



**UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID**  
**ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO**  
**Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**  
**ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DE DEMANDA Y DEMORAS EN EL**  
**AEROPUERTO DE BARCELONA**

**AUTOR: Mariano DE COSSÍO ORTEGA**  
**TUTOR DEL TRABAJO: Álvaro RODRÍGUEZ**  
**SANZ**

**Enero de 2024**



## Agradecimientos

Me gustaría transmitir mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que me han ayudado a lo largo de esta etapa.

En primer lugar, agradecer a mi tutor, D. Álvaro Rodríguez Sanz, por el conocimiento y los medios facilitados para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster.

En segundo lugar, a mis padres por apoyarme y comprenderme en todo momento, así como darme todos los recursos necesarios para lograr el objetivo. Además, a mis amigos y a mi pareja, gracias por transmitirme fuerzas en todo momento.

En conclusión, después de este periodo he podido aprender mucho tanto en mi vida personal, académica y profesional.

Gracias a todos y por todo!



# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>3</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>7</b>
<b>1. Resumen</b>	<b>9</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>11</b>
2.1. Objetivos . . . . .	11
2.2. Alcance . . . . .	12
2.3. Metodología . . . . .	13
2.4. Antecedentes y planteamiento . . . . .	14
<b>3. Principales estrategias de gestión de la demanda</b>	<b>18</b>
3.1. Consideraciones previas . . . . .	18
3.2. Regulación de la demanda en aeropuertos con capacidad cercana a la saturación: Estrategias actuales. . . . .	21
3.3. Ventajas e inconvenientes de los dos principales modelos de gestión. . . . .	25
3.3.1. Modelo administrativo mediante <i>slots</i> . . . . .	25
3.3.2. Modelo económico. . . . .	26
<b>4. Evaluación de la demanda y capacidad y las posibles demoras asociadas. Medidas de mitigación.</b>	<b>28</b>
4.1. Problemas de capacidad. . . . .	28
4.2. Estudio de la capacidad y de la demanda. . . . .	30
4.2.1. Datos de partida necesarios. . . . .	30
4.2.2. Análisis y propuesta de optimización de las operaciones. . . . .	35
4.2.3. Método de relajación de puntas horarias . . . . .	37
4.2.4. <i>Congestion pricing</i> . . . . .	40
4.2.5. Métodos alternativos de mejora de la saturación. . .	42
<b>5. Conclusiones y recomendaciones.</b>	<b>45</b>
5.1. Líneas futuras de investigación e innovación. . . . .	45
<b>Referencias</b>	<b>48</b>

<b>Anexo</b>	<b>52</b>
A. Datos en bruto de operaciones horarias en el busy day. . . .	53
B. Datos en bruto de operaciones horarias en el día de mayor tráfico del año. . . . .	54

## Índice de figuras

1.	Imagen global del Aeropuerto de Barcelona. [1] . . . . .	14
2.	Gráfica Capacidad vs Demanda en el contexto del Plan Director. [15] . . . . .	15
3.	Relación entre demora y ratio de demanda anual y volumen anual de servicio. [20] . . . . .	20
4.	Relación de compromiso entre coste de demanda y coste de demora.[7] . . . . .	21
5.	Diferencia entre modelos de gestión de la demanda. [8] . .	23
6.	Comparativa entre demoras de los 34 aeropuertos más grandes de Europa vs EEUU. [5] . . . . .	24
7.	Aeronaves de llegada totales por mes en LEBL. [18] . . . .	31
8.	Aeronaves de salida totales por mes en LEBL. [18] . . . .	31
9.	Aeronaves totales por mes en LEBL. [18] . . . . .	32
10.	Aeronaves totales por día durante el mes punta en LEBL. [18]	33
11.	Aeronaves totales por semana durante el mes punta en LEBL. [18] . . . . .	33
12.	Aeronaves totales por hora en el busy day en LEBL. [18] .	34
13.	Pasajeros totales por hora en el busy day en LEBL. [18] . .	35
14.	Aeronaves totales por hora en el máximo día de tráfico anual en LEBL. [18] . . . . .	36
15.	Comparación de operaciones reales vs introducción del método en el busy day. [18] . . . . .	37
16.	Comparación de operaciones reales vs introducción del método en el día de más tráfico del año. [18] . . . . .	39
17.	Beneficios de congestion pricing en Nueva York. [23] . . . .	40



## 1. Resumen

La gestión de la capacidad y la demanda es uno de los puntos más relevantes que lleva mucho tiempo en los pensamientos de los expertos aeroportuarios. Las posibles soluciones son múltiples, van desde el incremento de la capacidad de las infraestructuras hasta medidas mucho más ingeniosas y densas teóricamente como subastas de *slots* o reducción de tiempos del sistema ATM.

En el presente trabajo, se van a analizar las medidas llevadas a cabo actualmente en el aeropuerto de Barcelona para mitigar las demoras asociadas al exceso de demanda. Además, la parte más importante va a ser en la que se va a estudiar la capacidad y demanda del aeropuerto de Barcelona para proponer dos métodos combinados a modo de solución del problema de saturación. Dichos métodos serán el de relajación de puntas horarios junto al de *congestion pricing*. Junto a todo lo anterior, también se van a proponer otras posibles medidas que pueden ayudar todavía más a reducir los tiempos de espera no deseados y, por tanto, mejorar los niveles de servicio del pasajero. Todo lo anterior, se analizará desde el punto de visto operativo, pero también económico y medioambiental, para darle un sentido más global.

Para terminar con el presente estudio, se van a sacar una serie de conclusiones, recomendaciones y posibles líneas futuras de investigación derivadas de la subida exponencial del tráfico aéreo en los últimos años con una subida no equivalente de la capacidad aeroportuaria, lo que supone el idear nuevas formas de atajar este problema.



## 2. Introducción

### 2.1. Objetivos

A continuación, se van a presentar los puntos principales que se van a desarrollar, con la intención de proponer alternativas ante una creciente demanda pero que, a su vez, no suponga un ascenso de la demora. En puntos posteriores se desarrollarán los objetivos principales expuestos a continuación de una manera clara, sencilla y esquemática. Dichos objetivos serán los siguientes:

- Valorar la situación actual de saturación del aeropuerto de Barcelona con datos reales.
- Tomar en consideración las medidas actuales puestas en marcha para controlar la demanda (sistemas de *slots*).
- Proponer y argumentar medidas que complementen a las ya activas para seguir reduciendo los retrasos al mínimo. Dichas acciones se apoyarán en el análisis de los datos actuales del aeropuerto.
- Poner el foco en el crecimiento del nivel de servicio ofrecido al pasajero tanto desde el punto de vista del aeropuerto como de las compañías aéreas.
- Contribuir a la mejora tanto económica como del medio ambiente reduciendo el gasto innecesario de combustibles fósiles derivados de una mala gestión de la demanda.
- Evaluar proyectando a futuro qué se puede seguir haciendo, proponiendo a su vez medidas que ayuden a la mejora de la problemática.

## 2.2. Alcance

En lo que respecta al alcance del presente estudio, hay que tener en cuenta diferentes aspectos que son necesarios mencionar. En primer lugar, va a ser necesario en puntos posteriores analizar y concretar el contexto del aeropuerto de Barcelona para poder encontrar las mejores soluciones y medidas propuestas. Para que se pueda realizar lo anterior, será necesario la búsqueda, obtención y análisis de datos relacionados con la situación actual.

Por otro lado, es muy importante valorar y comparar las medidas realizadas en otros aeropuertos tanto españoles como extranjeros con una situación equivalente de tráfico para proporcionar las que mejor se adaptan a la realidad del aeropuerto a estudio y poder proponer soluciones más adaptadas al caso.

Resulta muy importante mencionar que el alcance tendrá las limitaciones propias del tipo de estudio de investigación que se desarrolle, donde los datos es posible que no sean del todo acordes a la realidad debido a que algunos son privados para el público general. También supone una dificultad añadida, la red extremadamente difícil que tiene el transporte aéreo en la actualidad, donde todo está interconectado e interrelacionado. A pesar de ello, se ha conseguido alcanzar un nivel óptimo de detalle acorde a lo esperado.

A pesar de lo anterior, la intención es la proponer y ayudar a mejorar la situación de saturación en el caso concreto de Barcelona, aunque se busca que la solución pueda servir de ayuda en otros casos con realidades diferentes (global). Por ello, el estudio se va a centrar en elementos como la mejora operativa, económica, social y tecnológica, poniendo el foco en el futuro mediante la potenciación del conocimiento y del desarrollo de la industria para seguir creciendo en los niveles que actualmente se desarrolla.

### 2.3. Metodología

En el presente apartado se va a mencionar una explicación acerca de cómo se va a hacer el estudio del caso práctico que se realiza en el presente Trabajo de Fin de Grado.

Para comenzar, se va a realizar un repaso de la situación actual del aeropuerto (punto de partida), así como una explicación de cómo afecta de manera global los problemas de demanda, capacidad y demora a la situación del transporte aéreo y al caso concreto de Barcelona.

Posteriormente, se van a explicar y analizar diferentes medidas puestas en marcha de manera general (comparando el modelo europeo y el americano) para paliar el problema que supone el tener una demanda muy cercana o, incluso, superar la capacidad declarada.

Una vez realizado lo explicado en el anterior párrafo, se van a poner en común diferentes escenarios e ideas, pero adaptándolo al caso concreto del aeropuerto a estudio (LEBL) para analizar si es posible mejorar la situación de las demoras en Barcelona.

Por último, se valorarán posibles ideas novedosas que se pueden plantear, entre las que destacar el método de relajación de puntas horarias combinado con el de *congestion pricing* u otras de menor importancia en el estudio como las mejoras del servicio ATM o el paso en condiciones favorables de vuelos IMC a VMC para poder ampliar la capacidad. Además, se plantearán una serie de conclusiones y líneas futuras de investigación asociadas al extenso estudio realizado.

## 2.4. Antecedentes y planteamiento

En este cuarto apartado dentro de la introducción, se va a explicar cual es la situación de partida y, por tanto, algunas de las causas de por qué se ha escogido el aeropuerto de Barcelona como base del estudio, así como la obtención de datos necesarios e información asociada.

Se ha escogido dicho aeropuerto debido a que es el segundo aeropuerto más grande del territorio español por detrás del de Madrid-Barajas, donde Barcelona tiene una gran influencia en el desarrollo del transporte aeroportuario nacional debido a su ubicación e importancia competitiva. Se puede observar en la Figura 1 una imagen global de dicho aeropuerto.

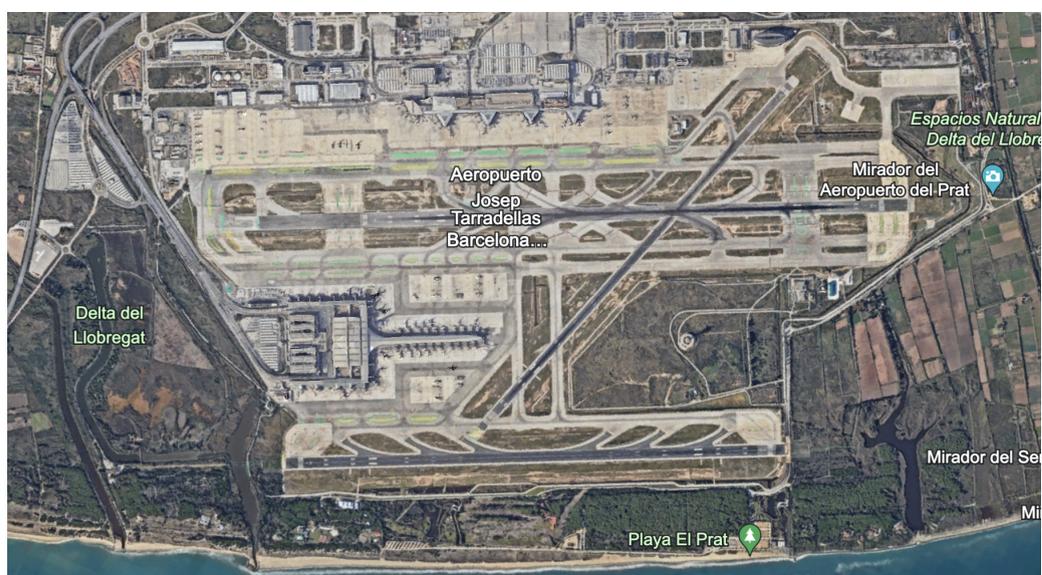


Figura 1: Imagen global del Aeropuerto de Barcelona. [1]

Tal y como se aprecia en la Figura 1, el aeropuerto consta de tres pistas, dos de ellas paralelas y otra cruzada para días con vientos cambiantes y operaciones de despegues y aterrizajes no preferentes. De las dos paralelas, la más cercana al mar es notablemente más corta que la otra en cuestión. En cuanto a la configuración preferente, es necesario diferenciar entre operaciones diurnas (Configuración Oeste en pistas paralelas con salidas por la 25L y 25R y llegadas por la 25R) y operaciones nocturnas (Configuración Norte en pistas cruzadas con salidas por la 07R y llegadas por la 02). Dicha operativa se realiza de esta manera con la intención de sobrevolar el mínimo espacio posible las poblaciones cercanas en horario de descanso.

Además de las pistas, el aeropuerto consta de dos terminales (tal y como se puede ver en la anterior imagen). En cuanto a los datos de capacidad declarada, ésta consta actualmente de aproximadamente 80 operaciones por hora (38 aterrizajes y 40 despegues). Se pretende que este dato de capacidad se incremente a 90 operaciones hora con la mejora en el diseño de campo de vuelo, lo cual supone un gran desembolso, además de problemas políticos, naturales y sociales, los cuales se comentarán en los siguientes apartado del trabajo.

Unido a todo lo anterior, cabe destacar que una razón de elevado peso por la cual se ha elegido el estudio de este aeropuerto, es que consta de problemas de capacidad (ver Figura 2) derivado de su entorno tanto urbanístico como natural en cuanto a pistas y, también, aunque en menor medida, en cuento a terminales, por lo que resulta necesario el idear y poner en marcha medidas que ayuden a la relajación de las demoras sin comprometer la demanda, y ni que ello suponga problemas económicos, sociales o políticos.

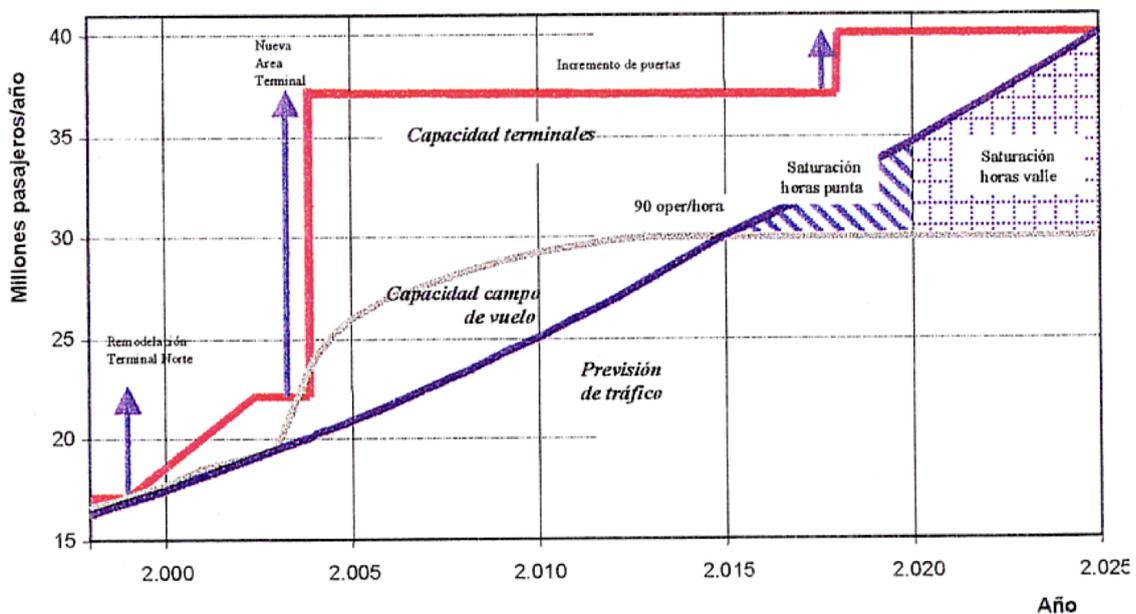


Figura 2: Gráfica Capacidad vs Demanda en el contexto del Plan Director. [15]

Por otro lado, una vez presentado el aeropuerto protagonista del estudio, es necesario poner en contexto y valorar el por qué es tan importante el

controlar la demanda y la capacidad, así como las demoras que se originan por el descontrol en el equilibrio de los dos factores mencionados anteriormente. Para apoyar el por qué se realiza dicho estudio, según estadísticas del año 2022 facilitadas por EUROCONTROL [12], el retraso medio de los vuelos en la región europea fue de 17,3 minutos. Además, solo el aproximadamente 65 % de los vuelos llegó dentro de los primeros 15 minutos o antes de demora respecto a la hora de llegada programada (STA). Resulta evidente que este retraso elevado por vuelo no es debido solo a un factor, hay múltiples elementos como son retrasos acumulados (capacidad), problemas de las compañías aéreas, demoras en ruta, condiciones atmosféricas y otros factores como conflictos armados o problemas derivados de condiciones laborales de distintos gremios. El más importante de todos, el cual supone casi el 50 % del tiempo total de demoras es el relacionado con problemas de capacidad y exceso de demanda. Aunque, cabe destacar que si en Europa estos datos de demoras son elevados, no tienen comparación con los que tienen en otros lugares del mundo como Estados Unidos con una regulación mucho más laxa que la europea en cuanto a demanda aeroportuaria.



### 3. Principales estrategias de gestión de la demanda

#### 3.1. Consideraciones previas

Una vez presentado el contexto en el que se va a centrar el estudio del presente Trabajo de Fin de Máster, resulta necesario el definir conceptos que se van a utilizar a lo largo de todo el documento con la intención de facilitar su comprensión en los futuros apartados.

- **Capacidad:** A lo largo de los anteriores puntos ya se ha ido mencionando este concepto, pero su definición es compleja. En primer lugar, dependerá de si se refiere a capacidad de pista (operaciones), de pasajeros (terminal), de calles de rodaje, etc. En el caso del presente proyecto, la capacidad que será relevante será la capacidad aeroportuaria desde el punto de vista de operaciones hora, lo que también se llama Aeronaves Hora Punta (AHP), la cual es el número máximo de aviones que es capaz de absorber el aeródromo desde el punto de vista de la pista (elemento normalmente limitante). Va a resultar de vital importancia porque es la que marca la probabilidad más cercana o lejana de alcanzar saturación. Dichas AHP son las que se mencionan en el apartado 2.4 y que en posteriores puntos del trabajo se irá desgranando. Recapitulando, OACI define el concepto de capacidad aeroportuaria como: *“Conjunto de instalaciones aeroportuarias necesarias y como mínimo igual a la demandada que deben ajustarse a la oferta, para dar un servicio adecuado.”*
- **Demanda:** En lo que respecta a la demanda, sucede de una manera equivalente a la capacidad. Es conveniente diferenciar entre aspectos que componen un todo, pero que sin diferenciación, puede ser que se pierda información. La demanda será distinta si se tratan de operaciones de tráfico nacional o internacional, si son vuelos de carga o de pasajeros o si es lo que se llama tradicionalmente aviación general. Una parte fundamental que hay que mencionar, y que es la base de este trabajo, es que la demanda en la mayoría de aeropuertos con tráfico importante estará regulada (o por lo menos ordenada) para poder gestionar de una manera más eficiente la capacidad disponible. Por lo que, será importante tener en cuenta la siguiente definición de

OACI: *“Es el parámetro fundamental para la Planificación Aeroportuaria que determina las necesidades de instalaciones en un período de tiempo. De su análisis, se deducirán las operaciones de aeronaves y su distribución anual, diaria y horaria.”*

- **Demora:** Otro concepto fundamental en este estudio será el entendimiento de qué es la demora y cómo afecta a la operación normal de los aeropuertos. La demora consiste básicamente en retrasos ya sean planificados o no de la operación de una o varias aeronaves por diferentes razones, las cuales se estudiarán más adelante. Es importante señalar que en lo que respecta al presente trabajo, se centrará más en el exceso de demanda aeroportuaria respecto a la capacidad asociada del aeródromo a estudio. La demora también se asocia a la degradación del nivel de servicio ofrecido al pasajero, pues está comprobado que a mayor demanda (con igual capacidad), habrá más probabilidad si no se ponen medios de que existan demoras y eso a su vez supone una reducción del nivel de servicio asociado. Ahora, uniendo por un lado el ratio de operaciones a planificar) y por el otro lado las demoras por avión, sale la siguiente gráfica representada en la siguiente Figura 3. Tal y como se va a poder observar en la imagen citada, es muy sencillo observar como un aumento de la demanda a partir de determinados niveles, hace que la demora aumente de una manera exponencial.

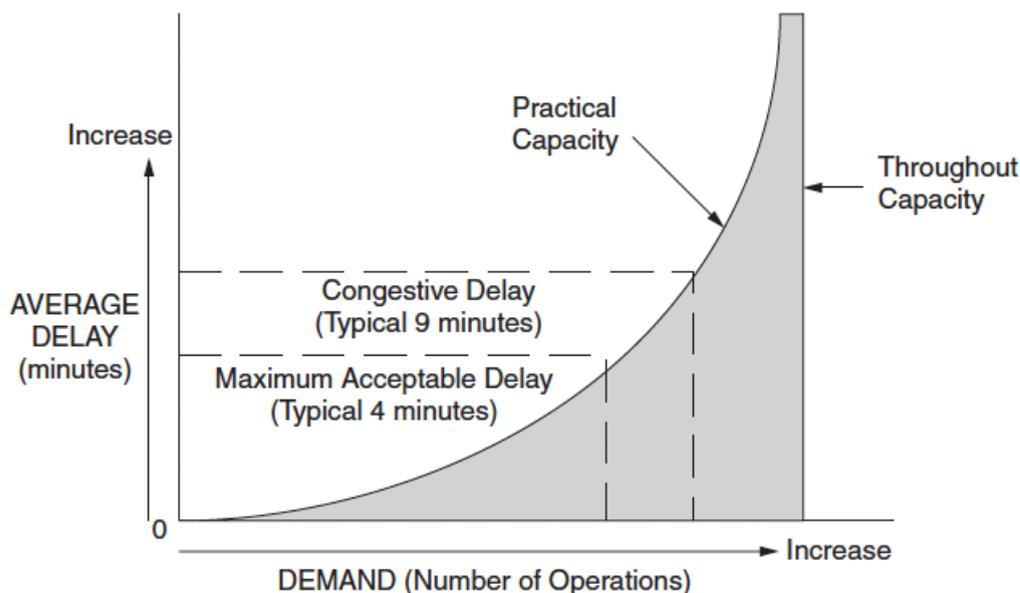


Figura 3: Relación entre demora y ratio de demanda anual y volumen anual de servicio. [20]

- **Plan Director:** Consiste en el documento oficial que pone de relieve las necesidades y establece las políticas que se establecerán en el futuro para el desarrollo del aeródromo. Dicho de otra manera, OACI lo define de la siguiente forma: “*El Plan Maestro de un Aeropuerto es un concepto que explica el desarrollo total de un aeropuerto. La palabra “desarrollo” incluye el área completa del aeropuerto, tanto para usos aeronáuticos (lado aire), como no aeronáuticos (lado tierra) incluyendo el uso de las áreas adyacentes al mismo.*” Para el caso del Aeropuerto de Barcelona, se puede consultar en [15]. Los elementos más importantes que deben aparecer en un documento de este tipo son la previsión de demanda para adaptar la capacidad a ésta, desarrollo de los terrenos del propio aeródromo y de los anexos a él, elementos medioambientales como eje para el desarrollo sostenible y la viabilidad económica y guía aproximada de inversión necesaria para seguir desarrollando el aeropuerto.

### 3.2. Regulación de la demanda en aeropuertos con capacidad cercana a la saturación: Estrategias actuales.

Una vez vistas las principales definiciones así como la introducción, va a ser necesario estudiar cuáles son las principales estrategias que se siguen en la actualidad ante situaciones de saturación de la capacidad aeroportuaria por un exceso de demanda y que, como consecuencia, este hecho genera demoras y una degradación del nivel de servicio muy evidente. Ambas estrategias profundizan en dos vías contrapuestas para llegar a un mismo punto, que es el de optimización con los medios existentes en cada aeropuerto. En la Figura 4 se va representar la relación de compromiso entre la pérdida de demanda por regulación y los costes a consecuencia de no actuar en la demanda y su demora.

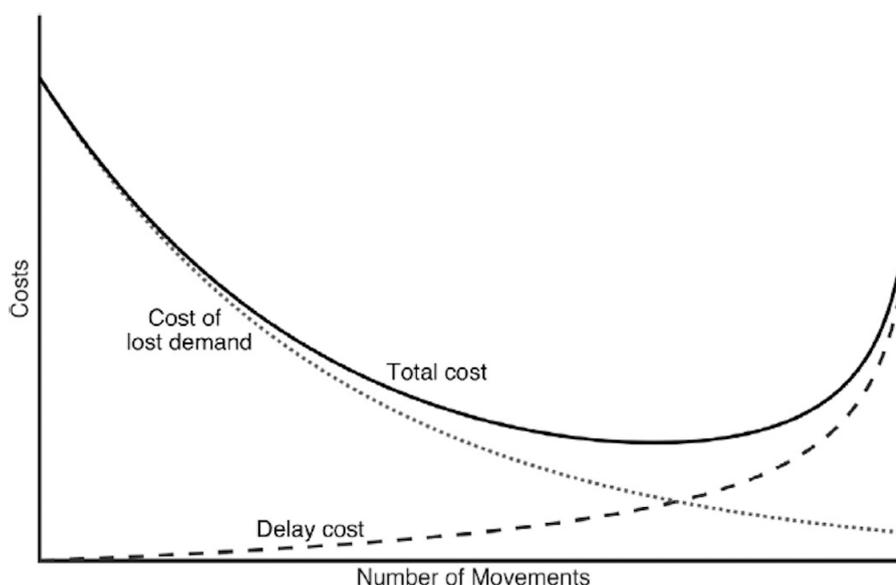


Figura 4: Relación de compromiso entre coste de demanda y coste de demora.[7]

Actualmente, hay dos modelos contrapuestos en cuanto a la gestión de la demanda y la capacidad:

El primero es el modelo europeo, el también llamado modelo de gestión administrativo. Básicamente, consiste en introducir regulaciones de tipo administrativo mediante el uso de *slots* aeroportuarios con la intención de distribuir el tráfico de una manera lo más homogénea posible. El límite de aeronaves que admite este sistema son las Aeronaves Hora Punta (AHP)

que ya mencionamos en el capítulo 2.4. Esto quiere decir que en aeropuertos de tipo coordinado, es decir, con regulaciones horarias de este tipo, no se puede sobrepasar la capacidad que marcan para el aeródromo las AHP (Capacidad declarada del aeródromo). Con ello, lo que se pretende es no saturar el sistema distribuyendo la demanda más allá de las horas consideradas como puntas.

El segundo gran modelo es el americano, el cual consiste en que la demanda se autorregule sola mediante el modelo de mercado. Consiste en una visión mucho más económica donde no se imponen restricciones administrativas a las operaciones. Una alternativa que se ha planteado dentro de este tipo de regulación son los llamados precios a la congestión, es decir, aumentar tarifas aeroportuarias cuando se detecta que el aeropuerto está en un estado de saturación mayor. Este modelo, va a ser una de las partes que se van a proponer como solución en el estudio de medidas para Barcelona. Otra idea es la del mercado de *slots* aeroportuarios, a través del cual se subastan dichas ventanas de operación en las horas deseadas para las compañías.

Para seguir ilustrando el presente apartado y, a modo de comparación, se van a adjuntar en la Figura 5 los dos modelos que se han explicado anteriormente para poder ver de una manera más práctica cual ha funcionado mejor allí donde se han puesto en funcionamiento. Cabe destacar que los dos aeropuertos que se han comparado han sido FRA (Frankfurt) y EWR (Newark), los cuales tienen unos niveles de capacidad muy semejantes respecto al aeropuerto protagonista de este trabajo (LEBL-Barcelona).

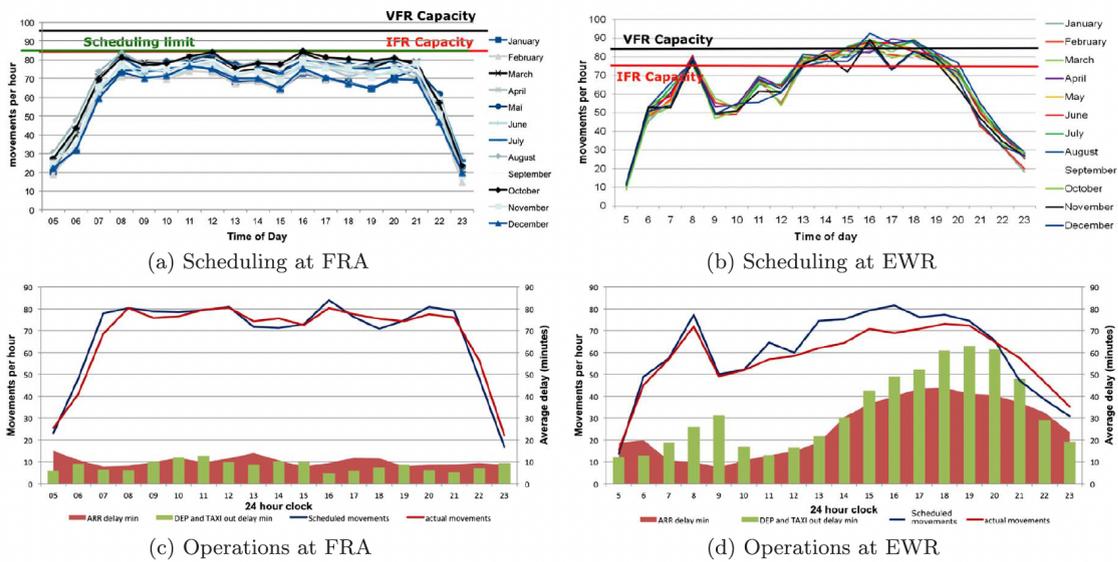


Figura 5: Diferencia entre modelos de gestión de la demanda. [8]

Tal y como se puede ver, la gestión de la demanda del modelo administrativo permite optimizar mucho mejor los recursos del aeropuerto que el modelo que no es intervencionista (económico) que se propone en Estados Unidos. En el segundo caso, se ve como hay picos que superan claramente la capacidad y otros momentos del día en el que se infrutilizan los recursos del aeropuerto. Además, en la Figura 5 también se suministran datos de los retrasos en función del tiempo y se ve de una manera muy clara que en aeropuertos donde no se actúa para regular la demanda, los retrasos son mucho mayores (del orden de 4 y 5 veces superiores a los coordinados administrativamente con *slots*) y, por tanto la pérdida del nivel de servicio al pasajero es mucho mayor, tal y como se puede ver en la siguiente gráfica (Figura 6) que compara las demoras del modelo europeo con el norteamericano. Además de todo lo anterior, las demoras suponen pérdidas económicas, sociales y medioambientales muy importante, por lo que atajar este problema se ha vuelto una prioridad en los estudios relacionados con la industria aeroportuaria.

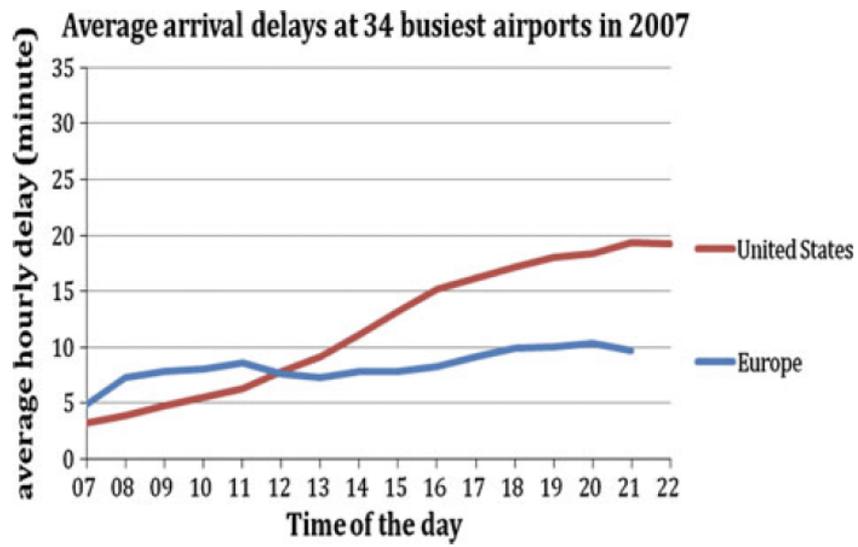


Figura 6: Comparativa entre demoras de los 34 aeropuertos más grandes de Europa vs EEUU. [5]

### **3.3. Ventajas e inconvenientes de los dos principales modelos de gestión.**

Una vez presentados, explicados y contrastados los dos principales modelos que hay en el mundo de gestión de la demanda y capacidad, en el presente punto lo que se pretende es el poner de relieve las diferentes ventajas e inconvenientes de los dos modelos, con la intención de que en futuros apartados poder proponer ideas que hagan facilitar la relajación de las demoras y a su vez poder mejorar la capacidad.

#### **3.3.1. Modelo administrativo mediante *slots*.**

Entrando ya en materia, en lo que respecta a las medidas administrativas de *slots*, las principales ventajas (algunas de ellas ya se han ido deslizando) se listan a continuación:

- Mejor rendimiento global del campo de vuelo y de la infraestructura aeroportuaria.
- Realizada de una manera adecuada, favorece la posibilidad de competencia entre aerolíneas ya consolidadas.
- Minimiza las demoras asociadas a la congestión al distribuir la demanda.
- Permite el poder planificar tanto de manera interna como con otros aeropuertos con antelación los diferentes servicios necesarios.
- Al minimizar demoras, aumenta los niveles de servicio de manera considerable.
- Optimización de los recursos limitados medioambientales, limitando el uso de combustibles fósiles de manera desproporcionada.

Por otro lado, se van a presentar una serie de inconvenientes relacionados con el uso de esta medida:

- Problemas para el surgimiento de aerolíneas de nueva creación por la imposibilidad de acceder a diferentes horarios de interés.

- Se considera un modelo especialmente rígido sin mucha posibilidad de poder cambiar o cancelar horarios prefijados. Importante llegado a este punto entender el modelo 80/20 de cumplimiento de *slots* (ver [16]).
- Modelo poco ágil, es decir, conlleva demasiada burocracia el uso de este sistema y con tiempo de acción muy elevados.
- Menor aparición de vuelos no regulares y nuevos servicios, así como la creación de nuevas rutas.

### 3.3.2. Modelo económico.

En este punto cabe destacar que la mayoría de ventajas que tiene el modelo administrativo de *slots* descrito anteriormente se le pueden aplicar como inconvenientes a este tipo de regulación y viceversa.

Resulta importante comentar que hay dos posibles modelos diferenciados dentro de este punto. Por un lado, se tiene la subasta de *slots* y por otro las tarifas por congestión. Ambos son modelos económicos que se consideran mucho más dinámicos y flexibles que la otra alternativa, aunque puede generar problemas de falta de previsión o de posibles monopolios donde solo las grandes compañías pueden hacer frente al pago de los mejores *slots* o les puede ser menos problemático el no cumplir con dichas regulaciones al tener las mismas penalizaciones que las compañías *low cost*, por ejemplo. En estos modelos siempre se tiene la duda de la eficacia frente a situaciones de demanda muy elevada o de problemas frente a fallos de algún tipo por falta de planificación, de ahí que en el caso de EEUU además de tener estos modelos, en los principales aeropuertos del país se opta también por una asignación de *slots* muy parecida a la europea.

Por último, hay algunas medidas extras que se podrán llevar a cabo en la gestión de las demoras dentro del contexto de cada aeropuerto y que, las que se puedan adecuar al contexto del aeropuerto de Barcelona, se explicarán en el siguiente apartado donde ya se concreta al caso de LEBL.



## 4. Evaluación de la demanda y capacidad y las posibles demoras asociadas. Medidas de mitigación.

Ya en anteriores apartados del presente estudio se ha mencionado la capacidad declarada en Aeronaves Hora Punta (78 a 80 ops/hora) del aeropuerto de Barcelona. En este punto se va a intentar atacar el problema de las demoras desde diferentes prismas: falta de capacidad, exceso de demanda y medidas alternativas de mitigación. Por lo tanto, la intención que se persigue llegados a este punto del estudio es la de ofrecer posibilidad de mejorar la situación de saturación de LEBL mediante todo tipo de soluciones adaptadas a su problemática. Cabe destacar que para este caso, se va a optar por el método de relajación de puntas desde el prisma operativo y para darle un sentido económico, las aeronaves afectadas por la regulación impuesta, se podrán acoger a un beneficio económico en las tarifas por operativa en horarios cercanos al suyo pero de menor tráfico con un modelo inverso al del *congestion pricing* pero que se base en sus elementos.

### 4.1. Problemas de capacidad.

Entrando ya en uno de los puntos más relevantes del presente trabajo, tal y como se ha mencionado en el punto 2.4, el gran problema que tiene el aeropuerto de Barcelona es la capacidad de sus pistas. Si bien, como ya se ha comentado, tiene un sistema de dos pistas paralelas (una de ellas más corta, lo cual impide las operaciones para aeronaves más grandes) y una cruzada respecto a las anteriores, este modelo resulta ser totalmente insuficiente como bien muestran los diversos proyectos de ampliación de la pista paralela más cercana al mar (07R/25L). Dichas ampliaciones se han encontrado con problemas de diversa índole, como bien se van a mostrar a continuación:

- Medioambiental: Posiblemente el principal problema por el que no se ha podido realizar una ampliación de dicha pista o la construcción de otra más. Esto sucede porque hay un área protegida natural la cual sería muy complicada de restituir si se realiza dicho proyecto. Para solucionar este hecho, se ha llegado a proponer la construcción de una pista extra alternativa dentro del mar, pero el desembolso económico la ha hecho impracticable.

- Económico: Gran parte de la década que va del 2008 al 2016 ha sido una época de crisis económica profunda, donde los proyectos de ampliación y mejora de las infraestructuras aeroportuarias se han ido dejando a un lado por falta de recursos económicos. Además, como se ha mencionado en el punto anterior, las condiciones especiales de este aeropuerto, lo hacen complicado económicamente para buscar un equilibrio entre mejora de capacidad y no tener un problema medioambiental.
- Político: No hay que dejar de lado que los aeropuertos y el transporte aéreo en general son elementos donde la política juega un papel relevante. Diferentes hechos ocurridos han provocado que proyectos avanzados no se hayan podido acometer.
- Social: no hay que olvidar que un gran *stakeholder* de un aeropuerto son los vecinos de las localidades anexas. El aumento de las operaciones, puede suponer un aumento del nivel sonoro del tráfico y una mayor molestia para los vecinos.

## 4.2. Estudio de la capacidad y de la demanda.

En la presente sección se van a analizar las demandas del aeropuerto en cuestión, así como el cruce con la capacidad para poder realizar un método de mejora de la absorción de dicha demanda. El método utilizado para el cálculo de los parámetros de diseño es del día de diseño (*busy day*), el cual se define de la siguiente manera:

*“El día de diseño, o Busy Day, se define como el segundo día de más tráfico en una semana promedio perteneciente al mes pico del año.”*

Además de ese día de diseño, se obtendrá la hora pico como la hora de mayor operación del aeropuerto en el año estudiado. Los datos para todos estos parámetros serán los facilitados para el año 2019 y en todos los casos se tiene en cuenta el tráfico comercial, por lo que otros tipos de movimientos no han sido valorados, aunque sí que es muy importante mencionar este hecho para poder valorar que la demanda en determinados casos (muy escasos) es incluso mayor a la que se va a describir en este punto.

### 4.2.1. Datos de partida necesarios.

Para iniciar el análisis mencionado en la anterior introducción, será necesario extraer los datos mediante gráficos que ayuden a la elección de los parámetros para el cálculo deseado. En primer lugar, se van a adjuntar las operaciones separadas entre llegadas y salidas a modo informativo para, posteriormente, juntarlas y elegir el mes con mayor tráfico.

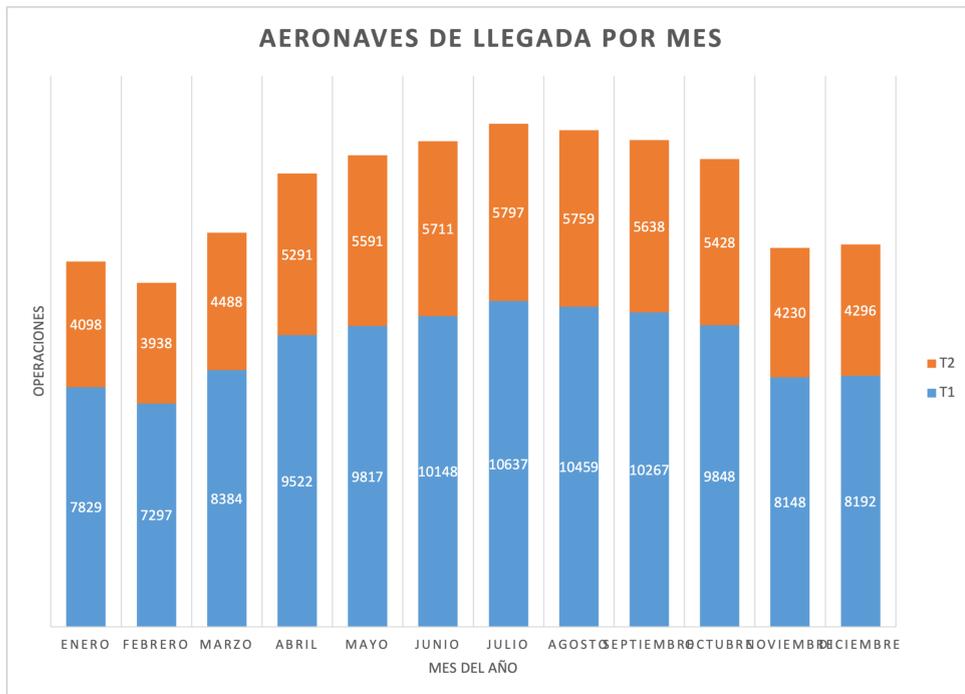


Figura 7: Aeronaves de llegada totales por mes en LEBL. [18]

Tal y como se puede observar en la Figura 7, el mes con mayor tráfico de llegadas es Julio con 16434 operaciones. Este dato no es definitivo, pues habrá que sumarle las salidas para poder sacar el mes punta.

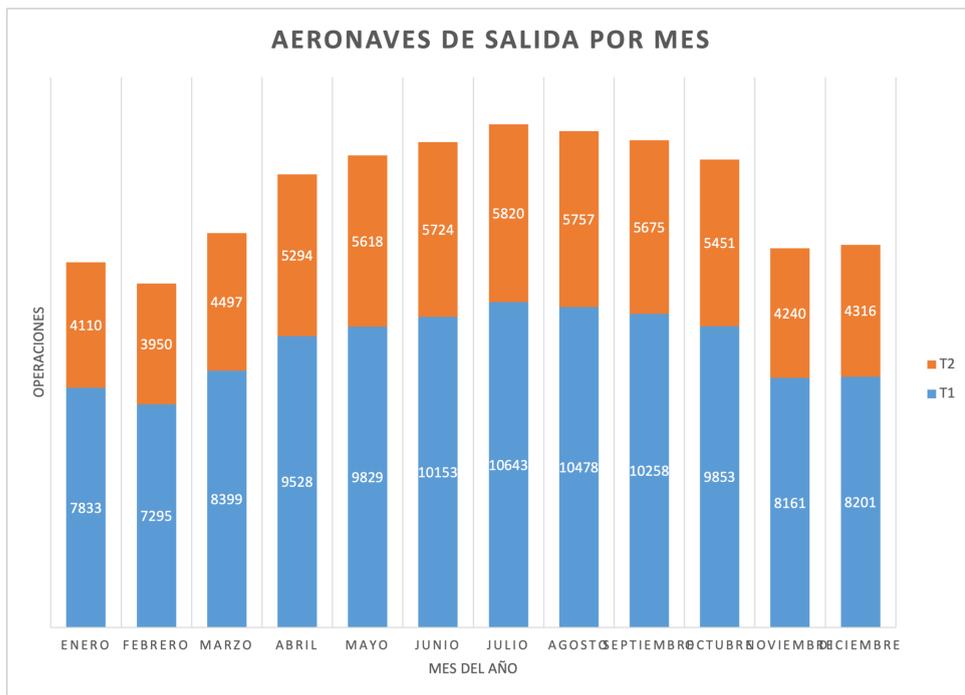


Figura 8: Aeronaves de salida totales por mes en LEBL. [18]

Analizando la Figura 8, se puede comprobar claramente que las conclusiones a las que se llegaron en el tráfico de llegadas, aplica para el de salidas. El número total de operaciones de salidas en el mes de Julio (también mes punta) es de 16463. Por lo que, ya solo queda juntar ambos datos en una gráfica con las operaciones totales de salidas y de llegadas.

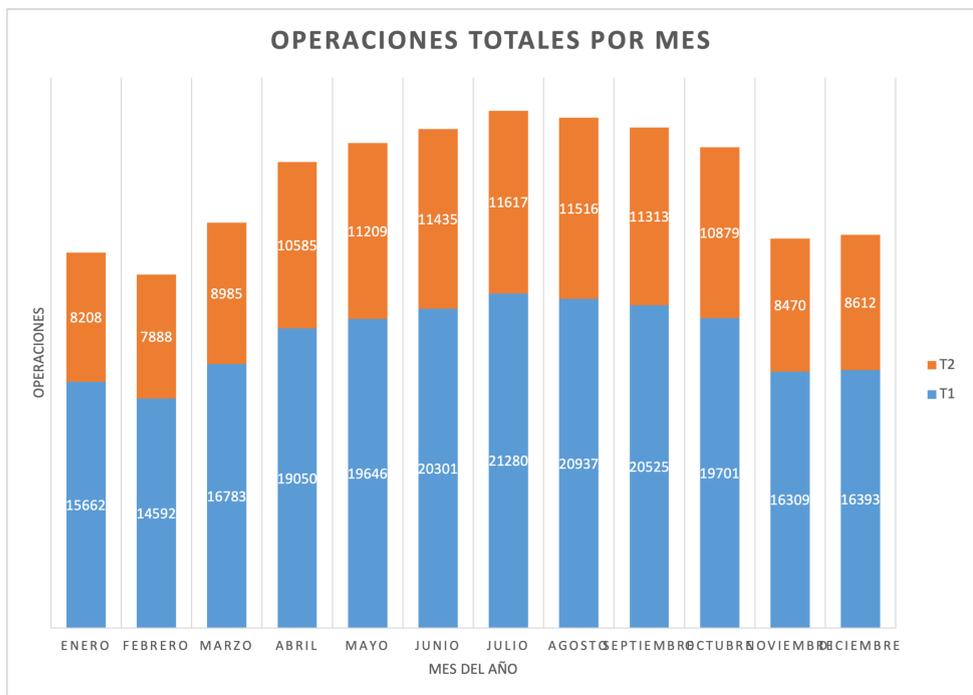


Figura 9: Aeronaves totales por mes en LEBL. [18]

En la Figura 9 se comprueba que Julio con un total de 32897 operaciones totales es el mes punta de LEBL en 2019. Se utilizará dicho mes para el cálculo de la semana promedio y del *busy day*, así como de la hora punta de dicho día cogido como base del cálculo.

Prosiguiendo con el análisis, a continuación se facilita el gráfico con las operaciones diarias durante todo el mes punta ya analizado con anterioridad.

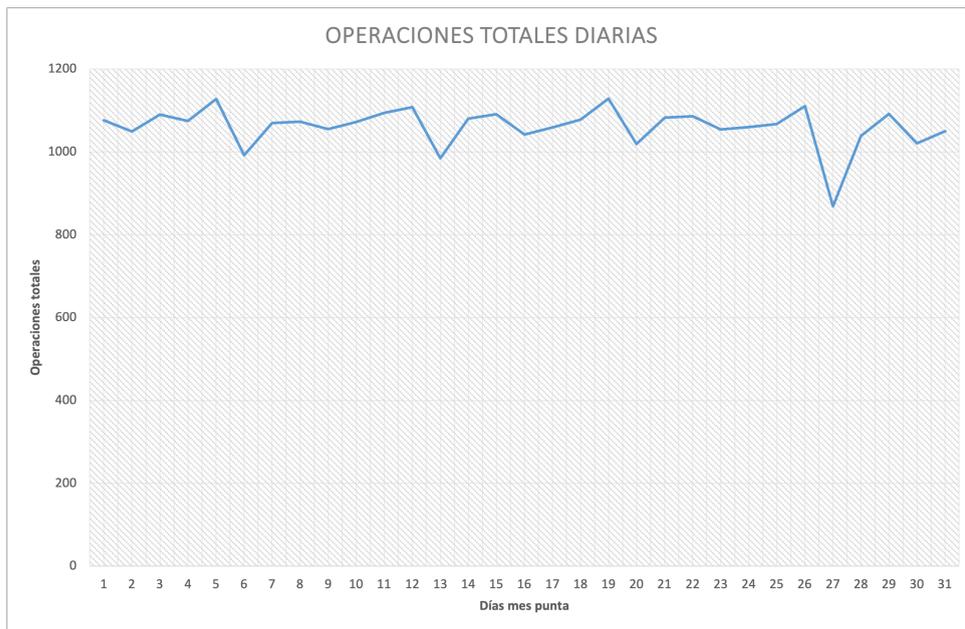


Figura 10: Aeronaves totales por día durante el mes punta en LEBL. [18]

A partir de la Figura 10, resulta sencillo agrupar los días en semanas para sacar la semana promedio, tal y como se muestra en la siguiente Figura 11:

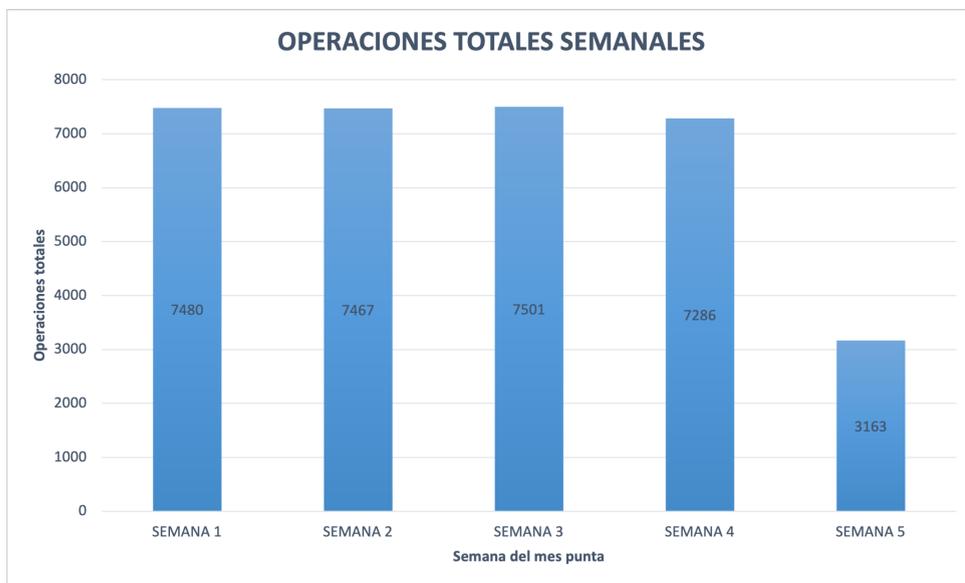


Figura 11: Aeronaves totales por semana durante el mes punta en LEBL. [18]

Con los datos de los anteriores gráfico, se llega a la conclusión de que la semana promedio escogida será la semana 2, la cual incluye los días 8 al 14 ambos inclusive. Según el método, es el segundo día de la semana

promedio del mes punta, por lo que el día escogido es el 11 con 1094 operaciones totales diarias. En cuanto a los Pasajeros totales de dicho *busy day* alcanzan los 171356.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta, es que los valores que se han obtenido totales para el *busy day*, se tendrán que sacar por hora para obtener las AHP (Aeronaves Hora Punta) y los PHD (Pasajeros Hora de Diseño). Dichos elementos se usan de esta manera y con este método para no infradimensionar ni sobredimensionar las infraestructuras.

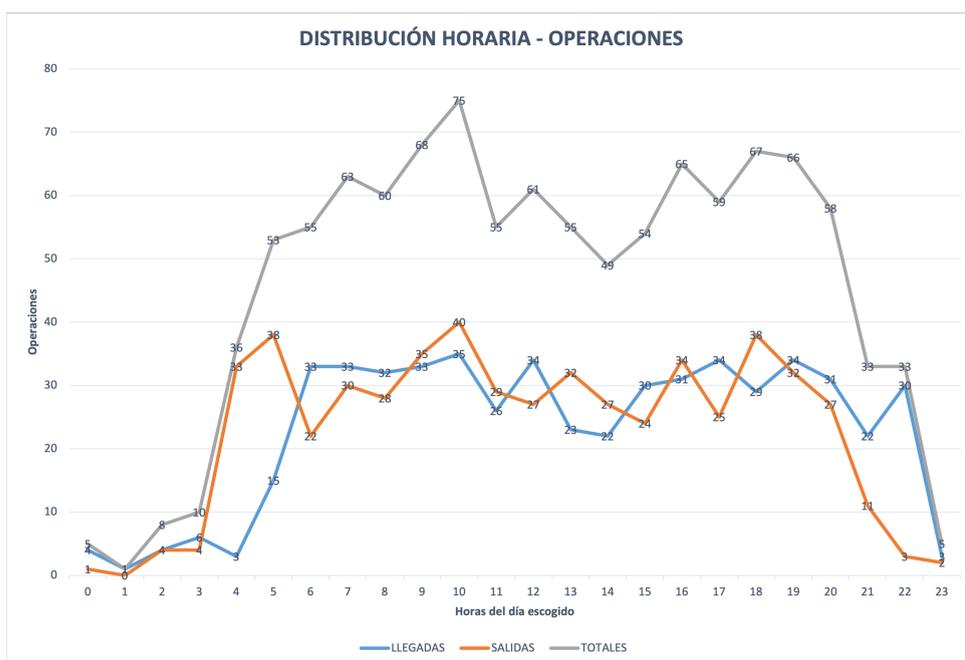


Figura 12: Aeronaves totales por hora en el busy day en LEBL. [18]

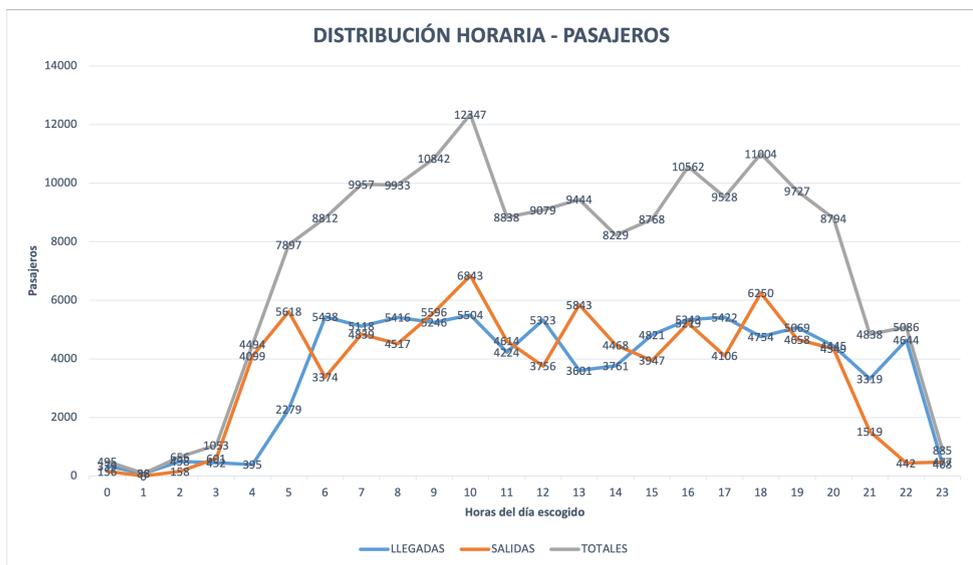


Figura 13: Pasajeros totales por hora en el busy day en LEBL. [18]

Una vez analizados los datos arrojados por la Figura 12 y la Figura 13, se pueden llegar a la obtención de los siguientes datos:

- **AHP:** Dicha hora ha sido las 10 de la mañana. En dicha hora, el número de aeronaves de salida han sido de 40 (la capacidad declarada máxima son 40), de llegada de 35 (máximo declarado son 38) y el número total de 75 (máximo declarado son 78).
- **PHD:** Dicha hora ha sido las 10 de la mañana también. En dicha hora, el número de pasajeros totales para el dimensionamiento de las terminales han sido de 12347.

Tal y como se puede observar, el aeropuerto está muy cercano a la saturación llegando a igualar la capacidad máxima declarada de aeronaves de salida. Esto sucede a pesar de elegir un día que no es el de máximo tráfico, sino con unos parámetros prefijados para no hacer cálculos demasiado optimistas o pesimistas a nivel de infraestructura global.

#### 4.2.2. Análisis y propuesta de optimización de las operaciones.

Para poder analizar en el caso más desfavorable posible, se va a partir del día con mayor tráfico del año para, a partir de ahí y mediante una metodología de optimización de distribución de puntas horarias, poder balancear la demanda lo más homogéneamente posible con la intención ya

mencionada en puntos anteriores del trabajo.

Dicho día de máximo tráfico del año 2019 fue el 14 de Junio con 1142 operaciones en el día. Resulta interesante la comparación con el *busy day*, el cual consta de 1094 operaciones en dicho día. A continuación, se va a proporcionar el gráfico con la distribución horaria de operaciones el 14 de junio.

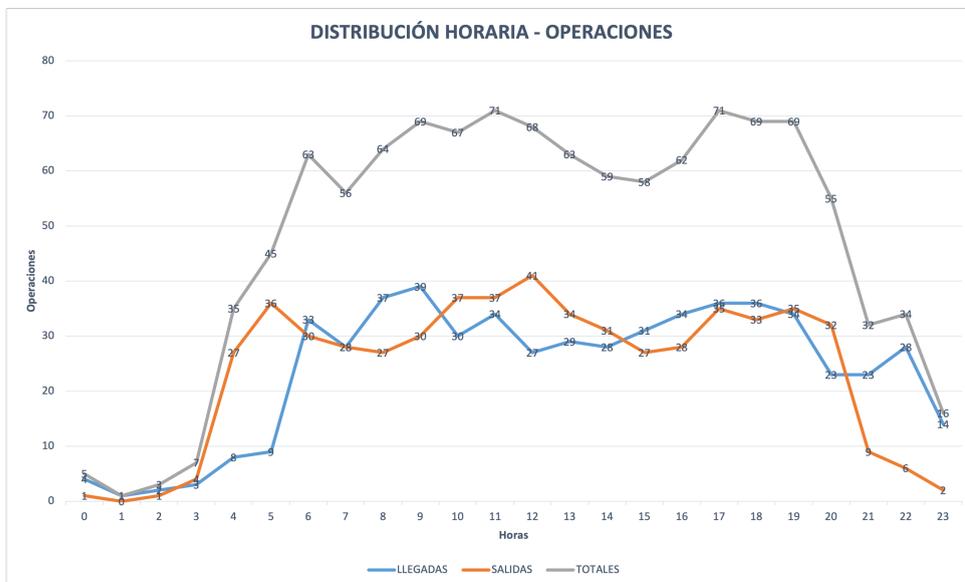


Figura 14: Aeronaves totales por hora en el máximo día de tráfico anual en LEBL. [18]

Analizando la Figura 14, resulta muy interesante el ver como en cuanto a tráfico total (salidas más llegadas) el tráfico está repartido de una manera más homogénea este día de máximo tráfico que el *busy day*. Aún así, hay dos momentos problemáticos que son necesarios mencionar que no pasaba en el mencionado día de diseño.

Uniéndolo con lo mencionado anteriormente, en cuanto al tráfico de llegadas, a las 9 horas de la mañana, se ha llegado a 39 aeronaves donde la capacidad declarada es de 38. Dicho efecto se visualiza de la misma manera a las 12 horas con las salidas, donde se alcanzan 41 *departures* frente a los 40 declarados. Este punto enlaza con que es necesario mencionar que la capacidad última o máxima del aeropuerto puede ser mayor a la declarada (y de hecho pasa de vez en cuando como en el ejemplo anterior) aunque no es recomendable e indica que el aeropuerto está en saturación, lo cual

favorece la aparición de demoras.

### 4.2.3. Método de relajación de puntas horarias

Tal y como se ha comentado a lo largo del estudio, el objetivo prioritario que se persigue es el de comparar la capacidad y la demanda de LEBL y, a su vez, proporcionar soluciones que sean compatibles con la operativa del aeropuerto. Una vez ya desgranados los datos necesarios para poder estudiar dichas medidas, se va a proceder a explicar el método de relajación de puntas horarias, el cual consiste en distribuir el tráfico de manera más uniforme a lo largo del día, con la intención de maximizar la capacidad (limitada) del aeródromo y evitar situaciones de demoras. Para ello, se van a coger tanto las gráficas de la Figura 12 como de la Figura 14. Para poder hacer esto posible, se procederá a flexibilizar el sistema de *slots* (franjas horarias) mediante la posibilidad de introducir como segundo elemento una reducción de tasas de la demanda de dichos horarios menos usuales (Ver punto 4.2.4). Añadir a todo lo anterior, que se va a establecer un máximo del 90% de la capacidad declarada para despegues (36 ops/hora) y aterrizajes (34 ops/hora) y que las horas nocturnas con bajo tráfico, no se van a modificar operaciones para no perturbar el descanso de los vecinos. A continuación, se muestra una comparación de las gráficas actuales en contraste con las del método.



(a) Operaciones horarias en el busy day.

(b) Operaciones horarias corregidas en el busy day.

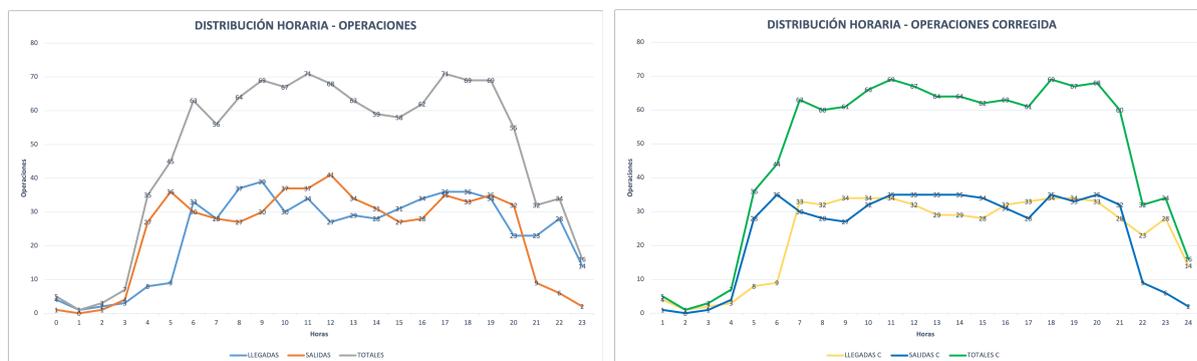
Figura 15: Comparación de operaciones reales vs introducción del método en el busy day. [18]

Además de adjuntar las gráficas de comparación donde se pueden vi-

sualizar fácilmente los datos (ver también Anexo), se van a mencionar los cambios realizados y cómo ha afectado a la operativa del aeropuerto:

- **LLEGADAS:** Se han regulado a un máximo de 33 operaciones por hora (por debajo del 90 %) donde los siguientes horarios han sido los afectados: 10, 12, 17 y 19. En todos los casos, se ha podido balancear hacia la hora posterior, quedando la gráfica mucho más regular en cuanto a picos sin necesidad de tomar acciones más relevantes.
- **SALIDAS:** Se han regulado a un máximo de 35 operaciones por hora (por debajo del 90 %) donde los siguientes horarios han sido los afectados: 5, 10, 18. En el primer caso, se han podido pasar las 3 últimas aeronaves a la hora posterior, pues había un gran diferencial entre las 5 y las 6 AM. En los dos siguientes casos, se ha tenido que balancear con los dos horarios siguientes debido a la gran demanda existente dentro de las franjas posteriores.
- **TOTALES:** Un efecto muy importante que resulta de la aplicación de este método tanto en salidas como en llegadas, es el de la reducción muy importante de los picos de aeronaves totales, quedando la operativa del aeropuerto mucho más equilibrada y lejana a la saturación. En el caso original, se ha pasado de tener un pico de 75 operaciones/hora al caso corregido donde se han conseguido un máximo de 68 operaciones/hora (muy por debajo de las 78 operaciones/hora declaradas).

Una vez ya presentadas las modificaciones y conclusiones relativas al estudio del *busy day*, se va a proporcionar de manera equivalente las gráficas del día de mayor tráfico del año en el aeropuerto de Barcelona, con el fin de demostrar que el método es válido para cualquier caso. Cabe destacar, que aunque el número de operaciones es mayor que en el *busy day*, está mejor proporcionado en cuanto a operaciones totales (suma de llegadas y salidas) pero no es exactamente igual para las salidas y llegadas de manera individual, las cuales si que van a poder ser optimizadas.



(a) Operaciones horarias en el día de más tráfico. (b) Operaciones horarias corregidas en el día de más tráfico.

Figura 16: Comparación de operaciones reales vs introducción del método en el día de más tráfico del año. [18]

Una vez vistas las gráficas (ver Anexo 2 para datos en bruto), es necesario realizar una serie de comentarios para poder contextualizar los resultados a los que se han llegado:

- **LLEGADAS:** Se han regulado a un máximo de 34 operaciones por hora (el 90% exacto del máximo de capacidad declarada) donde los siguientes horarios han sido los afectados: 8, 9, 11, 16, 17, 18 y 19 horas. Ha sido necesario balancear tanto a las horas anteriores como posteriores, mencionando el caso especial de las 16 a las 19 horas, donde se ha visto la necesidad de balancear algunos a horas tempranas y otros a horarios posteriores.
- **SALIDAS:** Se han regulado a un máximo de 35 operaciones por hora (por debajo del 90%) donde los siguientes horarios han sido los afectados: 5, 10, 11 y 12. En el caso de las 5, ha sido relativamente fácil balancear, sin embargo, en el de las 10 a las 12, ha resultado necesario los 3 horarios posteriores de tráfico (valle por horario central del día) y las 9 horas para poder entrar dentro de los límites exigidos.
- **TOTALES:** Al igual que en caso del *busy day*, un efecto muy importante que resulta de la aplicación de este método tanto en salidas como en llegadas, es el de la reducción muy importante de los picos de aeronaves totales, quedando la operativa del aeropuerto mucho más equilibrada y lejana a la saturación. En el caso original, se ha pasado

de tener un pico de 71 operaciones/hora al caso corregido donde se han conseguido un máximo de 69 operaciones/hora.

#### 4.2.4. Congestion pricing.

Una vez realizado el análisis de la operativa del método de relajación de puntas horarias, se va a proceder a explicar qué incentivos se van a proporcionar para que los distintos actores accedan a aplicar de una manera efectiva el método.

Primeramente, se necesita de un análisis de la capacidad, demanda y demora como el que se ha realizado a lo largo del presente trabajo. De ese estudio, se ve que en determinadas situaciones donde la capacidad y la demanda están muy cerca de saturarse (entendiendo saturarse como el alcanzar o incluso superar la capacidad declarada que hace reducir drásticamente el nivel de servicio) es muy interesante aplicar el método de relajación de puntas horarias, distribuyendo las operaciones en horarios cercanos de menor tráfico. Va a resultar prioritario el proporcionar un incentivo debido al trastoque de adelantar o atrasar una operación ya sea de salida o de llegada.

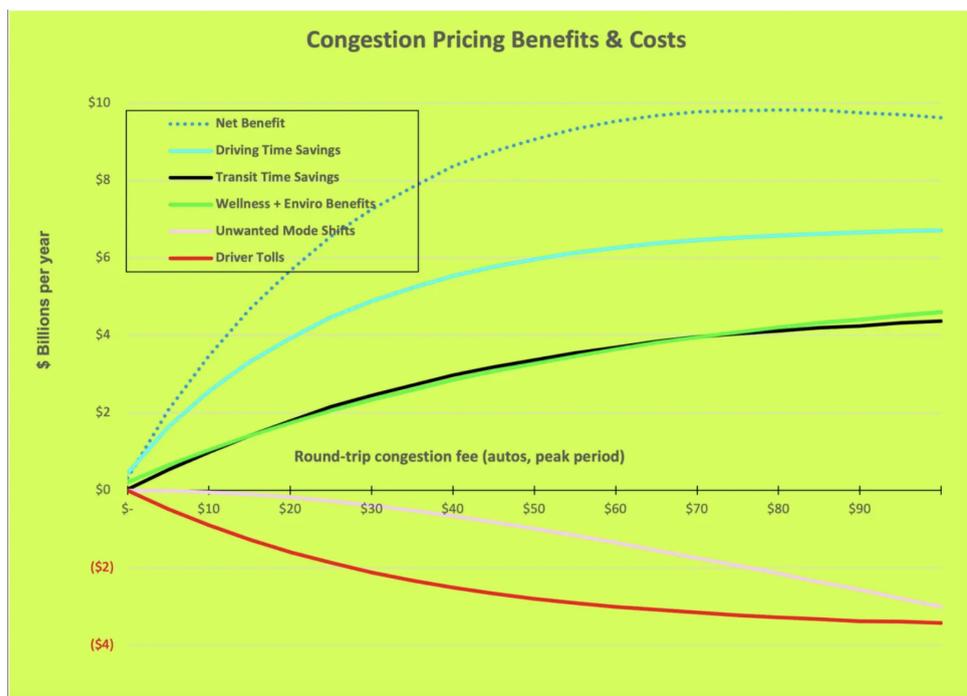


Figura 17: Beneficios de congestion pricing en Nueva York. [23]

La solución que se propone va a ser el denominado *congestion pricing*, el cual es un método utilizado ampliamente en otras industrias (ej. automóvil, ver Figura 17) en el que el precio de las tarifas varía en función de la demanda que tiene que soportar el sistema. Resulta sencillo viendo el gráfico anterior sacar conclusiones de ventajas para el uso de precios distintos en función de la demanda y si, además, eso se combina con un estudio exhaustivo de la situación particular de cada territorio se puede vislumbrar que hay beneficios económicos, sociales y medioambientales muy importantes.

En el caso del presente estudio, se va a hacer de una manera inversa a la que se suele llevar a cabo, pues normalmente se suele elevar el precio en momentos de congestión, mientras que en este caso se va a reducir la tarifa a los que decidan operar a otras franjas horarias cercanas, tal y como se explicará a continuación. Llevado al terreno aeroportuario, básicamente consiste en reducir las tarifas en momentos concretos de saturación con la intención de que los vuelos que lo vean conveniente puedan adelantar o atrasar sus operaciones para beneficiarse de esta medida. Según el alcance deseado por cada aeropuerto, mediante herramientas del *congestion pricing*, se podrá diferenciar no solo entre horas pico y valle para balancear, sino también entre tipos de aeronaves utilizadas (tamaño) o la terminal de la que se haga uso (porque puede darse la situación de que haya terminales con mucha operativa y otras al mismo tiempo con sobredimensionamiento debido a que hay veces que la saturación puede venir de las propias terminales), con la intención de afinar lo máximo posible y exprimir la capacidad limitada.

Desde el punto de vista de las compañías de bajo coste tendría beneficios claros, pues podría suponer una buena oportunidad de operar en aeropuertos de primer nivel a un precio más reducido y, así poder repercutirlo en los billetes a la baja. Además, supondría una oportunidad de poder operar a compañías pequeñas y competir con otras de mayor nivel. Esta medida va mu enfocada en estos dos tipos de aerolíneas, pues sus viajeros son menos sensibles a las posibles variaciones horarias pero si, mucho más a los precios.

Por otro lado, desde el lado de las compañías bandera o principales, supondría una mejora del nivel de servicio pues se reduciría la saturación y también puede suponer el abrir alternativas de rutas por poder operar

con mayor número de vuelos si se decide aplicar de manera decidida (disminución de demanda).

Sin embargo, tiene un problema asociado que no es estrictamente del método, si no regulatorio. Actualmente en Europa, debido a las medidas de *slots* (administrativas) la normativa impide poder realizar este tipo de soluciones.

#### 4.2.5. Métodos alternativos de mejora de la saturación.

Una vez realizado el estudio sobre la demanda y capacidad del aeropuerto mediante un método de relajación de puntas horarias bonificando las aeronaves que transicionan de un horario muy saturado a otro cercano no tan demandado, cabe mencionar el uso de algunos métodos que pueden ser muy relevantes en un futuro para mejorar dicha situación. Las medidas se van a mencionar a continuación:

- **Mejoras en los procedimientos de Navegación Aérea:** Dicho método ha sido ya utilizado en aeropuertos con grandes niveles de saturación y sin posibilidades reales de ampliación de capacidad (Ej. Madrid-Barajas con el uso de operativa de aproximación y despegue independiente). Simplemente consiste en las mejoras de las aproximaciones con el uso de mejores sistemas de automatización de aviso de pista libre (ver [19]) o con uso de procedimientos más optimizados, tal y como presenta ENAIRE en su nota técnica (ver [10]) como mejoras para dicho aeródromo. Entre las medidas propuestas por el ANSP, se encuentran las operativas (Reducir la separación de aeronaves en condiciones de óptimas, ordenar los aviones por tipo de estelas turbulentas o reducir separación en llegadas en configuración no preferente), las de diseño de espacio aéreo (mejorando la gestión de los flujos en el TMA), las infraestructuras (prolongación de pista no preferentes o creaciones de by-pass) y tecnológicas/sistemas (mediante la modernización del sistema ATM SACTA). Con las medidas planteadas en el estudio, según simulaciones de ENAIRE, se podría pasar de 78 aeronaves/hora hasta las 90 operaciones/hora, lo cual sería un paso muy relevante para el aeropuerto.
- **Pasar de reglas IMC a VMC:** Una medida muy relevante que se

utiliza en Estados Unidos, es la de considerar los vuelos como VMC (Visuales) bajo condiciones óptimas (más del 80 % de los días de un año), lo cual podría flexibilizar mucho más las operaciones por la reducción de las distancias necesarias entre aeronaves. Además, en el caso de Barcelona tendría un gran impacto, porque la situación climatológica suele ser óptima. Según datos de los diferentes *papers* analizados (ver bibliografía), la mejora de estos procedimientos podría mejorar en más de un 10 % los datos de capacidad, lo que equivaldría pasar a tener una capacidad de unas 85 aeronaves/hora. Sobretodo, sería muy relevante para los aterrizajes, aunque se verían claramente beneficiados también los despegues.

- **Mejora tecnológica:** Aunque ya se ha dejado deslizar en el primer punto de este apartado, cabe destacar la gran evolución que va a suponer las mejoras tecnológicas en cuanto a la gestión de la demanda y la capacidad aeroportuaria. Sin ir más lejos, cada vez hay más sistemas que ayudan a la gestión de afluencia y capacidad (ATFCM de EUROCONTROL) o los sistemas modernos de Navegación Aérea (ITEC), los cuales van a permitir ser mucho más precisos y poder dar órdenes más adecuadas en función de la situación. Además, todo ello se verá incrementado de una manera clara con la gestión óptima de la inteligencia artificial.



## 5. Conclusiones y recomendaciones.

En el presente apartado de Trabajo de Fin de Máster, se van a proporcionar una serie de reflexiones acerca del estudio realizado a lo largo de éste, y de si se ha conseguido llegar a la consecución de los objetivos expuestos en los diferentes apartados.

- Se ha conseguido analizar la situación de partida actual del aeropuerto de Barcelona.
- A través de los datos facilitados, se ha podido concluir que, efectivamente, la situación de LEBL es cercana a la saturación por problemas en la capacidad de las pistas y la gran demanda en periodos prolongados de tiempo.
- Mediante la implantación del método de relajación de puntas horarias a través de la bonificación de uso en horas valle, se ha podido relajar la situación del aeropuerto y, como efecto indirecto, ha sido posible abrir el poder operar a compañías interesadas que no pueden volar a Barcelona por las altas tasas genéricas. Además, se ha podido facilitar la situación a las compañías ya establecidas con los *slots*. Cabe destacar que la reducción de los retrasos y la demora también establece una mejora muy relevante de la situación medioambiental y los ruidos asociados a la operativa.
- Se han facilitados más medidas alternativas con las que se pueden contar para mejorar aún más la situación de saturación (ya sea mediante mejoras de capacidad, de gestión de demanda o ambas) en corto, medio y largo plazo.
- Se ha proporcionado un horizonte de mejora y una línea de investigación muy relevante aplicable no solo para el caso del aeropuerto de Barcelona sino con metodología aplicable de manera global.

### 5.1. Líneas futuras de investigación e innovación.

Ahondando un poco más en el último punto de las conclusiones facilitadas, se pueden encontrar diversas fuentes de inspiración para futuros estudios de investigación.

Una posible vía es la de la profundización en cuanto a la estandarización del método de relajación de puntas con bonificación de tasas para poder adaptarlo de una manera muy sencilla a la situación concreta de cada aeropuerto. Se podría intentar buscar un encaje normativo que permita su uso en el actual sistema administrativo.

Otro punto muy interesante a estudio, sería el de estudiar el impacto económico y medioambiental comparando periodos de tiempo equivalente con el método y sin él para ver cómo de beneficioso (o no) resulta para la operativa del aeropuerto.

En cuanto a los métodos alternativos, parece muy relevante la profundización de la adopción de la medida de considerar el tráfico como VMC en los momentos que sean posibles.

Por último, comentar que las posibilidades que abre este TFM son casi infinitas, pues la operativa aeroportuaria ofrece gran cantidad de elementos interconectados entre sí. Un último aspecto que se puede estudiar relacionado con el método desarrollado, es cómo afecta a la terminal el uso de estas medidas en cuanto a flujos de pasajeros.



## Referencias

- [1] Google Earth. “*Imágenes panorámicas*”. Versión: Octubre de 2023. URL: <https://www.google.com/intl/es/earth/>.
- [2] ENAIRE. “*AIP ESPAÑA*”. Versión: Octubre/Noviembre de 2023. URL: <https://aip.enaire.es/AIP/>.
- [3] AENA. “*Web de Datos de Aena*”. Versión: Octubre/Noviembre de 2023. URL: <https://www.aena.es/es/estadisticas/inicio.html>.
- [4] AENA-ENAIRES. “*ANEXO VIII: AIP. AEROPUERTO DE BARCELONA-EL PRAT*” Versión: Marzo de 2023. [https://aip.enaire.es/AIP/contenido\\_AIP/AD/AD2/LEBL/LE\\_AD\\_2\\_LEBL\\_en.pdf](https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LEBL/LE_AD_2_LEBL_en.pdf).
- [5] Barnhart, Fearing, Odoni y Vaze “*Demand and capacity management in air transportation*”. 1ª Edición (Año: 2012).
- [6] Loan Thanh Le “*DEMAND MANAGEMENT AT CONGESTED AIRPORTS: HOW FAR ARE WE FROM UTOPIA?*”. 1ª Edición (Año: 2006).
- [7] Guillen, Jacquillat y Odoni “*Airport demand management: The operations research and economics perspectives and potential synergies*”. 1ª Edición (Año: 2016).
- [8] Jacquillat y Odoni “*A roadmap toward airport demand and capacity management*”. 1ª Edición (Año: 2017).
- [9] Vaze y Barnhart “*An assessment of the impact of demand management strategies for efficient allocation of airport capacity*”. 1ª Edición (Año: 2012).
- [10] ENAIRE. “*AEROPUERTO JT BARCELONA-EL PRAT: ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN EN EL HORIZONTE PLAN DIRECTOR*”. Versión: 21 de Julio de 2021.
- [11] AENA. “*Futuro desarrollo del Aeropuerto Josep Tarradellas Barcelona El Prat*”. Versión: 8 de Julio de 2021.
- [12] EUROCONTROL. “*All-Causes Delays to Air Transport in Europe - Annual 2022*”. Versión: 21 de Marzo de 2023. <https://www.euroco>

ntrol.int/publication/all-causes-delays-air-transport-europe-annual-2022.

- [13] OACI. “*Planes Maestros y Capacidad aeroportuaria*”. Versión: 17 de Junio de 2023.
- [14] OACI. “*DEMANDA /CAPACIDAD EN LOS AEROPUERTOS*”. Versión: Marzo de 2006.
- [15] Ministerio de Fomento. “*Plan Director del aeropuerto de Josep Tarradellas Barcelona-El Prat*”. Versión: 22 de Octubre de 1999. <https://www.mitma.gob.es/areas-de-actividad/aviacion-civil/politicas-aeroportuarias/integracion-territorial-aeroportuaria/planes-directores/plan-director-del-aeropuerto-de-barcelona>.
- [16] Universidad Politécnica de Valencia: José María Mateu Céspedes. “*Políticas aeroportuarias y asignación de slots*”. Sin fecha de publicación.
- [17] El Economista. “*¿Es posible una pista sobre el mar para ampliar el Aeropuerto de Barcelona?*”. Versión: 14 de Febrero de 2023. <https://www.eleconomista.es/infraestructuras-servicios/noticias/12149544/02/23/Es-posible-una-pista-sobre-el-mar-para-ampliar-el-Aeropuerto-de-Barcelona.html>.
- [18] AENA “*Excel de datos para cálculo de busy day*”. 2019.
- [19] Airport technology. “*Optimised runway tool to improve efficiency at Heathrow*”. Versión: 28 de Marzo de 2018. <https://www.airport-technology.com/news/optimised-runway-tool-improve-efficiency-heathrow/?cf-view>.
- [20] Horonjeff, McKelvey, Sproule y Young. “*Planning and design of airports*”. Versión: Quinta entrega.
- [21] Federal Highway Administration. “*Congestion pricing*”. Versión: 11 de Febrero de 2022. [https://ops.fhwa.dot.gov/congestionpricing/cp\\_what\\_is.htm](https://ops.fhwa.dot.gov/congestionpricing/cp_what_is.htm).
- [22] André de Palma y Robin Lindsey. “*Traffic congestion pricing methodologies and technologies*”. Versión: Diciembre de 2011. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X11000362>.

- [23] Streetsblog NYC. “*The Congestion Pricing Toll Really Should Be 80 dollars*”. Versión: 27 de enero de 2022. <https://nyc.streetsblog.org/2022/01/27/opinion-the-congestion-pricing-toll-really-should-be-80>.



# Anexo

### A. Datos en bruto de operaciones horarias en el busy day.

HORAS	LLEGADAS	SALIDAS	TOTALES	LLEGADAS C	SALIDAS C	TOTALES C
0	4	1	5	4	1	5
1	1	0	1	1	0	1
2	4	4	8	4	4	8
3	6	4	10	6	4	10
4	3	33	36	3	33	36
5	15	38	53	15	35	50
6	33	22	55	33	25	58
7	33	30	63	33	30	63
8	32	28	60	32	28	60
9	33	35	68	33	35	68
10	35	40	75	33	35	68
11	26	29	55	28	32	60
12	34	27	61	33	29	62
13	23	32	55	24	32	56
14	22	27	49	22	27	49
15	30	24	54	30	24	54
16	31	34	65	31	34	65
17	34	25	59	33	25	58
18	29	38	67	30	35	65
19	34	32	66	33	33	66
20	31	27	58	32	29	61
21	22	11	33	22	11	33
22	30	3	33	30	3	33
23	3	2	5	3	2	5
	548	546	1094	548	546	1094

## B. Datos en bruto de operaciones horarias en el día de mayor tráfico del año.

HORAS	LLEGADAS	SALIDAS	TOTALES	LLEGADAS C	SALIDAS C	TOTALES C
0	4	1	5	4	1	5
1	1	0	1	1	0	1
2	2	1	3	2	1	3
3	3	4	7	3	4	7
4	8	27	35	8	28	36
5	9	36	45	9	35	44
6	33	30	63	33	30	63
7	28	28	56	32	28	60
8	37	27	64	34	27	61
9	39	30	69	34	32	66
10	30	37	67	34	35	69
11	34	37	71	32	35	67
12	27	41	68	29	35	64
13	29	34	63	29	35	64
14	28	31	59	28	34	62
15	31	27	58	32	31	63
16	34	28	62	33	28	61
17	36	35	71	34	35	69
18	36	33	69	34	33	67
19	34	35	69	33	35	68
20	23	32	55	28	32	60
21	23	9	32	23	9	32
22	28	6	34	28	6	34
23	14	2	16	14	2	16
	571	571	1142	571	571	1142