evolución Histórica.....	39
3.2.2	Definición y principales tipos	41
3.2.3	Propiedades.....	43
3.2.4	Modelos de redes complejas	45
3.3	Características de las redes aeroportuarias.....	47
3.3.1	Comunidades en las redes de Aeropuertos	49
3.4	Conclusiones.....	54
CAPÍTULO 4	ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS: DEMANDA, CAPACIDAD Y UTILIDAD.	55
4.1	Introducción	57
4.2	Parámetros de capacidad.....	57
4.3	Relación entre capacidad y demanda	60
4.3.1	Tipos de aeropuertos	60
4.3.2	Efecto en la propagación de retrasos.....	62

4.4	Horas pico y horas valle.....	62
4.5	Variaciones semanales, mensuales y estacionales	65
4.5.1	Variaciones semanales	65
4.5.2	Variaciones mensuales y estacionales.	66
4.6	Utilidad	66
4.6.1	Costes operacionales de un vuelo.....	67
4.6.2	Ingresos generados por vuelo	69
4.7	Conclusiones.....	70
CAPÍTULO 5 MODELOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL Y MECANISMOS DE RELAJACIÓN		71
5.1	Introducción	73
5.2	Modelo con horizonte de planificación cerrado.	73
5.2.1	Parámetros	73
5.2.2	Variables.....	75
5.2.3	Función Objetivo	76
5.2.4	Restricciones	77
5.2.5	Modelo completo.....	78
5.3	Modelo con horizonte de planificación periódico	79
5.3.1	Introducción	79
5.3.2	Modelo	80
5.4	Mecanismos de Relajación.....	82
5.4.1	Fundamentos.....	82
5.4.2	Algoritmo Branch and Bound	82
5.4.3	Relajación Lagrangiana. Subastas Combinatorias.....	84
5.5	Conclusiones.....	85
CAPÍTULO 6 DISEÑO DE ESCENARIOS, APLICACIÓN Y COMPARACIÓN DE MÉTODOS		87
6.1	Introducción	89
6.2	Creación de escenarios.	89
6.2.1	Introducción. Java y Gurobi.....	89
6.2.2	Estructura del programa y parámetros modificados.	89
6.2.3	Diseño de escenarios.....	94
6.3	Batería de problemas	98
6.4	Análisis y comparación de resultados	99
6.4.1	Análisis escenario 5a-pp.....	99
6.4.2	Comparación con escenario 8a-pp.....	104
6.4.3	Comparación con escenario 5a-hs.	105
6.5	Conclusiones.....	108

ÍNDICES

CAPÍTULO 7 CONCLUSIÓN	109
BIBLIOGRAFÍA	113
ANEXOS	119
Anexo I. Batería de Problemas	121
Anexo II. Resultados Obtenidos	125
Anexo III. Equivalencias número de vuelos pp/hs	131

Índice De Ilustraciones

<i>Ilustración 1 Evolución del volumen de pasajeros mundiales transportados por tráfico aéreo desde 2016. Extraído de (IATA, 2017)</i>	26
<i>Ilustración 2 Evolución del número de pasajeros transportados en España. Elaboración propia a partir de (Subdirección General de Transporte Aéreo, 2019)</i>	26
<i>Ilustración 3 Estimación del crecimiento del tráfico aéreo Europeo en millones de vuelos. Extraído de Challenges of Growth 2013, Summary Report, EUROCONTROL, June 2013.</i>	27
<i>Ilustración 4 Evolución del tiempo de retraso medio de los vuelos de los principales aeropuertos de Europa 2016-2040. Extraído de: (EUROCONTROL, 2018)</i>	28
<i>Ilustración 5 Representación de una red simple formada por 8 nodos interconectados por 10 aristas. Elaboración propia a partir de (Sallan & Jordan, 2019).</i>	39
<i>Ilustración 6 Representaciones de una misma red simple. Izquierda: Grafo, Derecha: Matriz de Adyacencia. Elaboración propia.</i>	42
<i>Ilustración 7 Ejemplo de representación de red dirigida. Elaboración propia.</i>	42
<i>Ilustración 8 Ejemplo de representación de red con peso. Elaboración propia</i>	43
<i>Ilustración 9 Ilustración del modelo de generación de redes de Watts and Strogatz. De derecha a izquierda: Red regular / Red pequeño-mundo / Red aleatoria. Extraído de (Sallan & Jordan, 2019).</i>	46
<i>Ilustración 10 Representación de las primeras 10 comunidades de la red de aeropuertos detectadas, ordenadas por número decreciente de nodos. Extraído de: (Sallan & Jordan, 2019)</i>	49
<i>Ilustración 11 Clasificación visual de los aeropuertos de la red global en comunidades. Extraído de: (Guimerà, Mossa, Turttschi, & Amaral, 2005).</i>	49
<i>Ilustración 12 Representación esquemática de una red de aeropuertos con configuración hub-and-spoke. Elaboración propia a partir de: (Sallan & Jordan, 2019)</i>	51
<i>Ilustración 13 Ejemplo estructura wave-system en aeropuertos hub. Elaboración propia a partir de: (Dennis, 1994)</i>	51
<i>Ilustración 14 Tabla comparativa de las propiedades de las redes aeroportuarias formadas por diferentes aerolíneas. N: número de nodos, E: número de aristas, C: coeficiente medio de clustering, L: distancia geodésica media, D: diámetro. Extraído de: (Sallan & Jordan, 2019)</i>	52
<i>Ilustración 15 Representación de todas las trayectorias aeroportuarias de China y Estados Unidos. Extraído de: (Pan & Lishuai, 2018).</i>	53
<i>Ilustración 16 Resultados del análisis de las redes aeroportuarios de China y Estados Unidos. Extraído de: (Pan & Lishuai, 2018)</i>	53
<i>Ilustración 17 Cálculo de los volúmenes de tráfico anuales e índices de utilización de referencia en función de la configuración de las pistas de aterrizaje y despegue del aeropuerto. Extraído de: (Gelhausen, Berster, & Wilken, 2013)</i>	58
<i>Ilustración 18 Tipos de configuraciones de pistas de aterrizaje y despegue. Extraído de: (ICAO, 2020)</i>	58
<i>Ilustración 19 Resolución de los parámetros de capacidad y restricciones rodantes a aplicar en los aeropuertos coordinados de España durante la temporada de verano de 2020. Extraído de: (Ministerio de Fomento, 2020)</i>	59
<i>Ilustración 20 Número de movimientos por hora medios por meses para el aeropuerto de Frankfurt (FRA) en 2007. Ejemplo de distribución desigual de los movimientos con grandes variaciones en los picos de mañana y tarde. Extraído de (Odoni, Morisset, Drotleff, & Zock, 2011)</i>	60
<i>Ilustración 21 Número de movimientos por hora medios por meses para el aeropuerto Internacional Libertad de Newark (EWR) en 2007. Ejemplo de distribución desigual de los movimientos con grandes variaciones en los picos de mañana y tarde. Extraído de (Odoni, Morisset, Drotleff, & Zock, 2011)</i>	61
<i>Ilustración 22 Comparación del número de vuelos retrasados en su llegada (área roja) y en su salida (barras verdes) frente al número de vuelos programados (línea azul) y los realmente llevados a cabo (línea roja) entre los dos aeropuertos mencionados con anterioridad. Extraído de: (Odoni, Morisset, Drotleff, & Zock, 2011)</i>	62
<i>Ilustración 23 Ranking de tráfico relativo (movimientos hora/ movimiento de la hora más ocupada del año) del año 2008 en los aeropuertos de Frankfurt, Londres Stansed y Palma de Mallorca. Extraído de: (Wilken, Berster, & Gelhausen, 2011)</i>	63

ÍNDICES

<i>Ilustración 24 Relación entre el tráfico operado en horas pico y el número de pasajeros anuales para un estudio de 24 aeropuertos. Extraído de: (Ruhl & Trnavskis, 1998)</i>	64
<i>Ilustración 25 Variación por horas de la demanda semanal de vuelos en las semanas pico del año 2008 para los aeropuertos de Frankfurt, Stansted y Palma de Mallorca. Extraído de: (Wilken, Berster, & Gelhausen, 2011)</i>	65
<i>Ilustración 26 Variación mensual de la demanda en 2008 para los aeropuertos de Frankfurt, Stansted y Palma de Mallorca. Extraído de: (Wilken, Berster, & Gelhausen, 2011)</i>	66
<i>Ilustración 27 Descomposición costes totales de operación de un vuelo. Elaboración propia a partir de (ICAO, 2017).</i>	67
<i>Ilustración 28 Comparación del coste DOC por tipo de aeronave. Elaboración propia a partir de (ICAO, 2017)</i>	68
<i>Ilustración 29 Evolución precio medio por billete de avión para vuelos domésticos en Estados Unidos desde 1995 hasta 2019. Elaboración propia a partir de: (Bureau of Transportation Statistics, 2019)</i>	69
<i>Ilustración 30 Valores medios referentes a los billetes de avión vendidos en España en el año 2017. Elaboración propia a partir de: (Kayak España, 2017)</i>	69
<i>Ilustración 31 Representación gráfica de los costes de desviación asociados a una operación de llegada con un modelo de horizonte de planificación cerrado. Extraído de: (Araúzo, 2016).</i>	75
<i>Ilustración 32 Representación gráfica de los costes de desviación para una operación de llegada con horizonte de planificación periódico. Extraído de (Araúzo, 2016).</i>	79
<i>Ilustración 33 Representación del esquema de nodos y ramificaciones Branch and Bound. Extraído de: (Gurobi Optimization, LLC, 2020)</i>	83
<i>Ilustración 34 Esquema de subasta combinatoria de slots aeroportuarios para una red de aeropuertos. Extraído de: (Bolic, y otros, 2014)</i>	85
<i>Ilustración 35 Configuración de las restricciones rodantes. Código de programación. Elaboración Propia.</i>	90
<i>Ilustración 36 Configuración de horas pico. Código de programación. Elaboración propia.</i>	91
<i>Ilustración 37 Distribución de demanda pt1. Código de programación. Elaboración propia.</i>	91
<i>Ilustración 38 Representación de la evolución de la utilidad obtenida de un vuelo dependiendo del tiempo en el que se programa. Elaboración propia a partir de (Araúzo, 2016)</i>	92
<i>Ilustración 39 Configuración de utilidades. Código de programación. Elaboración propia.</i>	92
<i>Ilustración 40 Configuración de tiempos de vuelo. Código de programación. Elaboración propia.</i>	93
<i>Ilustración 41 Configuración de conexiones entre aeropuertos. Código de programación. Elaboración propia.</i>	93
<i>Ilustración 42 Generación del problema. Código de programación. Elaboración propia.</i>	94
<i>Ilustración 43 Resolución del problema generado. Código de programación. Elaboración propia.</i>	94
<i>Ilustración 44 Representación redes 5 y 8 aeropuertos con estructura PP (point-to-point) y HS (hub-and-spoke).Cada enlace representa las rutas bidireccionales de ida y vuelta. Elaboración propia.</i>	95

Índice De Gráficos

Gráfico 1 Representación gráfica de la demanda obtenida para un aeropuerto en un problema de 24 franjas horarias, 3 aeropuertos y 200 vuelos. Elaboración propia.	97
Gráfico 2 Representación gráfica de la demanda obtenida para un aeropuerto en un problema de 168 franjas horarias, 5 aeropuertos y 1200 vuelos. Elaboración propia.	97
Gráfico 3 Comparación de los tiempos de ejecución empleados para resolver los mismos problemas dependiendo de si se programan en horizonte periódico (p) o no periódico (np). Elaboración propia.	98
Gráfico 4 Representación valor objetivo obtenido frente a el tipo de problema para los dos métodos de resolución descritos en problemas diarios (24, 48 y 96 franjas). Elaboración propia.	99
Gráfico 5 Representación valor objetivo obtenido frente a el tipo de problema para los dos métodos de resolución descritos en problemas semanales (168 y 336 franjas). Elaboración propia.	100
Gráfico 6 Evolución de los tiempos de ejecución para problemas de pequeño tamaño (24 y 48 franjas). Elaboración propia.	101
Gráfico 7 Evolución Del tiempo de ejecución para todos los problemas. Elaboración propia.	101
Gráfico 8 Evolución del % de vuelos programados por tipo de problema y método de resolución. Elaboración propia.	102
Gráfico 9 Representación de la relación entre el % de vuelos programados y el factor de carga de cada problema. Elaboración propia.	103
Gráfico 10 Relación entre el % de vuelos programados y el % de horas pico para los problemas resueltos por GRB y LR. Elaboración propia.	103
Gráfico 11 Comparación de los tiempos de ejecución para escenarios de 5 y 8 aeropuertos por el método LR. Elaboración propia.	104
Gráfico 12 Tiempos de ejecución para los escenarios a5-pp y a8-pp por el método GRB. Elaboración propia.	104
Gráfico 13 Comparación de los factores de carga de los problemas dependiendo de si cuentan con estructura point-to-ooint o hub-and-spoke. Elaboración propia.	106
Gráfico 14 Evolución de los tiempos de ejecución por el método GRB para los escenarios pp y hs. Elaboración propia.	106
Gráfico 15 Evolución de los tiempos de ejecución por el método LR para los escenarios pp y hs. Elaboración propia.	107
Gráfico 16 Relación entre el % de vuelos programados y los tipos de estructura. Elaboración propia.	107

Índice De Tablas

<i>Tabla 1 Características de las redes simuladas en cuanto a conectividad. Elaboración propia</i>	96
<i>Tabla 2 Restricciones rodantes empleadas para aeropuertos tipo hub y tipo spoke. Elaboración propia</i>	96
<i>Tabla 3 Utilidades y costes por franja horaria de vuelo programados. Elaboración propia</i>	96
<i>Tabla 4 Problemas a ejecutar referentes al escenario de 5 aeropuertos con estructura point-to-point. Elaboración propia.</i>	121
<i>Tabla 5 Problemas a ejecutar referentes al escenario de 8 aeropuertos con estructura point-to-point. Elaboración propia.</i>	122
<i>Tabla 6 Problemas a ejecutar referentes al escenario de 5 aeropuertos con estructura hub-and-spoke. Elaboración propia.</i>	123
<i>Tabla 7 Resultados obtenidos para los problemas de 5 aeropuertos con estructura point-to-point . Parte 1 (de 24 a 96 franjas). Elaboración propia.</i>	126
<i>Tabla 8 Resultados obtenidos para los problemas de 5 aeropuertos con estructura point-to-point . Parte 2 (de 168 a 336 franjas). Elaboración propia.</i>	127
<i>Tabla 9 Resultados obtenidos para los problemas de 8 aeropuertos con estructura point-to-point. Parte 1 (de 24 a 96 franjas horarias). Elaboración propia.</i>	128
<i>Tabla 10 Resultados obtenidos para los problemas de 5 aeropuertos con estructura hub-and-spoke. Parte 1 (de 24 a 96 franjas horarias). Elaboración propia.</i>	129
<i>Tabla 11 Resultados obtenidos para los problemas de 5 aeropuertos con estructura hub-and-spoke. Parte 2 (de 168 a 336 franjas horarias). Elaboración propia.</i>	130
<i>Tabla 12 Cálculo del número de vuelos a simular en el escenario hs de 5 aeropuertos a partir del escenario pp para mantener la equivalencia. Elaboración propia.</i>	131

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

El tráfico aéreo representa un servicio vital para las sociedades de la actualidad. La continua evolución de este sistema y, en general, de los hábitos y necesidades de las poblaciones de los países desarrollados, hacen de las capacidades de las infraestructuras aeroportuarias actuales un factor crítico en algunas situaciones.

Tal y como indica un estudio de EUROCONTROL¹, el tráfico aéreo de Europa está destinado a encontrarse fuertemente congestionado en las próximas décadas. Se estima que en 2040 los vuelos aumentarán en un 53% y con ello los problemas de capacidad harán que hasta 1.5 millones de vuelos tengan que ser anulados provocando que 160 millones de personas no puedan volar. (EUROCONTROL, 2018)

Los datos muestran que es necesario investigar e invertir para poder aumentar la capacidad y no alcanzar esta situación. Esta inversión se tendrá que llevar a cabo tanto para aumentar físicamente las infraestructuras como para hacer un mejor uso de las mismas.

En cuanto a la optimización de su uso, asociaciones como ACI EUROPE² han reclamado en numerosas ocasiones la necesidad de una reforma de los tradicionales procesos de asignación de slots. En su mayoría, dichos procesos fueron establecidos hace 27 años y numerosos estudios argumentan que ya no son aptos ni eficientes para la demanda actual.

Es por ello que en este trabajo se tratará de realizar una aportación a estas investigaciones estudiando la eficacia de métodos matemáticos complementarios a los procesos de asignación de slots tradicionales.

1.2 Objetivos y Alcance del Trabajo

Los objetivos del siguiente trabajo son:

- Estudiar las principales características de las redes aeroportuarias de vuelos comerciales existentes en el mundo, así como los parámetros que las definen.
- Estudiar el comportamiento de la demanda, capacidad y utilidad aeroportuaria.
- A partir de los estudios previos, diseñar escenarios simplificados de redes aeroportuarias representativas de la realidad con características diversas.
- Estudiar su comportamiento frente a algoritmos matemáticos de resolución de problemas de asignación de slots.
- Concluir qué algoritmos y redes resultan más eficientes.

¹ EUROCONTROL es la Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea, cuenta con el objetivo fundamental de armonizar e integrar los servicios de navegación aérea en Europa para conseguir aumentar la seguridad y eficiencia de las actividades aeroportuarias.

² ACI EUROPE es el Consejo de Aeropuertos Internacional de Europa, una asociación comercial aeroportuaria europea que promueve los intereses colectivos del sector y la excelencia tanto profesional como operativa de sus actividades.

1.3 Antecedentes

Este trabajo forma parte de una de las líneas de investigación llevada a cabo por el Departamento de Organización de Empresas y CIM de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid.

Durante los últimos años se han realizado diferentes trabajos de fin de grado e investigación docente que han ido profundizando en el estudio de esta temática. En primer lugar, se estudió la aplicación de algoritmos de relajación Lagrangiana para la asignación de franjas horarias a un solo aeropuerto de carácter no periódico (de la Fuente Miguel, 2016), (Araúzo, 2016). Esta investigación se amplió con el estudio de técnicas de programación lineal para la resolución de los problemas mediante el paquete Gurobi tanto para modelos con horizontes de planificación cerrados como periódicos (Pascual Pulido, 2018). Ambos trabajos se han complementado con una comparativa de los dos algoritmos de resolución para un solo aeropuerto (Gómez Miguel, 2019).

Por último, se ha tratado de ampliar este estudio aplicándolo a sistemas con varios aeropuertos y resolución mediante subastas combinatorias (Coco Alberto, 2020).

El presente TFG continuará con esta línea de estudio para sistemas con varios aeropuertos, comparando la eficacia de los dos métodos estudiados (relajación Lagrangiana y Gurobi) y dotando a los escenarios simulados de mayor realismo mediante el estudio de las características de las redes de aeropuertos y otros parámetros clave.

1.4 Contenidos de la memoria

La memoria de este Trabajo de Fin de Grado estará dividida en siete capítulos. A continuación, se explicará de manera breve el contenido y la razón de ser de cada uno de ellos.

En primer lugar, se encuentran los capítulos en los que se hace referencia al marco teórico y estado del arte de las diferentes temáticas necesarias para el desarrollo de la aplicación práctica del proyecto. Éstos son los capítulos 2, 3, 4 y 5 que se describen a continuación:

En el CAPÍTULO 2 se estudiará la situación actual en cuanto al proceso de asignación de slots aeroportuarios, su funcionamiento y estado del arte en cuanto a investigación. En el CAPÍTULO 3 se hará referencia a la teoría sobre redes de aeropuertos tanto a nivel matemático como aplicadas al ámbito aeroportuario, sus principales características y los parámetros que las definen. En el capítulo 4 se estudiarán en profundidad los modelos de estimación de demanda de slots, así como otros de los principales parámetros que definen la capacidad de los aeropuertos y la utilidad obtenida por cada vuelo. Por último, para finalizar el marco teórico, en el CAPÍTULO 5 se explicarán brevemente los fundamentos principales de los métodos matemáticos que se utilizarán para resolver los problemas de asignación de stocks,

INTRODUCCIÓN

haciendo especial referencia a la adaptación de estos modelos a redes de aeropuertos en lugar de a aeropuertos independientes.

En cuanto a la aplicación práctica de los contenidos previamente estudiados, contamos con el CAPÍTULO 6 , éste estará dividido en dos partes diferenciadas, el diseño de los escenarios a ensayar, tanto a nivel de programación como a nivel conceptual, y la comparación de los resultados obtenidos.

Finalmente, el CAPÍTULO 7 muestra la conclusión del estudio, en la que se encuentra una visión global de los resultados obtenidos y las principales aportaciones del trabajo a esta temática, además de una crítica sobre los puntos fuertes y débiles de la metodología utilizada.

CAPÍTULO 2 ASIGNACIÓN DE SLOTS AEROPORTUARIOS

2.1 Introducción

En el presente capítulo se llevará a cabo una introducción a la teoría de asignación de slots. En primer lugar, se estudiará la situación de crecimiento actual tanto a nivel global como nacional. Después se detallarán las previsiones de futuro a nivel europeo referentes a tráfico aéreo, densidad y grado de saturación de los aeropuertos. Posteriormente, se definirán los principales conceptos a conocer para el desarrollo del trabajo y los mecanismos utilizados en la actualidad para realizar esta asignación. Además, se describirá el estado del arte actual de esta temática, así como las principales líneas de investigación para la optimización de las herramientas utilizadas.

2.2 Situación del tráfico aéreo en la actualidad y estimaciones de futuro.

Antes de comenzar con el análisis del tráfico aéreo mundial en la actualidad, se definirán los siguientes conceptos básicos de obligada comprensión antes de profundizar en el estudio.

- **RPK (Revenue-Passenger-Kilometers):** Cantidad de pasajeros transportados multiplicados por la distancia recorrida.
- **ASK (Available-Seat-Kilometers):** Cantidad de asientos disponibles para la venta multiplicado por la distancia recorrida.
- **PLF (Passenger-Load-Factor):** Factor de ocupación, obtenido dividiendo los RPK entre los ASK.

2.2.1 Situación actual global

El informe anual de Diciembre de 2019 de la IATA³ concluye que el RPK mundial ha aumentado en un 4,2%, sin embargo, el ASK lo ha hecho en tan sólo un 3,4%, lo que determina que la demanda está creciendo más rápido que la capacidad, incrementando el factor de ocupación en 0,7 puntos porcentuales. Con ello, el PLF mundial alcanza ya el 82,6%, que, siguiendo la tendencia desde hace años, marca un nuevo record histórico.

Dentro de los datos globales, en 2019, Europa representa la región con mayor PLF situándolo en un 85,2%, mientras que África cuenta con el mayor crecimiento regional de demanda, un 4,9%. Además, según la publicación de la IATA, el 80.8% de las aerolíneas encuestadas han confirmado que esperan que los volúmenes de pasajeros transportados continúen aumentando en 2020.

Para poder hacernos a la idea de la evolución histórica del crecimiento de la industria en la Ilustración 1 se puede observar la evolución de los volúmenes de pasajeros aéreos en los últimos cuatro años.

³ La Asociación Internacional de Transporte Aéreo o IATA es una asociación comercial que representa aproximadamente el 82% del tráfico aéreo total (unas 290 aerolíneas) y cuenta con el objetivo de ayudar a formular políticas sobre los aspectos críticos de la aviación.

Resulta evidente que el crecimiento de la demanda de viajeros se ha reducido en el año 2019 frente a años anteriores. Sin ir más lejos, en 2018 el crecimiento anual del RPK fue del 7,3% y, en general, la media de crecimiento en el largo plazo ha estado alrededor de 5,5%, ambas cifras superiores a las de éste último año que han conformado el peor resultado desde la crisis financiera mundial del año 2008.

La bajada cuantitativa de este incremento se adjudica, principalmente, a un contexto económico mundial ligeramente más débil, marcado por una menor confianza empresarial y nuevas tensiones comerciales internacionales provocadas por conflictos políticos y geopolíticos en algunas regiones.

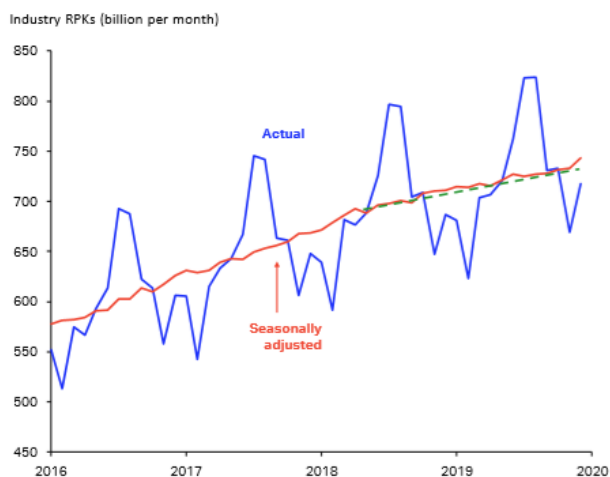


Ilustración 1 Evolución del volumen de pasajeros mundiales transportados por tráfico aéreo desde 2016. Extraído de (IATA, 2017)

2.2.2 Situación actual en España

Más concretamente, en nuestro país, las últimas estadísticas referentes al año 2019, muestran que, con 275,4 millones de pasajeros, se ha registrado un incremento del 4,4% respecto al año anterior.

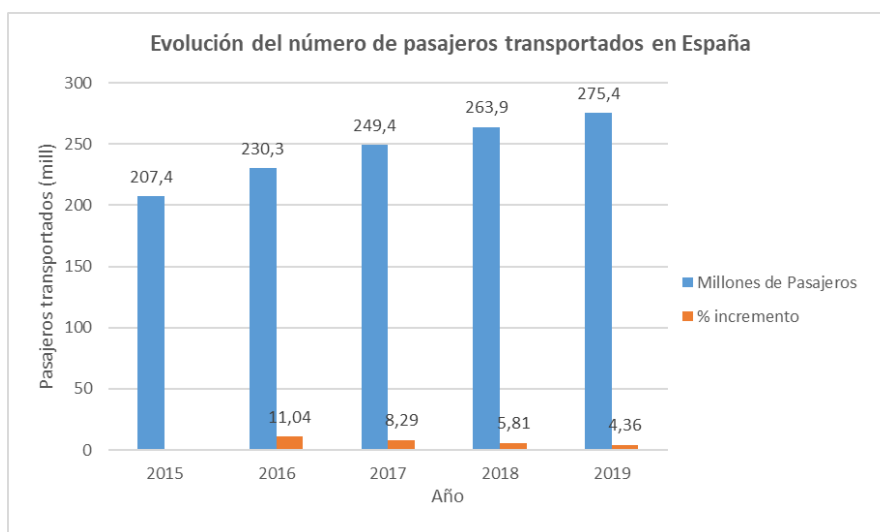


Ilustración 2 Evolución del número de pasajeros transportados en España. Elaboración propia a partir de (Subdirección General de Transporte Aéreo, 2019)

ASIGNACIÓN DE SLOTS AEROPORTUARIOS

Este resultado nos sitúa por encima de la media global de crecimiento que como ya se ha mencionado está en el 4,2%. (Subdirección General de Transporte Aéreo, 2019).

De esta forma, se mantiene la tendencia positiva que se lleva registrando desde noviembre de 2013.

Tal y como podemos observar en la Ilustración 2, a pesar de que el incremento es superior a la media mundial, siguiendo la tendencia global sí que se observa una importante bajada cuantitativa del mismo en los últimos años.

2.2.3 Previsiones de futuro a nivel europeo

A pesar de esta reducción del crecimiento, las previsiones sobre el futuro de la industria europea al margen de verse afectada por esta tendencia, presenta resultados de crecimiento y probable colapso de un gran número de aeropuertos.

El último estudio de EUROCONTROL sobre los retos del futuro de la aviación europea, *Challenges of Growth*, realizado en 2018 y con vistas al horizonte de 2040 estudia cuatro posibles escenarios futuros diferentes.

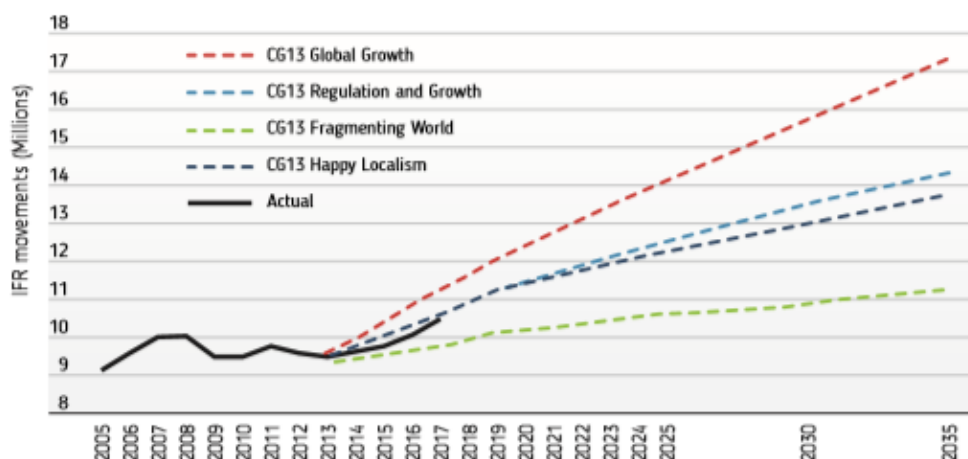


Ilustración 3 Estimación del crecimiento del tráfico aéreo Europeo en millones de vuelos. Extraído de *Challenges of Growth 2013, Summary Report, EUROCONTROL, June 2013*.

- Crecimiento Global: Fuerte crecimiento global usando la tecnología para mitigar los efectos medioambientales.
- Crecimiento Regulado: Crecimiento moderado regulado para conciliar la demanda con la sostenibilidad de la industria.
- Fragmentación Global: Escenario de crecimiento de tensiones y reducción de la globalización.
- Localización: Similar al escenario de crecimiento regulado, pero con una Europa frágil y cada vez más individualista.

Si observamos las curvas de crecimiento esperado para estos cuatro escenarios aplicadas desde el anterior estudio en 2013, en la **¡Error! No se encuentra el origen d e la referencia.**, podemos comprobar que el escenario de Crecimiento Regulado es el que más se adapta a los datos hasta 2017, por lo que es considerado como el más probable.

El mencionado escenario, estima para 2040 la siguiente situación:

- El número de vuelos aumentará en 16,2 millones en Europa, un 53% más de vuelos que en la actualidad.
- De los cuales 1,5 millones quedarán sin acomodar por falta de capacidad. Esto supone un 8% de la demanda estimada y aproximadamente 160 millones de personas sin viajar.
- A pesar de ésta pérdida de vuelos, se estima que, en el verano de 2040, 16 aeropuertos se encontrarán absolutamente congestionados.
- Esta congestión se trasladará a los usuarios en forma de retrasos, de media, 20 minutos de retraso por cada vuelo en el verano de 2040, transformando la situación actual tal y como podemos ver en la Ilustración 4.

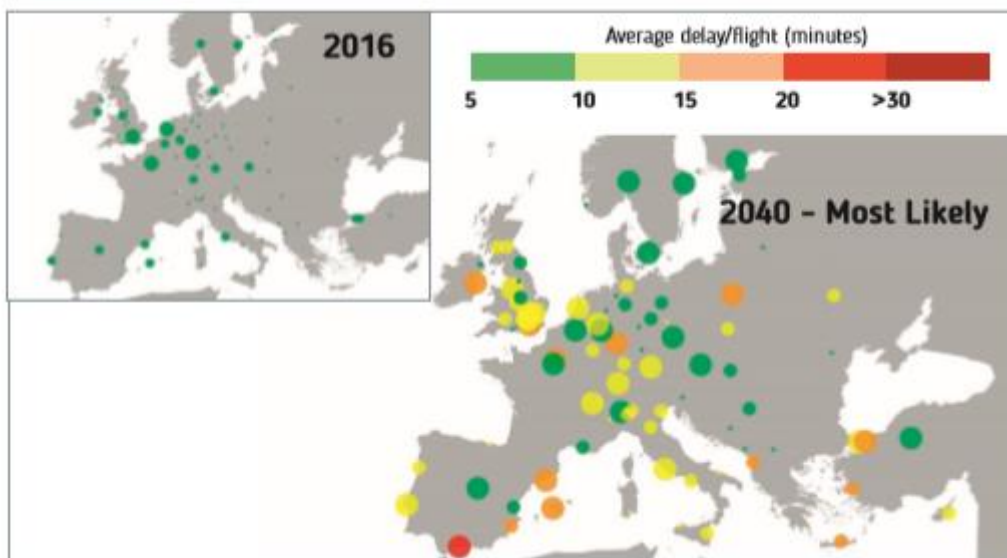


Ilustración 4 Evolución del tiempo de retraso medio de los vuelos de los principales aeropuertos de Europa 2016-2040. Extraído de: (EUROCONTROL, 2018)

En cuanto a la adaptación a este cambio, se espera que 111 aeropuertos europeos aumenten su capacidad de forma que se puedan gestionar un 16% más de vuelos que en la actualidad. Esta expansión se concentrará en los principales aeropuertos europeos a pesar de que son los más difíciles de ampliar por falta de espacio, lo cual hace necesario que se exploten al máximo todas las alternativas logísticas como la gestión de la asignación de slots.

2.3 Conceptos principales

A continuación, se definen los principales conceptos a tener en cuenta para la comprensión del trabajo. Los mismos están extraídos en su mayoría del Reglamento de la Comunidad Económica Europea Nº 95/93 (Consejo Europeo, 1993) relativo a normas comunes para la asignación de franjas horarias en los aeropuertos comunitarios y del *Worldwide Slot Management Standards* publicado en 2017 por la IATA (IATA, 2017).

Clasificación de los aeropuertos según su nivel de congestión y agentes implicados.

En primer lugar, se definirán por orden ascendente de congestión los tres niveles de aeropuertos existentes junto a sus agentes característicos.

Aeropuerto Nivel 1 o no coordinado: Aeropuertos donde la capacidad de la infraestructura aeroportuaria es, por lo general, suficiente para satisfacer la demanda de los usuarios del aeropuerto en cualquier franja horaria.

Las compañías que operen o vayan a operar en un aeropuerto Nivel 1 deberán comunicar debidamente sus intenciones al Agente de Asistencia en Tierra designado, así como al Gestor Aeroportuario.

Aeropuerto Nivel 2 o con facilitación de horarios: Aeropuertos donde existe una probabilidad de congestión durante algunos periodos del día, la semana o la temporada. Ésta puede resolverse mediante ajustes de la programación establecidos de mutuo acuerdo entre las compañías aéreas y el facilitador.

En este tipo de aeropuertos será necesario el nombramiento de un **Facilitador**, un agente independiente e imparcial que contará con el tiempo y los recursos suficientes para prestar los servicios de facilitación.

Las compañías, antes de operar en un aeropuerto Nivel 2 deberán enviar información sobre sus actividades previstas y estar preparadas para aceptar horarios alternativos si el facilitador así lo considera necesario.

Aeropuerto de Nivel 3 o Coordinado: Aeropuertos donde los proveedores de capacidad no han desarrollado una infraestructura suficiente, o donde los gobiernos han impuesto condiciones que imposibilitan satisfacer la demanda.

En este tipo de aeropuertos se deberá garantizar el nombramiento de un **Coordinador**. Dicho coordinador se encargará de asignar los slots a las compañías aéreas y otros operadores de forma imparcial y siguiendo la normativa.

Además, se deberá crear un **Comité de Coordinación** con el objetivo de asesorar al coordinador en los asuntos relacionados con la capacidad, la asignación de slots y la supervisión y utilización de los slots en el aeropuerto. De tal comité pueden formar parte todas las compañías aéreas que utilicen regularmente el aeropuerto, el gestor aeroportuario, las autoridades de control del tráfico aéreo y los representantes de la aviación comercial.

En este tipo de aeropuertos es necesario que todas las compañías aéreas y demás operadores de aeronaves dispongan de un slot asignado por un coordinador para poder aterrizar o despegar en el aeropuerto durante los periodos en que tiene lugar la asignación de slots.

Franja Horaria y otras definiciones necesarias

Franja horaria o slot: El concepto franja horaria hace referencia al permiso dado por un coordinador para utilizar toda la infraestructura aeroportuaria necesaria con fines de aterrizaje y despegue en una fecha y hora determinada para la prestación de un servicio aéreo en un aeropuerto Nivel 3. Dichos aeropuertos serán, por tanto, los que se estudiarán en el presente trabajo.

Nuevo entrante: Se considera nuevo entrante, en rasgos generales, a una compañía aérea que solicite una franja horaria en un aeropuerto para cualquier día y que dispondría, en el caso en el que fuera concedida, de menos de cinco franjas en dicho aeropuerto para ese día. Una compañía no puede ser nuevo entrante si cuenta con más del 5% del total de franjas aéreas disponibles de un aeropuerto o más del 4% del total de franjas disponibles de un sistema de aeropuertos del que forma parte dicho aeropuerto.

Parámetros de Coordinación: Éste término hace referencia a la expresión en términos operativos de toda la capacidad disponible en un aeropuerto para asignarla en franjas durante cada periodo de coordinación que reflejará todos los factores técnicos, operativos y medioambientales que influyen en el funcionamiento de la infraestructura aeroportuaria y de sus subsistemas.

2.4 Asignación de slots

2.4.1 Breve marco histórico

Históricamente, a nivel nacional, el transporte aéreo ha sido regulado bajo el patrocinio y control de las autoridades nacionales. Esto significó en Europa la creación de líneas aéreas nacionales monopolistas y aeropuertos de carácter público.

En cuanto a los vuelos internacionales, la necesidad de acuerdos bilaterales entre Estados llevó a un control estricto del acceso a los mercados y los regímenes de propiedad de las líneas aéreas.

Como consecuencia de estas actuaciones se consiguió que la fragmentación en mercados nacionales y la falta de competencia real avanzaran en dirección opuesta a la mejora del nivel de vida y el consiguiente aumento de la demanda de transporte aéreo. (Coito, 2019)

Es por ello que a partir de mediados de 1970 la aviación civil comenzó la transformación de una economía administrada a una de mercado. En 1978 se liberalizó el mercado de Estados Unidos y en 1986 en Europa con el Acta Única Europea.

En la actualidad, el Reglamento (CEE) n.º 95/93, que estudiaremos a continuación, establece que las franjas horarias de los aeropuertos Nivel 3 se asignarán a las líneas aéreas de un manera equitativa, no discriminatoria y transparente mediante el ya descrito Coordinador de Franjas Horarias. (Consejo Europeo, 1993)

Si bien es cierto que, tal y como se estudiará en un apartado más adelante, varios estudios afirman que este sistema de asignación de franjas impide el uso óptimo de la capacidad aeroportuaria, el objetivo principal de estas medidas se ha alcanzado plenamente, al menos hasta ahora. De 1995 a 2014, mientras que el número de kilómetros recorridos por pasajeros dentro de la UE registró un aumento del 23%, en el caso del transporte aéreo fue del 74%. Además, la cuota de la aviación total aumentó del 6,5% al 9,2%, lo que supone el mayor crecimiento de todos los modos de transporte de la Unión con diferencia. (Coito, 2019)

2.4.2 Principios

La coordinación de aeropuertos es un método para gestionar la capacidad de los mismos mediante la aplicación del conjunto de normas contenidas en las directrices mundiales. La coordinación conlleva la asignación de la capacidad aeroportuaria, restringida o limitada, a las compañías aéreas y a otros operadores de aeronaves para garantizar el funcionamiento viable del aeropuerto y del transporte aéreo. La coordinación también es un procedimiento para incrementar al máximo el uso eficiente de la infraestructura aeroportuaria. Si bien no es una solución al problema de falta de capacidad, sí es una solución provisional para la gestión de infraestructuras congestionadas. (IATA, 2017)

Los dos principios primordiales en este proceso son:

- Los derechos históricos o “*grandfather rights*” por los que una compañía tiene derecho a obtener una determinada serie de franjas por el hecho de haberlas operado en la temporada anterior. Este derecho está sujeto al segundo principio:
- La filosofía “*use it or lose it*”, por la que las compañías sólo podrán acceder a sus derechos históricos si en la temporada anterior han utilizado esos slots como mínimo el 80% del tiempo asignado.

De esta forma se garantiza la continuidad de los servicios regulares y se da valor a las compañías que han hecho un uso adecuado de las instalaciones.

2.4.3 Procedimiento de Asignación

El procedimiento de asignación de franjas horarias se realiza en base a los principios previamente mencionados y a los parámetros de coordinación establecidos.

Dichos parámetros hacen referencia a la capacidad disponible del aeropuerto durante el periodo a programar. Se calculan teniendo en cuenta todos los condicionantes técnicos, operativos y medioambientales pertinentes, así como los cambios que puedan sufrir, los distintos tipos de tráfico del aeropuerto, la situación de la capacidad y el potencial grado de congestión del espacio aéreo. (Consejo Europeo, 1993). En la práctica, sin embargo, normalmente la capacidad declarada ronda entre el 85 y el 90% de la capacidad total calculada. (Neufville, 2013)

Estos parámetros se estudiarán con mayor detalle en el CAPÍTULO 4 .

Una vez que se conozca el número de franjas horarias a distribuir, se comenzará con la asignación.

El procedimiento de asignación se divide en dos fases principales, la asignación primaria y la asignación secundaria, que se explicarán a continuación:

ASIGNACIÓN PRIMARIA

En primer lugar, la asignación se basará en el mencionado derecho histórico de las compañías aéreas por el cual, el coordinador del aeropuerto se encuentra en la obligación de renovar, si la compañía así lo desea, todos los slots que hayan sido utilizados más del 80% del tiempo programado en el periodo anterior.

Todas las franjas que no hayan cumplido con los requisitos de derecho histórico pasarán a encontrarse en la denominada Reserva de Slots.

Del conjunto de dicha reserva se destinará un 50% de las franjas horarias restantes a compañías consideradas nuevos entrantes para, de esta forma, asegurar que nuevas compañías puedan entrar a formar parte de la programación del aeropuerto. Con ello se pretende fomentar la competencia entre aerolíneas.

Si la demanda de los nuevos entrantes no alcanza el mencionado 50% de las franjas restantes, dichas franjas pasarán de forma directa al proceso de asignación secundaria.

El 50% restante se asignará al resto de compañías interesadas en ellos cumpliendo con el siguiente orden de prioridades:

1. Compañías que cumplan las condiciones de los derechos históricos, pero deseen un cambio de slot.
2. Servicios que programen operaciones para todo el año.
3. Resto de ofertas.

En todo caso, cuando no se pueda satisfacer una solicitud, se propondrá la solución que mejor se adapte a los requerimientos de la compañía.

Este proceso se repetirá cíclicamente hasta que se hayan asignado el 100% de dichas franjas.

ASIGNACIÓN SECUNDARIA

Este proceso no es llevado a cabo por las autoridades aeroportuarias, sino que consiste en un mercado formado por las compañías que hayan conseguido algún slot en el proceso de asignación anterior y deseen intercambiarlo por otro.

No podrán formar parte de dicho mercado los slots asignados a compañías consideradas nuevos entrantes. Esto es así para preservar el derecho de entrada a nuevas compañías y evitar que éstas se beneficien de su prioridad para obtener slots con el único fin de transferirlos.

Durante este intercambio se preservará la total transparencia de la negociación y el coordinador responsable deberá ser informado de cada transferencia para autorizarla o no en el caso de que no cumpla con los criterios del Reglamento. (IATA, 2017)

2.5 Principales líneas de investigación

A pesar de que el sistema propuesto por la IATA e implantado en la mayoría de aeropuertos del mundo ha demostrado ser eficiente y mantener los retrasos de los vuelos en cifras razonables, su antigüedad y, para algunos, falta de optimización de los recursos disponibles, ha provocado que se estudien nuevas alternativas para sustituir su uso total o parcialmente. Durante este apartado, se presentarán las principales críticas e ideas planteadas.

En cuanto a las principales críticas al sistema, la mayoría de estudios sobre esta temática hacen mención a la antigüedad del reglamento (1993) frente a la rápida e

imparable evolución de tráfico aéreo. Afirman que el proceso de asignación existente no se adapta a las necesidades y complejidades del problema actual. Se considera un sistema excesivamente simplificado que en algunos casos no tiene en cuenta la eficiencia tanto de la asignación como de la utilización de unos recursos cada vez más escasos. (Zografos, 2017)

Por otro lado, el estudio realizado por el Parlamento Europeo sobre los slots aeroportuarios (Parlamento Europeo, 2016) divide las carencias del sistema en la falta de dos eficacias diferenciadas:

- **Eficacia Productiva.** Esta eficacia consiste en la búsqueda del uso del 100% de los slots aeroportuarios disponibles en una situación global en la que cada vez son un recurso más escaso. El sistema actual no cuenta con ella porque da a las aerolíneas la posibilidad de conservar sus derechos históricos usando tan sólo el 80% de sus slots, pudiendo dejar inutilizado el 20% restante. Con ello, éstas cuentan con cierta flexibilidad para adaptarse a la demanda, pero no se maximiza su uso.
- **Eficacia de Asignación.** Esta eficacia hace referencia a asignar cada franja horaria a la aerolínea que le vaya a otorgar mayor utilidad social. Este concepto de nuevo confronta con los derechos históricos que reducen la competitividad y asignan sistemáticamente franjas que quizá en el pasado sí contaban con una utilidad óptima, pero en el presente no. El acaparamiento de derechos históricos por parte de algunas aerolíneas con el sólo objetivo de no perderlos para su uso futuro o evitar la entrada de nuevos competidores al mercado da lugar a dos fenómenos:
 - o “Slot hoarding” o acumulación de slots: Este fenómeno consiste en que, para conservar sus derechos, las aerolíneas operen en algunas franjas con aeronaves de menor capacidad o con menor carga. De esta forma cumplen con el 80% de utilización, pero la realidad es que no hacen un uso eficaz y óptimo de la franja, sin aprovechar toda su utilidad.
 - o “Babysitting” o servicio de niñera: Esta estrategia consiste en la transferencia de slots (durante el segundo proceso de asignación) a aerolíneas secundarias pertenecientes a la misma compañía para que los utilicen hasta que su uso genere un mayor beneficio.

Ambas estrategias llevan a un uso ineficiente de las franjas asignadas.

En cuanto a la proposición de soluciones o posibles mejoras, la optimización de la asignación de slots ha sido objeto de numerosos estudios. La mayoría de ellos cuentan con un punto en común, la asignación óptima de slots pasa por la necesidad de conocer su verdadero valor para las aerolíneas.

Es necesario conocer y comprender la utilidad o falta de utilidad que supone cada franja para las aerolíneas. Esto incluye también, los niveles de tolerancia frente a desviaciones de horarios así como la valoración económica real que les asignan. (Zografos, 2017)

Para ello, los principales estudios proponen dos métodos para garantizar que cada slot es asignado sólo a las líneas aéreas que estén dispuestas a pagar más por él

(Díaz Olariaga & Ruiz de la Villa, 2010). Esto implica además que en una situación de competitividad el beneficio de la compañía sea un fiel indicador de la utilidad social obtenida con esa franja. (Parlamento Europeo, 2016)

- **El establecimiento de un mercado de slots**, dotando a las aerolíneas de la capacidad de vender sus slots a otras de forma que mantener sus slots históricos también les suponga un coste de oportunidad que actualmente no existe. En este caso la parte vendedora fijaría el precio en los niveles de mercado que estime, posiblemente reflejando la relación oferta-demanda sobre ese slot. (Díaz Olariaga & Ruiz de la Villa, 2010)
- **La realización de subastas**. La teoría económica confirma que, en una subasta bien definida, la voluntad de pagar un bien por parte del comprador refleja el beneficio que obtendrá con su uso, y con ello, tal y como se ha indicado anteriormente, la utilidad social que aportará. (Parlamento Europeo, 2016).

Algunos estudios han tratado de complementar estas dos estrategias hasta formar la asignación completa (Mott MacDonald, 2006).

Estos métodos, teóricamente, garantizarían la eficiencia de asignación mencionada anteriormente y, muy posiblemente también la eficiencia de productividad. Algunos estudios ya lo han probado mediante el modelado y simulación de subastas para la resolución de este problema. (Araúzo J.A., Villafáñez F.A., García D.P., Pajares J., Pavón J., 2018)

Estas propuestas, parecen en su mayoría irremediablemente unidas a la utilización de los conocimientos matemáticos existentes sobre planificación de slots. Se desarrollan e investigan modelos de optimización y resolución de algoritmos aplicados al problema de capacidad de la asignación de slots. (Parlamento Europeo, 2016)

Este problema se puede resumir en la consecución de una función objetivo basada en la utilidad total de las franjas asignadas sujeta a diferentes restricciones de capacidad. Además, esto se puede aplicar tanto a problemas de un solo aeropuerto como a problemas de redes de aeropuertos, tal y como se hará en el presente trabajo.

2.6 Conclusiones

La gestión del uso de la capacidad aeroportuaria es un punto crítico del tráfico aéreo de nuestros días. El colapso de algunos aeropuertos en temporadas altas y el aumento de los retrasos son fenómenos a mitigar, puesto que las previsiones de futuro auguran la continuidad del crecimiento de la demanda.

Frente a medidas infraestructurales para contar con mayor capacidad, el presente trabajo estudiará la mejora en la gestión de la capacidad actual y la optimización del uso de los recursos existentes. En la consecución de esa mejora resulta innegable la importancia del proceso de asignación de slots.

ASIGNACIÓN DE SLOTS AEROPORTUARIOS

Numerosos estudios confirman que el proceso que se sigue actualmente en la mayoría de aeropuertos del mundo, basado en las pautas dictadas por la IATA y la CEE, no se adapta a las necesidades del tráfico aéreo actual.

Tras estudiar las principales críticas al sistema y soluciones propuestas por los estudios más recientes, este trabajo tratará de avanzar un paso más en el estudio de la resolución del problema de asignación de slots por medio de algoritmos matemáticos de programación aplicados a redes de aeropuertos.

CAPÍTULO 3 ESTUDIO DE LAS REDES AEROPORTUARIAS.

3.1 Introducción

En el presente capítulo se estudiarán las redes como un factor importante a la hora de caracterizar el tráfico aéreo. En primer lugar, se analizará la teoría de redes complejas como ciencia, con el objetivo de contar con un marco teórico sobre esta temática. Se hará referencia a la evolución histórica de su estudio, sus tipos y sus propiedades básicas.

A continuación, se estudiarán las redes de aeropuertos, aplicando lo analizado anteriormente a este caso concreto. Se detallarán sus características, propiedades y principales modelos, así como la medida en la que afectan a la congestión aeroportuaria. Se finalizará con una conclusión a modo de resumen.

El objetivo principal de este capítulo consiste en fundamentar el diseño de escenarios que se llevará a cabo en el CAPÍTULO 6 .

3.2 Teoría de Redes

3.2.1 Concepto y Evolución Histórica

Una red es, en su forma más simple, un conjunto de elementos llamados nodos o vértices conectados entre sí dos a dos por líneas o aristas (Newman M. , Networks: An Introduction, 2010). En la actualidad, las redes están presentes en multitud de sistemas tanto naturales como sociales o tecnológicos.

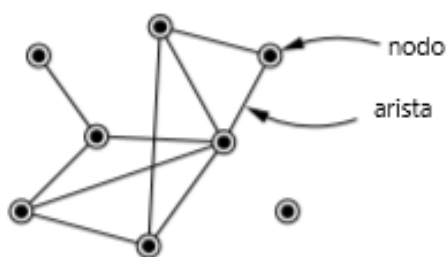


Ilustración 5 Representación de una red simple formada por 8 nodos interconectados por 10 aristas. Elaboración propia a partir de (Sallan & Jordan, 2019).

El estudio de las redes desde un punto de vista matemático como teoría de grafos, es uno de los pilares fundamentales de las matemáticas discretas. En cuanto a las primeras pruebas de su estudio, se considera que la resolución del problema de Los Puentes de Königsberg⁴ por Euler en 1736 sentó las bases de esta temática. A partir de ese momento, el estudio de redes ha evolucionado hasta convertirse en una materia sustancial (Newman M. , 2003).

⁴ Euler formuló el problema con el siguiente enunciado: “En la ciudad de Königsberg, Prusia, hay una isla A llamada Kneiphof, rodeada por los dos brazos del río Pregel. Hay siete puentes a,b,c,d,e,f y g que cruzan por los dos brazos del río. La cuestión consiste en determinar si una persona puede realizar un paseo de tal forma que cruce cada uno de esos puentes una sola vez” (Euler, 1741). Euler demostró la imposibilidad de tal ruta en su artículo titulado *Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis*. Este artículo fue considerado por varios autores como el nacimiento de la Teoría de Grafos (Apple, 2009).

Para explicar la historia evolutiva del estudio de redes se utilizará la clasificación en periodos empleada por Ted G. Lewis en su obra *Network Science: Theory and Applications* (Lewis, 2009):

- **Periodo previo a las redes (1736-1966).** Durante este periodo apareció la teoría matemática de grafos gracias a la mencionada resolución del problema de los Puentes de Königsberg por Euler en 1736. Gracias a este trabajo se pudo demostrar que las absorciones de la realidad en forma de nodos y aristas podían ser útiles para la resolución de problemas reales. Durante este periodo surgió también la teoría de la asociación preferencial o “preferential attachment” (Yule, 1925) que explica el crecimiento de redes como un proceso emergente y no aleatorio. Por último, este periodo finalizó con la creación del algoritmo Erdos-Renyi (ER) (Erdős & Rényi, 1960) que estableció el primer método de generación de redes aleatorias.
- **Periodo de desarrollo de las redes (1967-1998).** Este periodo estuvo marcado por la puesta a prueba del famoso experimento de los “seis grados de separación” por Stanley Milgram⁵. Los resultados del experimento demostraron el denominado “small-world effect” o efecto del pequeño mundo y con él aparecieron las redes pequeño mundo. A partir de éstas, durante los años noventa se dejó atrás la idea de grafos y se establecieron gran parte de los fundamentos de la teoría de redes que conocemos en la actualidad.
- **Periodo moderno (1998-Actualidad).** Durante este periodo la teoría de redes se ha convertido en una disciplina científica como tal y se ha aplicado a numerosos campos de estudio y fenómenos del mundo real.

En los últimos años ha surgido un nuevo movimiento en la investigación sobre redes. Esta perspectiva se aleja del estudio de pequeños grafos y las propiedades individuales de sus aristas y nodos para considerar las propiedades a gran escala. Este nuevo enfoque ha sido propiciado y soportado por la aparición de nuevas tecnologías y herramientas que hacen posible analizar datos a gran escala con facilidad (Newman M. , 2003).

En este trabajo se estudiarán las redes mediante la denominada “*networks science*” o *teoría de redes complejas*. Esta teoría comprende las redes como un ejemplo de sistemas complejos formados por elementos interdependientes que interactúan entre sí, llamados componentes (Sallan & Jordan, 2019). Los sistemas complejos, cuentan con dos características principales:

- **Holismo.** Realizar cambios en uno de los componentes puede afectar a todo el sistema de forma inesperada.

⁵ La teoría de los seis grados de separación afirma que cualquier persona puede estar conectada a cualquier otra a través de una cadena de conocidos que no tiene más de cinco intermediarios, es decir, que conecte a ambas personas con sólo seis enlaces. Esta teoría fue inicialmente propuesta por el escritor húngaro Frigyes Karinthy en un cuento titulado “Chains” publicado en 1929.

- **Sinergismo.** El sistema complejo, por el hecho de serlo, puede realizar tareas que no podrían ser superadas por los componentes de forma individual.

En definitiva, los sistemas complejos tratan de estudiar el vínculo entre la interacción microscópica de los componentes del sistema y la aparición de fenómenos macroscópicos que afectan a su totalidad.

Su estudio comenzó en los años 60 cuando se observó que sistemas de diferentes naturalezas se comportaban y formaban estructuras similares (von Bertalanffy, 1968) y se convirtió en un campo de investigación interdisciplinar.

En el caso de las redes, entenderemos la red como sistema complejo, los nodos como componentes y las aristas como interacciones entre elementos.

3.2.2 Definición y principales tipos

Como ya se ha mencionado, una red es un conjunto de elementos o nodos conectados dos a dos por aristas o links. Una red compleja puede ser representada matemáticamente como un gráfico de la siguiente forma:

$$G = (N, \varepsilon)$$

Donde N es un conjunto de nodos que representa los componentes de la red y ε es un conjunto de pares de N que representa los links o aristas del gráfico, es decir, las relaciones entre los nodos de la red. El número de nodos será denotado como N y el número de aristas como ε . (Sallan & Jordan, 2019).

Existen ligeras diferencias en cuanto a la forma de definir la función por distintos autores. Algunos hacen referencia al posible carácter dinámico de las redes añadiendo a su fórmula la dependencia respecto al tiempo (Lewis, 2009):

$$G(t) = \{N(t), L(t), f(t): J(t)\}$$

Donde t es el tiempo simulado o real y las funciones N y f coinciden, respectivamente con las N y ε de la anterior definición pero añadiendo la dependencia temporal. Además, este autor utiliza la función L para nombrar a los links o aristas y con la función J describe el algoritmo que determinará el comportamiento de los nodos y links respecto al tiempo.

En cuanto a la visualización de redes, los métodos simplificados que se emplean normalmente son:

- **Grafos** en los que se representan los nodos como puntos y las aristas como líneas que los conectan.
- **Matrices de adyacencia A** , es decir, matrices cuadradas ($N \times N$) cuyos componentes a_{ij} obtendrán el valor 1 si existe una conexión entre los nodos a los que se hace referencia y 0 en caso contrario.

A continuación, se muestra un ejemplo de las dos posibles representaciones para una red simple:

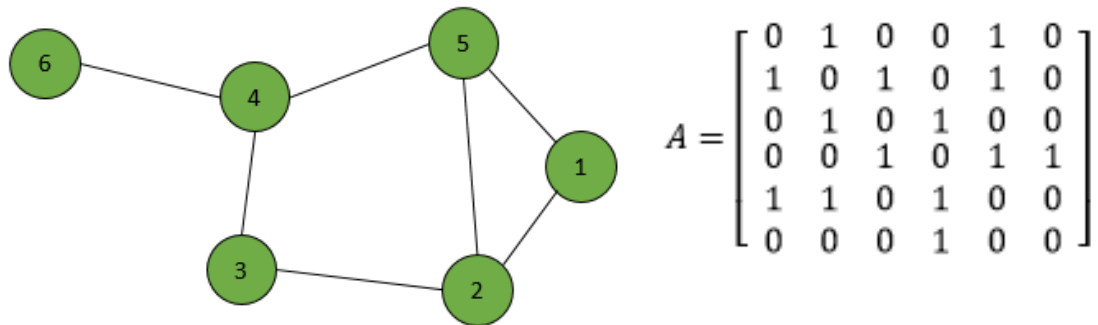


Ilustración 6 Representaciones de una misma red simple. Izquierda: Grafo, Derecha: Matriz de Adyacencia. Elaboración propia.

A partir de esta definición de una red simple, se pueden añadir nuevas características tanto al grafo como a la matriz dependiendo del tipo de conexiones de la red que se esté estudiando. Estas conexiones pueden ser:

- **Dirigidas o no dirigidas.** Las conexiones de un grafo son no dirigidas si las relaciones entre los pares de nodos son siempre recíprocas, esto da lugar a una matriz de adyacencia simétrica, como la de la Ilustración 6. Si no tiene porqué ser así, estaríamos ante una red con conexiones dirigidas y su matriz de representación no será simétrica tal y como se muestra en la Ilustración 7. También pueden existir redes mixtas, con conexiones de los dos

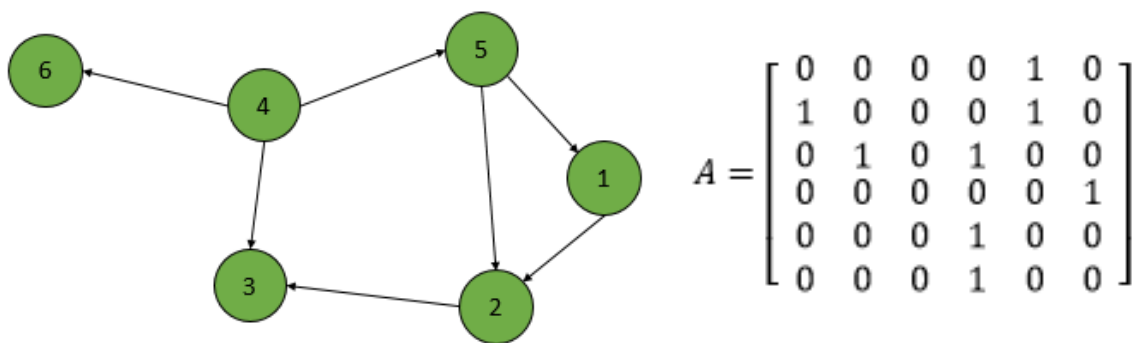


Ilustración 7 Ejemplo de representación de red dirigida. Elaboración propia.

tipos.

- **Con peso o sin peso.** Las conexiones sin peso mostradas en las matrices anteriores son binarias, la conexión existe (1) o no existe (0). Sin embargo, en algunos tipos de redes es necesario señalar que existen diferencias de capacidad, intensidad, distancia o tiempo entre algunas conexiones. Este tipo de redes se pueden presentar de la siguiente manera:

$$G = (N, \varepsilon, W)$$

De esta manera, a la fórmula general se le añade la variable W que representa el conjunto de números reales de los pesos asociados con cada arista. En este caso la matriz de representación no sería de adyacencia puesto que las relaciones dejarían de ser binarias. Una forma de representarlas podría ser la que se muestra a continuación.

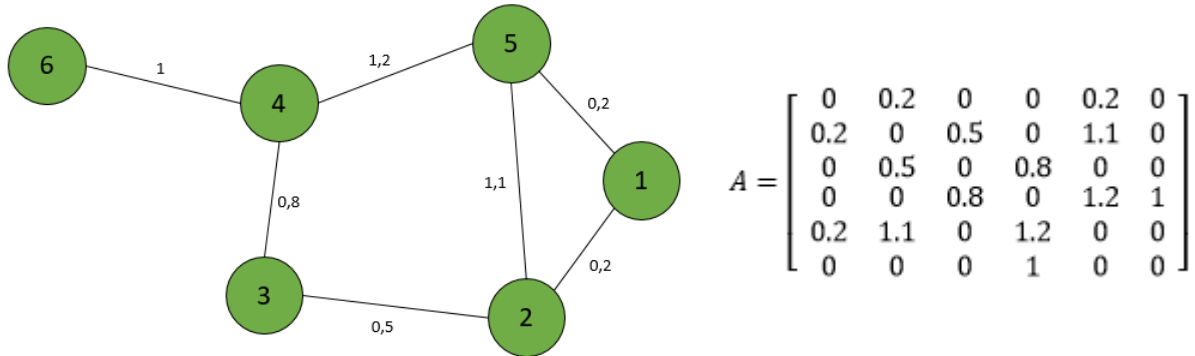


Ilustración 8 Ejemplo de representación de red con peso. Elaboración propia

- **Simplex o Multiplex.** Existe la posibilidad de que dentro de una misma red se encuentren diferentes tipos de enlaces que hagan referencia a relaciones diferentes. En las redes simplex (utilizadas normalmente) los enlaces siempre hacen referencia a un mismo ente, por ejemplo, la red aeroportuaria. Sin embargo, las redes multiplex pueden referirse a entes diferentes dependiendo de la señalización del enlace, por ejemplo, la red de líneas aeroportuarias y ferroviarias.
- **Con o sin loops.** Por último, detallaremos que, en algunas redes, en las que está permitida la existencia de *loops* o bucles, pueden existir enlaces con el mismo origen y destino.

3.2.3 Propiedades

Una vez definidos los tipos de redes que podemos encontrar, pasaremos a analizar las propiedades básicas que las caracterizan.

Para realizar esta selección de las propiedades más importantes nos basaremos principalmente en la clasificación que se hace en Sallan & Jordan (2019) y Lewis (2009).

Distancia geodésica y eficiencia global.

La **distancia geodésica** hace referencia a la distancia mínima que se debe recorrer para comunicar un par de nodos. En las redes sin peso, esta distancia se mide como la suma del mínimo número de nodos que se deben atravesar para alcanzar el nodo objetivo partiendo del nodo de inicio. Si dos nodos no están conectados, su distancia geodésica será infinita.

A partir de este concepto aparecen otros relativos a la distancia dentro de la red:

- El **diámetro de la red** es la distancia (en número de nodos atravesados) que separa los dos nodos más alejados de la red.
- El **paso medio o longitud del camino medio** es el número medio de enlaces o nodos que hay que recorrer para unir dos nodos mediante el camino más corto, es decir, la media de las distancias geodésicas de todos los pares de nodos.

Estas medidas nos dan detalles sobre lo compacta que es una red o sobre la separación típica de sus nodos.

Para tener en cuenta el hecho de que dos nodos completamente desconectados, separados por una distancia infinita, pueden condicionar en gran medida estas propiedades se introdujo el concepto de **eficiencia global** de la red (Latora & Marchiori, 2001). Se define como la media armónica de las distancias y evalúa la conectividad de la red entre el 0, para una red completamente desconectada y el 1 para una red completa (todos sus nodos están conectados directamente dos a dos).

Clustering

El **clustering** es una propiedad que mide la probabilidad de que dos nodos conectados a un tercero tengan una conexión directa entre ellos.

Para medirlo se introdujo el concepto de **coeficiente de clustering local** (Watts & Strogatz, 1998), que varía entre 0 y 1. El coeficiente local de clustering para un nodo será cero si ninguno de sus vecinos está conectado entre sí de forma directa y 1 si todos ellos lo están.

A partir de este coeficiente, realizando el promedio para todos sus nodos, surge el **coeficiente medio de clustering** de una red.

Grado e intermediación.

El **grado de un nodo** hace referencia al número de links que lo conectan al resto de la red, es decir, a su conectividad. Si un nodo está conectado, por ejemplo, a otros dos por medio de dos aristas, su grado será dos. A continuación, se detallan otros conceptos que parten del estudio del grado como propiedad:

- El elemento **hub** o centro de actividad de una red es el nodo con mayor grado. Es posible que un sistema cuente con más de un *hub* si varios nodos tienen el mismo número de links y coinciden con el máximo.
- El **grado de la red** se define como el máximo grado de todos sus nodos, es decir, el grado de su nodo *hub*.
- El **grado medio de la red** es el promedio de los grados de todos sus nodos.
- Por último, la **distribución de grado de la red** describe las frecuencias relativas de los nodos que tienen grados distintos de tal manera que conforma una distribución.

El grado es un indicador de la **centralidad local** de la red, los nodos que cuentan con un grado muy alto tienen muchos enlaces directos con otros. Sin embargo, si

queremos medir la importancia de un nodo teniendo en cuenta sus conexiones indirectas utilizaremos la medida de la **intermediación del nodo**.

Para medir este concepto se utiliza la suma del número de caminos geodésicos que atraviesan ese nodo dividida entre la suma total de caminos geodésicos de cada par de nodos. De este modo se mide que porcentaje de caminos geodésicos lo atraviesan, y con ello se mide cuantitativamente su importancia para la conectividad de la red.

El concepto de intermediación también se puede aplicar a las aristas de la red e inicialmente se introdujo para detectar la existencia de comunidades dentro de una red (Newman & Girvan, 2004) a las que se hará referencia más adelante.

Asortatividad

La **asortatividad** mide la existencia de correlaciones entre los nodos de una red (Newman M. , The Structure and Function of Complex Networks, 2003). Más concretamente entre las propiedades de nodos vecinos. Estas propiedades pueden ser discretas o escalares.

Cuando una red es asortativa o de asortatividad positiva, sus nodos tienden a estar conectados con otros que cuentan con características similares. En el caso de ser disortativa, ocurre el efecto contrario, los nodos suelen estar conectados directamente con aquellos que tienen características opuestas.

Generalmente esta propiedad se suele medir comparando el grado de nodos adyacentes, en este caso propiedad escalar.

Comunidades

Una comunidad dentro de una red es un conjunto de nodos altamente conectados entre sí pero débilmente conectados con otros grupos que a su vez sí están altamente conectados entre sí. Un claro ejemplo de este fenómeno se puede observar en las redes sociales con los grupos de amigos.

3.2.4 Modelos de redes complejas

Los modelos de redes tratan de, siguiendo el propósito del estudio de las redes complejas, explicar las propiedades macroscópicas de los sistemas por medio de sus interacciones microscópicas. En este apartado se estudiarán los modelos teóricos de redes basados en el estudio de Sallan & Jordan (2019).

Redes regulares

La principal característica de las redes regulares es que todos sus nodos tienen el mismo grado, es decir, cuentan con el mismo número de aristas y, por tanto, están conectados directamente al mismo número de nodos vecinos.

Estas características hacen que cuenten con un alto coeficiente medio de clustering, pero también con una distancia geodésica media alta.

Redes aleatorias (modelo ER)

Tal y como se menciona en el Apartado 3.2.1 el modelo Érdos-Renyi de generación de redes proponía la existencia de nodos conectados por enlaces aleatorios.

Por ello, estas redes pueden generarse aleatoriamente a partir de la distribución del grado de la red que une dos nodos cualesquiera con una probabilidad p . Esto provoca que todos los nodos sean estadísticamente equivalentes y hace que las redes aleatorias con gran número de nodos posean un coeficiente medio de clustering bajo, pero distancias geodésicas pequeñas.

Si bien estas redes no se asemejan a la realidad, se continúan utilizando puesto que sirven como base comparativa de redes reales y ayudan a detectar sus propiedades.

Redes pequeño-mundo

Tras el descubrimiento de los dos modelos anteriores de redes, en el segundo periodo de su estudio, mencionado en el Apartado 3.2.1 como el Periodo de desarrollo de las redes, se planteó que las redes reales eran considerablemente diferentes a los modelos regulares o aleatorios.

Por un lado, las redes reales cuentan con altos valores de coeficiente medio de clustering tal y como las redes regulares. Sin embargo, normalmente muestran pequeños valores de distancia geodésica media como las redes aleatorias. Estas dos características definen las redes pequeño-mundo que se descubrieron por primera vez con el mencionado experimento de los seis grados de separación.

Como podemos observar en la Ilustración 9 el proceso de generación propuesto por Watts and Strogatz consistía en redirigir una pequeña parte de los enlaces de una red regular. De esta forma, la red quedaría en un punto intermedio entre el modelo regular y el modelo aleatorio. Con ello, se consigue disminuir rápidamente la distancia geodésica media sin afectar en gran medida al alto coeficiente de clustering que en rasgos generales se mantiene.



Ilustración 9 Ilustración del modelo de generación de redes de Watts and Strogatz. De derecha a izquierda: Red regular / Red pequeño-mundo / Red aleatoria. Extraído de (Sallan & Jordan, 2019).

Redes scale-free

Este modelo de redes surge tras la observación de que, en la realidad, con frecuencia, los nodos con grados altos están rodeados por nodos con grados bajos.

Esto rompe con los modelos regulares y aleatorios que proponen redes en las que todos los nodos tienen características muy similares.

Además, frente a los modelos que asumen que las redes están formadas por N nodos constantes (como el de las redes pequeño-mundo), este modelo considera el factor de crecimiento por el que a una red inicial se le van añadiendo nodos y vértices conforme al paso del tiempo.

Dicho crecimiento hace que las conexiones dejen de ser uniformes y aparece el mencionado fenómeno del emparejamiento preferente o *preferential attachment*. Este fenómeno provoca que la probabilidad de que un nuevo nodo se conecte con otro mediante una arista dependa directamente del grado del segundo.

En estas redes, la distancia geodésica media es similar a las redes pequeño-mundo, sin embargo, el coeficiente medio de clustering es bajo, tal y como sucede en las redes aleatorias.

3.3 Características de las redes aeroportuarias

Teniendo en cuenta la teoría de redes estudiada en el apartado anterior, en primer lugar, estableceremos los conceptos principales para su aplicación a las redes de aeropuertos.

En las redes aeroportuarias los nodos serán los aeropuertos (en el caso de las ciudades que cuentan con varios se podrán simplificar en uno sólo de mayor capacidad (Guimerà, Mossa, Turtschi, & Amaral, 2005)). En cuanto a las aristas, en la bibliografía podemos encontrar dos enfoques para su estudio (Sallan & Jordan, 2019):

- **Redes de aeropuertos (*airport networks*).** En estas redes las aristas o conexiones representan las rutas existentes entre aeropuertos o ciudades. Las rutas siempre se considerarán bidireccionales puesto que existe la posibilidad de realizarlas en ambos sentidos, por ello, estas redes son no dirigidas.
- **Redes de navegación (*navigation networks*).** En este caso, las aristas de la red representan las rutas finalmente tomadas por las aerolíneas, que en algunos casos pueden diferir de las anteriores. Si bien generalmente suelen construirse rutas de ida y vuelta, pueden existir casos de rutas triangulares en las que la conexión de dos aeropuertos sea unidireccional, por tanto, estas redes se estudiarán como redes dirigidas.

Entenderemos estos dos tipos de redes como dos niveles diferentes de profundización en el estudio y a partir de ahora nos centraremos en las redes de aeropuertos no dirigidas por ser una simplificación viable de las segundas.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que estas redes dependen directamente de dos factores, el espacio y el tiempo, por lo que su estudio siempre irá acompañado de la siguiente información:

- **Alcance espacial de la red.** Se puede considerar la red mundial de aeropuertos (WAN)⁶ en su totalidad o alguno de sus subgrupos o comunidades en particular, pero es necesario detallar los límites.
- **Alcance temporal de la red.** El tráfico aeroportuario varía considerablemente con las diferentes estaciones del año e incluso horas del día por lo que es importante tener en cuenta que ventana de tiempo se está analizando.

En cuanto al peso de los enlaces, podemos considerar redes sin peso o redes en las que el peso haga referencia al número de vuelos, asientos disponibles... dependiendo del objeto de estudio en cada caso. Para conocer en profundidad las principales propiedades de las redes aeroportuarias se han consultado estudios de todo tipo, considerando redes aeroportuarias globales (Guimerà, Mossa, Turtschi, & Amaral, 2005), regionales (Li & Cai, 2004) (Lordan & Sallan, 2017), con peso (Barrat, Barthélemy, Pastor-Satorras, & Vespignani, 2004) y sin peso (Bagler, 2008).

Estas son las principales propiedades a tener en cuenta cuando se habla de la red global de aeropuertos:

- En cuanto a la **distribución del grado de la red** si bien sigue una ley potencial para valores de grado medios y bajos, decae exponencialmente con los valores altos. Este fenómeno se asocia a las limitaciones de capacidad de los aeropuertos que no pueden soportar un gran número de conexiones. (Sallan & Jordan, 2019). Esta característica es propia de las **redes scale-free**.
- Por otro lado, las redes de aeropuertos tienden a contar con distancias geodésicas cortas que hacen que no sea necesario pasar por muchas escalas para alcanzar un destino, aunque esté alejado. Además, los valores del coeficiente de clustering son muy elevados, ambas propiedades les acercan a los modelos de **redes pequeño-mundo**.
- Se observa una tendencia por la que los aeropuertos con grados altos tienden a conectarse con otros de las mismas características creando un fenómeno llamado "**club de ricos**" (Sallan & Jordan, 2019).
- Al contrario que la mayoría de redes reales analizadas, las redes de aeropuertos presentan una propiedad muy particular. Las ciudades o aeropuertos más conectados (con mayor grado) no suelen contar con la mayor centralidad (mayor intermediación). Esto lleva a la conclusión de que existen aeropuertos poco conectados que son, sin embargo, muy determinantes a la hora de mantener la red conectada. En la literatura, este fenómeno **alta intermediación/bajo grado** se ha asociado a las restricciones geopolíticas que hacen que solo algunos aeropuertos puedan albergar rutas a países extranjeros (Guimerà & Amaral, Modeling the world-wide airport network, 2004) y convierten la red global de aeropuertos en una estructura multi-comunitaria.

Estas propiedades hacen que las redes de aeropuertos se definan como un modelo de red pequeño-mundo en la que el grado de los nodos está definido por una

⁶ Las siglas inglesas WAN hacen referencia a *World Airport Network* o Red Global de Aeropuertos.

distribución acumulativa que decae como una ley potencial truncada (Guimerà & Amaral, Modeling the world-wide airport network, 2004).

3.3.1 Comunidades en las redes de Aeropuertos

Como ya se ha mencionado la red global de aeropuertos está claramente estructurada en forma de una red multi-comunitaria. Esto significa que está dividida en regiones que por diferentes razones enlazan sus nodos entre sí de forma muy densa frente a los enlaces con nodos de otras regiones. En las siguientes ilustraciones, podemos ver la distinción de estas comunidades.

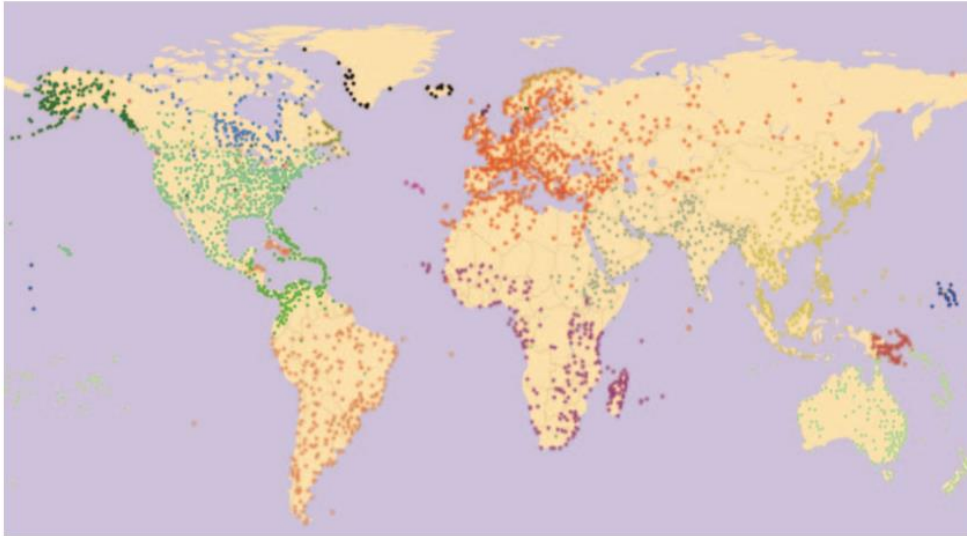


Ilustración 11 Clasificación visual de los aeropuertos de la red global en comunidades. Extraído de: (Guimerà, Mossa, Turtschi, & Amaral, 2005).

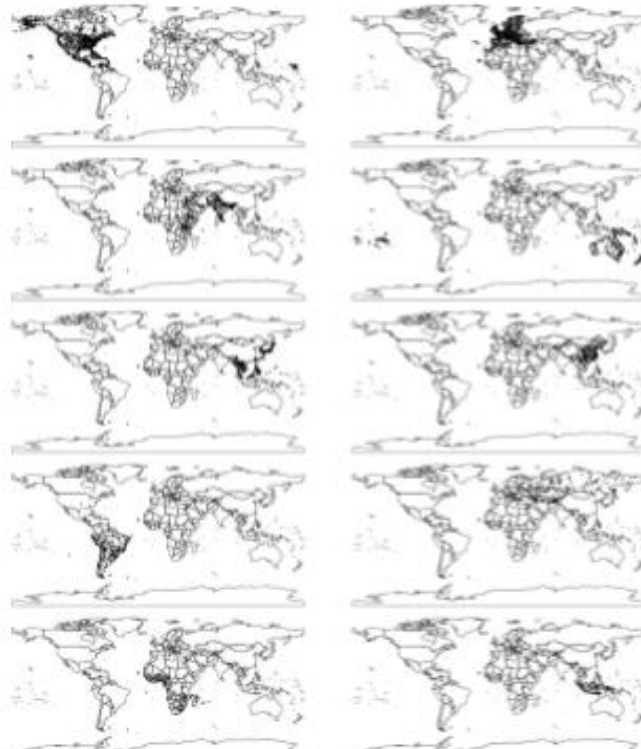


Ilustración 10 Representación de las primeras 10 comunidades de la red de aeropuertos detectadas, ordenadas por número decreciente de nodos. Extraído de: (Sallan & Jordan, 2019)

A continuación, trataremos de explicar el porqué de este fenómeno:

- Por un lado, se deben tener en cuenta los **aspectos políticos** que restringen en diferentes medidas la posibilidad de realizar vuelos internacionales o intercontinentales. Estas restricciones están sujetas a las conocidas como “Libertades del aire”⁷ y propician que exista mayor densidad de rutas nacionales o regionales limitando la posibilidad de conectar rutas con otros países o regiones a algunos aeropuertos.
- Por otro lado, se debe tener en cuenta la **naturaleza geográfica** de la red. Los vuelos son operados por aerolíneas que tratan de optimizar sus costes para aumentar su beneficio. Estos costes están íntimamente ligados con la distancia de los vuelos por lo que los vuelos largos están asociados a tickets más caros y menor demanda. Por ello, las aerolíneas buscan operar vuelos con distancias lo suficientemente grandes como para que el vuelo sea necesario, pero no tan elevadas como para tener que ofertar tickets difícilmente asequibles, favoreciendo las rutas regionales.

Además de estos dos factores, se debe tener en cuenta que desde que se produjo la liberación del tráfico aeroportuario, la red de aeropuertos no es más que la suma de todas las rutas planeadas por las aerolíneas. Esto lleva a que dependa fuertemente de los modelos de negocio que sigan dichas compañías, a continuación, explicaremos los tres principales:

- El modelo **full-service o servicio completo** que opta por ofrecer una mejor experiencia para el pasajero en cuanto a comodidades o “extras”. Este tipo de modelo de negocio suele optar por estructuras de conexión *hub-and-spoke*.
- El modelo **low-cost o de bajo coste** que trata de obtener distinción ofreciendo los precios de billetes más ajustados posibles. Estos modelos optan por estructuras de conexión *point-to point*.
- Los modelos **híbridos**, situados entre los dos extremos anteriores, optan por ofrecer un término medio entre experiencia y precio y utilizan estructuras mixtas. La mayoría de las aerolíneas que apuestan por estrategias de este tipo comenzaron trabajando con estructuras point-to-point y ahora se encuentran evolucionando hacia hub-and-spoke.

A continuación, se detallarán las principales características de estas estrategias, así como su implicación en la saturación o congestión de los aeropuertos.

⁷ Las “Libertades del Aire” son una serie de derechos recogidos en la teoría del Derecho Aeronáutico que garantizan a las aerolíneas de un Estado entrar en el espacio aéreo de otro y aterrizar en el mismo. Existen un total de 9 libertades clasificadas entre técnicas, comerciales y otras libertades. (Jefatura del Estado, 1969).

Estructuras hub-and-spoke

A partir del concepto de *hub* definido en el apartado 3.2.3 surgen las redes de aeropuertos denominadas como **hub-and-spoke**, que se pueden observar en la Ilustración 12. Estas redes siguen una estructura muy común caracterizada por la existencia de aeropuertos principales con vuelos directos entre ellos y aeropuertos secundarios conectados a un principal de forma directa y al resto de forma indirecta o con escalas.

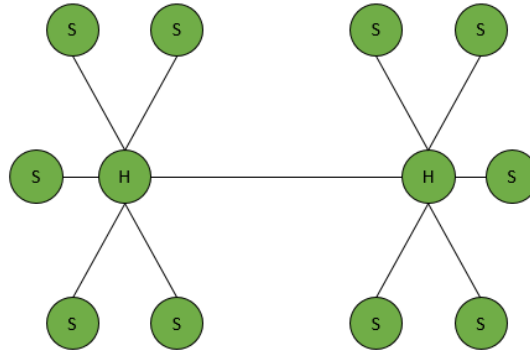


Ilustración 12 Representación esquemática de una red de aeropuertos con configuración hub-and-spoke. Elaboración propia a partir de: (Sallan & Jordan, 2019)

El objetivo de este tipo de redes consiste en agrupar los viajeros de rutas *long-haul* o de larga distancia (generalmente menos demandadas) de forma que se puedan utilizar aviones de mayor envergadura y optimizar los costes. Para ello se crean rutas *short-haul* o de corta distancia, operadas generalmente por aviones de pequeño tamaño, que acerquen a los pasajeros desde los aeropuertos *spoke* a los aeropuertos *hub* o viceversa (Sallan & Jordan, 2019). Esta estrategia, además, facilita que las conexiones internacionales ocupen menor número de rutas y afecten a menos aeropuertos, reduciendo la necesidad de acuerdos entre estados.

De esta forma se reduce el número de rutas necesarias y se optimiza su uso con naves de mayor tamaño, pero se requiere la capacidad necesaria para concentrar muchos vuelos en algunos aeropuertos (*hub*). Esta concentración potencia la aparición de horas pico en las que el aeropuerto se encuentra al límite de su capacidad provocando congestión, retrasos e incluso rechazo de algunas rutas, como veremos más adelante.

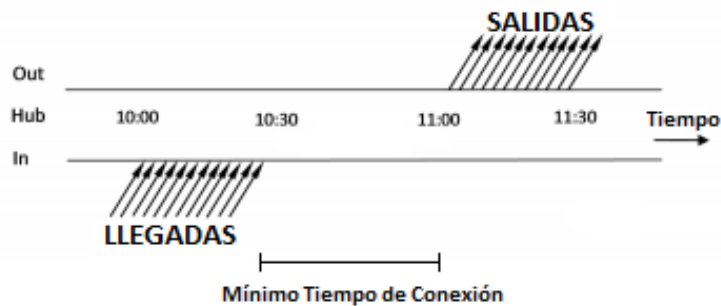


Ilustración 13 Ejemplo estructura wave-system en aeropuertos hub. Elaboración propia a partir de: (Dennis, 1994)

Además, conlleva una bajada en la calidad del vuelo puesto que supone la necesidad de hacer escalas siempre que no se viaje de aeropuerto principal a aeropuerto principal.

Estas escalas entre diferentes vuelos hacen necesaria la organización de las franjas conocida como estructura *wave-system* (Burghouwt & de WIT, 2005). Dicha estructura tiene el objetivo de poder coordinar el mayor número de vuelos diferentes formando “ondas” a lo largo del día (Mirkovik & Totic, 2016) que siguen el esquema mostrado en la Ilustración 13.

Estructuras punto a punto

En las estructuras punto a punto, cada ruta completa se lleva a cabo con un vuelo directo, esto provoca que se maximice el número de rutas necesarias y por tanto franjas a asignar.

Si tomamos como ejemplo la Ilustración 12 en la que los 12 aeropuertos se conectan por medio de 11 rutas, en el caso de una estructura *point-to-point* pura necesitaríamos 66 enlaces. Si bien en el primer caso la distancia geodésica máxima sería 2 en el segundo se reduce a la mitad, 1, pero para ello se ha tenido que aumentar el número de rutas 6 veces.

Por otro lado, al ser rutas directas sin escalas, los diferentes vuelos no tienen por qué estar conectados por lo que no es necesaria la estructura *wave-system* y tanto llegadas como salidas se pueden repartir más homogéneamente en el tiempo. Esto también permite aumentar la productividad y la eficiencia pues cada avión de la flota puede pasar más tiempo al día volando (Sallan & Jordan, 2019).

A continuación, en la Ilustración 14 se muestra una comparativa entre aerolíneas que utilizan diferentes modelos de negocio:

Airline	N	E	C	L	D
Ryanair	211	1684	0.446	2.218	4
Volotea	79	278	0.229	2.457	5
Southwest Airlines	99	746	0.808	1.970	3
Transavia	85	117	0.000	2.592	5
Vueling	131	333	0.679	2.054	3
Norwegian	113	248	0.695	2.133	4
American Airlines	349	1052	0.945	2.337	4
Lufthansa	204	312	0.932	2.118	4
China Eastern Airlines	228	741	0.583	2.514	5
Emirates	144	152	0.553	2.095	4

Ilustración 14 Tabla comparativa de las propiedades de las redes aeroportuarias formadas por diferentes aerolíneas. N: número de nodos, E: número de aristas, C: coeficiente medio de clustering, L: distancia geodésica media, D: diámetro. Extraído de: (Sallan & Jordan, 2019)

La tabla nos muestra cómo, siguiendo diferentes estrategias, Ryanair, una muy conocida compañía *low cost*, cubre un número de destinos muy similar a Lufthansa

o China Eastern Airlines con, en el caso de Lufthansa, un número de conexiones más de cinco veces mayor y en el caso de China Eastern Airlines más del doble de rutas. Esto nos muestra como la estructura *hub-and-spoke* puede llegar a cubrir muchos destinos sin la necesidad de establecer gran cantidad de rutas.

Además, algunos estudios demuestran que las diferencias entre estos dos tipos de estructuras pueden llegar a definir las redes de países en su totalidad. Tal es el caso del estudio que se analiza a continuación. (Pan & Lishuai, 2018).

En su desarrollo se comparan las redes aeroportuarias de China y Estados Unidos. La diferencia entre éstas estructuras se puede apreciar fácilmente observando, tan sólo una imagen de sus trayectorias de vuelo, tal y como se muestra en la Ilustración 15.

Como vemos, existe una clara diferencia entre el número de rutas que conectan los aeropuertos, mucho menor en China, frente a el manto de trayectorias que cubre los aeropuertos estadounidenses que denota una estructura con predominancia *point-to-point*.

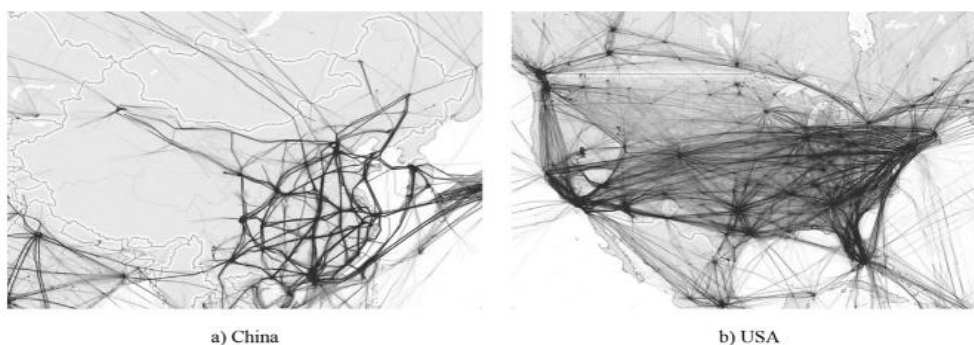


Ilustración 15 Representación de todas las trayectorias aeroportuarias de China y Estados Unidos. Extraído de: (Pan & Lishuai, 2018).

El estudio, además, cuantifica los resultados del análisis de ambas redes, obteniendo los resultados mostrados en la Ilustración 16.

Network structure assessment results.

	Network based on airports alone	
	China	United States
Weighted degree centrality (average)	8	9
Weighted degree centrality (standard deviation)	0.94	0
Characteristic path length	1.11	1
Algebraic connectivity	7	10

Ilustración 16 Resultados del análisis de las redes aeroportuarias de China y Estados Unidos. Extraído de: (Pan & Lishuai, 2018)

Resulta especialmente significativo el valor del camino geodésico medio, 1 para Estados Unidos, es decir, conexión directa entre prácticamente la totalidad de sus nodos. En cuanto a la red china, su camino geodésico es mayor y la conectividad y

centralidad de los nodos considerablemente menor a la estadounidense lo cual denota una estructura con alta tendencia *hub-and-spoke*. De esta forma, el estudio demuestra que estas estructuras pueden llegar a representar redes reales.

3.4 Conclusiones

Uno de los factores principales que determinan la fluidez del tráfico aéreo es la estructura de las redes de aeropuertos. Esta estructura, como la de cualquier otra red presente en el mundo, cuenta con propiedades definidas por la teoría de redes complejas.

Para poder comprender las características macroscópicas de la red de aeropuertos se ha realizado un estudio de las propiedades microscópicas de las redes, así como de los resultados de su asociación.

Tras consultar una amplia bibliografía se ha podido concluir que las redes de aeropuertos son un ejemplo particular de las redes pequeño mundo y cuentan con un amplio factor regional, formando comunidades claramente distinguidas.

Esta característica resulta interesante por abrir la posibilidad de poder comparar las características de las redes de distintas regiones y obtener que modelos funcionan mejor en cuanto a menor congestión y retrasos.

Profundizando en el estudio de las comunidades podemos afirmar que su división en estructuras depende de aspectos geo-políticos, así como de las decisiones estratégicas de las aerolíneas que operan en ellas. Por último, se han estudiado los dos principales modelos de gestión de rutas y flotas de las aerolíneas, *hub-and-spoke* y *punto a punto*, sus características y su aportación a la gestión de franjas horarias.

CAPÍTULO 4 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS: DEMANDA, CAPACIDAD Y UTILIDAD.

4.1 Introducción

Durante el presente capítulo, se llevará a cabo un estudio sobre los principales parámetros que definen los escenarios de asignación de slots, la demanda de franjas, la capacidad de los aeropuertos y la utilidad obtenida con cada vuelo. Para ello, se hará referencia a sus características principales, así como a los factores más determinantes de su comportamiento, el efecto que causa en diferentes tipos de aeropuertos y la forma de administrarlas.

Este estudio servirá como base para establecer los parámetros que se utilizarán en la creación de escenarios del CAPÍTULO 6 , con el objetivo de que éstos sean fundamentados y representativos de la realidad.

4.2 Parámetros de capacidad

Tal y como se mencionó en el CAPÍTULO 2 , uno de los aspectos más relevantes e imprescindibles a la hora de realizar la asignación de slots aeroportuarios es el previo cálculo de la capacidad disponible del aeropuerto.

La capacidad total que alberga un aeropuerto está condicionada por diferentes factores, desde el tamaño de sus infraestructuras y las condiciones climatológicas hasta la capacidad de sus conexiones para trasladar pasajeros desde y hasta otros puntos de la ciudad o región (taxis, autobuses, metro...). Sin embargo, sólo uno de esos factores es el más restrictivo y el que, generalmente, determina la capacidad máxima. Éste es, en la mayoría de aeropuertos principales, el sistema de pistas, terminales y plataformas de despegue y aterrizaje (Gelhausen, Berster, & Wilken, 2013).

Este sistema está conformado por tres tipos de capacidades que normalmente se calculan por temporadas (verano e invierno) (Coco Alberto, 2020):

- **La capacidad de plataforma** hace referencia al número de operaciones (llegada y salida de la aeronave en un aeropuerto) por hora, dependiendo del tipo de nave.
- **La capacidad de pista** hace referencia al número de naves que pueden aterrizar o despegar en una pista en una hora. Este parámetro depende altamente de la configuración de las pistas y el tipo de aeronaves.
- **La capacidad de terminal.** Número de pasajeros que pueden embarcar desde el edificio.

La importancia de la configuración de las pistas a la hora de calcular las restricciones de capacidad es tal, que numerosos estudios se basan en ella para establecer el número de movimientos de referencia de cada tipo de aeropuerto, tal y como vemos en la Ilustración 17.

Runway configuration	Minimum annual aircraft movements	Minimum 5% peak hour	Minimum CUI
Single runway	70 000	35	0.7
Two independent parallel runways (distance ≥ 1.5 kms)	140 000	70	0.7
Two dependent parallel runways (distance < 1.5 kms)	100 000	50	0.7
Two crossing runways	100 000	50	0.7
Three runways	150 000	75	0.7
Four and more runways	200 000	100	0.7

Ilustración 17 Cálculo de los volúmenes de tráfico anuales e índices de utilización de referencia en función de la configuración de las pistas de aterrizaje y despegue del aeropuerto. Extraído de: (Gelhausen, Berster, & Wilken, 2013)

Como vemos, los aeropuertos se clasifican según la configuración de sus pistas, la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO) reconoce siete configuraciones principales dependiendo del número de pistas, orientación y separación entre ellas, tal y como podemos observar en la Ilustración 18.

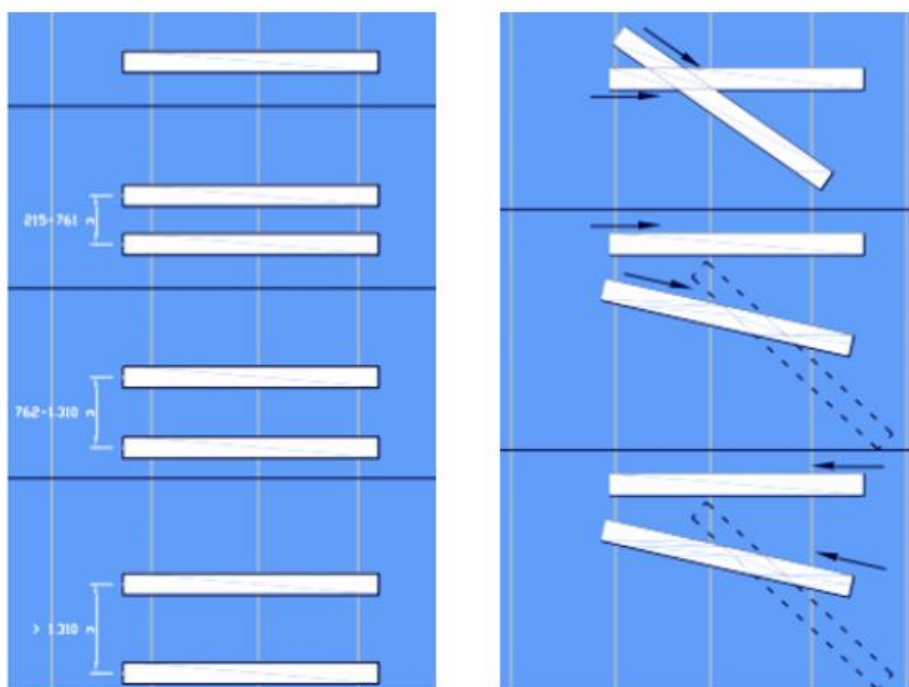


Ilustración 18 Tipos de configuraciones de pistas de aterrizaje y despegue. Extraído de: (ICAO, 2020)

Como podemos comprobar observando las dos ilustraciones anteriores, la capacidad de movimientos en las pistas aumenta a medida que lo hace su separación. Sin embargo, en los casos en los que el aeropuerto cuenta con un espacio reducido se suele optar por configuraciones cruzadas que permiten operar independientemente de la dirección en la que sopla el viento.

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE DEMANDA, CAPACIDAD Y UTILIDAD

Una vez que se realiza el cálculo y se cuenta con la cifra de capacidad, generalmente medida en número de posibles movimientos al año, día u hora (sumando despegues y aterrizajes), dependiendo del propósito de su estudio, se obtiene el número de slots disponibles para asignar a las aerolíneas en cada franja horaria.

En la siguiente Ilustración 19 podemos observar los resultados de dicho cálculo para los aeropuertos coordinados de España, en ella vemos como se han transformado en restricciones rodantes de capacidad.


 PARAMETROS DE CAPACIDAD AEROPORTUARIA Temporada: Verano 20 Edición: Septiembre 2019																
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	1800			
		M-J-V-D										2100 No Sch				
		14	14	24					Tráfico Interinsular		500	400				
AGP	MÁLAGA-COSTA DEL SOL	07:00 - 18:59	25	25	46	5	5	8								
		19:00 - 06:59	24	24	37	5	5	7								
ALC	ALICANTE-ELCHE	00:00 - 04:59	19	19	36	4	4	7	4 No UE	17 No Sch					4650	3600
		04:30 - 05:59	19	19	36	4	6	7							2650 No Sch	2750 No Sch
		06:00 - 23:59	19	19	36	4	4	7							750 No UE	
BCN [†]	JT BARCELONA-EL PRAT	00:00 - 03:59	24	24		4	4									
		04:00 - 04:59	18	30		4	6									
		05:00 - 20:59	38	40		7	8 (A)									
		21:00 - 22:59	26	22		5	4									
		23:00 - 23:59	24	24		4	4									
BIO	BILBAO	14	14	22	3	3	4					1500 Sch	1600			
		L-X-S							600 No Sch		700 No Sch					
FUE	FUERTEVENTURA	14	14	24	3	3	5					2500	2750			
		M-J-V-D														
		12	12	22												
IBZ	IBIZA				3	3	5	11	13					2700	2000	
								2 No UE	9 No Sch					1750 No Sch	1750 No Sch	
LPA	GRAN CANARIA	L-M-X-J-V			5	5	7	Tráfico No Interinsular				3400				
		24	24	36				7 UE No Sch	16 No Sch	Tráfico No Interinsular				3400		
								9 No UE No Sch	Tráfico No Interinsular				3400			
		S-D						Tráfico Interinsular				Tráfico Interinsular				
		25	25	40					13	15	Tráfico Interinsular				1050	1000
MAD [‡]	AS MADRID-BARAJAS	00:00 - 03:59	20	20	38	4	4	7								
		04:00 - 04:59	19	29		6	6	9								
		05:00 - 20:59	48	52		11 (A)	11 (A)	-								
		21:00 - 21:59	28	22		6	6	9								
		22:00 - 23:59	20	20	38	4	4	7								
MAH	MENORCA	12	12	22	2	3	4					1700	1700			
PMI	PALMA DE MALLORCA				6	6						Tráfico No Interinsular				
												6000 UE	4600 No Sch			
												1100 No UE	Tráfico Interinsular			
		33	34	66					Tráfico Interinsular		400					
TFS	TENERIFE SUR				5	5	7	2 No UE No Sch						3000	3000	
												600 No UE No Sch	3600			
VLC	VALENCIA				5	5	6	6 No UE						1200 No Sch	1800	
												600 No UE	600 No UE			

Ilustración 19 Resolución de los parámetros de capacidad y restricciones rodantes a aplicar en los aeropuertos coordinados de España durante la temporada de verano de 2020. Extraído de: (Ministerio de Fomento, 2020)

Durante este trabajo, nos centraremos y utilizaremos especialmente las restricciones de capacidad referentes a las pistas por tratarse de movimientos individuales.

Dentro de este tipo de restricciones vemos como dependiendo del tamaño y volumen de tráfico del aeropuerto se organizan de maneras diferentes. Para aeropuertos *hub* como, por ejemplo, AS Madrid-Barajas o Barcelona-El Prat, el número de restricciones rodantes depende del periodo del día. Según va descendiendo el tamaño e importancia de la infraestructura vemos como las restricciones varían entre los días de la semana para aeropuertos como el de Lanzarote o son constantes para aeropuertos como el de Valencia.

Si tomamos el ejemplo de Bilbao podemos ver como en cada slot se pueden producir 3 llegadas, 3 salidas o 4 llegadas y salidas combinadas. Si observamos las restricciones en cuanto a horas en lugar de slots obtenemos que se pueden realizar

14 llegadas, 14 salidas o 22 movimientos combinados en total. Éstas cifras resultan coherentes si tenemos en cuenta que un slot suele tener una duración de, aproximadamente 15 minutos (un cuarto de hora).

4.3 Relación entre capacidad y demanda

Tal y como hemos observado, las restricciones de capacidad son prácticamente constantes o al menos están claramente definidas durante toda una temporada, no ocurre lo mismo con la demanda, que varía notablemente dependiendo de la estación y la hora del día. De ésta forma, conlleva a la creación de horas pico y valle que pueden saturar o desaprovechar respectivamente los recursos del aeropuerto.

Algunos autores consideran esta relación entre demanda y capacidad “*uno de los problemas fundamentales que subyacen bajo la poca fiabilidad y los costes sustanciales de los sistemas de transporte aéreo contemporáneos*” (Barnhart, Fearing, Odoni, & Vaze, 2012). Es por ello que conocer los principales factores que afectan al comportamiento de la demanda es clave a la hora de optimizar el funcionamiento y la utilidad de los aeropuertos.

4.3.1 Tipos de aeropuertos

En la actualidad, dependiendo del tipo de aeropuerto y su importancia en la red, pueden existir:

- Aeropuertos que rozan el máximo de su capacidad durante la mayoría de horas del año. Estos aeropuertos suelen coincidir con los principales de cada país, como pueden ser London Heathrow, Frankfurt, Paris Charles de Gaulle o New York La Guardia. Podemos ver un ejemplo de cómo podría ser la representación de la distribución operaciones/hora de uno de estos aeropuertos en la Ilustración 20.

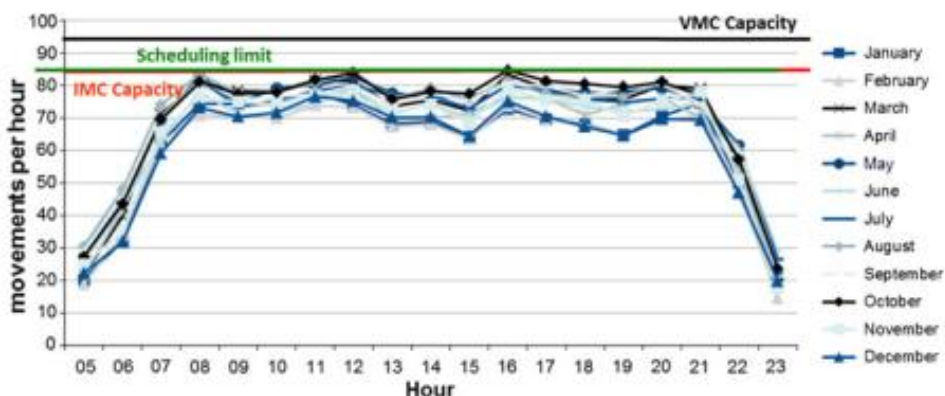


Ilustración 20 Número de movimientos por hora medios por meses para el aeropuerto de Frankfurt (FRA) en 2007. Ejemplo de distribución desigual de los movimientos con grandes variaciones en los picos de mañana y tarde. Extraído de (Odoni, Morisset, Drotleff, & Zock, 2011)

Como vemos, en el caso del Aeropuerto de Frankfurt, la demanda, a pesar de ser muy diferenciada entre las horas del día y de la noche, no cuenta con diferencias notables durante las horas de luz, en las que prácticamente de forma continuada roza los límites de capacidad.

Cabe destacar la notación utilizada para distinguir entre los dos tipos de capacidades que se muestran y que hacen referencia a las condiciones meteorológicas:

- *IMC Capacity (Instrument Meteorological Conditions Capacity)*. Establece la capacidad máxima que puede albergar el aeropuerto con malas condiciones climáticas. Más concretamente, cuando la meteorología hace que los pilotos necesiten tomar referencias con instrumentos indicativos para poder volar.
- *VMC Capacity (Visual Meteorological Conditions Capacity)*. Hace referencia a la capacidad máxima cuando las condiciones climatológicas son suficientes como para que el piloto pueda volar sirviéndose tan sólo de su capacidad visual para tomar referencias. Es por ello que esta capacidad es mayor y suele prevalecer, de media, el 80% del tiempo (Barnhart, Fearing, Odoni, & Vaze, 2012).

Este aeropuerto en concreto no permite que la demanda (slots asignados) supere la capacidad IMC durante el día.

- Aeropuertos que alcanzan sus límites de capacidad durante las horas pico y se mantienen por debajo en el resto de horas. La representación de sus movimientos podría asemejarse a la de la Ilustración 21.

En la imagen podemos observar a simple vista como se sobrepasan las capacidades máximas en las primeras horas de la mañana y durante la tarde, con un valle entre las 9 de la mañana y el mediodía que diferencia los dos periodos pico.

Se muestra también un notable descenso durante los periodos de noche y madrugada, aproximadamente de 9 de la noche a 6 de la mañana. Es importante destacar que, si bien existe un claro descenso del tráfico durante esas horas, en algunos casos este desaprovechamiento de infraestructuras se suple con operaciones de aeronaves de carga (Wilken, Berster, & Gelhausen, 2011).

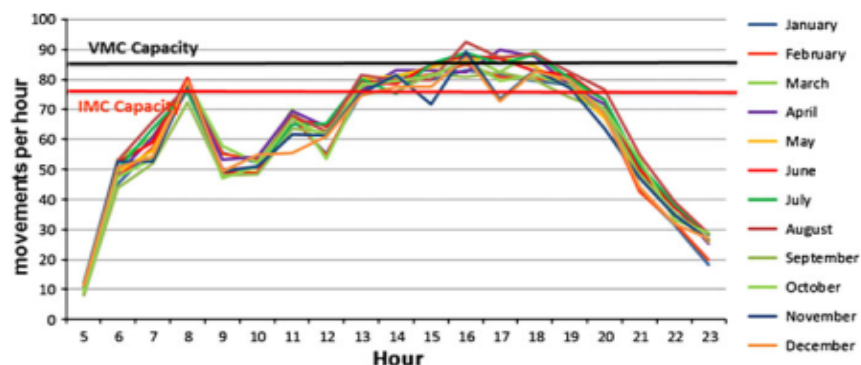


Ilustración 21 Número de movimientos por hora medios por meses para el aeropuerto Internacional Libertad de Newark (EWR) en 2007. Ejemplo de distribución desigual de los movimientos con grandes variaciones en los picos de mañana y tarde. Extraído de (Odoni, Morisset, Drotleff, & Zock, 2011)

- Aeropuertos con bajos volúmenes de carga que no se aproximan en ningún momento a sus límites de capacidad. Estos aeropuertos, al carecer de problemática, no serán estudiados en profundidad durante este trabajo.

4.3.2 Efecto en la propagación de retrasos

Tal y como hemos observado, las mencionadas horas pico suelen ocurrir en los periodos de mañana y tarde, momentos en los que los usuarios pueden obtener mayor utilidad de sus viajes. Esta mayor demanda por parte de los viajeros se transforma en horas más cotizadas por parte de las compañías a la hora de obtener los slots que las corresponden. Estos hechos las convierten en un importante objeto de estudio para optimizar la asignación de slots mediante una buena simulación de la realidad. Además, estas grandes diferencias en la demanda entre las horas pico y valle potencian en gran manera la existencia y propagación de retrasos en los vuelos, tal y como vemos en la Ilustración 22.

Como podemos observar, una mayor irregularidad en la demanda cercana a los límites de capacidad y, por tanto, la existencia de horas puntas más diferenciadas, afecta negativamente a la aparición de retrasos tanto en aterrizajes como en despegues.

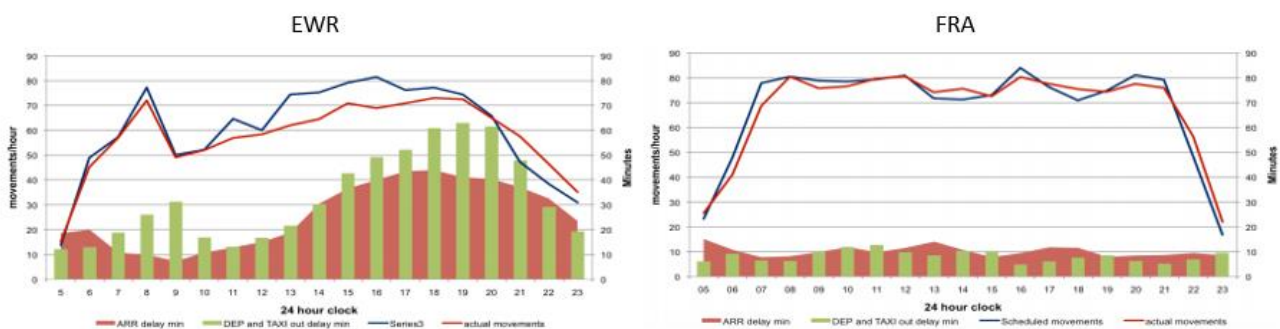


Ilustración 22 Comparación del número de vuelos retrasados en su llegada (área roja) y en su salida (barras verdes) frente al número de vuelos programados (línea azul) y los realmente llevados a cabo (línea roja) entre los dos aeropuertos mencionados con anterioridad. Extraído de: (Odoni, Morisset, Drotleff, & Zock, 2011)

Este fenómeno afecta directamente a la confiabilidad y robustez del aeropuerto y, con ello, a su prestigio, aumentando la impuntualidad de los vuelos y la incertidumbre asociada a la desviación de los mismos (Odoni, Morisset, Drotleff, & Zock, 2011). Si bien la existencia y propagación de retrasos no es un objeto directo de este estudio, existe una amplia bibliografía que trata este tema (Fleurquin, Ramasco, & Eguiluz, 2013), (Pyrgiotis, Malone, & Odoni, 2013).

4.4 Horas pico y horas valle

Tal y como se ha mencionado, el estudio de las horas pico y valle de los aeropuertos es un factor esencial para poder valorar su saturación. Las diferencias de afluencia existentes entre estos dos tipos de periodos hacen que estimar una media de la demanda durante todo el día sea una simplificación muy poco exacta de la realidad de los aeropuertos en la actualidad. Por lo que, para realizar cualquier tipo de

estudio, y, más concretamente en nuestro caso, diseñar escenarios, es primordial distinguir las características de estos periodos.

Sin embargo, no existe un método estricto para definir qué horas son pico y cuáles no, en la literatura consultada, destacan dos (Wilken, Berster, & Gelhausen, 2011):

- La trigésima hora pico, también conocida como SBR o *Standard Busy Rate* (Wang & Pitfield, 1999) toma como referencia de hora pico la trigésima hora con mayor volumen de tráfico del año.
- La hora pico 5% o *Busy Hour Rate (BHR)* toma como referencia la hora que supera en un 5% el volumen de tráfico de todas las horas operativas del año. Es decir, el percentil 95 de los volúmenes de tráfico por horas ordenados de forma descendente.

En la siguiente gráfica de la Ilustración 23 podemos observar las curvas de tráfico para la definición de las horas pico de tres aeropuertos de diferentes características y por los dos métodos descritos.

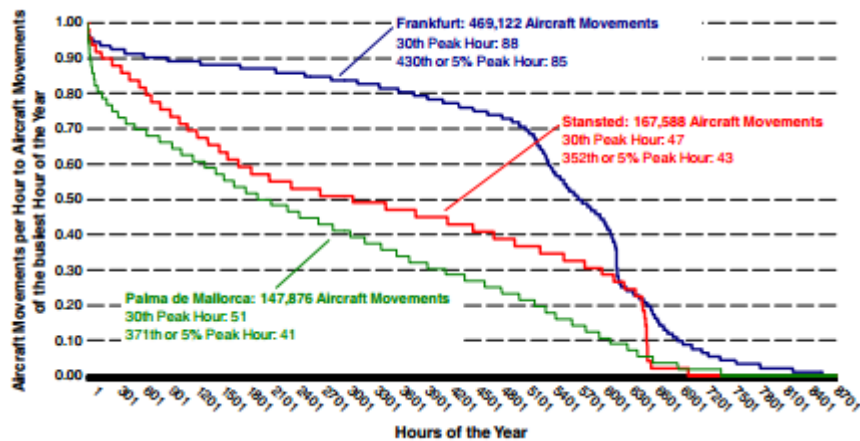


Ilustración 23 Ranking de tráfico relativo (movimientos hora/ movimiento de la hora más ocupada del año) del año 2008 en los aeropuertos de Frankfurt, Londres Stansted y Palma de Mallorca. Extraído de: (Wilken, Berster, & Gelhausen, 2011)

En el eje horizontal se muestra el ranking de todas las horas del año en las que ha habido aterrizajes o despegues, comenzando con la hora de mayor tráfico del año seguida en orden descendente por la suma de las siguientes horas más ocupadas. Como podemos observar, la tendencia muestra que el número de horas afectadas por cada volumen de tráfico aumenta según va disminuyendo el número de operaciones por hora.

En cuanto a la comparación entre las horas pico calculadas mediante los dos métodos mencionados, podemos observar que en los tres casos los dos resultados son cercanos. Sin embargo, como hemos visto en la gráfica, el método de la trigésima hora puede llegar a ser inexacto porque el tráfico varía mucho entre apartados vecinos dentro del gráfico y es fácil que no represente una hora “típica” (Wilken, Berster, & Gelhausen, 2011). Sin embargo, escoger la opción del 5% es considerada una selección más exacta y menos volátil por una amplia bibliografía (Matthews, 1995), (Poole, 1972), (Urbatzka & Wilken, 1997).

Además, los datos proporcionados de forma libre por la OAG hasta el año 2019 permitían determinar de forma consistente y sencilla la hora pico 5%, potenciando su utilización para el cálculo de capacidades y grado de saturación de los aeropuertos.

Si analizamos las curvas, podemos observar que las tres cuentan con una forma similar en los aspectos generales, pero se diferencian en la pendiente de las horas que cuentan con altos volúmenes de tráfico. Cuanto mayor sea el tráfico en relación con la capacidad, mayor es la utilización de los recursos, hecho que se representa en una curva menos inclinada, es decir, más horas con ocupación alta (a excepción del inicio de la curva). Este es el caso de la curva del aeropuerto de Frankfurt, que, en coherencia con lo mostrado en apartados anteriores, destaca por la alta utilización de sus recursos durante un porcentaje considerablemente mayor de horas operativas que los demás, que cuentan con curvas más inclinadas.

Este comportamiento parcialmente constante de la demanda, es típico en los aeropuertos *hub* que trabajan al borde de su capacidad. De hecho, algunos autores en estos casos consideran que el volumen medio de utilización de estos aeropuertos se puede definir como el número de operaciones anuales dividido entre las horas operativas, excluyendo aquellas horas en las que se realicen menos de cinco operaciones (Gelhausen, Berster, & Wilken, 2013).

En general, para la mayoría de aeropuertos, se pueden asumir entre 14 y 16 horas al día de alta demanda (durante las horas de luz) y de 8 a 10 horas de noche con menor demanda. De esta forma obtenemos que, en un año completo, existen alrededor de 5500 horas de relativa alta demanda y alrededor de 3000 de muy baja actividad.

Sin embargo, diversos estudios demuestran que el reparto del tráfico durante esas horas varía dependiendo del tipo de aeropuerto. Como ya se ha mencionado con el caso del aeropuerto de Frankfurt, el comportamiento diferenciado entre horas pico y valle disminuye con el aumento del número de pasajeros anuales, tal y como se muestra en la Ilustración 24. Es por ello que se pueden detectar curvas más planas para los aeropuertos *hub*.

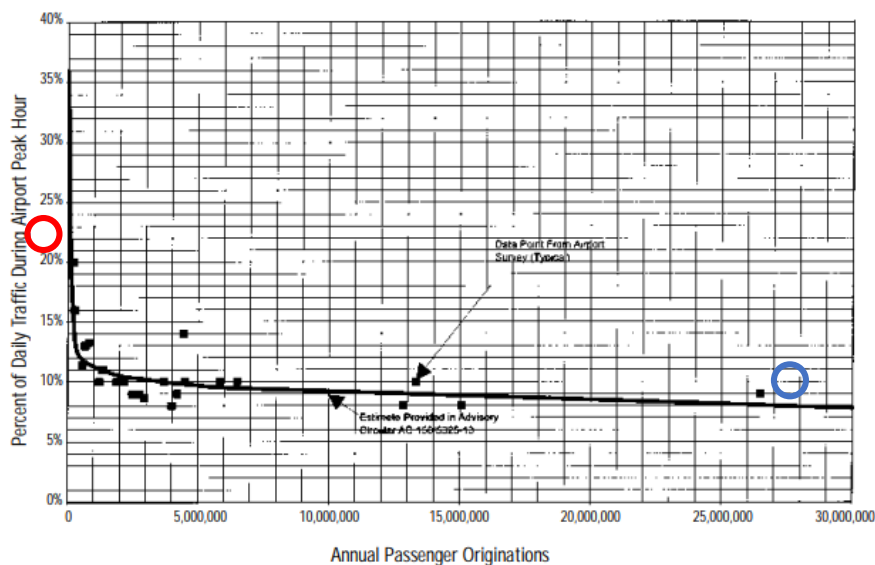


Ilustración 24 Relación entre el tráfico operado en horas pico y el número de pasajeros anuales para un estudio de 24 aeropuertos. Extraído de: (Ruhl & Trnavskis, 1998)

Más concretamente se ha calculado que el porcentaje de tráfico operado en horas pico puede variar desde un 8% para los aeropuertos de mayor envergadura (indicador rojo de la Ilustración 24) hasta un 20% para los aeropuertos *spoke* o de menor tamaño (indicador azul) (Ruhl & Trnavskis, 1998).

4.5 Variaciones semanales, mensuales y estacionales

Como ya se ha mencionado, existen notables variaciones de la demanda durante las horas del día. Sin embargo, a pesar de ser las más estudiadas, éstas no son las únicas variaciones de demanda que sufren los aeropuertos. Normalmente, existen también desequilibrios en cuanto a la demanda a nivel semanal, mensual o estacional.

4.5.1 Variaciones semanales

Si bien estas variaciones dependiendo del tipo de aeropuerto pueden ser las menos pronunciadas, suelen provocar una menor demanda de vuelos durante los fines de semana. En la siguiente imagen podemos observar la representación semanal de la demanda para tres aeropuertos de diferentes características:

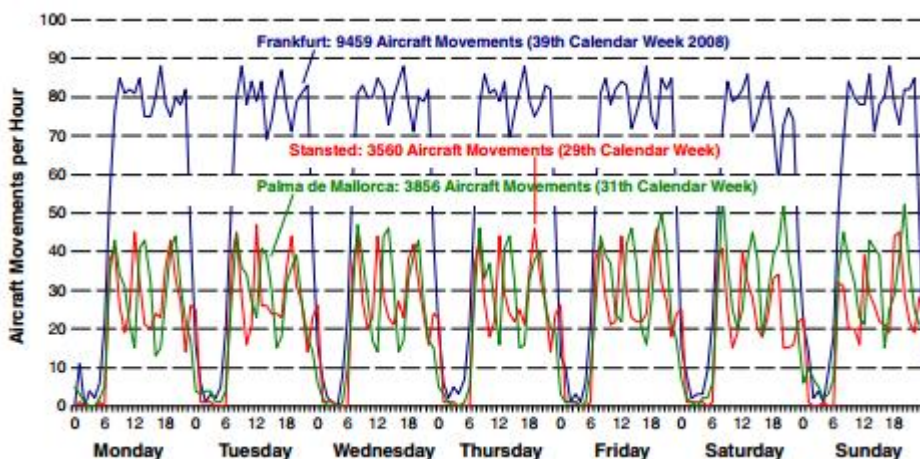


Ilustración 25 Variación por horas de la demanda semanal de vuelos en las semanas pico del año 2008 para los aeropuertos de Frankfurt, Stansted y Palma de Mallorca. Extraído de: (Wilken, Berster, & Gelhausen, 2011)

La ilustración nos muestra como en los aeropuertos de London Stansted y Palma de Mallorca el tráfico disminuyó unos 50 movimientos (un 10% del total) durante los fines de semana. En cuanto al aeropuerto de mayor tamaño, Frankfurt, la reducción relativa de vuelos fue mucho menor, alrededor de 60 movimientos menos durante el fin de semana que suponen un 4% de la media de los días entre semana, situada en 1350 movimientos.

Tal y como hemos visto que ocurría con las horas pico y valle, vemos que las variaciones a nivel semanal también afectan más a los aeropuertos cuanto menor sea su envergadura.

Un caso señalado por la bibliografía (Wilken, Berster, & Gelhausen, 2011) es el del aeropuerto de Cologne/Bonn que, con una media de 310 movimientos diarios, los viernes aumenta hasta los 340 y los sábados disminuye hasta 240.

4.5.2 Variaciones mensuales y estacionales.

Generalmente, las variaciones mensuales se suelen asociar a fenómenos estacionales y se utilizan para su estudio. Normalmente, los meses de verano se relacionan con un mayor número de viajes de tipo vacacional provocando aumentos en la demanda de un gran número de destinos, mientras que los meses de noviembre a marzo suelen contar con una menor demanda. Tal y como podemos observar en la Ilustración 26 para los aeropuertos analizados anteriormente:

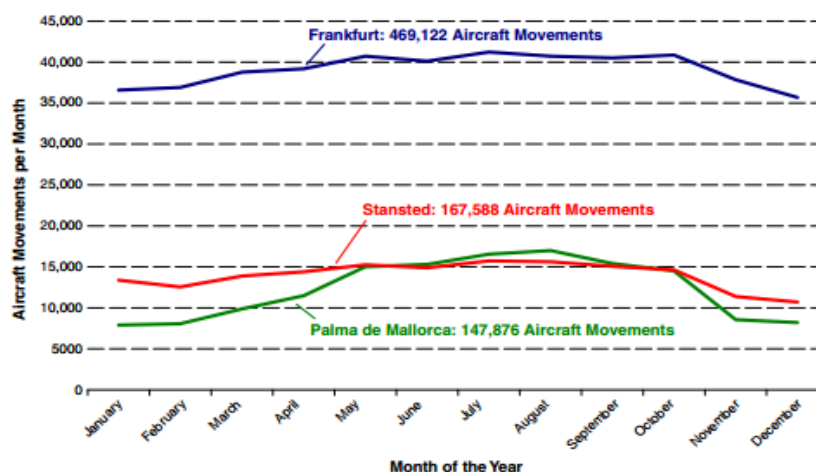


Ilustración 26 Variación mensual de la demanda en 2008 para los aeropuertos de Frankfurt, Stansted y Palma de Mallorca. Extraído de: (Wilken, Berster, & Gelhausen, 2011)

Como vemos, la tendencia al alza en los meses de verano se ve especialmente remarcada en destinos como Palma de Mallorca, de reconocido carácter turístico. Esta tendencia estacional se ve, por tanto, fuertemente potenciada por fenómenos como el clima, la localización geográfica o el patrimonio turístico de la zona en la que se encuentra el aeropuerto.

Por otro lado, podemos observar que incluso aeropuertos como el de Frankfurt, que sufre menos los tipos de variaciones estudiados anteriormente, el tráfico es un 10% mayor en los meses de verano.

4.6 Utilidad

Para completar el estudio sobre los principales parámetros de los vuelos, se definirán las principales características relativas a la utilidad de los mismos.

Durante este trabajo, entenderemos la utilidad de un vuelo como el beneficio que genera tanto para la aerolínea como para el aeropuerto que lo programa. Para definir el concepto numéricamente utilizaremos por tanto la siguiente expresión:

$$Utilidad = Ingresos - Costes$$

Para poder cuantificarlo de forma realista y no muy compleja tomaremos como costes el costo operacional de volar la aeronave y como ingresos el dinero bruto obtenido por la venta de los billetes.

Si bien este balance puede parecer tan sólo representativo del beneficio obtenido por la aerolínea, asumiremos que una mayor utilidad para la aerolínea equivale a un

mayor precio que están dispuestas a pagar por un slot y, con ello, un mayor beneficio para los aeropuertos coordinadores.

4.6.1 Costes operacionales de un vuelo

La organización ICAO señala dos posibles clasificaciones de los costes asociados a el vuelo de una aeronave, según los objetivos que permiten alcanzar o según su funcionalidad. (ICAO, 2017).

- **Costos por objetivo.**
 - o Salarios (Personal de gestión, de vuelo, de mantenimiento...).
 - o Materiales (Combustible y aceite, materiales de mantenimiento, menús para los pasajeros...).
 - o Servicios contratados (Publicidad, promociones, comunicación, seguros, comisiones...).
 - o Otras categorías (Tasas de aterrizaje, alquileres, depreciaciones...).
- **Costos por funcionalidad.**
 - o Costes operativos de las aeronaves. Costes asociados al vuelo de la nave, también conocidos como Costes Operativos Directos (DOC). Su descomposición y magnitud se estudiará más adelante.
 - o Costes de servicio de las aeronaves. Costes asociados a la estancia de la nave en tierra. (Aprox. 800\$ por operación).
 - o Costes de servicio de tráfico. Costes asociados a la gestión de los pasajeros y sus equipajes. (Aprox. 15\$ por pasajero embarcado).
 - o Costes de servicio del pasaje. Costes asociados a atender al pasaje durante el vuelo. (Aprox. 0.015\$ por RPM (por milla y pasajero)).
 - o Costes asociados a reservas y descuentos. (Aprox. 14% de los ingresos totales).
 - o Otros costes. Publicidad, administración... (Aprox. 13% de los gastos operativos totales)

En la siguiente ilustración podemos hacernos una idea de la importancia de cada uno de estos factores en el coste total.



Ilustración 27 Descomposición costes totales de operación de un vuelo. Elaboración propia a partir de (ICAO, 2017).

Como vemos, los costes de operación de la nave representan el porcentaje notablemente más significativo de los costes totales. Estos costes DOC están conformados por cuatro agentes principales:

- Personal. (Salarios).
- Combustible. Es una cifra fácil de calcular, pero, sin embargo, muy volátil debido a las fluctuaciones del mercado.
- Mantenimiento.
- Gastos de propiedad. (Depreciación, arrendamientos y seguros).

Según el mencionado informe de ICAO, para un vuelo regular de una nave Boeing 757-200 con, aproximadamente 186 plazas, el coste operativo total sería de 2550\$ por hora bloqueada.

El concepto hora bloqueada hace referencia al número de horas que se emplea la aeronave para recorrer una ruta determinada. Se calcula desde la suelta de calzos hasta la puesta en destino y, generalmente, se utiliza como unidad de medida de la utilización media de una aeronave durante un periodo de tiempo. (Doganis, Rigas, & Dennis, 1989).

Si estudiamos este coste para aviones de mayor envergadura por un lado contamos con factores que lo economizan como el mismo número de pilotos para un pasaje considerablemente mayor o los costos fijos de taxi despegue y aterrizaje. Por otro lado, existen factores que aumentan su DOC, como el mayor salario de la tripulación, o los costes por depreciación.

La ICAO, aporta los siguientes datos medios a modo de orientación:

Tipo de Nave	Nº de asientos	DOC por hora bloqueada (\$)	DOC por asiento y hora (\$)	Distancia media recorrida (millas)	Horas bloqueadas
DC9-30	100	1973	19,73	472	8,1
A320	148	2270	15,33783784	1191	11,7
B727-200	150	2555	17,03333333	704	8,4
B757-200	186	2550	13,70967742	1252	11,3
B747-400	375	6455	17,21333333	4065	12,4

Ilustración 28 Comparación del coste DOC por tipo de aeronave. Elaboración propia a partir de (ICAO, 2017)

En algunos casos podemos ver diferencias notables de costes operativos para naves de tamaños muy similares (A 320 y B727-200), estas variaciones se asocian a la implementación de nuevas tecnologías más eficientes en algunas de ellas. Por norma general se observa que, a mayor cantidad de pasaje, mayores costos operativos, pero, sin embargo, menores costos por pasajero y hora bloqueada.

A partir de la cifra aproximada del DOC y los ingresos totales por venta de billetes que estudiaremos en el siguiente apartado, se puede calcular el coste total aproximado por vuelo para las aerolíneas y, con él, la utilidad asociada.

4.6.2 Ingresos generados por vuelo

Asumiremos, como ya se ha mencionado, como ingresos mayoritarios los generados mediante la compra de billetes que dependerán, por tanto, directamente, del número de asientos ofrecidos.

Se debe tener en cuenta que los precios por asiento son altamente variables y dependen de muchos factores como pueden ser; la distancia recorrida, la demanda de la ruta, el horario o el tipo de asiento ocupado (*Economy, business, first class...*).

Además, el precio del combustible es uno de los principales condicionantes a la hora de establecer el precio de los billetes, potenciando su cambio tal y como muestra la Ilustración 29 que sitúa el precio medio actual en 355\$.

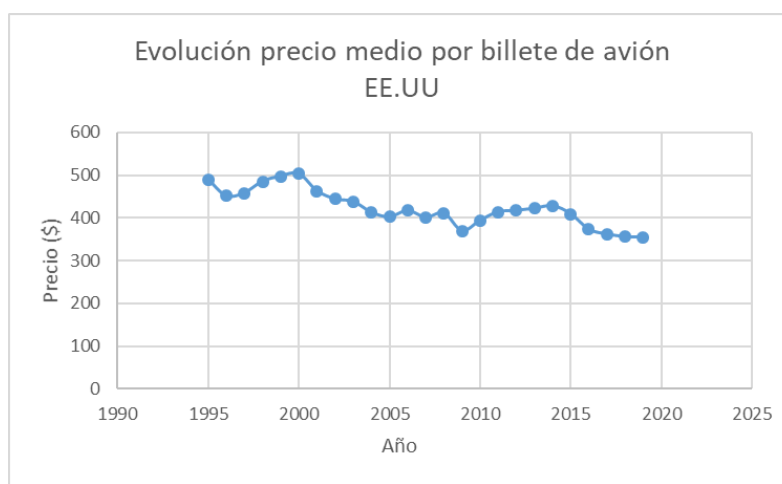


Ilustración 29 Evolución precio medio por billete de avión para vuelos domésticos en Estados Unidos desde 1995 hasta 2019. Elaboración propia a partir de: (Bureau of Transportation Statistics, 2019)

Junto al precio de los combustibles también han evolucionado en el tiempo el número de servicios ofrecidos junto al billete, reduciéndose, como por ejemplo las tasas actuales por maleta facturada (entre 30 y 200\$ (Steele, 2019)) o de mano que antes estaban incluidas en el precio base del billete.

Otros estudios, como el de la agencia *Kayak* para los vuelos efectuados en España durante el año 2017, diferencia entre los precios de los vuelos según sean nacionales, europeos e internacionales.

	Valores medios para viajes de ida y vuelta		
	Precio (€)	Distancia (km)	Precio/km (€)
Nacionales	105,8	1971,6	0,08
Europeos	114,7	2696,8	0,05
Internacionales	595,7	14580,6	0,04

Ilustración 30 Valores medios referentes a los billetes de avión vendidos en España en el año 2017. Elaboración propia a partir de: (Kayak España, 2017)

Como vemos, los billetes de avión se comportan, en cierta forma, como una economía de escala, a mayor distancia recorrida y mayor tamaño de la aeronave menor precio por kilómetro recorrido.

4.7 Conclusiones

Durante este apartado se ha llevado a cabo un estudio sobre la importancia de la demanda, su relación con la capacidad y el cálculo de la utilidad de los vuelos. Las principales conclusiones que podemos extraer son las siguientes:

- La capacidad y con ella, el cálculo de las restricciones rodantes de cada aeropuerto es un aspecto imprescindible a la hora de planificar la asignación de slots y aunque depende de numerosos factores el más limitante pasa por el número y configuración de sus pistas de aterrizaje.
- La relación entre capacidad y demanda es un aspecto fundamental para cualquier estudio relacionado con el dimensionamiento, simulación o incluso propagación de retrasos en un aeropuerto.
- La demanda es un fenómeno irregular que provoca horas pico y valle potenciando la bajada de la productividad de los aeropuertos, que mantienen sus infraestructuras de forma constante.
- Las horas pico de la demanda suelen encontrarse en las horas de la mañana y primeras horas de la tarde, mientras que durante la noche existe una bajada de demanda muy pronunciada. Sin embargo, dependiendo del tipo de aeropuerto y sobretodo de su envergadura, estos cambios son más o menos pronunciados y afectan a un mayor o menor porcentaje de los vuelos.
- También existen variaciones durante los días de la semana y meses del año, cobrando una mayor importancia estas últimas por la existencia de periodos estacionales como las vacaciones de verano.
- Como norma general, los aeropuertos de tipo *hub* que operan al límite de su capacidad durante la mayor parte de las horas del día son los que se ven afectados en menor medida por estas variaciones.
- La utilidad de los vuelos es un aspecto a tener en cuenta si se quiere valorar su rentabilidad tanto para la aerolínea como para, en nuestro caso, los aeropuertos coordinados. Los costes asociados a los vuelos se dividen en los diferentes servicios ofrecidos siendo el más determinante el coste de operación de la nave que comprende actividades como el combustible utilizado o los salarios de la tripulación.
- En cuanto a los ingresos, se medirán respecto al número de billetes vendidos y, a pesar de la gran variabilidad a la que están sujetos debido a la volatilidad del precio de los combustibles, se pueden establecer algunos valores medios.

CAPÍTULO 5 MODELOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL Y MECANISMOS DE RELAJACIÓN

5.1 Introducción

En el presente apartado se presentarán los modelos de programación lineal entera para varios aeropuertos utilizados para simular el problema de asignación de slots. En ellos se representan, de forma simplificada, los principales agentes involucrados. Estos modelos serán la base de la implementación a partir de la cual se obtendrán los resultados del CAPÍTULO 6

En primer lugar, se detallará un modelo para redes de aeropuertos con horizontes de planificación cerrados. Una vez descrito, se avanzará en cuanto a complejidad y se elaborará un nuevo modelo para redes de aeropuertos con horizontes de planificación periódicos.

Ambos modelos parten de los creados por (Araúzo, 2016) para un solo aeropuerto y se les han realizado cambios para la aplicación a redes aeroportuarias en las que pueden participar dos o más aeropuertos.

A continuación, se detallarán los mecanismos de resolución empleados con el objetivo de sentar sus bases teóricas y comprender su funcionamiento antes de probarlos y compararlos en el CAPÍTULO 6.

5.2 Modelo con horizonte de planificación cerrado.

En primer lugar, se explicarán los parámetros implicados y las variables utilizadas. Una vez establecido lo anterior, se detallará la función objetivo y su razón de ser así como las restricciones asociadas.

5.2.1 Parámetros

A continuación, se muestran los parámetros clasificados según el agente al que representan como: generales, asociados a la red o asociados a los vuelos.

Parámetros generales

T: Cantidad de franjas horarias disponibles en los aeropuertos. Cada franja horaria se denominará como: $t = \{0, 1, 2, \dots, T-1\}$.

Parámetros asociados a la red de aeropuertos

A: Número de aeropuertos que conforman la red del problema, cada uno de ellos será denotado como $a = \{1, 2, \dots, A\}$.

A continuación, se detallan los parámetros que describen la capacidad de cada aeropuerto.

H_a : Número de restricciones rodantes de capacidad aplicables a las franjas horarias del aeropuerto a . Cada una de ellas $h_a = \{1, 2, \dots, H_a\}$ afectará a T_{ha} franjas consecutivas.

ac_{hat} : Capacidad en número de llegadas asociada a la restricción h_a . Es decir, número máximo de llegadas programables en los intervalos que van desde t hasta $(t+T_{ha}-1)$. En el caso en el que T_{ha} fuera 1, esta restricción solo se aplicaría al intervalo t .

dc_{hat} : Capacidad en número de salidas asociada a la restricción h_a . Es decir, número máximo de salidas programables en los intervalos que van desde t hasta $(t+T_{ha}-1)$. En el caso en el que T_{ha} fuera 1, esta restricción solo se aplicaría al intervalo t .

tc_{hat} : Capacidad en número de movimientos totales (despegues y aterrizajes) asociada a la restricción h_a .

Parámetros asociados a los vuelos

M : Cantidad de vuelos que desean operar entre dos aeropuertos, $m = \{1, 2, \dots, M\}$, a cada uno de ellos se le tendrá que asociar dos franjas, una para la salida en el aeropuerto origen y otra para la llegada en el aeropuerto destino.

Dentro del conjunto total de los vuelos M , distinguiremos:

A_a : Conjunto de vuelos m que tienen como destino el aeropuerto a .

D_a : Conjunto de vuelos m que tienen como origen el aeropuerto a .

gu_m : Utilidad bruta proporcionada por el vuelo m en el caso en el que se opere en las franjas deseadas para su despegue y aterrizaje.

A continuación, se muestran los parámetros asociados a las franjas solicitadas para el despegue y aterrizaje de los vuelos y las penalizaciones y costes a aplicar en el caso en el que no se programen en las franjas solicitadas.

$ldrt_m$: Franja horaria mínima solicitada para el despegue del vuelo m del aeropuerto origen.

$rdrt_m$: Franja horaria máxima solicitada para el despegue del vuelo m del aeropuerto origen.

$lart_m$: Franja horaria mínima solicitada para la llegada del vuelo m al aeropuerto destino.

$rart_m$: Franja horaria máxima solicitada para la llegada del vuelo m al aeropuerto destino.

$mintb_m$: Tiempo de vuelo mínimo entre el aeropuerto origen y el aeropuerto destino, medido en franjas horarias.

$maxtb_m$: Tiempo de vuelo máximo entre el aeropuerto de origen y el aeropuerto destino, medido en franjas horarias.

cdb_m : Penalización asignada al vuelo m en el caso de programar la salida antes de $ldrt_m$.

cda_m : Penalización asignada al vuelo m en el caso de programar la salida después de $rdrt_m$.

cab_m : Penalización asignada al vuelo m en el caso de programar la llegada antes de $lart_m$.

caa_m : Penalización asignada al vuelo m en el caso de programar la llegada después de $rart_m$.

dca_{mt} : Coste de desviación de llegada, calculado a partir de las penalizaciones por retrasar o adelantar la llegada y dependiente del número de franjas de desviación sobre la franja solicitada.

$$dca_{mt} = \begin{cases} cab_m \cdot (lart_m - t) & \text{si } t < lart_m \\ 0 & \text{si } lart_m \leq t \leq rart_m \\ caa_m \cdot (t - rart_m) & \text{si } t > rart_m \end{cases} \quad (1.a)$$

dcd_{mt} : Coste de desviación de salida, calculado a partir de las penalizaciones por retrasar o adelantar la salida y dependiente del número de franjas de desviación sobre la franja solicitada.

$$dcd_{mt} := \begin{cases} cdb_m \cdot (ldrt_m - t) & \text{si } t < ldrt_m \\ 0 & \text{si } ldrt_m \leq t \leq rdrt_m \\ cda_m \cdot (t - rdrt_m) & \text{si } t > rdrt_m \end{cases} \quad (1.b)$$

Para ayudar a su comprensión se utilizará la Ilustración 31 que representa los costes de desviación en un horizonte de planificación cerrado para una operación de aterrizaje.

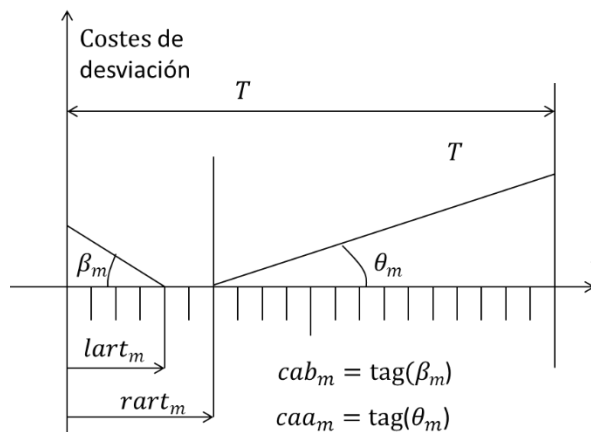


Ilustración 31 Representación gráfica de los costes de desviación asociados a una operación de llegada con un modelo de horizonte de planificación cerrado. Extraído de: (Araújo, 2016).

Como vemos, si programamos el vuelo entre las franjas mínima y máxima no existe coste asociado por desviación. Éste va aumentando conforme nos alejamos de las mismas según los ángulos mostrados, cuyo valor es variable en función del tipo de vuelo.

5.2.2 Variables

Variables temporales:

td_{ma} : Franja horaria asignada a la salida del vuelo m desde el aeropuerto a .

ta_{ma} : Franja horaria asignada a la llegada del vuelo m en el aeropuerto a .

Variables binarias

Variables binarias que indican la programación de aterrizajes y despegues.

δa_{tm} : Variable que toma valor 1 cuando el aterrizaje del vuelo m se haya programado en la franja t y 0 para el resto de franjas en las que no se ha programado.

δd_{tm} : Variable que toma valor 1 cuando el despegue del vuelo m se haya programado en la franja t y 0 para el resto de franjas en las que no se ha programado.

Estas variables binarias, están, por tanto, relacionadas con las temporales de la siguiente manera:

$$\sum_{a=0}^{A-1} \sum_{t=0}^{T-1} t \cdot \delta a_{tm} = ta_{ma} \quad (1)$$

$$\sum_{a=0}^{A-1} \sum_{t=0}^{T-1} t \cdot \delta d_{tm} = td_{ma} \quad (3)$$

Además, en el modelo descrito, los vuelos solicitados por las compañías, al igual que ocurre en la realidad, no están limitados por la capacidad del aeropuerto. Esto conlleva que en algunos casos los aeropuertos se vean obligados a rechazar la programación de algunos vuelos por falta de capacidad, por ello, se ha creado la siguiente variable binaria.

δ_m : Variable que toma el valor 1 si el vuelo es programado y 0 si el vuelo es rechazado.

5.2.3 Función Objetivo

Una vez definidas todas las variables y parámetros del modelo, se diseña la función objetivo que busca optimizar la utilidad neta de los vuelos programados. Es, por tanto, una función de maximización en la que se tendrán en cuenta las utilidades brutas y penalizaciones de cada vuelo programado, con el objetivo de obtener la mayor utilidad neta posible (U) para el conjunto de vuelos y aeropuertos.

Además de las penalizaciones asociadas al retraso o adelanto del momento de despegue o aterrizaje deseado (dca_{mt} , dcd_{mt}) se tendrá en cuenta una posible penalización por el tiempo transcurrido entre ambas operaciones (ctb_m), que hace referencia al coste en el que incurre cada nave al volar por cada franja horaria de duración del viaje. Para ello, se creará una variable (tb_m) que nos devolverá el valor del tiempo de vuelo.

$$\sum_{t=0}^{T-1} t \cdot \delta d_{tm} - \sum_{t=0}^{T-1} t \cdot \delta a_{tm} - tb_m = 0 \quad (4)$$

Por lo que, si consideramos un coste de vuelo por franja horaria de ctb_m , nuestra función objetivo será:

$$U = \sum_{m=1}^M \left(gu_m \cdot \delta_m - \sum_{t=0}^{T-1} (dca_{mt} \cdot \delta a_{tm} + dcd_{mt} \cdot \delta d_{tm}) - ctb_m \cdot tb_m \right) \quad (5)$$

5.2.4 Restricciones

Relaciones entre variables

En primer lugar, debemos asegurar que cada vuelo programado debe contar con un slot de salida y otro de llegada en diferentes aeropuertos.

$$\delta_m = \sum_{t=0}^{T-1} \delta a_{tm} = \sum_{t=0}^{T-1} \delta d_{tm} \quad m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (6)$$

El tiempo de vuelo, vendrá dado por la expresión mostrada anteriormente:

$$\sum_{t=0}^{T-1} t \cdot \delta d_{tm} - \sum_{t=0}^{T-1} t \cdot \delta a_{tm} - tb_m = 0 \quad m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (7)$$

Restricciones de programación

Además, la duración del vuelo no podrá sobrepasar los tiempos mínimos y máximos asociados al mismo:

$$max tb_m \cdot \delta_m - tb_m \geq 0 \quad m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (8)$$

$$tb_m - min tb_m \cdot \delta_m \geq 0 \quad m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (9)$$

Restricciones de Capacidad

Para cada aeropuerto, el número de **llegadas** para el conjunto de franjas de t a $t+T_{ha}-1$ no puede superar la capacidad ac_{hat} .

$$\sum_{m \in A_a}^M \sum_{\tau=t}^{t+T_{ha}-1} \delta a_{tm} \leq ac_{hat} \quad \begin{array}{l} a = 1, 2, \dots, A \\ h = 1, 2, \dots, H_a \\ t = 0, 1, 2, \dots, T - T_{ha} \end{array} \quad (10)$$

Para cada aeropuerto, el número de **salidas** para el conjunto de franjas de t a $t+T_{ha}-1$ no puede superar la capacidad dc_{hat} .

$$\sum_{m \in D_a}^M \sum_{\tau=t}^{t+T_{ha}-1} \delta d_{tm} \leq dc_{hat} \quad \begin{array}{l} a = 1, 2, \dots, A \\ h = 1, 2, \dots, H_a \\ t = 0, 1, 2, \dots, T - T_{ha} \end{array} \quad (11)$$

Para cada aeropuerto, el número de **movimientos totales**, sumando llegadas y salidas, para el conjunto de franjas de t a $t+T_{ha}-1$ no puede superar la capacidad tc_{hat} .

$$\sum_{m \in \{A_a \cup D_a\}}^M \sum_{\tau=t}^{t+T_{ha}-1} (\delta a_{tm} + \delta d_{tm}) \leq tc_{hat} \quad \begin{array}{l} a = 1, 2, \dots, A \\ h = 1, 2, \dots, H_a \\ t = 0, 1, 2, \dots, T - T_{ha} \end{array} \quad (12)$$

5.2.5 Modelo completo

Si agrupamos la función objetivo con todas las restricciones necesarias obtenemos el modelo completo:

$$\max_{\delta_m, \delta a_{tm}, \delta d_{tm}} U = \sum_{m=1}^M \left(gu_m \cdot \delta_m - \sum_{t=0}^{T-1} (dca_{mt} \cdot \delta a_{tm} + dcd_{mt} \cdot \delta d_{tm}) - ctb_m \cdot tb_m \right) \quad (13.a)$$

Sujeto a:

$$\delta_m = \sum_{t=0}^{T-1} \delta a_{tm} \quad m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (13.b)$$

$$\delta_m = \sum_{t=0}^{T-1} \delta d_{tm} \quad m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (13.c)$$

$$\sum_{t=0}^{T-1} t \cdot \delta d_{tm} - \sum_{i=0}^{T-1} t \cdot \delta a_{tm} - tb_m = 0 \quad m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (13.d)$$

$$\max tb_m \cdot \delta_m - tb_m \geq 0 \quad m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (13.e)$$

$$tb_m - \min tb_m \cdot \delta_m \geq 0 \quad m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (13.f)$$

$$\sum_{m \in A_a}^M \sum_{\tau=t}^{t+T_{ha}-1} \delta a_{tm} \leq ac_{hat} \quad \begin{array}{l} a = 1, 2, \dots, A \\ h = 1, 2, \dots, H_a \\ t = 0, 1, 2, \dots, T - T_{ha} \end{array} \quad (13.g)$$

$$\sum_{m \in D_a}^M \sum_{\tau=t}^{t+T_{ha}-1} \delta d_{tm} \leq dc_{hat} \quad \begin{array}{l} a = 1, 2, \dots, A \\ h = 1, 2, \dots, H_a \\ t = 0, 1, 2, \dots, T - T_{ha} \end{array} \quad (13.h)$$

$$\sum_{m \in \{A_a \cup D_a\}}^M \sum_{\tau=t}^{t+T_{ha}-1} (\delta a_{tm} + \delta d_{tm}) \leq tc_{hat} \quad \begin{array}{l} a = 1, 2, \dots, A \\ h = 1, 2, \dots, H_a \\ t = 0, 1, 2, \dots, T - T_{ha} \end{array} \quad (13.i)$$

$$\delta a_{tm}, \delta d_{tm}, \delta_m \in \{0, 1\} \quad \begin{array}{l} m = \{1, 2, \dots, M\} \\ t = \{1, 2, \dots, T - 1\} \end{array} \quad (13.j)$$

5.3 Modelo con horizonte de planificación periódico

5.3.1 Introducción

En el siguiente modelo tendremos en cuenta que en algunos casos es posible que una programación aeroportuaria se repita periódicamente durante varios ciclos que bien pueden referirse a días, semanas o incluso meses.

En este modelo, a diferencia del anterior, si queremos planear un horizonte semanal podríamos programar el despegue de un vuelo la noche de un domingo y su aterrizaje la mañana de un lunes.

Uno de los principales cambios reside en el modelo de los costes de desviación, ya que también serán periódicos, si los comparamos con la representación de la Ilustración 31, los costes para un horizonte periódico se representarían de la siguiente manera:

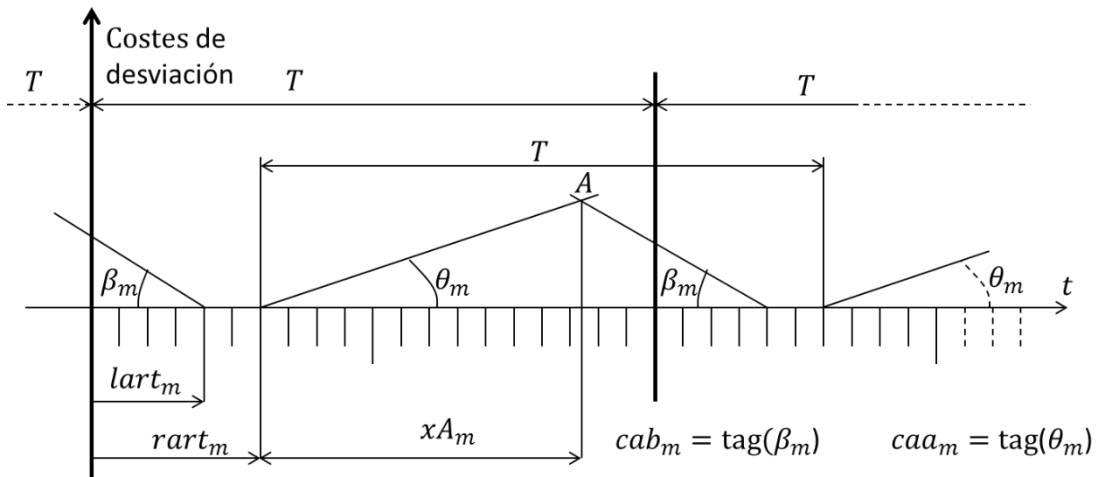


Ilustración 32 Representación gráfica de los costes de desviación para una operación de llegada con horizonte de planificación periódico. Extraído de (Araújo, 2016).

Tal y como se puede observar, para implantar este nuevo modelo, es necesario conocer cuál es la posición del punto A. Para ello, primero se calculará la componente x del punto (xA_m).

Para ello, utilizaremos la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 caa_m \cdot xA_m &= cab_m(T - rart_m + lart_m - xA_m) \Rightarrow \\
 (caa_m + cab_m)xA_m &= cab_m(T - rart_m + lart_m) \Rightarrow \\
 xA_m &= \frac{cab_m(T - rart_m + lart_m)}{caa_m + cab_m}
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Teniendo en cuenta que el punto A puede estar situado en el primer o segundo periodo indistintamente, calcularemos la componente y del punto de la siguiente manera.

$$tA_m = \begin{cases} rart_m + xA_m & \text{si } rart_m + xA_m < T \\ rart_m + xA_m - T & \text{si } rart_m + xA_m \geq T \end{cases}
 \tag{15}$$

A partir de las dos componentes, podemos calcular los costes de desplazamiento para una operación de llegada de la siguiente manera:

$$dca_{mt} = \begin{cases} caa_m \cdot (T - rart_m + t) & \text{si } tA_m < lart_m \wedge t < tA_m \\ cab_m \cdot (lart_m - t) & \text{si } tA_m < lart_m \wedge tA_m \leq t < lart_m \\ caa_m \cdot (t - rart_m) & \text{si } tA_m < lart_m \wedge t > rart_m \\ 0 & \text{si } lart_m \leq t \leq rart_m \\ cab_m \cdot (lart_m - t) & \text{si } tA_m > rart_m \wedge t < lart_m \\ caa_m \cdot (t - rart_m) & \text{si } tA_m > rart_m \wedge rart_m < t \leq tA_m \\ cab_m \cdot (T - t + lart_m) & \text{si } tA_m > rart_m \wedge tA_m < t \end{cases} \quad (16)$$

Para las operaciones de salida se seguirá el mismo razonamiento, obteniendo:

$$xD_m = \frac{cdb_m(T - rdrt_m + ldrt_m)}{cda_m + cdb_m} \quad (17)$$

$$tD_m = \begin{cases} rdrt_m + xD_m & \text{si } rdrt_m + xD_m < T \\ rdrt_m + xD_m - T & \text{si } rdrt_m + xD_m \geq T \end{cases} \quad (18)$$

Por lo que los costes asociados a la desviación de una operación de llegada se definirán como:

$$dcd_{mt} = \begin{cases} cda_m \cdot (T - rdrt_m + t) & \text{si } tD_m < ldrt_m \wedge t < tD_m \\ cdb_m \cdot (ldrt_m - t) & \text{si } tD_m < ldrt_m \wedge tD_m \leq t < ldrt_m \\ cda_m \cdot (t - rdrt_m) & \text{si } tD_m < ldrt_m \wedge t > rdrt_m \\ 0 & \text{si } ldrt_m \leq t \leq rdrt_m \\ cdb_m \cdot (ldrt_m - t) & \text{si } tD_m > rdrt_m \wedge t < ldrt_m \\ cda_m \cdot (t - rdrt_m) & \text{si } tD_m > rdrt_m \wedge rart_m < t \leq tD_m \\ cdb_m \cdot (T - t + ldrt_m) & \text{si } tD_m > rdrt_m \wedge tD_m < t \end{cases} \quad (19)$$

5.3.2 Modelo

Estas modificaciones afectarán, por un lado, a las restricciones rodantes de las últimas franjas del periodo, que como ya se ha mencionado, se pueden conectar con las primeras del siguiente y, por otro, a las restricciones de programación de los vuelos.

Nuevas restricciones

Es necesario, en primer lugar, modificar la restricción que nos devuelve el tiempo de vuelo. Para poder calcularlo con este modelo, añadiremos una variable binaria ρ_m . Ésta variable tomará valor 0 si las dos operaciones se programan en el mismo ciclo y 1 cuando la segunda operación esté programada en el ciclo siguiente al de la primera.

Para ello, sustituiremos la restricción (7) por la siguiente:

$$\sum_{t=0}^{T-1} t \cdot \delta d_{tm} - \sum_{i=0}^{T-1} t \cdot \delta a_{tm} + t b_m - T \cdot \rho_m = 0 \quad m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (20)$$

Por otro lado, habría que limitar por arriba la duración de los vuelos de forma que ninguno pueda superar el periodo de planificación. Como en el modelo anterior ya contamos con una cota superior para este parámetro, solo habría que garantizar lo siguiente:

$$\max tb_m \leq T - 1 \quad m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (21)$$

En cuanto a las restricciones de capacidad, en el horizonte de planificación periódico debemos incluir restricciones rodantes para las franjas horarias que van desde $(T - T_{ha} + 1)$ hasta $(T - 1)$ siempre que $T_{ha} > 1$. Por ello, debemos incluir las siguientes restricciones al modelo.

Referentes a los despegues:

$$\sum_{m \in D_a} \sum_{\tau=t}^{t+T_{ha}-1} \delta d_{tm} + \sum_{m \in D_a} \sum_{\tau=t}^{T_{ha}-T+t-1} \delta d_{tm} \leq dc_{hat} \quad \begin{array}{l} a = 1, 2, \dots, A \\ h = 1, 2, \dots, H_a \\ t = 0, 1, 2, \dots, T - T_{ha} \end{array} \quad (22)$$

Referentes a los aterrizajes:

$$\sum_{m \in A_a} \sum_{\tau=t}^{t+T_{ha}-1} \delta a_{tm} + \sum_{m \in A_a} \sum_{\tau=t}^{T_{ha}-T+t-1} \delta a_{tm} \leq ac_{hat} \quad \begin{array}{l} a = 1, 2, \dots, A \\ h = 1, 2, \dots, H_a \\ t = 0, 1, 2, \dots, T - T_{ha} \end{array} \quad (23)$$

Referentes a los movimientos totales:

$$\sum_{m \in \{A_a \cup D_a\}} \sum_{\tau=t}^{t+T_{ha}-1} (\delta a_{tm} + \delta d_{tm}) + \sum_{m \in \{A_a \cup D_a\}} \sum_{\tau=t}^{T_{ha}-T+t-1} (\delta a_{tm} + \delta d_{tm}) \leq tc_{hat} \quad \begin{array}{l} a = 1, 2, \dots, A \\ h = 1, 2, \dots, H_a \\ t = 0, 1, 2, \dots, T - T_{ha} \end{array} \quad (24)$$

Modelo Completo

Modificando el modelo presentado para un horizonte de planificación cerrado con los cambios mostrados anteriormente obtenemos:

$$\delta_m, \delta a_{tm}, \delta d_{tm} \quad \max U = \sum_{m=1}^M \left(gu_m \cdot \delta_m - \sum_{t=0}^{T-1} (dca_{mt} \cdot \delta a_{tm} + dcd_{mt} \cdot \delta d_{tm}) - ctb_m \cdot tb_m \right) \quad (25.a)$$

$$\sum_{m \in A_a} \sum_{\tau=t}^{t+T_{ha}-1} \delta a_{tm} \leq ac_{hat} \quad \begin{array}{l} a = 1, 2, \dots, A \\ h = 1, 2, \dots, H_a \\ t = 0, 1, 2, \dots, T - T_{ha} \end{array} \quad (25.b)$$

$$\sum_{m \in A_a} \sum_{\tau=t}^{T-1} \delta a_{tm} + \sum_{m \in A_a} \sum_{\tau=t}^{T_{ha}-T+t-1} \delta a_{tm} \leq ac_{hat} \quad \begin{array}{l} a = 1, 2, \dots, A \\ h = 1, 2, \dots, H_a \\ t = 0, 1, 2, \dots, T - T_{ha} \end{array} \quad (25.c)$$

$$\sum_{m \in D_a} \sum_{\tau=t}^{t+T_{ha}-1} \delta d_{tm} \leq dc_{hat} \quad \begin{array}{l} a = 1, 2, \dots, A \\ h = 1, 2, \dots, H_a \\ t = 0, 1, 2, \dots, T - T_{ha} \end{array} \quad (25.d)$$

$$\sum_{m \in D_a} \sum_{\tau=t}^{T-1} \delta d_{tm} + \sum_{m \in D_a} \sum_{\tau=t}^{T_{ha}-T+t-1} \delta d_{tm} \leq dc_{hat} \quad \begin{array}{l} a = 1, 2, \dots, A \\ h = 1, 2, \dots, H_a \\ t = 0, 1, 2, \dots, T - T_{ha} \end{array} \quad (25.e)$$

$$\sum_{m \in \{A_a \cup D_a\}}^M \sum_{\tau=t}^{t+T_{ha}-1} (\delta a_{tm} + \delta d_{tm}) \leq tc_{hat} \quad \begin{array}{l} a = 1, 2, \dots, A \\ h = 1, 2, \dots, H_a \\ t = 0, 1, 2, \dots, T - T_{ha} \end{array} \quad (25.f)$$

$$\sum_{m \in \{A_a \cup D_a\}}^M \sum_{\tau=t}^{T-1} (\delta a_{tm} + \delta d_{tm}) + \sum_{m \in \{A_a \cup D_a\}}^M \sum_{\tau=t}^{T_{ha}-T+t-1} (\delta a_{tm} + \delta d_{tm}) \leq tc_{hat} \quad \begin{array}{l} a = 1, 2, \dots, A \\ h = 1, 2, \dots, H_a \\ t = 0, 1, 2, \dots, T - T_{ha} \end{array} \quad (25.g)$$

$$\delta_m = \sum_{t=0}^{T-1} \delta a_{tm} \quad m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (25.h)$$

$$\delta_m = \sum_{t=0}^{T-1} \delta d_{tm} \quad m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (25.i)$$

$$\sum_{t=0}^{T-1} t \cdot \delta d_{tm} - \sum_{i=0}^{T-1} t \cdot \delta a_{tm} + tb_m - T \cdot \rho_m = 0 \quad m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (25.j)$$

$$tb_m - \min tb_m \cdot \delta_m \geq 0 \quad m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (25.k)$$

$$\max tb_m \cdot \delta_m - tb_m \geq 0 \quad m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (25.l)$$

$$\delta a_{tm}, \delta d_{tm}, \delta_m, \rho_m \in \{0, 1\} \quad \begin{array}{l} m = \{1, 2, \dots, M\} \\ t = \{1, 2, \dots, T - 1\} \end{array} \quad (25.m)$$

5.4 Mecanismos de Relajación

5.4.1 Fundamentos

Como hemos podido observar en los apartados anteriores, los modelos planteados pueden resultar bastante complejos a la hora de resolverse ya que cuentan con numerosas restricciones. En este trabajo se estudiarán y aplicarán dos técnicas de relajación con el objetivo de simplificar el problema.

Los modelos de resolución mediante relajación consisten en realizar simplificaciones al modelo descrito mediante la eliminación de algunas restricciones que convierten el problema en complejo. De esta forma, se obtiene un problema relajado que se puede resolver de una forma considerablemente más sencilla.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que la solución del problema relajado no tiene por qué coincidir o ser factible para el problema original. Por lo tanto, una vez resuelto, habrá que transformar la solución obtenida en una que sí cumpla con las restricciones del problema original mediante un proceso de factibilización. Aun así, una vez finalizado dicho proceso, es importante tener en cuenta que la solución final obtenida no tiene por qué ser la óptima para el problema original, aunque debe ser aproximada. (Laviós Villahoz, 2013).

A continuación, se detallan los dos algoritmos de relajación utilizados en este trabajo.

5.4.2 Algoritmo Branch and Bound

El algoritmo *Branch and Bound* o de Ramificación y Acotación es una técnica enumerativa que relaja las restricciones de integridad de las variables del problema original. Es decir, busca la solución óptima del problema de programación lineal entera a partir del conjunto de soluciones factibles enteras.

ser uno de los principales métodos de resolución en los que se basa dicho paquete para los problemas de programación lineal entera. (Gurobi Optimization, LLC, 2020).

5.4.3 Relajación Lagrangiana. Subastas Combinatorias

El segundo mecanismo de resolución aplicado es la Relajación Lagrangiana. Éste método, a diferencia del anterior y de la mayoría de mecanismos existentes para la resolución de problemas de programación lineal entera, no realiza una relajación de integridad si no que se basa en un enfoque Lagrangiano. De esta forma, la relajación pasa por eliminar las restricciones más complicadas del modelo incorporándolas a la función objetivo, convirtiendo el problema en uno más sencillo de resolver.

Las restricciones “complicadas” se añaden a la función objetivo acompañadas de multiplicadores de Lagrange que les aportan un peso. Cada peso representa la penalización aplicada a todas aquellas soluciones que no satisfacen la restricción afectada por el multiplicador y nos da una idea de la importancia de cada restricción.

Así, los multiplicadores hacen que las soluciones que no cumplan con las restricciones sean menos “atractivas” y, por tanto, se alejen del óptimo. Los pesos de los multiplicadores se irán modificando de forma iterativa hasta que se alcancen los valores óptimos que devuelvan la mejor solución alcanzada mediante el método del subgradiente.

Este mecanismo se haya íntimamente relacionado con las subastas combinatorias por la analogía existente entre sus procedimientos. Las subastas combinatorias son un tipo de mercado en el que los compradores, en lugar de realizar ofertas por un solo artículo, pujan por elementos en lotes. Esta característica permite tener en cuenta las restricciones de capacidad de los aeropuertos y han sido propuestas en una amplia bibliografía como medio de coordinación y negociación para sistemas multiagente (Kutanoglu & Wu, 1999) dado que se puede considerar que los problemas de asignación de slots aeroportuarios son problemas de asignación combinatoria (*combinational allocation problem*) o CAP. En nuestro caso contamos con un conjunto N de bienes o recursos (franjitas horarias) y otro conjunto M de agentes o compradores (vuelos), cada uno de estos agentes aporta una utilidad a la programación completa que buscamos maximizar. Los agentes, además, cuentan con unas preferencias en cuanto a horarios, aeropuertos de origen, aeropuertos de destino y precio de los intervalos que responden a sus propias funciones objetivo.

Dependiendo de la demanda originada por los agentes compradores, el subastador o, en nuestro caso, el coordinador de los aeropuertos, actualizará los precios que se calcularán mediante los multiplicadores Lagrangianos asociados a cada constante de capacidad. Es, por ello, un proceso iterativo que sigue una estructura como la que podemos ver en la Ilustración 34 Esquema de subasta combinatoria de slots aeroportuarios para una red de aeropuertos. Extraído de:

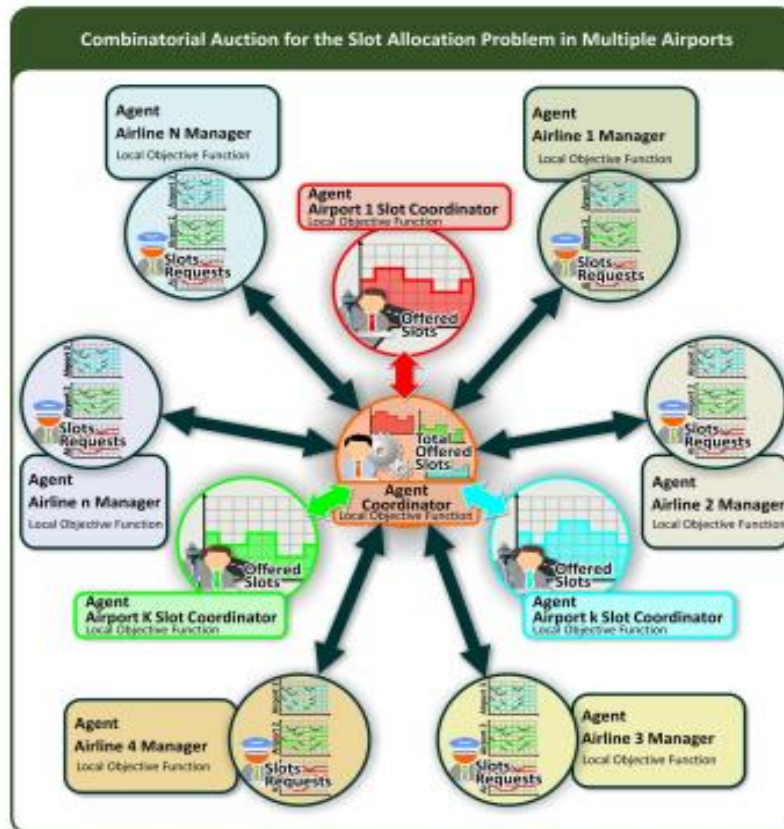


Ilustración 34 Esquema de subasta combinatoria de slots aeroportuarios para una red de aeropuertos. Extraído de: (Bolic, y otros, 2014)

5.5 Conclusiones

Durante este capítulo se han estudiado tanto los modelos como los mecanismos de resolución que se aplicarán en el CAPÍTULO 6 .

En primer lugar, se ha llevado a cabo la adaptación de los modelos proporcionados para un sólo aeropuerto (Araúzo, 2016) a las redes de aeropuertos, añadiendo nuevos parámetros y subíndices y modificando algunas de las restricciones. De esta forma se han obtenido los nuevos modelos en horizonte cerrado y horizonte periódico.

Si bien ambos modelos son similares en cuanto a formulación, y no es necesario hacer grandes cambios estructurales para adaptarlo a la periodicidad, sí es cierto que el segundo modelo es considerablemente más complejo. A cambio, ofrece una representación más fiel de la realidad y mayores posibilidades de creación de escenarios.

En cuanto a los algoritmos de resolución, hemos estudiado como la relajación del modelo es un recurso ampliamente utilizado dentro de la investigación operativa. Si bien existen diferentes métodos para llevar a cabo la relajación se han estudiado dos, de aplicación en el CAPÍTULO 6 . Por un lado, el método *Branch and Bound* forma parte de los métodos enumerativos que relajan la restricción de integridad y en él se basa *Gurobi*, el paquete de programación utilizado para llevar a cabo este trabajo.

Por otro lado, la Relajación Lagrangiana se basa en un principio diferente por el cuál elimina algunas restricciones traspasándolas a la función objetivo y acompañándolas de multiplicadores que se calculan de forma iterativa. Además, este mecanismo resulta muy adecuado para la resolución de nuestro problema por su paralelismo con las características de las subastas combinatorias.

En conclusión, a pesar de ser dos métodos basados en un mismo principio, el de relajación, afrontan el problema de dos formas muy diferenciadas, podremos comprobar la respuesta tanto de los modelos como de los algoritmos de resolución durante el desarrollo del CAPÍTULO 6.

CAPÍTULO 6 DISEÑO DE ESCENARIOS, APLICACIÓN Y COMPARACIÓN DE MÉTODOS

6.1 Introducción

Durante este capítulo se realizará la experimentación práctica y exposición de resultados de las simulaciones de asignación de slots descritas en los capítulos anteriores.

En primer lugar, se detallará el proceso de creación de escenarios, tanto a nivel de programación, explicando el manejo del paquete de programación utilizado y su funcionamiento básico, como a nivel conceptual. Se justificarán los diferentes escenarios elegidos junto a los parámetros aplicados y, como resultado de los mismos, la batería de problemas a testear.

A partir del planteamiento y ejecución de los escenarios se expondrán y compararán los resultados obtenidos de la experimentación tanto de los distintos escenarios como de los dos algoritmos utilizados.

6.2 Creación de escenarios.

6.2.1 Introducción. Java y Gurobi.

Para llevar a cabo la compilación y ejecución de los algoritmos de resolución se ha utilizado el lenguaje de programación *Java* y el solver *Gurobi*.

Java es un lenguaje de propósito general y orientado a objetos (POO) que se basa en el fundamento *WORA* (“*Write once, run anywhere*”) o, *escríbalo una vez y ejecútalo en cualquier dispositivo*. Ésta característica, unida a la similitud al lenguaje C y C++, en los que se basa y que eran previamente conocidos ha hecho que haya sido elegido para la realización de éste trabajo. El método de resolución por Relajación Lagrangiana ha sido programado íntegramente mediante este lenguaje.

Para poder ejecutar el programa codificado en Java se utilizará su propio compilador, proporcionado de manera gratuita por la empresa propietaria (*Oracle Corporation*).

Por otro lado, y como ya se ha mencionado anteriormente, *Gurobi Optimizer* es un solver o motor de programación lineal orientado a la optimización y resolución de problemas. Está codificado en lenguaje C pero tiene una parte ejecutable desde la que se puede interactuar con sus librerías y a la que se puede acceder desde una amplia variedad de lenguajes. (Pascual Pulido, 2018). Su importación permite la resolución de los problemas por el método denominado *Branch-and-Bound*, tal y cómo se ha explicado anteriormente.

Por último, para manejar y gestionar los ficheros se utilizará el editor *Eclipse*.

6.2.2 Estructura del programa y parámetros modificados.

Durante este trabajo se ha utilizado un programa adaptado a la resolución de problemas para redes de aeropuertos tanto de planificación cerrada como periódica proporcionado por el tutor del mismo. A partir de ésta codificación se ha estudiado la modificación de parámetros para ejecutar problemas de diferentes características. A continuación, se explicará la estructura básica del programa, las líneas de código modificadas y su efecto en los problemas resueltos.

El programa completo denominado ASA en referencia a “*Airport Slot Allocation*” está estructurado en dos paquetes principales:

- “*asa*”, se ocupa de la resolución de los problemas de optimización y cuenta con la función *main* desde la que manejaremos el código.
- “*asa.problemGenerator*” es el generador de los problemas que se resolverán posteriormente. Se le envían las características de los problemas que se desean testear y a partir de estos parámetros, que veremos a continuación, genera problemas semialeatorios.

Además de estos dos paquetes es importante mencionar la importación de las Librerías Java necesarias y el paquete de resolución Gurobi.

El programa está diseñado de tal forma que el usuario pueda diseñar los problemas que desee desde la función *main* de “*asa*” que, previamente, importa las clases de “*asa.problemGenerator*”, unificando el programa. Para ello se modificarán los parámetros que recoge la función privada *generateProblemNet* que veremos a continuación.

En primer lugar, se configuran las restricciones rodantes de los aeropuertos de la red modificando la parte del código que se muestra en la Ilustración 35.

```
private static void generateProblemNet() {
    AirportData a= new AirportData();
    a.addAC(1,4);
    a.addAC(3,10);
    a.addDC(1,4);
    a.addDC(3,10);
    a.addTC(1,6);
    a.addTC(3,15);

    AirportData b= new AirportData();
    b.addAC(1,2);
    b.addDC(1,2);
    b.addTC(1,3);
    b.addTC(4,8);

    AirportData[] ad=new AirportData[3];
    ad[0]=a;
    ad[1]=b;
    ad[2]=a;

    AirportsNet net=new AirportsNet(ad);
}
```

Ilustración 35 Configuración de las restricciones rodantes. Código de programación. Elaboración Propia.

Como vemos, en primer lugar se instancian objetos (a,b) de la clase *AirportData* a los que se les va añadiendo restricciones rodantes en cuanto a número de llegadas (AC, Arrival Capacity), número de salidas (DC, Departure Capacity) y movimientos totales (TC, Total Capacity) en forma de atributos del objeto. La primera cifra hace referencia al número de franjas horarias consecutivas a las que afecta y la segunda a la restricción en cantidad.

De esta forma creamos “tipos de aeropuertos” en cuanto a restricciones, en el caso del ejemplo se ha creado un tipo *a* con restricciones más amplias que podrían

asociarse a los aeropuertos de tipo *hub* y un tipo *b* con restricciones más estrictas, para, por ejemplo, aeropuertos de menor tamaño tipo *spoke*.

En la última parte del código de la Ilustración 35 creamos los aeropuertos que deseamos mediante un *array* de tamaño 3 (0,1 y 2) y les asociamos el tipo de restricciones de capacidad que consideremos adecuadas (*a* ó *b* en nuestro caso).

```
PeakTimeList pt1=new PeakTimeList();
pt1.addPeakTime(0.375, 0.15, 0.05);
pt1.addPeakTime(0.792, 0.35, 0.10);

PeakTimeList pt2=PeakTimeList.generatePeriodicPeakTimeList(0.2, 0.2, 0.5, 0.05, 4);

PeakTimeList pt3=new PeakTimeList();
pt3.addPeakTime(0.375, 0.25, 0.05);
pt3.addPeakTimeList(pt2);
```

Ilustración 36 Configuración de horas pico. Código de programación. Elaboración propia.

A continuación, en la Ilustración 36 veremos cómo se programan los tipos de configuraciones de horas pico.

Para configurar las horas pico se instancian elementos del tipo *PeakTimeList* a los que se les van añadiendo los periodos pico que se consideren necesarios.

En el caso de la lista *pt1* que podemos observar en la Ilustración 36 se le han añadido dos periodos de horas pico definidos cada uno por tres cifras, que, según su orden de aparición, representan:

- Hora pico expresada en fracción del número total de franjas horarias. En nuestro caso se están programando 24 franjas que hacen referencia a las 24 horas del día por lo que si multiplicamos obtenemos que se ha programado en primer lugar una hora pico a las 9 de la mañana y otra a las 19 horas (7 de la tarde).
- Proporción de los vuelos totales que se producen durante ese periodo. Es decir, en el primer caso del ejemplo, establecemos que un 15% de los vuelos operados al día en un aeropuerto de ese tipo solicitarán que se programen en esa hora pico y en el segundo un 35%.
- Desviación típica. A partir de los dos parámetros anteriores el programa diseñará una función normal con media a la hora pico previamente establecida y desviación típica, en este caso, del 5% (1,2 horas), por lo que, según los principios de la distribución normal, la demanda de ésta hora pico se distribuirá de la siguiente manera:

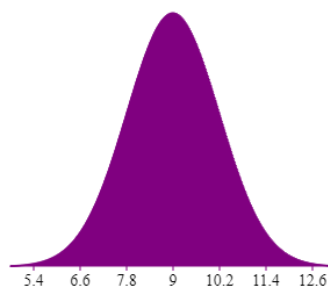


Ilustración 37 Distribución de demanda pt1. Código de programación. Elaboración propia.

Además, para los casos en los que, por ejemplo, se simulen semanas o días consecutivos, se podrán programar horas pico periódicas como es el caso de la lista $p/t2$ de la Ilustración 36. En ella, el segundo y último dígito hacen referencia respectivamente a:

- Intervalo de repetición del pico. En el caso de la imagen cada 0,2 fracciones del tiempo programado, es decir, para 24 horas, el periodo pico se repetirá cada 4,8 horas.
- Número de veces que se aplicará el intervalo. Número de repeticiones del periodo pico a lo largo del tiempo.

Una vez establecidas las restricciones rodantes de cada aeropuerto y las configuraciones de horas pico, se establecerán los parámetros asociados a la utilidad, tiempos y costes de los vuelos.

En primer lugar, para diseñar la utilidad de los vuelos, se debe tener en cuenta su funcionamiento, aunque ya apareció durante la explicación de los modelos de resolución se detallarán sus rasgos principales.

Las aerolíneas solicitarán un periodo concreto para realizar sus operaciones, en el caso que la coordinación del aeropuerto pueda asignar el vuelo dentro de dicho periodo se obtendrá la utilidad máxima de la operación. Sin embargo, si no es así y se asigna el vuelo fuera del periodo, su utilidad irá disminuyendo proporcionalmente al tiempo de desviación, conformando un comportamiento similar al que se representa en la Ilustración 38.



Ilustración 38 Representación de la evolución de la utilidad obtenida de un vuelo dependiendo del tiempo en el que se programa. Elaboración propia a partir de (Araújo, 2016)

Para definir las pendientes de la curva de utilidad, se utilizará el código que se muestra en la Ilustración 39.

```
TimeIntGenerator leftRightInt= new TimeIntGenerator(2.0/24,10.0/24);
TimeIntGenerator intWithGU= new TimeIntGenerator(0,1.0/24);
UtilityGenerator ug1=new UtilityGenerator(50,200,leftRightInt,intWithGU,leftRightInt);
UtilityGenerator ug2=new UtilityGenerator(25,150,leftRightInt,new TimeIntGenerator(0,2.0/24),leftRightInt);
```

Ilustración 39 Configuración de utilidades. Código de programación. Elaboración propia.

Para instanciar los tipos de utilidades *ug1* y *ug2* se proporciona a la clase *UtilityGenerator* los parámetros necesarios, por orden de aparición:

- Mínima utilidad posible.
- Máxima utilidad posible. (A partir de los valores mínimo y máximo proporcionados el generador de problemas obtendrá un valor aleatorio dentro de los límites introducidos).
- Pendiente izquierda de la curva.
- Tramo de utilidad máxima.
- Pendiente derecha de la curva.

Las pendientes se calcularán por medio de la clase generadora de intervalos de tiempo *TimeIntGenerator* a la que se le proporcionará el número mínimo y máximo de franjas horarias que pueden ocupar la pendiente izquierda, la derecha o la llanura de máxima utilidad.

```
TimeIntGenerator flightTime= new TimeIntGenerator(0.5/24,1.5/24);
TimeIntGenerator extraFlightTime= new TimeIntGenerator(0,0.2/24);
TimeIntGenerator flightTime1= new TimeIntGenerator(2.0/24,2.5/24);
FlightTimeGenerator ftg=new FlightTimeGenerator(flightTime,extraFlightTime,5.5,10.5);
FlightTimeGenerator ftg1=new FlightTimeGenerator(flightTime1,extraFlightTime,5.5,10.5);
```

Ilustración 40 Configuración de tiempos de vuelo. Código de programación. Elaboración propia.

A continuación, se establecerán los tiempos de vuelo:

Como vemos en la Ilustración 40, se han instanciado tres objetos diferentes de nuevo de tipo *TimeIntGenerator* para crear tres tipos de tiempos de vuelo introduciendo los valores mínimo y máximo para obtener un valor aleatorio entre ellos.

A continuación, se definen las instancias *ftg* y *ftg1* que representan dos modalidades de tiempos de vuelo. Para configurarlas se les proporciona:

- El tipo de tiempo de vuelo, en nuestro caso *flightTime* o *flightTime1*.
- Un posible tiempo de vuelo extra, *extraFlightTime*.
- Los valores mínimo y máximo entre los que se debe encontrar el coste del vuelo por cada franja horaria en el aire.

Por último, se codificarán las conexiones existentes entre los aeropuertos, el número de vuelos que desean recorrerlas y sus principales características. Para ello utilizaremos una función del objeto tipo red que creamos anteriormente.

```
net.setConnection(1, 2, new Connection(30,pt11,ug1,ug2,ftg));
net.setConnection(2, 1, new Connection(30,pt11,ug1,ug2,ftg));
net.setConnection(1, 3, new Connection(30,pt11,ug1,ug2,ftg));
net.setConnection(3, 1, new Connection(30,pt11,ug1,ug2,ftg));
net.setConnection(2, 3, new Connection(20,pt11,ug1,ug2,ftg1));
net.setConnection(3, 2, new Connection(20,pt11,ug1,ug2,ftg1));
```

Ilustración 41 Configuración de conexiones entre aeropuertos. Código de programación. Elaboración propia.

A la función *setConnection* se le enviarán, por orden de aparición:

- El aeropuerto origen de la ruta.
- El aeropuerto destino de la ruta.

- Un objeto de tipo *Connection* que cuenta con la siguiente información:
 - o Número de vuelos que solicitarán recorrer la ruta.
 - o Tipo de horas pico de la ruta.
 - o Función de utilidad generada en el aeropuerto origen.
 - o Función de utilidad generada en el aeropuerto destino.
 - o Tiempo de vuelo.

Por último, todavía dentro de la función *GenerateProblem* se ordenará la generación del problema, el fichero donde debe almacenarse, el número de franjas horarias que se desean simular y el tipo de problema, horizonte cerrado o periódico.

```
ProblemGeneratorNet pg=new ProblemGeneratorNet(net);
pg.generateProblem("problems\\p3a_c1.txt",24,true);
```

Ilustración 42 Generación del problema. Código de programación. Elaboración propia.

Una vez cerrada la función anterior, en el *main* ordenaremos la resolución del problema generado indicando el fichero donde se ha guardado y el tipo de impresión de la resolución que deseamos obtener tal y como se muestra en la Ilustración 43. El programa está configurado de forma que podamos elegir qué tipo de mecanismo de resolución utilizar, Gurobi (*Branch and Bound*), Relajación Lagrangiana o ambos a la vez.

```
generateProblemNet();
Problem p1=ProblemGeneratorNet.readProblem("problems\\p3a_c1.txt",true);
GRBSolver grb=new GRBSolver();
grb.setProblem(p1);
grb.run("results\\p3a_c1_grb", GRBSolver.PRINT_FINAL_SOL);
```

```
Problem p2=ProblemGeneratorNet.readProblem("problems\\p3a_c1.txt",false);
LRSolver lr=new LRSolver();
lr.setProblem(p2);
lr.run("results\\p3a_c1_lr", LRSolver.PRINT_SUMMARY_ROUNDS);
```

Ilustración 43 Resolución del problema generado. Código de programación. Elaboración propia.

6.2.3 Diseño de escenarios

Durante este apartado se justificará la creación de los escenarios que conformarán la batería de problemas. Los escenarios a testear tratan, por un lado, de acercarse simplificadaamente a la realidad de las redes de aeropuertos actuales y por otro, de comprobar la reacción de los algoritmos de resolución frente a diferentes tipos de problemas de mayor y menor exigencia.

Con el objetivo de comparar, además de los dos métodos de resolución presentados en el CAPÍTULO 5 , diferentes tipos de estructuras de redes, se detallarán las principales características de dichos escenarios así como las razones de su elección. Para ello, se pondrá en práctica toda la información recabada en capítulos anteriores: CAPÍTULO 3 , en cuanto a las propiedades de las redes y CAPÍTULO 4 en cuanto a características de la capacidad, demanda y utilidad de los aeropuertos y rutas que las forman.

Diseño de las redes

El fundamento elegido para diferenciar los tipos principales de redes de aeropuertos a comparar es su estructura principal, ésta podrá ser:

- **Hub and Spoke.** Basada en la existencia de aeropuertos de mayor tamaño *hub* que recogen el tráfico de los de menor tamaño o *spoke*, con el objetivo de unificarlo para completar vuelos de largo recorrido en naves de mayor envergadura.
- **Point to point.** Basada en la conexión directa de todos los aeropuertos de forma que no sea necesario realizar escalas.

Esta elección se fundamenta principalmente en el artículo “Characterizing air traffic networks via large-scale aircraft tracking data: A comparison between China and the US networks” (Pan & Lishuai, 2018). El mencionado estudio ha sido previamente analizado en el CAPÍTULO 3 .

En concreto, se crearán dos redes de tamaños diferentes (5 y 8 aeropuertos), para cada una de ellas se simulará la estructura *point-to-point* y para la de menor tamaño (5 aeropuertos), se simulará también la estructura *hub-and-spoke*. Por lo que, en cuanto a propiedades de red, contaremos con tres escenarios diferentes. Representados a continuación:

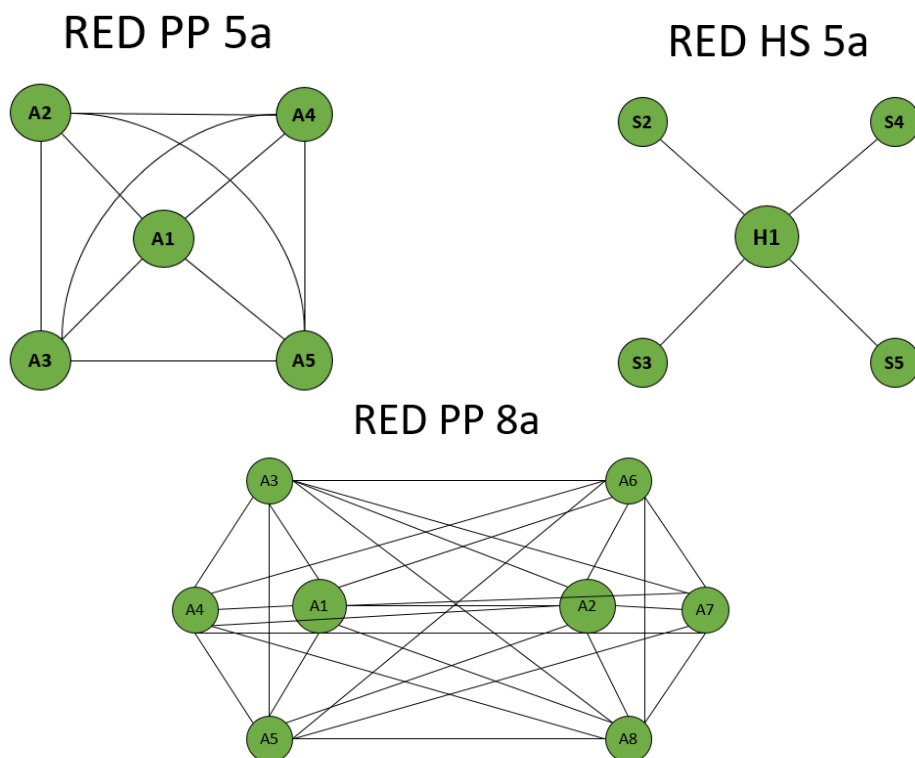


Ilustración 44 Representación redes 5 y 8 aeropuertos con estructura PP (point-to-point) y HS (hub-and-spoke).Cada enlace representa las rutas bidireccionales de ida y vuelta. Elaboración propia.

A continuación, en la siguiente tabla se muestran las propiedades matemáticas de cada una de las redes en cuanto a conectividad:

	PP a5	PP a8	HS a5
Nº de aeropuertos	5	8	5
Nº de conexiones	20	56	8
Grado medio	8	14	3,2
Camino geodésico m	1	1	1,6
Conectividad (%)	100	100	40

Tabla 1 Características de las redes simuladas en cuanto a conectividad.
Elaboración propia

En referencia a las características de sus aeropuertos, en las redes PP todos los aeropuertos serán considerados de igual tamaño y presentarán las mismas restricciones de capacidad. Por el contrario, en la red HS los aeropuertos *hub* contarán con restricciones rodantes más amplias y detalladas mientras que los *spoke* tendrán las mismas que en la red PP. La configuración de las restricciones rodantes se muestra en la siguiente tabla.

	Franjas Consecutivas			
	Aeropuerto tipo HUB		Aeropuerto tipo SPOKE	
	1	3	1	4
Aterrizaje	3	8	2	/
Despegue	3	8	2	/
Total	5	12	3	8

Tabla 2 Restricciones rodantes empleadas para aeropuertos tipo hub y tipo spoke.
Elaboración propia

Además, las rutas de la estructura HS contarán con una mayor utilidad y, para que los escenarios sean equivalentes, se calcularán de forma que viajen el mismo número de pasajeros, teniendo en cuenta que las aeronaves que cubren rutas hub-spoke son de mayor envergadura.

Las naves consideradas para operar las rutas y los cálculos para obtener sus utilidades y costes correspondientes se muestran en la siguiente **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y se basan en el estudio sobre utilidad del

Tipo Vuelo	NAVE	N Pasajeros	Utilidad Bruta	Coste/ franja de vuelo
HUB-SPOKE	B727-200	150	U(200,300)	U(30,40)
POINT-TO-POINT	DC9-30	100	U(90,150)	U(20,30)

Tabla 3 Utilidades y costes por franja horaria de vuelo programados. Elaboración propia

CAPÍTULO 3 .

El resto de características principales se mantendrán constantes para todos los escenarios a excepción de las utilizadas para aumentar o disminuir la carga de los problemas, que se detallarán en el siguiente apartado.

Cabe destacar, además, el diseño de las horas pico:

- **Simulaciones de un día:** Se situarán dos horas pico principales a las 9 de la mañana y a las 7 de la tarde.
- **Simulaciones semanales:** Se programarán dos periodos pico en los días viernes y domingo.

A continuación, podemos observar dos ejemplos de la demanda proporcionada por el generador de problemas para dos problemas de 24 (un día dividido en franjas de una hora) y 168 franjas (una semana dividida en franjas de una hora) en los que el 20% de la demanda se sitúa en las mencionadas horas pico.

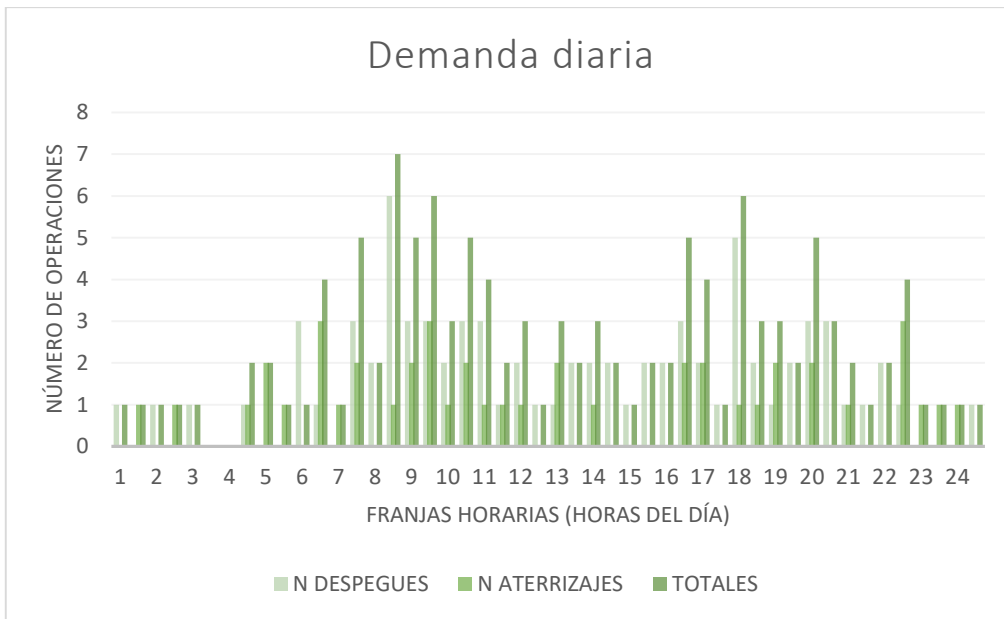


Gráfico 1 Representación gráfica de la demanda obtenida para un aeropuerto en un problema de 24 franjas horarias, 3 aeropuertos y 200 vuelos. Elaboración propia.

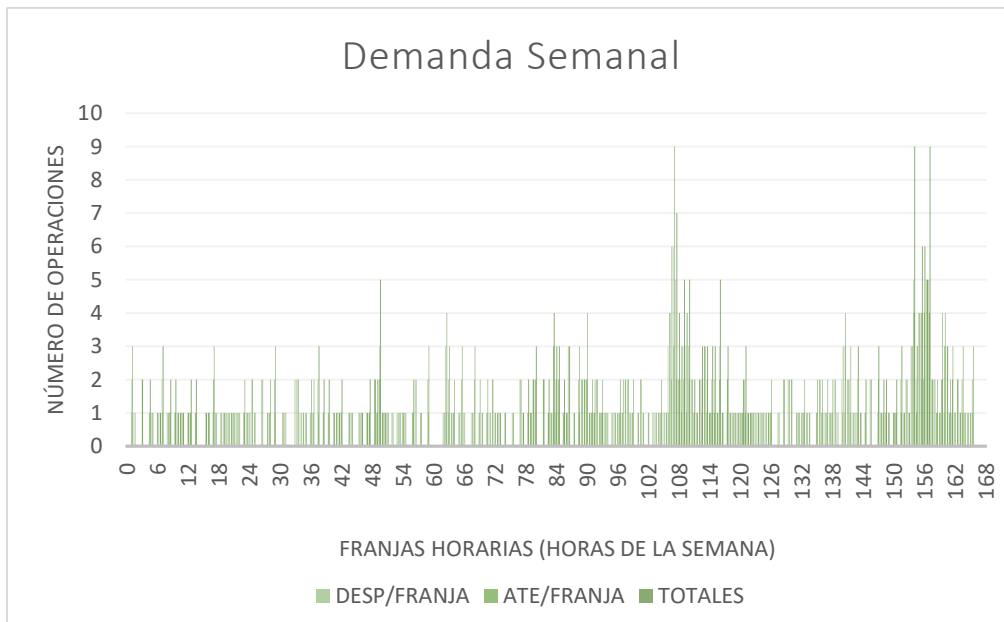


Gráfico 2 Representación gráfica de la demanda obtenida para un aeropuerto en un problema de 168 franjas horarias, 5 aeropuertos y 1200 vuelos. Elaboración propia.

En cuanto a la periodicidad de los problemas generados, como ya se ha mencionado en el CAPÍTULO 5 los problemas periódicos resultan más realistas que los de

horizonte cerrado. Por ello, todos los problemas simulados se generarán en horizonte periódico, sin embargo, se debe tener en cuenta que esto aumentará la complejidad de la resolución y, con ello, los tiempos de ejecución.

En los siguientes gráficos podemos observar el efecto de simular en horizonte periódico para 3 problemas sencillos.

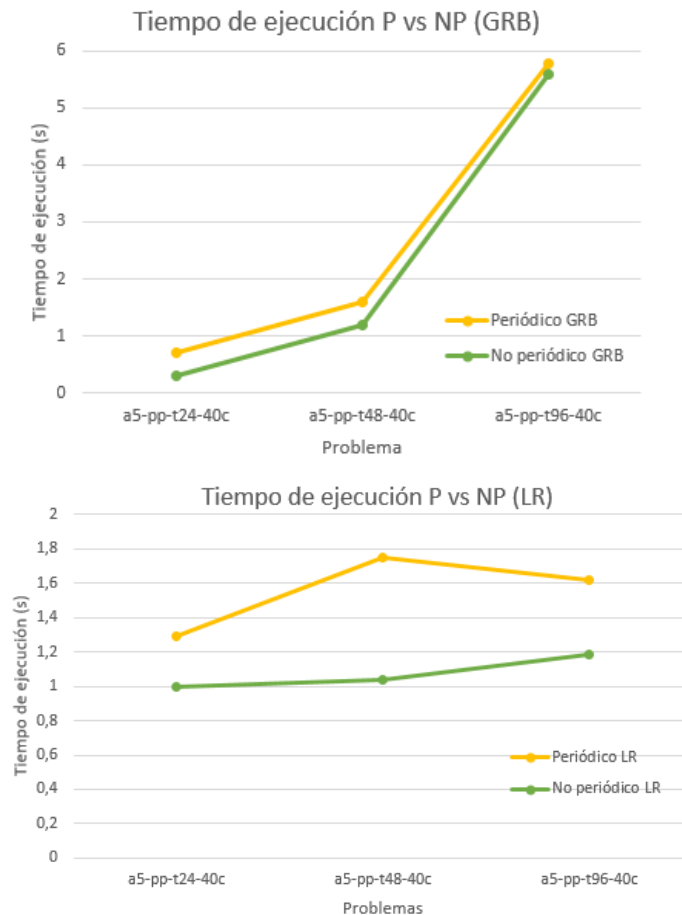


Gráfico 3 Comparación de los tiempos de ejecución empleados para resolver los mismos problemas dependiendo de si se programan en horizonte periódico (p) o no periódico (np). Elaboración propia.

Como podemos observar, independientemente del método de resolución utilizado, el tiempo de ejecución siempre resulta superior si se programa en horizonte periódico, lo cual nos da una idea del aumento de complejidad.

6.3 Batería de problemas

Una vez definidas y justificadas las redes que se testearán, en este apartado se presenta la recopilación total de problemas a ejecutar.

Ésta batería tiene el objetivo de comprobar, además del funcionamiento de los dos tipos de redes mencionadas, el funcionamiento de los algoritmos. Para ello, se combinarán parámetros que aumenten o disminuyan la carga y el orden del problema y con ello, su dificultad para ser resuelto.

Estos parámetros son:

- Número de franjas simuladas (24,48,96,168,336)
- Tanto por ciento de tráfico en horas punta (0,20 ó 40%)
- Número de vuelos por ruta (a, b ó c en orden ascendente)

La batería detallada en forma de tablas se podrá encontrar en el Anexo I. Batería de Problemas.

Debe tenerse en cuenta que, debido a la gran extensión de muchos de los problemas detallados en la batería anteriormente mencionada, algunos de ellos no han sido simulados por requerir un alto tiempo de ejecución.

6.4 Análisis y comparación de resultados

A continuación, se realizará un análisis detallado de todos los resultados obtenidos. Tales datos están recogidos en el Anexo II. Resultados Obtenidos .

En primer lugar, se analizarán y contrastarán los resultados de los problemas simulados para el escenario de 5 aeropuertos con estructura PP, por ser el más completo.

Una vez realizado dicho análisis, se contrastarán los datos obtenidos con los otros dos escenarios para analizar la respuesta de los algoritmos de resolución ante redes de diferentes características (escenario 5a-hs) y comprobar su eficacia frente a redes de mayor tamaño (escenario 8a-pp).

6.4.1 Análisis escenario 5a-pp.

En primer lugar, se analizarán los problemas y sus resoluciones en cuanto a uno de los factores más determinantes, el **valor objetivo** conseguido:

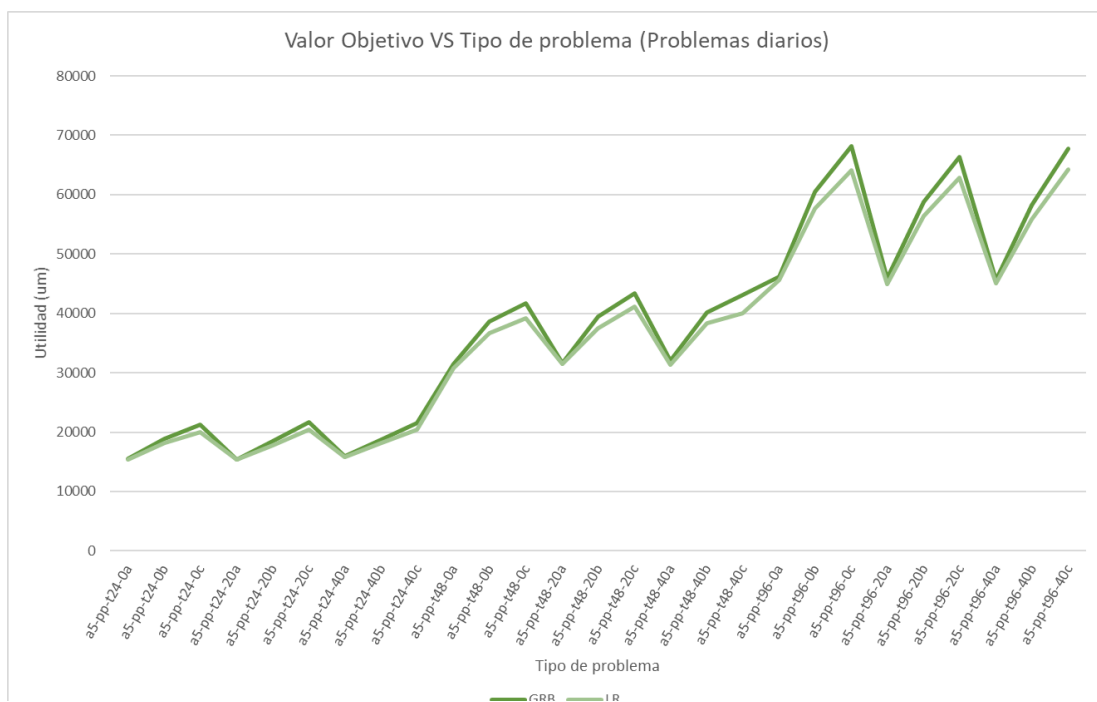


Gráfico 4 Representación valor objetivo obtenido frente a el tipo de problema para los dos métodos de resolución descritos en problemas diarios (24, 48 y 96 franjas). Elaboración propia.

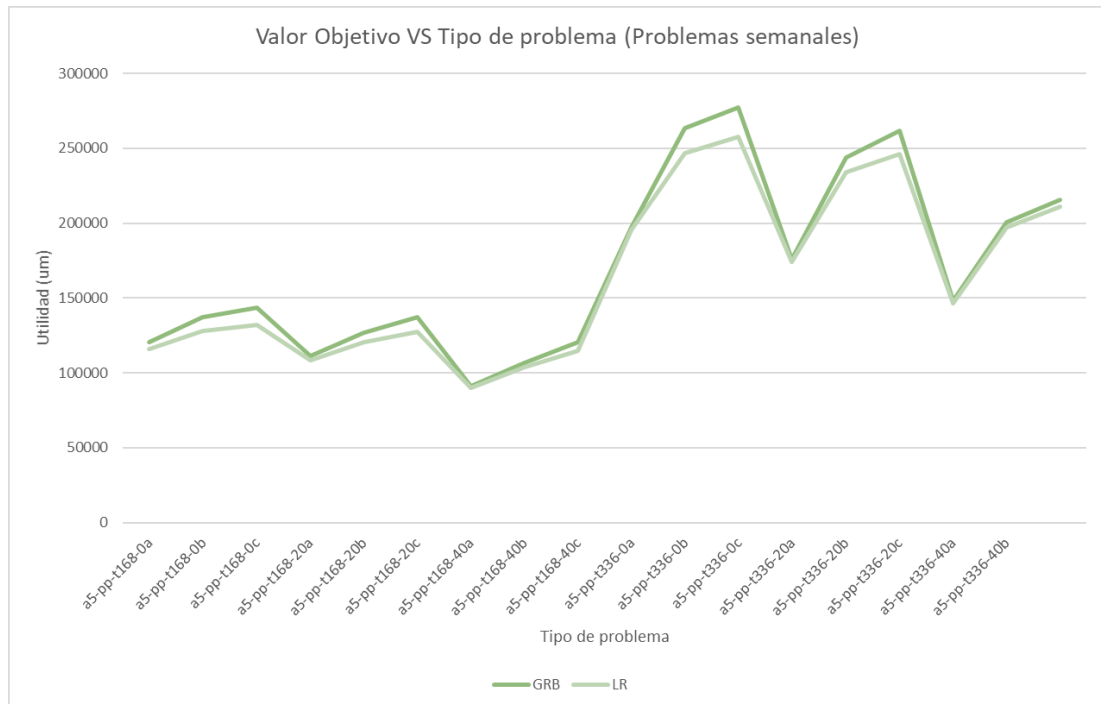


Gráfico 5 Representación valor objetivo obtenido frente a el tipo de problema para los dos métodos de resolución descritos en problemas semanales (168 y 336 franjas). Elaboración propia.

Como podemos observar en los gráficos (Gráfico 4 y Gráfico 5), a grandes rasgos, la resolución por el método GRB siempre obtiene mejores óptimos que la resolución por RL.

Esto se debe, principalmente, al funcionamiento de sus criterios de parada. Mientras que la resolución por Relajación Lagrangiana tiene establecido un criterio de parada basado en el incremento del valor objetivo de cada iteración (parará cuando alcance la solución óptima o cuando ese incremento no supere el valor $1E-7$), el solver Gurobi sólo se detendrá cuando se superen las tres horas de ejecución (10000s) sin alcanzar el valor óptimo, lo que le proporciona un mayor margen temporal para obtener mejores valores objetivo.

En trabajos anteriores (Gómez Miguel, 2019) se ha estudiado la modificación de dichos parámetros de parada así como de algunos otros, concluyendo que los utilizados en este trabajo son los más óptimos.

Además, si observamos los gráficos podemos comprobar que la diferencia de valores es menor para los problemas tipo a (menor número de vuelos) y va aumentando en los b y c (mayor número de vuelos). Es decir, la diferencia del valor objetivo obtenido mediante los dos métodos aumenta con la saturación del problema.

A continuación, examinaremos el comportamiento de los **tiempos de ejecución**, otro de los factores más importantes a tener en cuenta por su capacidad para condicionar la viabilidad de las resoluciones. Comprobaremos su evolución frente a diferentes parámetros como el tipo de problema, tamaño, % de horas punta o factor de carga.

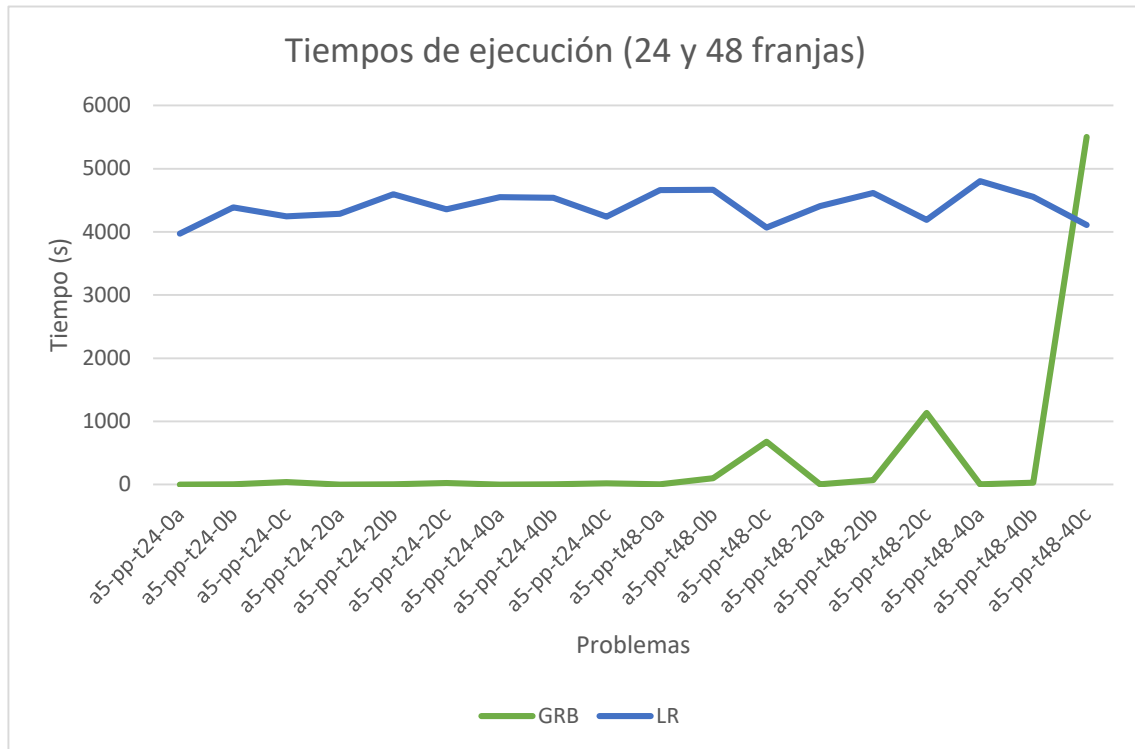


Gráfico 6 Evolución de los tiempos de ejecución para problemas de pequeño tamaño (24 y 48 franjas). Elaboración propia.



Gráfico 7 Evolución Del tiempo de ejecución para todos los problemas. Elaboración propia.

Tal y como podemos observar en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, mientras que los tiempos de ejecución del método LR se mantienen prácticamente constantes y muy bajos (entre 1 y 10 segundos), el caso de la resolución por Gurobi es muy diferente.

Si bien durante los primeros problemas (24 franjas) de tamaño muy reducido parece igualarse al método LR, vemos como, al aumentar los periodos de simulación y, en especial, la carga de los problemas, su tiempo de ejecución se distancia mucho del método LR.

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, podemos comprobar cómo, a l simular problemas de gran tamaño y carga, el método GRB alcanza su criterio de parada en los 10000 segundos.

Llama la atención como, independientemente del tamaño del horizonte simulado, para los problemas tipo a, la resolución por medio de Gurobi siempre ocupa tiempos muy reducidos y crece de forma casi exponencial para los casos b y c. Este comportamiento se asocia a su sensibilidad ante el factor de carga que, para los problemas tipo a, no supera la unidad (problemas infrasaturados), mientras que en los casos b la supera ligeramente y en algunos casos c llega a alcanzar cifras alrededor de 1,6.

Esto nos lleva a concluir que, si bien el método GRB es más eficiente en cuanto al resultado de sus valores objetivo, debemos tener en cuenta que emplea un tiempo mucho mayor que el método LR. Este factor temporal puede resultar clave si tenemos en cuenta que los problemas reales cuentan con tamaños y factores de carga mucho mayores y por tanto son más demandantes en cuanto a tiempos de ejecución.

Por último, estudiaremos el **% de vuelos programados** por cada método frente a los solicitados inicialmente. Podemos observar su evolución en el siguiente gráfico:



Gráfico 8 Evolución del % de vuelos programados por tipo de problema y método de resolución. Elaboración propia.

Como vemos, aunque los porcentajes se acercan mucho, se pueden apreciar los resultados del método GRB ligeramente por encima en algunos casos. Este hecho parece lógico considerando que el número de vuelos programados se encuentra en relación directa con el valor objetivo que hemos estudiado anteriormente. Además,

tal y como se muestra en el Gráfico 9, se ha comprobado la relación entre dichos porcentajes con los factores de carga de cada problema:

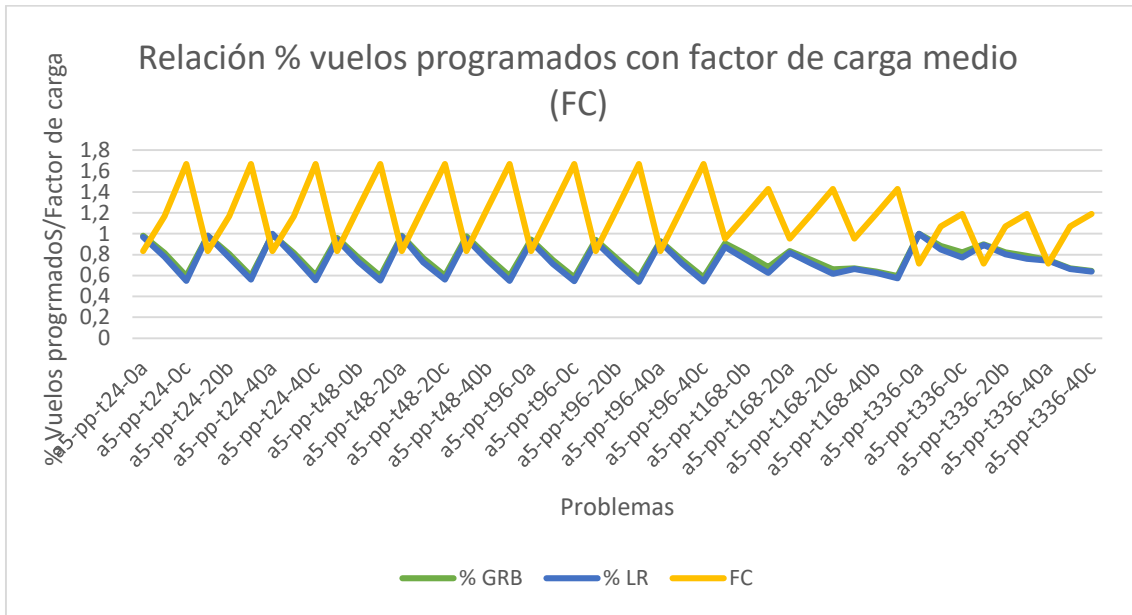


Gráfico 9 Representación de la relación entre el % de vuelos programados y el factor de carga de cada problema. Elaboración propia.

Tal y como se puede observar, se cumple una relación inversa, a mayor factor de carga (mayor saturación), menor porcentaje de vuelos programados para ambos métodos. Con ello, comprobamos como, si bien el factor de carga no afecta al método LR tanto como al método GRB en cuanto a tiempos de ejecución sí lo hace reduciendo el % de vuelos programados.

Además, si representamos los problemas ordenados por porcentaje de horas pico:

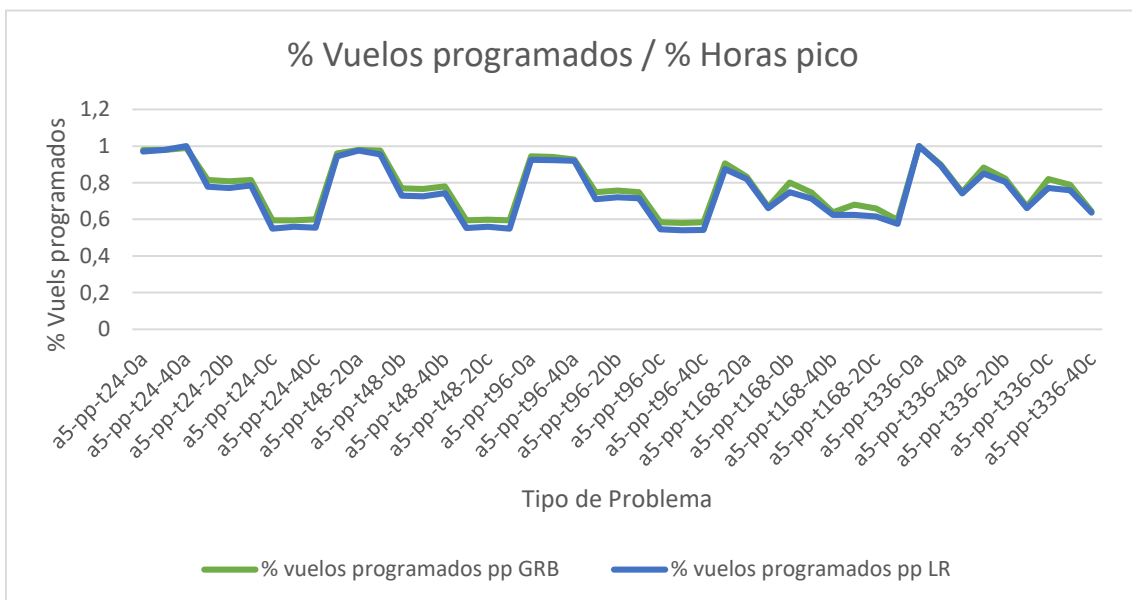


Gráfico 10 Relación entre el % de vuelos programados y el % de horas pico para los problemas resueltos por GRB y LR. Elaboración propia.

En el gráfico podemos ver como el % de horas pico es directamente proporcional a la disminución de vuelos programados. Además, se puede observar cómo, para los porcentajes de horas pico más críticos (40%) el método GRB obtiene un mejor resultado.

6.4.2 Comparación con escenario 8a-pp.

Una vez analizadas las características principales en cuanto a métodos de resolución para el escenario anterior, se pasará a contrastar su actuación frente a un escenario de misma estructura (pp) pero mayor tamaño. Los resultados de dichos problemas se encuentran detallados en la Tabla 15 del Anexo II. Resultados Obtenidos.

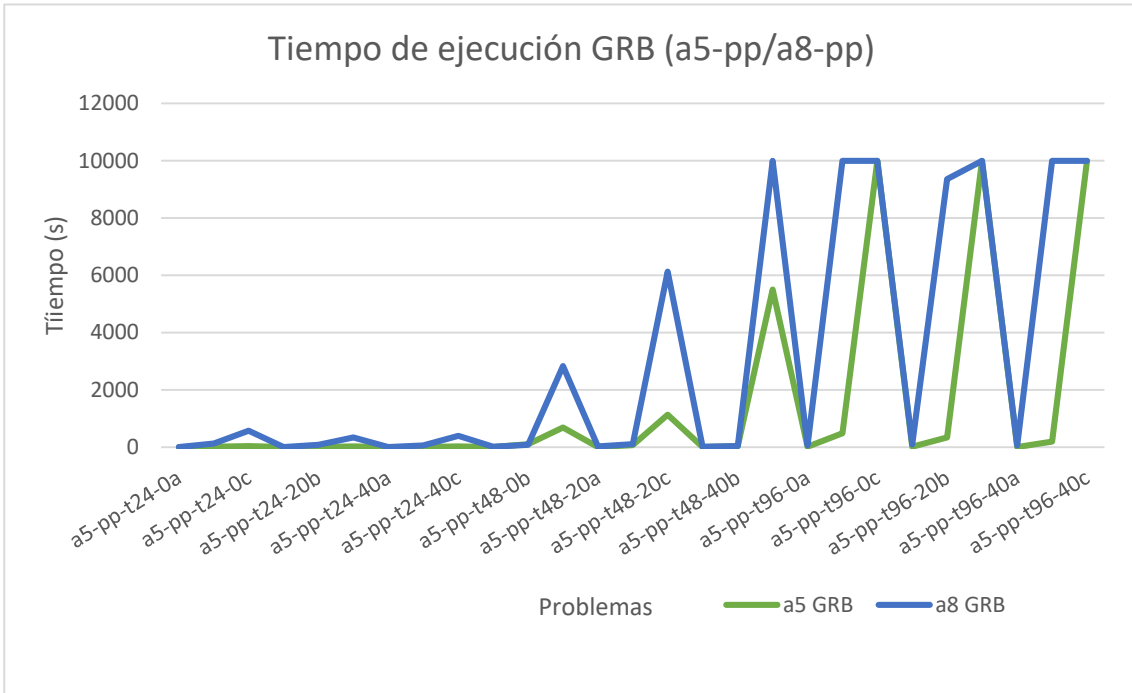


Gráfico 12 Tiempos de ejecución para los escenarios a5-pp y a8-pp por el método GRB. Elaboración propia.

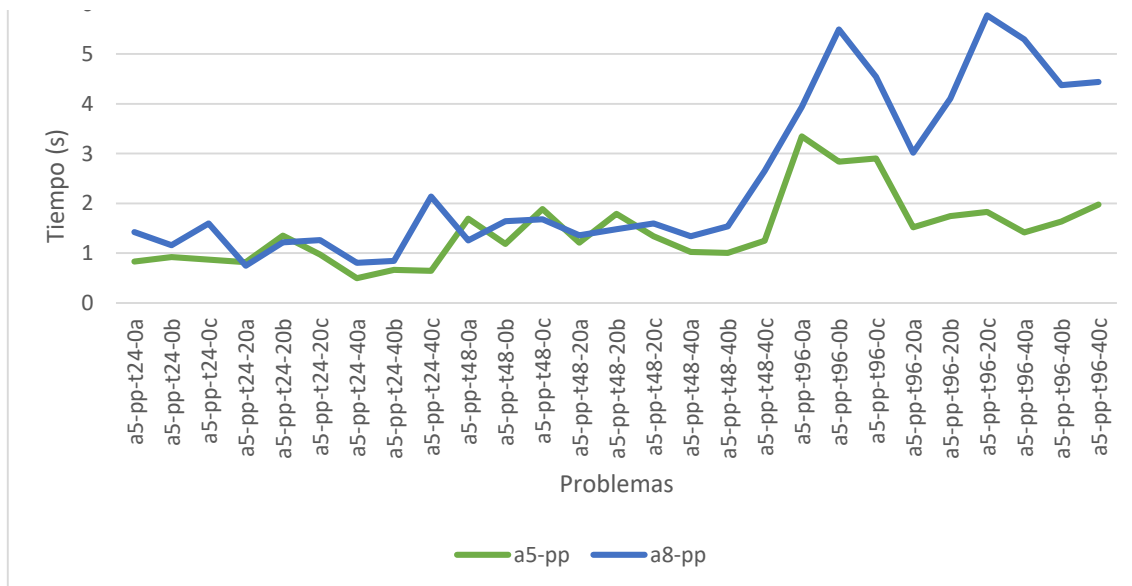


Gráfico 11 Comparación de los tiempos de ejecución para escenarios de 5 y 8 aeropuertos por el método LR. Elaboración propia.

Para crear escenarios equivalentes se ha tratado de diseñar los problemas de forma que cuenten con una carga media similar. Si comparamos los tiempos de ejecución para cada método de resolución en cada escenario obtenemos los gráficos Gráfico 12 y Gráfico 11.

Podemos observar cómo, en el caso de Gurobi (Gráfico 12), existe un claro crecimiento en los tiempos de ejecución para el escenario de los 8 aeropuertos que se aprecia sobre todo en los casos sobresaturados (b y c).

Sin embargo, para la resolución por el método de Relajación Lagrangiana, hasta la simulación de escenarios de 96 franjas la diferencia de tiempos de resolución no es clara. Además, en los escenarios de mayor horizonte, aunque si existe una diferencia proporcional al igual que en el caso de Gurobi, el incremento cuantitativo no se puede comparar para los dos casos, siendo el de los problemas resueltos por Gurobi mucho mayor (máximos de más de 9000 segundos de diferencia frente a no más de 4 segundos).

6.4.3 Comparación con escenario 5a-hs.

A continuación, estudiaremos la equivalencia entre los escenarios a5-pp y a5-hs. Tal y cómo se mencionó en el Apartado 6.2.3 el escenario *hub-ad-spoke* ha sido diseñado buscando la mayor equivalencia posible al escenario *point-to-point* pero dotándole de las características propias de este tipo de redes.

Para ello, se han adaptado propiedades como las condiciones rodantes del aeropuerto *hub* (más amplias y detalladas), los intervalos de tiempo para realizar las operaciones (más reducidos debido al fenómeno *wave-system*, estudiado en el CAPÍTULO 3), y la mayor capacidad en cuanto a pasajeros y utilidad generada por los vuelos.

La adaptación de dicha capacidad en cuanto a número de asientos ha sido un factor fundamental de la simulación, y se encuentra detallado en el Anexo III. Equivalencias número de vuelos pp/hs.

Los resultados referentes a los problemas simulados para este tipo de escenario se encuentran en las Tabla 10 y Tabla 11 del Anexo II. Resultados Obtenidos.

A continuación, en el Gráfico 13 podemos comprobar como la estructura *hub-and-spoke* permite, a pesar de contar con la mitad de rutas, reducir ampliamente la carga de los problemas.

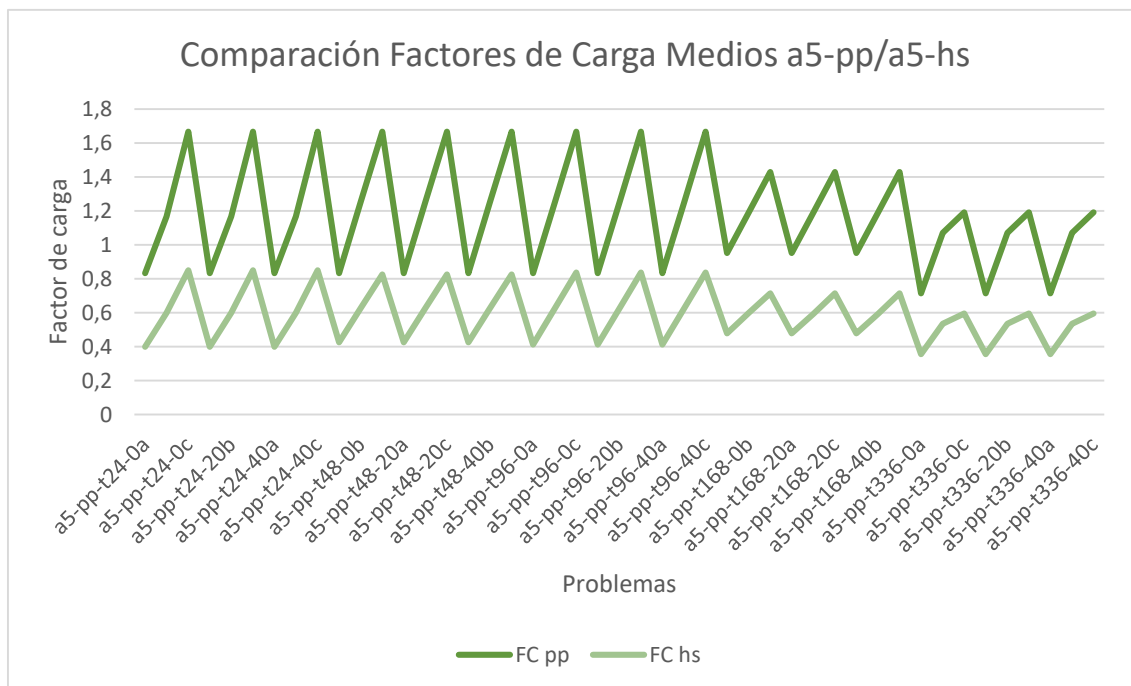


Gráfico 13 Comparación de los factores de carga de los problemas dependiendo de si cuentan con estructura point-to-point o hub-and-spoke. Elaboración propia.

Este fenómeno se puede comprobar también si comparamos los tiempos de ejecución, tal y como sucede en los gráficos Gráfico 14 y Gráfico 15. Éstos resultados demuestran que el mayor número de pasajeros por nave y las restricciones rodantes ligeramente más amplias del aeropuerto *hub* compensan la concentración de los vuelos de 20 rutas en 8.

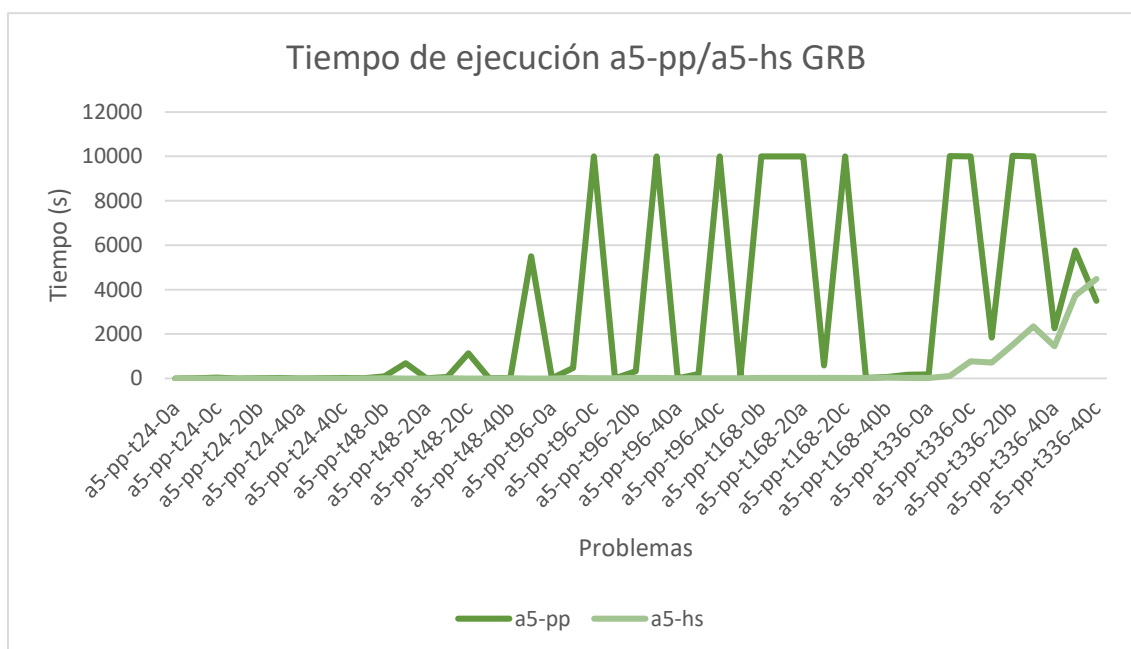


Gráfico 14 Evolución de los tiempos de ejecución por el método GRB para los escenarios pp y hs. Elaboración propia.

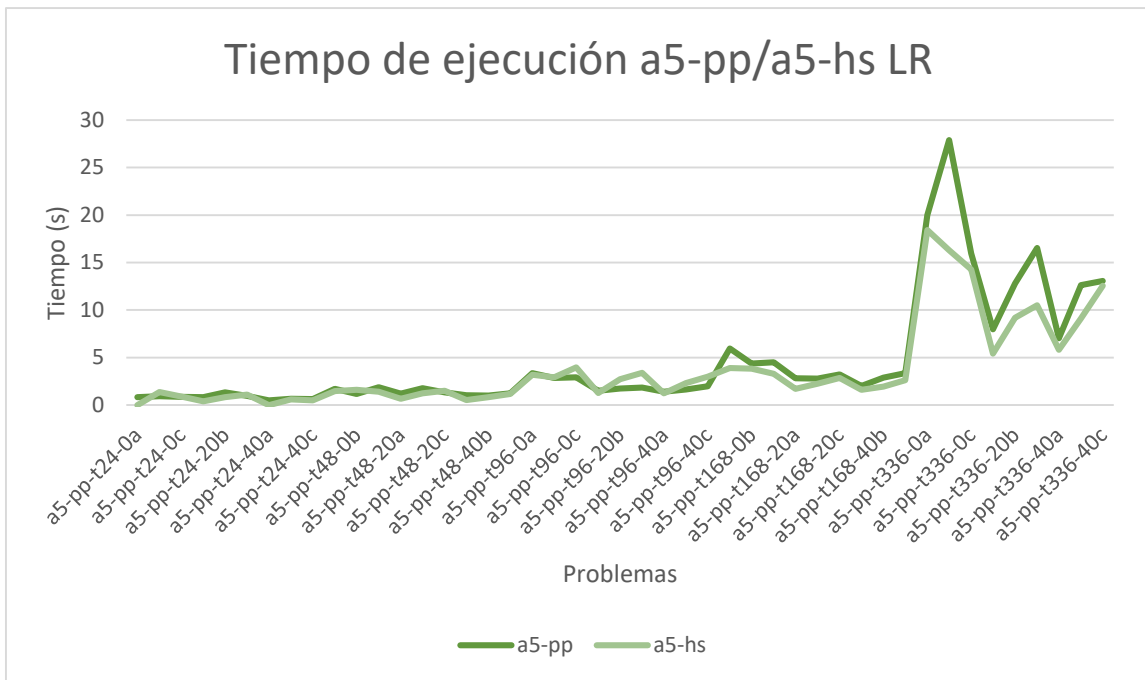


Gráfico 15 Evolución de los tiempos de ejecución por el método LR para los escenarios pp y hs. Elaboración propia.

Sin embargo, si observamos el Gráfico 14 podemos apreciar como al aumentar el periodo de planificación, el tiempo de ejecución de Gurobi comienza a crecer de forma rápida, lo que nos hace suponer que pueda llegar a alcanzar, en periodos mayores, al tiempo de ejecución de la estructura *point-to-point*.

Por otro lado, para el método de resolución LR no parece haber una gran diferencia en cuanto a tiempos de ejecución dependiendo de la estructura.

Por último, trataremos de comparar el efecto de las horas pico en las diferentes estructuras.

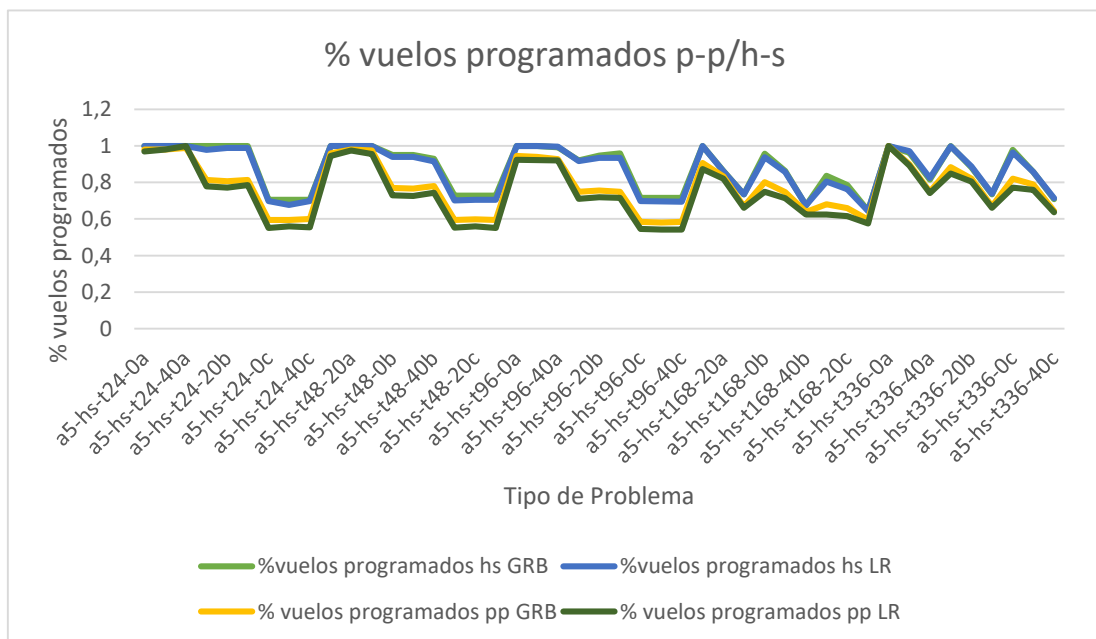


Gráfico 16 Relación entre el % de vuelos programados y los tipos de estructura. Elaboración propia.

Tal y como observamos en el Gráfico 16, a pesar de una hipótesis inicial en la que podríamos suponer que al concentrar todo el tráfico en un solo aeropuerto las horas pico podrían causar mayor efecto en los escenarios hs, la notable disminución del factor de carga en éstos problemas provoca el efecto contrario. De lo cual, podemos deducir, que el factor de carga determina el efecto de las horas pico sobre el número de vuelos programados en cada problema.

6.5 Conclusiones.

Durante este capítulo se han puesto en práctica gran cantidad de los contenidos estudiados en los anteriores. De esta forma, se ha podido conocer su importancia desde el enfoque de la simulación.

En primer lugar, para la realización de los ensayos, se ha entrado en contacto con la programación en Java y el pensamiento lógico. Además, durante el diseño de los escenarios a testear, se ha trabajado la aplicación de los aspectos teóricos previamente estudiados a un entorno de programación con posibilidades limitadas, tratando de obtener el mayor rendimiento de las mismas. Para ello se ha diseñado una batería de problemas considerados suficientemente variables y representativos de la realidad como para poder obtener conclusiones fundamentadas dentro de la simplicidad requerida para la viabilidad de su resolución.

Por otro lado, detrás de los resultados finales obtenidos, se ha llevado a cabo todo un estudio de ensayos prueba-error para comprobar que los problemas programados coincidieran con los diseñados, comprobando factores como el ajuste de la distribución de demanda generada a las distribuciones estudiadas en capítulos anteriores.

Por último, se han analizado los problemas ejecutados, comparándose entre sí en cuanto a método de resolución y escenario. Las principales conclusiones de este estudio de detallan en el CAPÍTULO 7 .

CAPÍTULO 7 CONCLUSIÓN

Durante el presente trabajo se ha realizado un profundo estudio tanto del sistema actual de asignación de slots como de las características principales de las redes aeroportuarias y sus parámetros con el propósito de llevarlo a la aplicación mediante dos mecanismos de resolución de problemas.

En primer lugar, al comienzo del estudio, se ha podido comprobar la necesidad de investigación sobre esta temática para relajar un sistema cada vez más congestionado como el aeroportuario. Las prospecciones de futuro, además, auguran un mayor crecimiento para el que, tal y como establecen numerosos estudios, el sistema en uso actualmente, no está preparado.

Una vez justificada la necesidad de estudio, se ha considerado conveniente analizar el sistema actual de redes aeroportuarias, sus características y funcionamiento. Gracias a éste estudio se han detectado las dos estructuras principales existentes: *hub and spoke* y *point-to-point*.

En cuanto a los parámetros que caracterizan los aeropuertos y cada una de las estructuras mencionadas se han estudiado puntos clave tales como el método de cálculo de la capacidad de cada aeropuerto, la variabilidad horaria y estacional de la demanda y las utilidades y costes asociados a cada tipo de vuelo dependiendo del tamaño de la aeronave que lo lleva a cabo.

Por último, se han adaptado los algoritmos de optimización a redes aeroportuarias (puesto que previamente sólo se habían aplicado a aeropuertos individuales) y se han estudiado los fundamentos de los dos métodos de resolución ejecutados basados en la relajación de restricciones.

A partir de todos los estudios detallados se han obtenido las siguientes conclusiones principales:

En cuanto a los métodos de resolución:

- ***Gurobi o Branch and Bound.*** Éste método basado en la ramificación relaja las restricciones de integridad. Poniéndolo a prueba con diferentes problemas se ha podido comprobar que alcanza los mejores objetivos, obteniendo mayores utilidades y porcentajes de vuelos programados frente a los solicitados. Sin embargo, cuenta con periodos de ejecución muy extensos que, además, crecen considerablemente con el tamaño de los problemas y los periodos de planificación. Ésta característica resulta crítica si se considera la posible aplicación a problemas reales, de extensión y tamaño mucho mayores.
- ***Relajación Lagrangiana.*** Éste método, a diferencia de la mayoría de mecanismos de relajación, no relaja la restricción de integridad si no algunas de las condiciones del problema, añadiéndolas a la función objetivo acompañadas de los denominados multiplicadores de Lagrange. Uno de sus valores añadidos es que, gracias a ellos, nos proporciona información sobre lo cotizada que esta una franja tal y como sucede en una subasta combinatoria. En cuanto a su efectividad, a pesar de contar con tiempos de ejecución muy reducidos, su capacidad para alcanzar el óptimo es inferior a la del método GRB.

En conclusión, se considera que, si bien el método GRB alcanza mejores resultados, su uso sólo es recomendable en problemas pequeños en los que su tiempo de ejecución se asimila al del método LR. Para grandes problemas se recomienda el uso del solver LR a pesar de no alcanzar la solución óptima.

En cuanto a los tipos de redes comparados:

- **Point-to-point:** Éstas redes se basan en la conexión total (o casi total) de todos sus aeropuertos. Éste hecho provoca que los pasajeros no tengan la necesidad de realizar escalas y son generalmente operadas por aerolíneas de bajo coste. La alta conectividad de la red provoca que cada ruta cuente con una demanda menor por lo que suelen ser recorridas por aeronaves de pequeño tamaño. Por ello, este sistema requiere una gran disponibilidad de franjas horarias disponibles por lo que, aunque se adapta mucho mejor a las necesidades de los pasajeros, complica en gran medida la programación de los vuelos, generando mayores tiempos de ejecución de los métodos de resolución.
- **Hub-and-Spoke:** Éste tipo de redes se fundamenta en la agrupación de los pasajeros y la existencia de diferentes tipos de aeropuertos. Reducen ampliamente el número de rutas conectando pequeños aeropuertos cercanos o *spoke* a aeropuertos tipo *hub* desde los que se operan rutas *long-haul* con grandes aeronaves. De esta forma se optimiza el uso de las franjas a costa de reducir la conectividad de la red y provocar la necesidad de realizar escalas en algunas rutas. Al ensayar esta estructura se ha podido comprobar dicha optimización, transportando un mismo número de pasajeros que la red *point-to-point* con factores de carga medios y tiempos de ejecución mucho menores.

Por último, a continuación, se detallarán algunas de las limitaciones del trabajo y sus consiguientes propuestas de mejora para futuros estudios.

La principal limitación del estudio ha sido la puesta a prueba de un número reducido de escenarios y problemas dado el tiempo requerido para la ejecución de cada uno de ellos. Se considera oportuno la realización de un estudio más amplio que, partiendo de los parámetros proporcionados en este, ponga a prueba redes más extensas y estudie también el comportamiento de las redes de estructura mixta (punto medio entre *point-to-point* y *hub-and-spoke*).

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

- Apple, K. &. (2009). Siete Puentes, un camino: Königsberg. *Suma*, 45, 69-78.
- Araújo J.A., Villafañez F.A., García D.P., Pajares J., Pavón J.;. (2018). Agent Based Modelling and Simulation of an Auction Markey for Airport Slots Allocation. *Springer, Cham*.
doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-94779-2_39
- Araújo, J. A. (2016). *Relajación Lagrangiana para la asignación de slots aeroportuarios. Documento de Trabajo*. Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, Departamaento de Organización de Empresas y CIM.
- Bagler, G. (2008). Analysis of the airport network of India as a complex weighted network. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 387 (12), 2972-2980.
- Barnhart, C., Fearing, D., Odoni, A., & Vaze, V. (2012). Demand and capacity mngement in air transportation. *The Association of European Operational Research Societies* , 1:135-155.
- Barrat, A., Barthélemy, M., Pastor-Satorras, R., & Vespignani, A. (2004). The architecture of complex weighted networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101 (11), 3747-3752.
- Bolic, T., Castelli, L., Ramirez, M., López, A., Araújo, A., & Villafañez, F. (2014). Market-Based Mechanisms for Airport Slot Allocation: Formalisation and Assessment Criteria. *ACCES Consortium*.
- Bureau of Transportation Statistics. (2019). *Annual U.S Domestic Average Itinerary Fare in Current and Constant Dollars*. Obtenido de <https://www.bts.gov/content/annual-us-domestic-average-itinerary-fare-current-and-constant-dollars>
- Burghouwt, G., & de WIT, J. (2005). Temporal configurations of European airline noetwroks. *Journal of Air Transport Management* 11 (3), 185-198.
- Coco Alberto, I. M. (2020). *Coordinación de Franjas Horarias en Varios Aeropuertos*. Valladolid: Departamento de Organización de Empresas y CIM, Escuela de Inenierías Industriales, Universidad de Valladolid.
- Coito, E. (2019). *El transporte aéreo: Normas del mercado*. Recuperado el 23 de Marzo de 2020, de Fichas temáticas sobre la Unión Europea. Parlamento Europeo: <http://www.europarl.europa.eu/factsheets/es>
- Consejo Europeo. (1993). *Reglamento CEE N°95/93*. Obtenido de Relativo a normas comunes para la asignación de frnajas horarias en los aeropuertos comunitarios: <https://www.mitma.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-relat>
- de la Fuente Miguel, M. (2016). *Algoritmo de Relajación Lagrangiana para la Asignación de Franjas Horarias a Vuelos* . Valladolid: Departamento de Organización de Empresas y CIM.

- Dennis, N. (1994). Airline hub operations in Europe. *Journal of Transport Geography* 2 (4), 219-233.
- Díaz Olariaga, Ó., & Ruiz de la Villa, A. B. (2010). Alternativas de mercado en la asignación de slots aeroportuarios. *Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica* (n 396), 1-10.
- Doganis, Rigas, & Dennis. (1989). Lessons in hubbing. *Airline Bussines*.
- Erdős, P., & Rényi, A. (1960). *On the evolution of random graphs*. Hungary: Institute of Mathematics, Hungarian Academy of Sciences.
- Euler, L. (1741). *Solutio Problematis ad Geometriam Situs Pertinentis*. St Petersburg: Typis Academiae.
- EUROCONTROL. (2018). *European Aviation in 2040-Challenges of Growth*. Obtenido de <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/official-documents/reports/challenges-of-growth-2018.pdf>
- Fleurquin, P., Ramasco, J. J., & Eguiluz, V. M. (2013). Systemic delay propagation in the US airport network. *Scientific Reports*, 3, 1159.
- Gelhausen, M. C., Berster, P., & Wilken, D. (2013). Do airport capacity constraints have a serious impact on the future development of air traffic? *Journal of Air Transport Management*, 3-13.
- Gómez Miguel, P. (2019). *Asignación de Franjas Horarias a Vuelos. Ajuste y comparativa de Algoritmos*. Valladolid: Departamento de Organización de Empresas y CIM, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.
- Gracia Calandín, C. P. (2010). *Métodos y Algoritmos para resolver problemas de Corte unidimensional en entornos realistas. Aplicación a una empresa del Sector Siderúrgico*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Organización de Empresas.
- Guimerà, R., & Amaral, L. (2004). Modeling the world-wide airport network. *The European Physical Journal B* 38, 381-385.
- Guimerà, R., Mossa, S., Turtschi, A., & Amaral, L. (2005). The worldwide air transportation network: anomalous centrality, community structure, and cities' global roles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102, 7794-7799. Obtenido de Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America .
- Gurobi Optimization, LLC. (2020). *Gurobi Optimizer*. Recuperado el 1 de 06 de 2020, de Mixed-Integer Programming (MIP) – A Primer on the Basics: <https://www.gurobi.com/resource/mip-basics/>
- IATA. (2017). *Directrices Mundiales de Slots*. Recuperado el 23 de Marzo de 2020, de <https://www.iata.org/en/policy/slots/slot-guidelines/>
- ICAO. (2017). *Airline Operating Costs and Productivity*. Recuperado el 14 de 06 de 2020, de <https://www.icao.int/MID/Documents/2017/Aviation%20Data%20and%20Analysis%20Seminar/PPT3%20-%20Airlines%20Operating%20costs%20and%20productivity.pdf>

- ICAO. (2020). *International Civil Aviation Organisation*. Recuperado el 03 de 06 de 2020, de <https://www.icao.int/Pages/default.aspx>
- Jefatura del Estado. (1969). Instrumento de ratificación del Protocolo relativo al texto auténtico trilingüe del Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Chicago,1944), firmado en Buenos Aires el día 24 de septiembre de 1968. *BOE núm. 311*, 20248-20259.
- Kayak España. (2017). *Las rutas más caras según el precio por km en 2017*. Recuperado el 14 de 06 de 2020, de <https://www.kayak.es/news/vuelos-precio-por-km/>
- Kutanoglu, E., & Wu, S. D. (1999). On combinatorial auction and Lagrangean relaxation for distributed resource scheduling. *IEE-Transactions* 31(9), 813-826.
- Latora, V., & Marchiori, M. (2001). Efficient behaviour of small-world networks. *Physical Review Letters* 87 (19), 198710.
- Laviós Villahoz, J. J. (2013). *Análisis de la Relajación Lagrangiana como método de programación de talleres flexibles en un entorno multiagente*. Burgos: Universidad de Burgos. Departamento Ingeniería Civil.
- Lewis, T. G. (2009). *Network Science: Theory and Applications*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Li, W., & Cai, X. (2004). Statistical Analysis of Airport Network of China. *Physical Review E* 69.
- Lordan, O., & Sallan, J. (2017). Analyzing the multilevel structure of the European airport network. *Chinese Journal of Aeronautics* 30 (2), 554-560.
- Matthews, L. (1995). Forecasting peak passenger flows at airports. *Transportation*, 22 (1), 55-72.
- Ministerio de Fomento. (2020). *Resolución del Director General de Aviación Civil por la que se determinan los parámetros para la asignación de franjas horarias para la temporada de verano*. Madrid: Gobierno de España.
- Mirkovik, B., & Tomic, V. (2016). Apro capacity at hub airport-the impact of wave-system structure. *Journal of advanced transportation*.
- Mott MacDonald. (2006). *Study of the Impact of the Introduction of Secondary Trading al Community Airports*. Obtenido de http://www.euaca.org/up/files/DocsEUROPE/EU_REGULATION_95_93_AS_AMENDED_Slot_Regulation/2006_slots_final_report_211108_054651.pdf
- Neufville, R. d. (2013). *Airport Systems: Planning, Desing, and , Management*. McGraw-Hill.
- Newman, M. (2003). *The Structure and Function of Complex Networks*. Department of Physics, University of Michigan.
- Newman, M. (2010). *Networks: An Introduction*. New York: Oxford University Press.
- Newman, M., & Girvan, M. (2004). Finding and evaluating community structure in networks. *Physical Review E* 69 (2).
- Odoni, A., Morisset, T., Drotleff, W., & Zock, A. (2011). Benchmarking Airport Airside Performance: FRA vs EWR. *9th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*.

- Pan, R., & Lishuai, L. (2018). Characterizing air traffic networks via large-scale aircraft tracking data: A comparison between China and de US networks. *Journal of Air Transport Management* 67, 181-196.
- Parlamento Europeo. (2016). *Research for TRAN Committe: Airport slots and aircraft size at EU airports*. Obtenido de <http://www.europarl.europa.eu/supporting-analyses>
- Pascual Pulido, L. F. (2018). *Modelos de Programación Lineal para la Asignación de Franjas Horarias a Vuelos*. Valladolid: Departamento de Organización de Empresas y CIM, Escuela de Ingeniería Industriales, Universidad de Valladolid.
- Poole, M. (1972). *Forecasting air traffic in peak periods*. London: European Airports Association, British Airports Authority.
- Pyrgiotis, N., Malone, K. M., & Odoni, A. (2013). Modelling delay propagation within an airport network. *Transportation Research Part C: Eemerging Technologies*, 27, 60-75.
- Ruhl, T. A., & Trnavskis, B. (1998). Airport Trip Generator. *Institute of Transportation Engineers Journal*, 24-31.
- Sallan, J. M., & Jordan, O. (2019). *Air Route Networks Throught Complex Networks Theory*. Elsevier.
- Steele, J. (2019). Comparing Checked Bag Fees for Domestic Flights on Major US Carriers. *The Points Guy*.
- Subdirección General de Transporte Aéreo. (2019). *Ministerio de Transportes, Movilidad y Agencia Urbana. Gobierno de España*. Recuperado el 21 de Marzo de 2020, de <https://www.mitma.gob.es/aviacion-civil/estudios-y-publicaciones/estadisticas-del-sector/informes-del-transporte-aereo-en-espana-2019/aeropuertos-espanoles-2019>
- Urbatzka, E., & Wilken, D. (1997). Estimating runway capacities of German airports. *Journal of Transportation Planning and Technology*, 20 (2), 103-129.
- von Bertalanffy, L. (1968). *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. George Braziller Inc.
- Wang, P. T., & Pitfield, D. E. (1999). The derivation and analysis of the passenger peak hour: an empirical application to Brazil. *Journal of Air Transport Management*, 5, 135-141.
- Watts, D., & Strogatz, S. (1998). Collective dynamics of "small-world" networks. *Nature* 393, 440-442.
- Wilken, D., Berster, P., & Gelhausen, M. C. (2011). New empirical evidence on airport capacity utilisation: Relationships between hourly and annual air traffic volumes. *Research in Transportation Business & Management*, 118-127.
- Yule, G. U. (1925). *A Mathematical theory of evolution based on the conclusions of Dr. J. C. Willis*. London: Phil. Trans. Roy. Soc.
- Zografos, K. M. (2017). Increasing airport capacity utilisation through optimum slot scheduling: review of current developments and identification of future needs. 3-24. doi:<https://doi.org/10.1007/s10951-016-0496-7>

ANEXOS

ANEXOS

Anexo I. Batería de Problemas

Nº	Franjas	Aerop.	Tipo de estructura	% horas pico	Tipo Nº vuelos	Nº Vuelos
1	T24	a5	PP	0	a	100
2	T24	a5	PP	0	b	140
3	T24	a5	PP	0	c	200
4	T24	a5	PP	20	a	100
5	T24	a5	PP	20	b	140
6	T24	a5	PP	20	c	200
7	T24	a5	PP	40	a	100
8	T24	a5	PP	40	b	140
9	T24	a5	PP	40	c	200
10	T48	a5	PP	0	a	200
11	T48	a5	PP	0	b	300
12	T48	a5	PP	0	c	400
13	T48	a5	PP	20	a	200
14	T48	a5	PP	20	b	300
15	T48	a5	PP	20	c	400
16	T48	a5	PP	40	a	200
17	T48	a5	PP	40	b	300
18	T48	a5	PP	40	c	400
19	T96	a5	PP	0	a	400
20	T96	a5	PP	0	b	600
21	T96	a5	PP	0	c	800
22	T96	a5	PP	20	a	400
23	T96	a5	PP	20	b	600
24	T96	a5	PP	20	c	800
25	T96	a5	PP	40	a	400
26	T96	a5	PP	40	b	600
27	T96	a5	PP	40	c	800
28	T168	a5	PP	0	a	800
29	T168	a5	PP	0	b	1000
30	T168	a5	PP	0	c	1200
31	T168	a5	PP	20	a	800
32	T168	a5	PP	20	b	1000
33	T168	a5	PP	20	c	1200
34	T168	a5	PP	40	a	800
35	T168	a5	PP	40	b	1000
36	T168	a5	PP	40	c	1200
37	T336	a5	PP	0	a	1200
38	T336	a5	PP	0	b	1800
39	T336	a5	PP	0	c	2000
40	T336	a5	PP	20	a	1200
41	T336	a5	PP	20	b	1800
42	T336	a5	PP	20	c	2000
43	T336	a5	PP	40	a	1200
44	T336	a5	PP	40	b	1800
45	T336	a5	PP	40	c	2000

Tabla 4 Problemas a ejecutar referentes al escenario de 5 aeropuertos con estructura point-to-point. Elaboración propia.

ASIGNACIÓN DE FRANJAS HORARIAS EN REDES DE AEROPUERTOS: COMPARACIÓN DE ALGORITMOS

Nº	Franjas	Aerop.	Tipo de estructura	% horas pico	Tipo Nº vuelos	Nº Vuelos
46	T24	a8	PP	0	a	168
47	T24	a8	PP	0	b	224
48	T24	a8	PP	0	c	280
49	T24	a8	PP	20	a	168
50	T24	a8	PP	20	b	224
51	T24	a8	PP	20	c	280
52	T24	a8	PP	40	a	168
53	T24	a8	PP	40	b	224
54	T24	a8	PP	40	c	280
55	T48	a8	PP	0	a	336
56	T48	a8	PP	0	b	392
57	T48	a8	PP	0	c	448
58	T48	a8	PP	20	a	336
59	T48	a8	PP	20	b	392
60	T48	a8	PP	20	c	448
61	T48	a8	PP	40	a	336
62	T48	a8	PP	40	b	392
63	T48	a8	PP	40	c	448
64	T96	a8	PP	0	a	672
65	T96	a8	PP	0	b	784
66	T96	a8	PP	0	c	896
67	T96	a8	PP	20	a	672
68	T96	a8	PP	20	b	784
69	T96	a8	PP	20	c	896
70	T96	a8	PP	40	a	672
71	T96	a8	PP	40	b	784
72	T96	a8	PP	40	c	896
73	T168	a8	PP	0	a	x
74	T168	a8	PP	0	b	x
75	T168	a8	PP	0	c	x
76	T168	a8	PP	20	a	x
77	T168	a8	PP	20	b	x
78	T168	a8	PP	20	c	x
79	T168	a8	PP	40	a	x
80	T168	a8	PP	40	b	x
81	T168	a8	PP	40	c	x
82	T336	a8	PP	0	a	x
83	T336	a8	PP	0	b	x
84	T336	a8	PP	0	c	x
85	T336	a8	PP	20	a	x
86	T336	a8	PP	20	b	x
87	T336	a8	PP	20	c	x
88	T336	a8	PP	40	a	x
89	T336	a8	PP	40	b	x
90	T336	a8	PP	40	c	x

Tabla 5 Problemas a ejecutar referentes al escenario de 8 aeropuertos con estructura point-to-point. Elaboración propia.

ANEXOS

Nº	Franjas	Aerop.	Tipo de estructura	% horas pico	Tipo Nº vuelos	Nº Vuelos
91	T24	a5	HS	0	a	64
92	T24	a5	HS	0	b	96
93	T24	a5	HS	0	c	136
94	T24	a5	HS	20	a	64
95	T24	a5	HS	20	b	96
96	T24	a5	HS	20	c	136
97	T24	a5	HS	40	a	64
98	T24	a5	HS	40	b	96
99	T24	a5	HS	40	c	136
100	T48	a5	HS	0	a	136
101	T48	a5	HS	0	b	200
102	T48	a5	HS	0	c	264
103	T48	a5	HS	20	a	136
104	T48	a5	HS	20	b	200
105	T48	a5	HS	20	c	264
106	T48	a5	HS	40	a	136
107	T48	a5	HS	40	b	200
108	T48	a5	HS	40	c	264
109	T96	a5	HS	0	a	264
110	T96	a5	HS	0	b	400
111	T96	a5	HS	0	c	536
112	T96	a5	HS	20	a	264
113	T96	a5	HS	20	b	400
114	T96	a5	HS	20	c	536
115	T96	a5	HS	40	a	264
116	T96	a5	HS	40	b	400
117	T96	a5	HS	40	c	536
118	T168	a5	HS	0	a	536
119	T168	a5	HS	0	b	664
120	T168	a5	HS	0	c	800
121	T168	a5	HS	20	a	536
122	T168	a5	HS	20	b	664
123	T168	a5	HS	20	c	800
124	T168	a5	HS	40	a	536
125	T168	a5	HS	40	b	664
126	T168	a5	HS	40	c	800
127	T336	a5	HS	0	a	800
128	T336	a5	HS	0	b	1200
129	T336	a5	HS	0	c	1336
130	T336	a5	HS	20	a	800
131	T336	a5	HS	20	b	1200
132	T336	a5	HS	20	c	1336
133	T336	a5	HS	40	a	800
134	T336	a5	HS	40	b	1200
135	T336	a5	HS	40	c	1336

Tabla 6 Problemas a ejecutar referentes al escenario de 5 aeropuertos con estructura hub-and-spoke. Elaboración propia.

Anexo II. Resultados Obtenidos

En las próximas páginas se muestran los resultados obtenidos para todos los problemas simulados mediante los métodos de resolución Gurobi (GRB) y Relajación Lagrangiana (RL).

Cabe destacar que los problemas del 73 al 90 que se muestran en la batería, correspondientes a las divisiones semanales en franjas de una y media hora de la estructura a8-pp no han sido resueltos. Esto es así debido a que en las divisiones anteriores, la resolución por Gurobi ya había alcanzado su criterio de parada por exceso de tiempo en la mayoría de los problemas.

ASIGNACIÓN DE FRANJAS HORARIAS EN REDES DE AEROPUERTOS: COMPARACIÓN DE ALGORITMOS

Nº	Problema	Espacio Medio de Búsqueda	Factor Medio de Carga	GUROBI					RL				
				Objetivo (um)	Gap	Nodos explorados	Tiempo (s)	Vuelos Programados	Objetivo (um)	Gap	Nodos explorados	Tiempo (s)	Vuelos Programados
1	a5-pp-t24-0a	4,68	0,8333	15472,6513	0	1.0	0,9814	98	15375,9352	0,0077	3971	0,832	97
2	a5-pp-t24-0b	4,6643	1,1667	18844,8396	0	843.0	6,8477	114	18200,9355	0,0377	4388	0,919	109
3	a5-pp-t24-0c	4,71	1,6667	21204,2645	0	10622.0	39,9482	119	20047,5172	0,0622	4246	0,867	110
4	a5-pp-t24-20a	4,62	0,8333	15393,3215	0	1.0	0,4778	98	15338,6242	0,0046	4285	0,818	98
5	a5-pp-t24-20b	4,6286	1,1667	18452,7336	0	330.0	4,7782	113	17766,0917	0,0406	4595	1,35	108
6	a5-pp-t24-20c	4,63	1,6667	21668,8183	0	1170.0	24,0998	119	20486,4567	0,0598	4357	0,97	112
7	a5-pp-t24-40a	4,55	0,8333	15931,0014	0	1.0	0,5475	99	15768,3452	0,0106	4547	0,497	100
8	a5-pp-t24-40b	4,6	1,1667	18717,6008	0	436.0	5,4736	114	18173,0431	0,033	4540	0,662	110
9	a5-pp-t24-40c	4,72	1,6667	21566,913	0	2959.0	19,0631	120	20393,0788	0,0601	4241	0,643	111
10	a5-pp-t48-0a	7,545	0,8333	31415,9886	0	1.0	2,9371	192	30736,0843	0,0221	4663	1,693	189
11	a5-pp-t48-0b	7,6567	1,25	38662,8122	0	6646.0	100,6947	231	36626,1442	0,0577	4668	1,186	219
12	a5-pp-t48-0c	7,1525	1,6667	41712,1026	0	41878.0	680,7208	238	39222,1337	0,0676	4068	1,886	221
13	a5-pp-t48-20a	7,72	0,8333	31680,6946	0	1.0	2,5751	196	31463,3142	0,0075	4408	1,208	195
14	a5-pp-t48-20b	7,3933	1,25	39496,8445	0	4585.0	71,0056	230	37529,955	0,0542	4616	1,789	218
15	a5-pp-t48-20c	7,655	1,6667	43343,9776	0	62443.0	1135,3373	239	41131,0555	0,0567	4192	1,336	224
16	a5-pp-t48-40a	7,13	0,8333	32100,9528	0	1.0	3,8208	195	31285,2076	0,0262	4801	1,024	191
17	a5-pp-t48-40b	7,75	1,25	40139,6174	0	851.0	30,7438	234	38367,7304	0,0471	4555	1,005	223
18	a5-pp-t48-40c	7,465	1,6667	43066,3932	0	333025.0	5499,8313	238	40041,5233	0,0794	4110	1,247	220
19	a5-pp-t96-0a	5,955	0,8333	46208,3482	0	1.0	8,2021	378	45580,1986	0,0142	4778	3,347	370
20	a5-pp-t96-0b	5,715	1,25	60531,826	0	13898.0	477,0361	449	57609,2168	0,0531	4444	2,837	426
21	a5-pp-t96-0c	5,8937	1,6667	68113,5144	0	114039.0	10000,2936	467	64095,2609	0,0688	3930	2,905	437
22	a5-pp-t96-20a	5,725	0,8333	45841,2277	0	1.0	6,9165	376	44944,9322	0,02	4866	1,521	369
23	a5-pp-t96-20b	5,7433	1,25	58826,9717	0	14631.0	331,2231	454	56357,5415	0,0461	4373	1,747	432
24	a5-pp-t96-20c	5,6037	1,6667	66286,131	0	149821.0	10000,4937	464	62806,2348	0,0621	3817	1,83	433
25	a5-pp-t96-40a	5,5925	0,8333	45581,5453	0	1.0	6,0438	371	45129,3058	0,0104	4773	1,418	368
26	a5-pp-t96-40b	5,8133	1,25	58235,4562	0	2425.0	192,0089	449	55864,387	0,0449	4150	1,633	429
27	a5-pp-t96-40c	5,8125	1,6667	67721,0374	0	100292.0	10000,3135	467	64296,1721	0,0592	3936	1,977	434

Tabla 7 Resultados obtenidos para los problemas de 5 aeropuertos con estructura point-to-point . Parte 1 (de 24 a 96 franjas). Elaboración propia.

ANEXOS

Nº	Problema	Espacio Medio de Búsqueda	Factor Medio de Carga	GUROBI					RL				
				Objetivo (um)	Gap	Nodos explorados	Tiempo (s)	Vuelos Programados	Objetivo (um)	Gap	Nodos explorados	Tiempo (s)	Vuelos Programados
28	a5-pp-t168-0a	5,2275	0,9524	120769,3	0	1439.0	130,4772	725	115798,486	0,0438	4703	5,946	699
29	a5-pp-t168-0b	5,215	1,1905	136986,368	0	194674.0	10000,7371	801	127868,332	0,0743	4344	4,367	749
30	a5-pp-t168-0c	5,2175	1,4286	143276,261	0	77129.0	20446,5283	816	132230,814	0,0894	4075	4,492	750
31	a5-pp-t168-20a	5,1875	0,9524	111349,767	1E-04	1.0	21185,1074	666	108195,098	0,0304	4430	2,817	656
32	a5-pp-t168-20b	5,242	1,1905	126670,839	0	13746.0	583,2819	747	120468,508	0,0537	4314	2,782	714
33	a5-pp-t168-20c	5,2375	1,4286	137168,68	0	243531.0	10000,9192	791	127482,779	0,0809	4036	3,226	738
34	a5-pp-t168-40a	5,2237	0,9524	91217,8622	0	1.0	23,6505	535	89903,827	0,0187	3811	2,021	529
35	a5-pp-t168-40b	5,216	1,1905	106593,842	0	7.0	65,2275	639	103601,621	0,0324	4197	2,903	625
36	a5-pp-t168-40c	5,1858	1,4286	120459,492	0	3198.0	166,1664	715	114819,672	0,0543	3997	3,352	690
37	a5-pp-t336-0a	18,9275	0,7143	196951,808	0	1.0	179,3303	1200	195217,216	0,0089	4923	124,411	1200
38	a5-pp-t336-0b	19,0772	1,0714	263162,497	0	1.0	10010,1163	1590	246659,675	0,0713	5068	27,878	1529
39	a5-pp-t336-0c	19,1005	1,1905	277448,055	1E-04	1.0	10003,5896	1641	257532,865	0,0845	4436	15,957	1543
40	a5-pp-t336-20a	19,0517	0,7143	176007,526	0	51260.0	1835,8257	1079	174048,702	0,0116	4244	7,971	1072
41	a5-pp-t336-20b	18,9894	1,0714	243639,139	0	46528.0	10027,7641	1479	233789,373	0,0427	4387	12,782	1448
42	a5-pp-t336-20c	19,024	1,1905	261540,346	0	1.0	10002,9247	1577	246098,118	0,0657	4442	16,515	1519
43	a5-pp-t336-40a	19,21	0,7143	148367,293	0	93311.0	2257,4124	898	146182,589	0,0156	3825	7,029	890
44	a5-pp-t336-40b	19,2089	1,0714	200402,997	0	142750.0	5764,7719	1205	197044,485	0,0183	3958	12,634	1190
45	a5-pp-t336-40c	19,046	1,1905	215436,089	0	34579.0	3499,7208	1287	210867,984	0,0233	3666	13,045	1275

Tabla 8 Resultados obtenidos para los problemas de 5 aeropuertos con estructura point-to-point . Parte 2 (de 168 a 336 franjas). Elaboración propia.

ASIGNACIÓN DE FRANJAS HORARIAS EN REDES DE AEROPUERTOS: COMPARACIÓN DE ALGORITMOS

Nº	Problema	Espacio Medio de Búsqueda	Factor Medio de Carga	GUROBI					RL				
				Objetivo (um)	Gap	Nodos explorados	Tiempo (s)	Vuelos Programados	Objetivo (um)	Gap	Nodos explorados	Tiempo (s)	Vuelos Programados
46	a8-pp-t24-0a	7,0119	0,875	27926,7813	0	1.0	3,3301	163	27632,7894	0,0107	4317	1,42	163
47	a8-pp-t24-0b	6,8973	1,1667	31840,8504	0	14413.0	123,383	185	30296,1232	0,0533	4630	1,159	175
48	a8-pp-t24-0c	7,0179	1,4583	34685,7116	0	120887.0	573,3544	192	33133,4379	0,0498	4288	1,599	181
49	a8-pp-t24-20a	6,8631	0,875	27592,8567	0	1.0	2,3148	163	27244,66	0,0132	4410	0,747	161
50	a8-pp-t24-20b	6,9018	1,1667	31952,3377	0	19375.0	79,8025	184	30556,5112	0,0484	4704	1,214	175
51	a8-pp-t24-20c	6,8679	1,4583	34722,3999	0	42421.0	332,5495	191	32711,5072	0,0644	4480	1,262	178
52	a8-pp-t24-40a	6,8095	0,875	27023,3183	0	1.0	2,1104	164	26717,752	0,0116	4654	0,803	164
53	a8-pp-t24-40b	7,1027	1,1667	32175,3828	0	1985.0	57,216	184	30633,9802	0,052	4623	0,846	173
54	a8-pp-t24-40c	6,7786	1,4583	34143,965	0	60410.0	392,0165	190	32057,349	0,0681	4383	2,136	176
55	a8-pp-t48-0a	11,5982	0,875	53626,5066	0	33.0	13,2745	320	52635,2718	0,019	4634	1,255	318
56	a8-pp-t48-0b	11,6582	1,0208	61045,867	0	2416.0	78,9518	353	58709,8865	0,0406	4956	1,638	341
57	a8-pp-t48-0c	11,5022	1,1667	63813,658	0	50965.0	2831,8655	370	60880,0698	0,0494	4580	1,68	354
58	a8-pp-t48-20a	11,7292	0,875	52778,2089	0	639.0	20,1202	315	51771,1618	0,0199	4644	1,357	311
59	a8-pp-t48-20b	11,9821	1,0208	59688,1162	0	1912.0	98,9314	354	57615,4647	0,0369	4750	1,482	345
60	a8-pp-t48-20c	12,0982	1,1667	63736,8986	0	130745.0	6128,5974	371	61327,1596	0,0406	4540	1,593	357
61	a8-pp-t48-40a	11,9435	0,875	54255,2046	0	1.0	8,956	321	53362,991	0,0168	4801	1,338	318
62	a8-pp-t48-40b	11,5026	1,0208	60344,1171	0	82.0	39,0395	356	58731,5296	0,028	4826	1,537	350
63	a8-pp-t48-40c	11,9286	1,1667	64703,4929	0	179603.0	10000,0866	369	61386,8238	0,0556	4698	2,653	350
64	a8-pp-t96-0a	18,9955	0,875	78389,3767	0	1.0	56,4879	633	77852,5288	0,007	4520	3,94	632
65	a8-pp-t96-0b	19,148	1,0208	90355,59	0	43217.0	10000,2625	701	87370,922	0,0348	4860	5,495	677
66	a8-pp-t96-0c	18,8103	1,1667	98909,4891	0	13537.0	10000,1131	735	93821,7664	0,0557	4673	4,543	702
67	a8-pp-t96-20a	18,9955	0,875	77653,0614	0	1.0	86,3897	631	76499,6055	0,0152	4672	3,015	624
68	a8-pp-t96-20b	19,4056	1,0208	89782,8449	0	63663.0	9359,837	692	86800,2314	0,0349	4906	4,105	678
69	a8-pp-t96-20c	18,5893	1,1667	94178,3531	0	18076.0	10000,0707	719	90472,4323	0,0421	4480	5,78	697
70	a8-pp-t96-40a	18,8735	0,875	79616,6073	0	1.0	53,2925	629	78420,7037	0,0154	4761	5,292	620
71	a8-pp-t96-40b	18,9413	1,0208	88810,4384	0	54521.0	10000,3249	701	85329,1041	0,0415	5091	4,376	678
72	a8-pp-t96-40c	18,567	1,1667	98277,763	0	18088.0	10000,0295	721	93596,3559	0,0514	4743	4,441	697

Tabla 9 Resultados obtenidos para los problemas de 8 aeropuertos con estructura point-to-point. Parte 1 (de 24 a 96 franjas horarias). Elaboración propia.

ANEXOS

Nº	Problema	Espacio Medio de Búsqueda	Factor Medio de Carga	GUROBI					RL				
				Objetivo (um)	Gap	Nodos explorados	Tiempo (s)	Vuelos Programados	Objetivo (um)	Gap	Nodos explorados	Tiempo (s)	Vuelos Programados
91	a5-hs-t24-0a	8,2344	0,4	28538,2014	0	1.0	0,1067	64	28538,2014	0	0	0,004	64
92	a5-hs-t24-0b	8,4271	0,6	42006,7334	0	1.0	1,13	96	41212,5336	0,0224	4880	1,369	94
93	a5-hs-t24-0c	8,3382	0,85	44302,2036	0	1.0	0,8926	96	43818,3264	0,011	3875	0,902	95
94	a5-hs-t24-20a	8,4531	0,4	27479,7671	0	1.0	0,1646	64	27479,7671	0	3904	0,396	64
95	a5-hs-t24-20b	8,6042	0,6	41710,2543	0	1.0	1,2985	96	41094,0353	0,0168	4493	0,824	95
96	a5-hs-t24-20c	8,6471	0,85	44834,4009	0	1.0	0,6523	96	42991,4544	0,0431	4459	1,093	92
97	a5-hs-t24-40a	8,4219	0,4	28603,2964	0	1.0	0,0898	64	28603,2964	0	0	0	64
98	a5-hs-t24-40b	8,5312	0,6	41860,0634	0	1.0	0,8657	96	41454,283	0,0124	4258	0,584	95
99	a5-hs-t24-40c	8,6765	0,85	44553,4493	0	1.0	0,3979	96	44006,9241	0,0124	3882	0,51	95
100	a5-hs-t48-0a	15,4118	0,425	62073,2051	0	1.0	1,9408	136	61874,8915	0,0063	4206	1,468	136
101	a5-hs-t48-0b	16,11	0,625	86858,0774	0	1.0	3,9095	190	85590,8143	0,0148	4828	1,613	188
102	a5-hs-t48-0c	15,1591	0,825	91699,4927	0	1.0	1,6047	192	88441,1048	0,0368	4373	1,415	185
103	a5-hs-t48-20a	14,8529	0,425	61857,7397	0	1.0	0,3411	136	61857,7397	0	4268	0,675	136
104	a5-hs-t48-20b	14,93	0,625	85859,0822	0	1.0	3,6542	190	83800,0827	0,0246	4366	1,244	188
105	a5-hs-t48-20c	15,3712	0,825	91234,5397	0	1.0	1,6247	192	88333,4379	0,0328	4286	1,499	186
106	a5-hs-t48-40a	15,5441	0,425	62042,1467	0	1.0	0,6971	136	62042,1467	0	4025	0,53	136
107	a5-hs-t48-40b	15,405	0,625	85774,1653	0	1.0	3,5006	186	84506,3834	0,0153	4255	0,845	183
108	a5-hs-t48-40c	15,2462	0,825	91938,471	0	1.0	1,3703	192	88982,2085	0,0332	4292	1,178	186
109	a5-hs-t96-0a	22,4583	0,4125	71048,2193	0	1.0	1,9033	264	71048,2193	0	8231	3,198	264
110	a5-hs-t96-0b	20,6075	0,625	99335,444	0	1.0	24,3449	368	97947,2293	0,0145	4510	2,906	367
111	a5-hs-t96-0c	21,3769	0,8375	115005,916	0	1.0	11,17	384	111830,186	0,0289	4583	3,979	374
112	a5-hs-t96-20a	21,8295	0,4125	70577,1682	0	1.0	2,2794	264	70577,1682	0	4089	1,278	264
113	a5-hs-t96-20b	20,625	0,625	100408,004	0	1.0	18,8187	379	98552,7458	0,0191	4711	2,707	374
114	a5-hs-t96-20c	21,6175	0,8375	116968,523	0	1.0	19,2618	384	113352,398	0,0323	4382	3,397	373
115	a5-hs-t96-40a	21,8561	0,4125	69123,4809	0	1.0	3,4018	262	68851,7017	0,0049	4221	1,234	263
116	a5-hs-t96-40b	20,78	0,625	101795,753	0	1.0	12,1124	384	99102,9633	0,0274	4854	2,298	374
117	a5-hs-t96-40c	21,4347	0,8375	115297,201	0	1.0	10,6472	384	111548,687	0,0339	4478	3	372

Tabla 10 Resultados obtenidos para los problemas de 5 aeropuertos con estructura hub-and-spoke. Parte 1 (de 24 a 96 franjas horarias). Elaboración propia.

ASIGNACIÓN DE FRANJAS HORARIAS EN REDES DE AEROPUERTOS: COMPARACIÓN DE ALGORITMOS

Nº	Problema	Espacio Medio de Búsqueda	Factor Medio de Carga	GUROBI					RL				
				Objetivo (um)	Gap	Nodos explorados	Tiempo (s)	Vuelos Programados	Objetivo (um)	Gap	Nodos explorados	Tiempo (s)	Vuelos Programados
118	a5-hs-t168-0a	6,4627	0,4786	245158,472	0	1.0	9,7609	536	241751,462	0,0143	5935	3,882	536
119	a5-hs-t168-0b	6,5253	0,6	289929,87	0	1.0	22,5128	636	279570,562	0,0371	4752	3,832	623
120	a5-hs-t168-0c	6,52	0,7143	312384,113	0	1.0	26,177	669	300342,166	0,0406	4652	3,277	644
121	a5-hs-t168-20a	6,4235	0,4786	211501,942	0	1.0	17,2588	463	209830,192	0,009	4164	1,718	462
122	a5-hs-t168-20b	6,491	0,5929	263618,432	0	1.0	17,0045	573	259637,313	0,0162	4283	2,24	569
123	a5-hs-t168-20c	6,5338	0,7143	290276,529	0	1.0	27,9901	628	280463,303	0,0364	4382	2,839	610
124	a5-hs-t168-40a	6,4459	0,4786	178407,877	0	1.0	24,9493	394	177853,397	0,0072	3598	1,612	394
125	a5-hs-t168-40b	6,4804	0,5929	206964,883	0	1.0	31,2175	447	205839,836	0,0102	3730	1,928	448
126	a5-hs-t168-40c	6,5525	0,7143	239912,03	0	1.0	27,5504	516	236998,612	0,0153	4086	2,621	515
127	a5-hs-t336-0a	24,8025	0,3571	366495,032	0	1.0	28,5757	800	366354,543	0,0004	7818	18,427	800
128	a5-hs-t336-0b	25,025	0,5357	550200,007	0	1.0	105,1564	1200	544457,87	0,0109	5040	16,299	1198
129	a5-hs-t336-0c	24,8683	0,5964	593873,846	0	1.0	772,3881	1308	578214,719	0,0271	4963	14,285	1288
130	a5-hs-t336-20a	24,64	0,3571	340653,767	0	1.0	717,8838	771	339726,032	0,004	3702	5,417	778
131	a5-hs-t336-20b	25,055	0,5357	479935,522	0	1.0	1503,4772	1059	477530,025	0,0054	4142	9,203	1064
132	a5-hs-t336-20c	24,872	0,5964	521353,016	0	3847.0	2350,3332	1145	517558,528	0,0076	4192	10,496	1145
133	a5-hs-t336-40a	24,8825	0,3571	283563,57	0	1.0	1444,4067	653	282919,18	0,0063	3663	5,813	660
134	a5-hs-t336-40b	24,8533	0,5357	393386,858	0	3758.0	3721,9383	881	392196,924	0,0066	3710	9,127	887
135	a5-hs-t336-40c	24,9409	0,5964	427886,231	0	3728.0	4481,6541	947	426127,137	0,0102	4015	12,567	954

Tabla 11 Resultados obtenidos para los problemas de 5 aeropuertos con estructura hub-and-spoke. Parte 2 (de 168 a 336 franjas horarias). Elaboración propia.

ANEXOS

Anexo III. Equivalencias número de vuelos pp/hs

Tipo Problema	Nº Rutas P-P	Nº vuelos/ruta	Nº Vuelos P-P	Nº Pasajeros/vuelo P-P	Nº pasajeros totales	Nº Pasajeros/vuelo H-S	Nº rutas H-S	Nº vuelos/ruta	Nº Vuelos H-S
a5-pp-t24-0a	20	5	100	100	10000	150	8	8,3333	64
a5-pp-t24-0b	20	7	140	100	14000	150	8	11,667	96
a5-pp-t24-0c	20	10	200	100	20000	150	8	16,667	136
a5-pp-t24-20a	20	5	100	100	10000	150	8	8,3333	64
a5-pp-t24-20b	20	7	140	100	14000	150	8	11,667	96
a5-pp-t24-20c	20	10	200	100	20000	150	8	16,667	136
a5-pp-t24-40a	20	5	100	100	10000	150	8	8,3333	64
a5-pp-t24-40b	20	7	140	100	14000	150	8	11,667	96
a5-pp-t24-40c	20	10	200	100	20000	150	8	16,667	136
a5-pp-t48-0a	20	10	200	100	20000	150	8	16,667	136
a5-pp-t48-0b	20	15	300	100	30000	150	8	25	200
a5-pp-t48-0c	20	20	400	100	40000	150	8	33,333	264
a5-pp-t48-20a	20	10	200	100	20000	150	8	16,667	136
a5-pp-t48-20b	20	15	300	100	30000	150	8	25	200
a5-pp-t48-20c	20	20	400	100	40000	150	8	33,333	264
a5-pp-t48-40a	20	10	200	100	20000	150	8	16,667	136
a5-pp-t48-40b	20	15	300	100	30000	150	8	25	200
a5-pp-t48-40c	20	20	400	100	40000	150	8	33,333	264
a5-pp-t96-0a	20	20	400	100	40000	150	8	33,333	264
a5-pp-t96-0b	20	30	600	100	60000	150	8	50	400
a5-pp-t96-0c	20	40	800	100	80000	150	8	66,667	536
a5-pp-t96-20a	20	20	400	100	40000	150	8	33,333	264
a5-pp-t96-20b	20	30	600	100	60000	150	8	50	400
a5-pp-t96-20c	20	40	800	100	80000	150	8	66,667	536
a5-pp-t96-40a	20	20	400	100	40000	150	8	33,333	264
a5-pp-t96-40b	20	30	600	100	60000	150	8	50	400
a5-pp-t96-40c	20	40	800	100	80000	150	8	66,667	536
a5-pp-t168-0a	20	40	800	100	80000	150	8	66,667	536
a5-pp-t168-0b	20	50	1000	100	100000	150	8	83,333	664
a5-pp-t168-0c	20	60	1200	100	120000	150	8	100	800
a5-pp-t168-20a	20	40	800	100	80000	150	8	66,667	536
a5-pp-t168-20b	20	50	1000	100	100000	150	8	83,333	664
a5-pp-t168-20c	20	60	1200	100	120000	150	8	100	800
a5-pp-t168-40a	20	40	800	100	80000	150	8	66,667	536
a5-pp-t168-40b	20	50	1000	100	100000	150	8	83,333	664
a5-pp-t168-40c	20	60	1200	100	120000	150	8	100	800
a5-pp-t336-0a	20	60	1200	100	120000	150	8	100	800
a5-pp-t336-0b	20	90	1800	100	180000	150	8	150	1200
a5-pp-t336-0c	20	100	2000	100	200000	150	8	166,67	1336
a5-pp-t336-20a	20	60	1200	100	120000	150	8	100	800
a5-pp-t336-20b	20	90	1800	100	180000	150	8	150	1200
a5-pp-t336-20c	20	100	2000	100	200000	150	8	166,67	1336
a5-pp-t336-40a	20	60	1200	100	120000	150	8	100	800
a5-pp-t336-40b	20	90	1800	100	180000	150	8	150	1200
a5-pp-t336-40c	20	100	2000	100	200000	150	8	166,67	1336

Tabla 12 Cálculo del número de vuelos a simular en el escenario hs de 5 aeropuertos a partir del escenario pp para mantener la equivalencia. Elaboración propia.

