

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería Aeroespacial

Estimación de Incertidumbres en Trayectorias a partir de Datos de DDR

Autora: Paula Santiago Garrido

Tutor: Alfonso Valenzuela Romero

Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Aeroespacial

Estimación de Incertidumbres en Trayectorias a partir de Datos de DDR

Autora:

Paula Santiago Garrido

Tutor:

Alfonso Valenzuela Romero

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Grado: Estimación de Incertidumbres en Trayectorias a partir de Datos de DDR

Autora: Paula Santiago Garrido

Tutor: Alfonso Valenzuela Romero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

A mi familia

*A los que no permitieron que
dejara de creer en mí*

Agradecimientos

Me gustaría agradecer en primer lugar a mi tutor, Alfonso Valenzuela, el tiempo dedicado y el haberme dado la oportunidad de trabajar con él, transmitiéndome sus conocimientos. Agradecerle también su apoyo y sus palabras en momentos en que se necesitaban.

A mis padres, por confiar y creer en mí y por los valores y principios que me han inculcado. Por haberme dedicado todo su tiempo, esfuerzo y recursos para brindarme la mejor forma posible de afrontar la vida.

Y a mi otra familia, los que siempre han estado animándome a seguir adelante en este proceso de aprendizaje, pero también, de superación personal.

Resumen

El objetivo de este proyecto es analizar el comportamiento de los vuelos europeos a partir de los datos proporcionados por EUROCONTROL, en particular, desde el punto de vista de los retrasos. Para ello, se analizará cómo EUROCONTROL entiende y modela los retrasos y, a partir de los datos proporcionados a través de la base de datos Demand Data Repository (DDR), se estudiarán los retrasos de los vuelos en un día concreto elegido, el 9 de septiembre de 2016. Posteriormente, se intentarán explicar las causas de los mismos, atendiendo a las categorías de usuarios y los horarios y los aeropuertos de operación.

Finalmente, se observará en los resultados obtenidos que hay ciertas tendencias estadísticas según el tipo de vuelo que se esté estudiando. Al final del documento, se darán pautas sobre cómo profundizar estos análisis en futuros trabajos.

Abstract

The objective of this project is to analyse European flights performance, based on the data provided by EUROCONTROL, in particular, from the point of view of delays. To do so, it will analyse how EUROCONTROL understands and models delays and, based on the data provided through the Demand Data Repository (DDR) database, flight delays on a specific day chosen, September 9, 2016, will be studied. Subsequently, an attempt will be made to explain the causes of the same, attending to the categories of users and the operation schedules and airports.

Finally, it will be observed in the results obtained that there are certain statistical trends according to the type of flight under study. At the end of the paper, guidelines will be given on how to deepen these analyses in future works.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 Introducción	21
1.1 Motivación	21
1.2 Objetivos.....	21
1.3 Metodología.....	21
1.4 Estructura del documento.....	22
2 Análisis de los retrasos según EUROCONTROL.....	25
2.1 Introducción	25
2.2 Análisis de los retrasos según EUROCONTROL.....	27
2.2.1 Definición y medida de los retrasos	27
2.2.2 Causas de los retrasos	27
2.3 Análisis de los retrasos en el año 2016.....	29
2.3.1 Media de retraso del año 2016	29
2.3.2 Septiembre de 2016	32
3 Introducción a las trayectorias DDR.....	33
4 Caracterización de los retrasos	37
4.1 Trayectorias proporcionadas por DDR.....	37
4.2 Estudio de la duración de los vuelos.....	39
4.3 Estudio de las diferencias de tiempos de despegue y aterrizaje	41
4.4 Estudio de los casos extremos	44
5 Estudio de los retrasos según los segmentos de mercado	49
5.1 Estudio en dos grupos de vuelos: regular de pasajeros y resto (de negocios, militares, carga y chárter).....	49
5.1.1 Grupo 1 – Regular de pasajeros.....	52
5.1.1.1 Estudio de la duración de los vuelos	52
5.1.1.2 Estudio de las diferencias de tiempos de despegue y aterrizaje	53
5.1.2 Grupo 2 – Resto de vuelos	55
5.1.2.1 Estudio de la duración de los vuelos	55
5.1.2.2 Estudio de las diferencias de tiempos de despegue y aterrizaje	56
5.1.3 Resumen y comparativa.....	58
5.2 Estudio en dos subgrupos de vuelos: regular tradicional y low-cost.....	60
5.2.1 Subgrupo 1.1 – Regular tradicional	60
5.2.1.1 Estudio de la duración de los vuelos	60
5.2.1.2 Estudio de las diferencias de tiempos de despegue y aterrizaje	61

5.2.2	Subgrupo 1.2 – Low-cost	63
5.2.2.1	Estudio de la duración de los vuelos.....	63
5.2.2.2	Estudio de las diferencias de tiempos de despegue y aterrizaje	64
5.2.3	Resumen y comparativa	66
6	Estudio de las desviaciones	71
6.1	<i>Introducción</i>	71
6.2	<i>Primer análisis: los horarios de operación.....</i>	72
6.3	<i>Segundo análisis: los aeropuertos de operación.....</i>	75
6.4	<i>Tercer análisis: la capacidad para absorber los retrasos en vuelo.....</i>	77
7	Ajuste de distribuciones de probabilidad a las desviaciones	81
8	Conclusiones	87
9	Referencias	91
Anexo	93
A.1	<i>Máximos aumentos en la duración de los vuelos.....</i>	93
A.2	<i>Máximos recortes en la duración de los vuelos</i>	97
A.3	<i>Máximos retrasos en el despegue (real-inicial)</i>	101
A.4	<i>Máximos retrasos en el aterrizaje (real-inicial).....</i>	105
A.5	<i>Máximos adelantos en el despegue (real-inicial)</i>	108
A.6	<i>Máximos adelantos en el aterrizaje (real-inicial).....</i>	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Campos de los archivos de NEST tipo .so6 [6]	38
Tabla 2. Indicadores para análisis de duración de vuelos real-inicial	40
Tabla 3. Indicadores para análisis de retrasos de vuelos real-inicial	42
Tabla 4. Máximos aumentos en la duración de los vuelos	45
Tabla 5. Máximos recortes en la duración de los vuelos	46
Tabla 6. Máximos retrasos en los despegues	46
Tabla 7. Máximos retrasos en los aterrizajes	47
Tabla 8. Máximos adelantos en los despegues	47
Tabla 9. Máximos adelantos en los aterrizajes	48
Tabla 10. Indicadores para análisis de duración de vuelos real-inicial, grupo 1	53
Tabla 11. Indicadores para análisis de retrasos de vuelos real-inicial, grupo 1	54
Tabla 12. Indicadores para análisis de duración de vuelos real-inicial, grupo 2	56
Tabla 13. Indicadores para análisis de retrasos de vuelos real-inicial, grupo 2	57
Tabla 14. Indicadores para análisis de duración de vuelos real-inicial, total, grupo 1 y grupo 2	58
Tabla 15. Indicadores para análisis de retrasos de vuelos real-inicial, total, grupo 1 y grupo 2	59
Tabla 16. Indicadores para análisis de duración de vuelos real-inicial, subgrupo regular tradicional	61
Tabla 17. Indicadores para análisis de retrasos de vuelos real-inicial, subgrupo regular tradicional	62
Tabla 18. Indicadores para análisis de duración de vuelos real-inicial, subgrupo low-cost	64
Tabla 19. Indicadores para análisis de retrasos de vuelos real-inicial, subgrupo low-cost	65
Tabla 20. Indicadores para análisis de duración de vuelos real-inicial, grupo 1, subgrupo 1.1 y subgrupo 1.2	66
Tabla 21. Indicadores para análisis de retrasos de vuelos real-inicial, grupo 1, subgrupo 1.1 y subgrupo 1.2	67
Tabla 22. Indicadores obtenidos para los aeropuertos estudiados	76
Tabla 23. Porcentaje de vuelos con absorción y DDI-F para vuelos regulares tradicionales y low-cost	79
Tabla 24. Distribuciones, parámetros característicos y log-likelihood para la duración de vuelos (real-inicial)	83
Tabla 25. Distribuciones, parámetros característicos y log-likelihood para los despegues (real-inicial)	84
Tabla 26. Distribuciones, parámetros característicos y log-likelihood para los aterrizajes (real-inicial)	84
Tabla 27. Distribuciones, parámetros característicos y log-likelihood para los despegues (real-regulado)	85
Tabla 28. Distribuciones, parámetros característicos y log-likelihood para los aterrizajes (real-regulado)	86
Tabla 29. Valores extremos de diferencias en la duración de los vuelos	93
Tabla 30. Valores extremos de diferencias en los despegues	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Territorio abarcado por la ECAC	26
Figura 2. Clasificación de vuelos por segmento de mercado en 2016	26
Figura 3. Causas primarias de los retrasos	28
Figura 4. Relación entre las diferentes causas de retrasos del NM con los códigos de IATA	29
Figura 5. Puntualidad en las salidas en 2016 vs 2015	30
Figura 6. Puntualidad en las llegadas en 2016 vs 2015	30
Figura 7. Principales causas y retrasos medios en 2016 vs 2015	31
Figura 8. Retraso en las causas primarias en 2016 vs 2015	31
Figura 9. Retrasos por horas reportados por las aerolíneas en 2016	32
Figura 10. Comparación de las trayectorias CTFM, CPF y ADS-B para el vuelo SWR563, desde LFMN (Niza, Francia) hasta LSZH (Zurich, Suiza), el 15-07-2017	34
Figura 11. Comparación de las trayectorias CTFM, CPF y ADS-B para el vuelo SWR563, desde LFMN (Niza, Francia) hasta LSZH (Zurich, Suiza), el 15-07-2017	35
Figura 12. Mapa de recepción de CPRs – mayo de 2017	36
Figura 13. Histograma de diferencia de duración de vuelos real-inicial	40
Figura 14. Percentiles de diferencia de duración de vuelos real-inicial	40
Figura 15. Histograma de diferencia de duración de vuelos real-inicial sin ajustar	41
Figura 16. Comparación de distribución normal y distribución de diferencias de duración de vuelos	41
Figura 17. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial	42
Figura 18. Histograma de retrasos en el aterrizaje de vuelos real-inicial	42
Figura 19. Percentiles de diferencia de tiempos en el despegue de vuelos real-inicial	43
Figura 20. Percentiles de diferencia de tiempos en el aterrizaje de vuelos real-inicial	43
Figura 21. Extracto de la lista de aerolíneas clasificadas	50
Figura 22. Extracto de la lista de vuelos clasificados que se exporta a Matlab	50
Figura 23. Extracto de la lista de aeronaves tipo business según STATFOR 2016	51
Figura 24. Extracto de la lista de operadores, aeronaves y call sign tipo de carga según STATFOR 2016	51
Figura 25. Histograma de diferencia de duración de vuelos real-inicial, grupo 1	53
Figura 26. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial, grupo 1	54
Figura 27. Histograma de retrasos en el aterrizaje de vuelos real-inicial, grupo 1	54
Figura 28. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial, grupo 1, editado	55
Figura 29. Histograma de diferencia de duración de vuelos real-inicial, grupo 2	56
Figura 30. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial, grupo 2	57
Figura 31. Histograma de retrasos en el aterrizaje de vuelos real-inicial, grupo 2	57
Figura 32. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial, grupo 2, editado	58
Figura 33. Extracto de la lista de operadores tipo low-cost según STATFOR 2016	60

Figura 34. Histograma de diferencia de duración de vuelos real-inicial, subgrupo regular tradicional	61
Figura 35. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial, subgrupo regular tradicional	62
Figura 36. Histograma de retrasos en el aterrizaje de vuelos real-inicial, subgrupo regular tradicional	62
Figura 37. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial, subgrupo regular tradicional, editado	63
Figura 38. Histograma de diferencia de duración de vuelos real-inicial, subgrupo low-cost	64
Figura 39. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial, subgrupo low-cost	65
Figura 40. Histograma de retrasos en el aterrizaje de vuelos real-inicial, subgrupo low-cost	65
Figura 41. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial, subgrupo low-cost	66
Figura 42. Comparación de distribución de retrasos de vuelos low-cost con distribución normal	68
Figura 43. Resumen de los valores de desviación estándar en despegues tras la clasificación de los vuelos	68
Figura 44. Resumen de los valores de desviación estándar en aterrizajes tras la clasificación de los vuelos	69
Figura 45. Despegues low-cost por horas	73
Figura 46. Desviaciones despegues low-cost por horas	73
Figura 47. Despegues regular tradicional por horas	73
Figura 48. Desviaciones despegues regular tradicional por horas	73
Figura 49. Aterrizajes low-cost por horas	74
Figura 50. Desviaciones aterrizajes low-cost por horas	74
Figura 51. Aterrizajes regular tradicional por horas	74
Figura 52. Desviaciones aterrizajes regular tradicional por horas	74
Figura 53. Ratio de despegues low-cost frente a regulares tradicionales	74
Figura 54. Ratio de aterrizajes low-cost frente a regulares tradicionales	74
Figura 55. Gráfico de dispersión: diferencia de tiempos de despegue vs diferencia de tiempos de aterrizaje	78
Figura 56. Gráfico de dispersión: diferencia de duración de los vuelos vs diferencia de tiempos de despegue	79
Figura 57. Comparación de distribuciones candidatas y distribución de diferencias de duración de todos los vuelos (real-inicial)	82
Figura 58. Comparación de distribuciones candidatas y distribución de desviaciones en los aterrizajes (real-inicial)	85
Figura 59. Datos vuelo con la sexta máxima diferencia de duración de vuelo, trayectoria inicial	96
Figura 60. Datos vuelo con la sexta máxima diferencia de duración de vuelo, trayectoria real	96
Figura 61. Datos vuelo con el sexto máximo retraso en el despegue, trayectoria inicial	99
Figura 62. Datos vuelo con el sexto máximo retraso en el despegue, trayectoria regulada	99
Figura 63. Datos vuelo con el sexto máximo retraso en el despegue, trayectoria real	100
Figura 64. Datos vuelo con máximo retraso en el despegue, trayectoria inicial	102
Figura 65. Datos vuelo con máximo retraso en el despegue, trayectoria real	102

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El tráfico aéreo se comporta de manera compleja. El comportamiento de los vuelos es muy variado y difícil de predecir debido a la multitud de factores que afectan a las operaciones, como decisiones individuales, fallos técnicos, meteorología, etc. Así, una mejor comprensión del comportamiento del tráfico permite una mejor predicción e identificación de los problemas a los que éste se enfrenta y de posibles soluciones. A su vez, una mejor predicción lleva a un mejor uso de los recursos, aumentando la eficiencia del sistema.

Una de las claves del comportamiento, que impacta directamente en la eficiencia, son los retrasos. Para estudiarlos, la Unidad de Evaluación del Rendimiento (Performance Review Unit, PRU) de EUROCONTROL combina los datos del Sistema de Vigilancia Dependiente Automática - Difusión (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B), del Informe de Posición Correlacionada (CPR¹) y de los aeropuertos para definir un conjunto común de datos, en particular trayectorias de vuelo, para la revisión de las actuaciones operacionales.

A partir de estos datos, EUROCONTROL estudia los retrasos a través de la Oficina Central para el Análisis de los Retrasos (Central Office for Delay Analysis, CODA), que ofrece a los responsables políticos y a los gerentes del sistema de transporte aéreo del área ECAC (o, en español, Conferencia Europea de Aviación Civil, CEAC), información oportuna, confiable y completa sobre la situación de la demora del tránsito aéreo en Europa.

Las principales tareas de la CODA involucran:

- recopilación de datos de una amplia variedad de proveedores de datos,
- validación de datos para garantizar que la base de datos CODA no produzca resultados cuestionables,
- comprobaciones de validez tales como integridad y consistencia de los datos en comparación con lo que ya está en CODA (por ejemplo, información de vuelo duplicada),
- análisis de retraso soportado por software,
- generación de informes a través de verificación, análisis, formateo y sinopsis y
- provisión de una interfaz de acceso a Internet para datos y análisis.

CODA proporciona información sobre todas las causas de demora una semana después del final de cada mes. Además de las estadísticas y los informes basados en los datos de vuelo del Network Manager (EUROCONTROL), incorpora datos operacionales recibidos de varios operadores. Primero, estos datos deben cargarse en la base de datos CODA (solo los datos que se pueden comparar con éxito con la información de vuelo del NM se moverán a las tablas CODA reales) y luego se agregan para que se puedan consultar.

En los informes de CODA aparecen resultados agregados y estadísticos simples; en este documento, se va a profundizar en los análisis presentados, mostrando más variedad de estadísticos y segregando en categorías de usuarios y horarios y aeropuertos de operación.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es el análisis del comportamiento de los vuelos europeos a partir de los datos proporcionados por EUROCONTROL. Así, el objetivo es estudiar y caracterizar los vuelos y sus retrasos.

1.3 Metodología

Para cumplir con el objetivo propuesto, se necesitará primero realizar una introducción teórica para entender cómo EUROCONTROL modela las trayectorias de los vuelos, así como los retrasos de los mismos. También

¹ El CPR (Correlated Position Report) es un informe de radar de posición dado por el servicio de control del tráfico aéreo que contiene información sobre el vuelo al que está asociado dicho informe.

será necesario conocer cómo EUROCONTROL proporciona estos datos y cómo se deben utilizar.

Además, se requerirá conocer los vuelos y sus retrasos en el período de tiempo de estudio que se va a considerar en este trabajo. Debido al volumen de datos, se va a analizar únicamente un día; concretamente, el 9 de septiembre de 2016, de forma que la extensión a más días sería directa. Este día será el día de referencia para todos los resultados obtenidos. Esta fecha se ha escogido porque el año 2016 es el último año del que se disponía de datos de vuelos completos descargables (en el momento de la realización de este trabajo) y el día 9 de septiembre fue el día de mayor número de vuelos en Europa en ese año.

A toda esta información se podía acceder a través del Demand Data Repository (DDR), a través a su vez de la herramienta NEST (Herramienta Estratégica de Red), hasta el año 2019, una base de datos facilitada por EUROCONTROL. EUROCONTROL, al final de cada ciclo AIRAC (28 días), publicaba información sobre los espacios aéreos, redes de rutas, distribuciones de demanda y de tráfico, así como las previsiones de tráfico STATFOR². Más concretamente, el DDR proporcionaba lo siguiente [2]:

- Datos anteriores de tráfico: se centran en las trayectorias de planes de vuelo y trayectorias reales desde agosto de 2012 hasta la fecha actual; se usan para análisis pasados.
- Datos del entorno anteriores y previos a las operaciones: contienen toda la información necesaria para analizar y procesar cargas en sectores, capacidad de cuellos de botella, opciones de redireccionamiento, etc. Se usan para procesar trayectorias de tráfico futuras.
- Previsiones estratégicas de tráfico: cubren la fase de planificación, desde 18 meses a 7 días antes de las operaciones. Se usan para planificar la capacidad estacional y a medio-corto plazo. Se pueden descargar estos pronósticos, así como diversas opciones de procesamiento de trayectorias 4D.
- Previsiones de tráfico pre-tácticas: se basan en la fase de planificación, desde 6 días a 1 día antes de las operaciones. La planificación pre-táctica de la red corre a cargo del sistema NM ETFMS PREDICT.
- Herramientas NEST y SAAM: analizan y procesan una gran cantidad de información para facilitar el diseño del espacio aéreo y la capacidad en Europa. Son compatibles con los datos de DDR.
- Uso de DCT: por cada ciclo AIRAC, se prepara un informe específico con todos los DCTs europeos (rutas directas) y su uso o desuso por parte de las aerolíneas en el plan de vuelo.
- Mapeo DCT: es una aplicación independiente, contenida en DDR2, que muestra en un mapa una gran cantidad de datos del entorno, como aeropuertos, sectores, DCT, rutas, etc. En próximas versiones, se proporcionará también información sobre las áreas de ruta libre y los puntos de entrada y salida de dicha ruta.

Después, se analizarán, a partir de los datos extraídos de NEST, los retrasos de los vuelos y se intentarán explicar las causas de los mismos, atendiendo a las categorías de usuarios y los horarios y los aeropuertos de operación.

Por último, se hará una introducción al ajuste de distribuciones de probabilidad a las desviaciones de la duración, el despegue y el aterrizaje de los vuelos a partir de los datos obtenidos a lo largo de este trabajo.

1.4 Estructura del documento

El estudio desarrollado en este documento se divide, incluyendo la introducción desarrollada en el presente capítulo, en ocho capítulos principales más un anexo.

En el capítulo 2, “Análisis de los retrasos según Eurocontrol”, se explica cómo EUROCONTROL entiende y modela los retrasos y se exponen los datos oficiales de retrasos del año 2016.

En el capítulo 3, “Introducción a las trayectorias DDR”, se realiza una introducción a la definición de las trayectorias de referencia que utiliza EUROCONTROL hoy en día para la revisión de las actuaciones operacionales, analizando sus características y de qué manera se ha llegado a ellas.

En el capítulo 4, “Caracterización de los retrasos”, se expone una introducción en la que se explica cómo se han

² STATFOR (Statistics and Forecast Service) proporciona estadísticas y previsiones sobre el tráfico aéreo en Europa y supervisa y analiza la evolución de la industria del transporte aéreo.

procesado los datos del DDR a través de NEST y, después, se estudian las trayectorias de las aeronaves el día de estudio considerado mediante varios análisis: duración de los vuelos, retrasos y casos extremos encontrados.

En el capítulo 5, “Estudio de los retrasos según los segmentos de mercado”, se estudian los retrasos dividiendo los vuelos en varios grupos según los segmentos de mercado definidos por EUROCONTROL.

En el capítulo 6, “Estudio de las desviaciones”, se profundiza en el estudio de las desviaciones para así intentar comprender la causa de la diferencia en las desviaciones encontradas en capítulos anteriores.

En el capítulo 7, “Ajuste de distribuciones de probabilidad a las desviaciones”, se realiza una introducción al ajuste de distribuciones de probabilidad a las desviaciones de la duración, el despegue y el aterrizaje de los vuelos a partir de los datos obtenidos a lo largo de este trabajo.

Por último, en el capítulo 8, “Conclusiones”, se resumen y discuten los resultados obtenidos más llamativos.

Al final de este documento se presenta un anexo, en el que se describe con detalle el estudio de los casos de máximos retrasos y adelantos, además de máximas diferencias en las duraciones de vuelo, para intentar explicar a qué se deben ciertos valores que, a priori, podrían ser anómalos. De este modo, se pretende facilitar la lectura del documento principal al lector y servir este anexo de consulta y de guía para conocer cómo se puede utilizar NEST para extraer información de los archivos .so6 publicados.

2 ANÁLISIS DE LOS RETRASOS SEGÚN EUROCONTROL

En este capítulo, se explica cómo EUROCONTROL entiende y modela los retrasos y se exponen los datos oficiales de retrasos del año 2016. Más concretamente, se detalla el mes de septiembre, ya que, como se explicó en el capítulo primero, el 9 de septiembre de 2016 es el día escogido para el estudio de este trabajo.

2.1 Introducción

Antes de clasificar los retrasos, es importante tener una mejor percepción de los vuelos de los diferentes operadores y sus necesidades, ver cómo operan y cómo se comportan en términos operacionales, económicos y políticos. Así, STATFOR ha definido diferentes segmentos de mercado de tráfico aéreo. Esta categorización se ha establecido a lo largo de los últimos años en el sector de la aviación y es comúnmente usada en informes y análisis de operaciones.

Las previsiones de tráfico de STATFOR se utilizan como entradas directas en el NSP y NOP³. Estas previsiones constituyen también un requisito previo para el establecimiento de las tasas unitarias utilizadas para calcular la ruta y los cargos de la terminal. Las previsiones de tráfico también son utilizadas por un gran número de departamentos de planificación de líneas aéreas, ANSPs⁴, aeropuertos, autoridades gubernamentales, etc.

Así, basándose en las respuestas a las preguntas “cuándo, dónde y por qué vuelan” y a “qué transportan”, STATFOR establece que los vuelos IFR (o Reglas de Vuelo Instrumental) se pueden agrupar en siete categorías:

- De negocios: vuelos listados por STATFOR que operan con un tipo de denominación de aeronave específica, así como marcados por la OACI como tipo “G”.
- Low-cost: vuelos listados por STATFOR en la lista de operadores low-cost y/o en la lista de aeropuertos de llegada o salida marcados como low-cost.
- Regulares tradicionales: vuelos marcados por OACI como tipo de vuelo “S”, excluyendo aquellos vuelos que encajen en otra categoría.
- Chárter: vuelos marcados por OACI como tipo de vuelo “N” que no están incluidos en el segmento de aviación de negocios.
- Militares IFR: vuelos con un tipo de aeronave u operador específicos o marcados por la OACI como tipo de vuelo “M”.
- Carga: vuelos con un tipo de aeronave, call sign y/o operador específico asociado a las operaciones de carga.
- Otros: todos los vuelos IFR que no encajen en ninguno de los segmentos anteriormente mencionados.

Esta categorización, aunque no es perfecta, ya que hay diferentes puntos de vista sobre cómo deberían agruparse los vuelos, es necesaria para estudiar los segmentos a lo largo del tiempo y así poder comparar entre ellos y entender mejor el comportamiento de los vuelos.

Es de utilidad recordar que la ECAC es una organización internacional que fue establecida en 1954 por la OACI y el Consejo de Europa y cuyo principal objetivo es el de promover un desarrollo continuo, seguro, eficiente y sostenible del sistema de transporte europeo. Actualmente lo forman 44 miembros y el territorio que abarca (en el momento del estudio) se puede observar en la Figura 1.

³ Una de las tareas de EUROCONTROL como Gestor de la Red (NM) es desarrollar, mantener e implementar el Plan Estratégico de Red (Network Strategy Plan, NSP), que es la herramienta estratégica para la gestión de la red ATM europea. El NSP define los objetivos operacionales necesarios para lograr los niveles requeridos de desempeño ATM. Las acciones y proyectos derivados del NSP se describen en detalle en el Plan de Operaciones de la Red (Network Operations Plan, NOP).

⁴Según EUROCONTROL, un Proveedor de Servicios de Navegación Aérea (Air Navigation Service Provider, ANSP), es una organización que presta el servicio de gestionar la aeronave en vuelo o en el área de maniobras y que es el legítimo titular de esa responsabilidad.

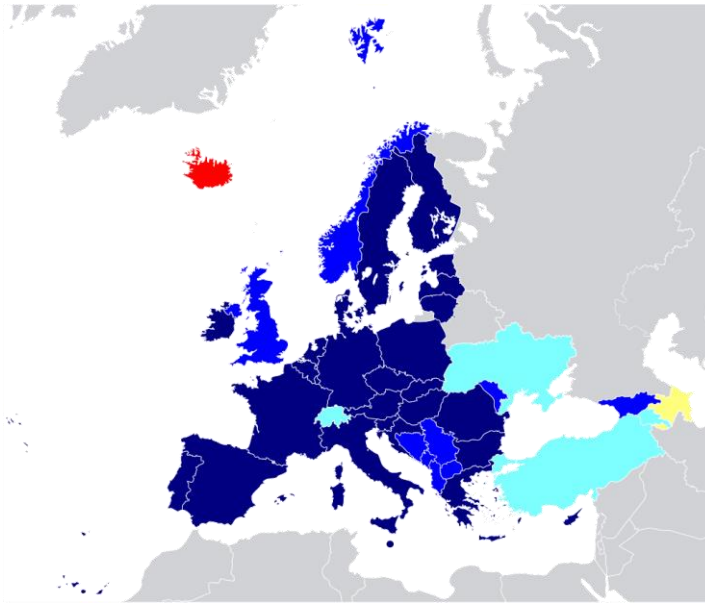


Figura 1. Territorio abarcado por la ECAC

En los últimos años y hasta el año considerado en este estudio, la tendencia observada en el territorio ECAC es [2]:

- Aumento del porcentaje de vuelos low-cost en 7 puntos: de un 23% en 2010 a un 30% en 2016.
- Pérdida de 3 puntos en vuelos regulares tradicionales: de un 56 % en 2010 a un 53% en 2016.
- Pérdida de 3 puntos en vuelos chárter: de un 6% en 2010 a un 3% en 2016.

Así, según STATFOR y como se puede observar en la Figura 2, en el 2016 hubo en la ECAC 10.197.000 vuelos, lo que corresponde a un aumento del 2.5 % de media diario con respecto a 2015 y llegando a alcanzar valores cercanos a los de 2008. De ellos, 5379000 vuelos fueron regulares tradicionales (subida del 2.1 % con respecto al año anterior), 3071000 low-cost (subida del 7.5 %), 681000 de negocios (bajada del 0.5 %), 346000 chárter (bajada del 15.3 %), 314000 de carga (subida del 1.6 %) y 406000 vuelos de otras categorías, incluyendo vuelos no clasificados y militares (bajada del 4.3 %). Este pequeño aumento en el número de vuelos con respecto al año anterior se produjo principalmente por las aerolíneas low-cost y el bajo precio del petróleo durante el año, además de un crecimiento económico estable, aunque pequeño. En el día de estudio considerado, el 9 de septiembre de 2016, hubo 35703 vuelos.

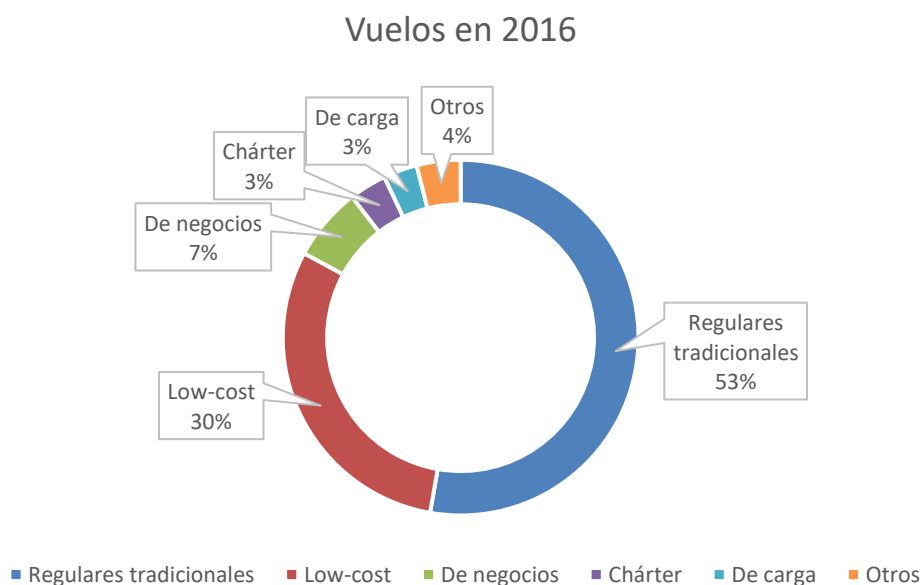


Figura 2. Clasificación de vuelos por segmento de mercado en 2016

2.2 Análisis de los retrasos según EUROCONTROL

2.2.1 Definición y medida de los retrasos

Según EUROCONTROL, un retraso es el intervalo de tiempo que existe cuando un evento no sucede en el tiempo en que estaba planificado, pudiendo ser positivo (el avión se retrasa) o negativo (el avión se adelanta).

Como se introdujo en el capítulo primero, EUROCONTROL estudia los retrasos a través de la CODA. Se pueden definir diferentes retrasos según los eventos que se estén comparando o si se trata de la fase de llegada o de salida. Así, según la CODA, las aerolíneas y los aeropuertos están sobre todo interesados en el retraso experimentado por el pasajero, al que se denomina retraso “all-causes”, y los ANSPs y el NM fijan su interés en solamente una parte de estos retrasos, el retraso ATFM⁵.

Estos retrasos se miden de forma diferente y hay muchos términos operacionales para calcularlos. En el caso de las salidas, el retraso “all-causes” se calcula como la diferencia entre el STD (Scheduled Time of Departure) y el AOBT (Actual Off-Block Time).⁶ Por otro lado, el retraso en salida ATFM se calcula como la diferencia entre el ETOT (Estimated Take-Off Time) y el CTOT (Calculated Take-Off Time), asignado por el NM.⁷ De forma similar se calculan los retrasos en las llegadas, siendo el retraso “all-causes” la diferencia entre el STA (Scheduled Time of Arrival) y el AIBT (Actual In-Block Time) y el retraso ATFM la diferencia entre el ELDT (Estimated Landing Time) y el CLDT (Calculated Landing Time). [2]

Este inciso en el cálculo de los retrasos “all-causes” y los ATFM es importante, ya que una vez se tengan a disposición los datos proporcionados por EUROCONTROL, es necesario saber de qué retrasos se está hablando y cómo se han calculado. De hecho, puede haber diferencias importantes entre ambos para un mismo vuelo (por ejemplo, de 80 minutos de diferencia) y esto se va a hacer notar a lo largo de este trabajo.

2.2.2 Causas de los retrasos

La CODA distingue dos grandes grupos de causas de retrasos: causas primarias y causas tipo *reactionary*, que se llamarán, en español, “retrasos en cadena”. Los retrasos en cadena son aquellos causados por la llegada con retraso de aeronaves, tripulación, pasajeros o equipajes de viajes anteriores. Más detalladamente, estos retrasos abarcan los retrasos provocados por los siguientes elementos [3]:

- *Load Connection*: espera de la carga de otro vuelo.
- *Through Check-in Error*: espera de pasajeros y equipaje de otro vuelo.
- *Aircraft Rotation*: llegada en retraso de la aeronave de otro vuelo o de la etapa anterior.
- *Cabin Crew Rotation*: espera de la tripulación de cabina de otro vuelo.
- *Crew Rotation*: espera de la tripulación de otro vuelo (de la cabina de mando o de toda la tripulación).
- *Operations Control*: cambio de rutas, desvíos o cambio de aeronave por razones que no sean técnicas.

Normalmente, se dividen todos estos tipos de retrasos en cadena en 2 grupos más generales:

- Retraso en cadena rotacional: los retrasos son resultado del mismo avión que causa retrasos en su próximo vuelo.
- Retraso en cadena no rotacional: un avión se retrasa como resultado de otro avión ya sea por los pasajeros, la tripulación o la espera de la carga de otro vuelo.

Según la CODA, en 2016 aproximadamente el 90% de los retrasos en cadena fueron tipo rotacional, por lo que fueron los que más afectaron al rendimiento de la red y a la experiencia del pasajero; así, a lo largo de este

⁵ El ATFM (Air Traffic Flow Management) es un servicio establecido por EUROCONTROL con el objetivo de contribuir a establecer un flujo seguro, ordenado y rápido del tránsito aéreo.

⁶ El STD es el tiempo de salida programado (Scheduled Time of Departure) y no es un término usado en el entorno operacional. Es un término usado más bien en el lado de los pasajeros y es el tiempo en el que el avión tiene programada la salida desde la puerta de salida; de hecho, es prácticamente idéntico al SOBT (Scheduled Off Block Time), que es el tiempo programado en el que el avión deja su posición de parking. El AOBT (Actual Of Block Time) es el tiempo real en que el avión deja la posición de parking para su salida.

⁷ El EOBT (Estimated Off Block Time) es el tiempo estimado en el que el avión comenzará el movimiento asociado con la salida y es el que aparece en el plan de vuelo. El EXOT (Estimated Taxi-Out Time) es el tiempo estimado entre el off-block y el despegue. El ETOT (Estimated Take Off Time) es una estimación del tiempo en el que el avión estará en el aire, teniendo en cuenta el EOBT más el EXOT. El ETOT se transformará en el CTOT (Calculated Take Off Time), que es el tiempo de despegue calculado y asignado por la CFMU (Central Flow Management Unit), como resultado de la asignación de franjas horarias tácticas.

documento se darán datos referidos a este tipo de retrasos cuando se hable de retrasos en cadena.

Por otro lado, dentro del grupo de causas primarias se encuentran las aerolíneas, los aeropuertos, en ruta, gubernamental, de tiempo y otras causas variadas. Una descripción más detallada de estos retrasos se puede ver en la Figura 3.

	CODA CAUSE	Description	IATA Code
Primary Delay Causes	Airline	Passenger and Baggage	11-19
		Cargo and Mail	21-29
		Aircraft and Ramp Handling	31-39
		Technical and Aircraft Equipment	41-48
		Damage to Aircraft & EDP/Automated Equipment Failure	51-58
		Flight Operations and Crewing	61-69
		Other Airline Related Causes	Others
	Airport	ATFM due to Restriction at Destination Airport	83
		Airport Facilities	87
		Restrictions at Airport of Destination	88
		Restrictions at Airport of Departure	89
	En-Route	ATFM due to ATC En-Route Demand / Capacity	81
		ATFM due to ATC Staff / Equipment En-Route	82
	Governmental	Security and Immigration	85-86
	Weather	Weather (other than ATFM)	71-77
		ATFM due to Weather at Destination	84
	Miscellaneous	Miscellaneous	98-99
	Reactionary	Late Arrival of Aircraft, Crew, Passengers or Load	91-96

Figura 3. Causas primarias de los retrasos

En esta imagen, se puede observar que las diferentes causas de los retrasos están asociadas a códigos estándar de retraso de IATA. En la siguiente figura, se muestra con más detalle la relación entre las diferentes causas de regulación del NM con estos códigos de IATA, a los que se hará alusión más adelante.

Correlation between IATA Delay Codes and the NM Regulation Reasons					
Regulation cause		CODE	Regulation Location	NM	IATA
				GUIDELINES	Delay Cause
ATC capacity	C	D	En Route: Demand exceeds or complexity reduces declared or expected ATC capacity Airport: Demand exceeds declared or expected ATC capacity.	89	RESTRICTIONS AT AIRPORT OF DEPARTURE
		E		81	ATFM due to ATC ENROUTE DEMAND / CAPACITY
		A		83	ATFM due to RESTRICTION AT DESTINATION AIRPORT
ATC industrial action	I	D	Reduction in any capacity due to industrial action by ATC staff	89	RESTRICTIONS AT AIRPORT OF DEPARTURE
		E		82	ATFM due to ATC STAFF / EQUIPMENT ENROUTE
		A		83	ATFM due to RESTRICTION AT DESTINATION AIRPORT
ATC routings	R	E	Network solutions / scenarios used to balance demand and capacity	81	ATFM due to ATC ENROUTE DEMAND / CAPACITY
ATC staffing	S	D	Unplanned staff shortage reducing expected capacity.	89	RESTRICTIONS AT AIRPORT OF DEPARTURE
		E		82	ATFM due to ATC STAFF / EQUIPMENT ENROUTE
		A		83	ATFM due to RESTRICTION AT DESTINATION AIRPORT
ATC equipment	T	D	Reduction of expected or declared capacity due to the non-availability or degradation of equipment used to provide an ATC service.	89	RESTRICTIONS AT AIRPORT OF DEPARTURE
		E		82	ATFM due to ATC STAFF / EQUIPMENT ENROUTE
		A		83	ATFM due to RESTRICTION AT DESTINATION AIRPORT
Accident / incident	A	D	Reduction of expected ATC capacity due to an aircraft accident / incident.	89	RESTRICTIONS AT AIRPORT OF DEPARTURE
		A		83	ATFM due to RESTRICTION AT DESTINATION AIRPORT
Aerodrome capacity	G	D	Reduction in declared or expected capacity due to the degradation or non-availability of infrastructure at an airport. e.g. Work in Progress, shortage of aircraft stands etc. Or when demand exceeds expected aerodrome capacity.	89	RESTRICTIONS AT AIRPORT OF DEPARTURE
		A		83	ATFM due to RESTRICTION AT DESTINATION AIRPORT
Aerodrome Services	E	D	Reduced capacity due to the degradation or non-availability of support equipment at an airport e.g. Fire Service, De-icing / snow removal equipment or other ground handling equipment.	99	OTHER
		A		99	OTHER
Industrial action NON-ATC	N	D	A reduction in expected / planned capacity due to industrial action by non ATC personnel.	98	INDUSTRIAL ACTION OUTSIDE OWN AIRLINE
		A		98	INDUSTRIAL ACTION OUTSIDE OWN AIRLINE
Airspace management	M	D	Reduction in declared or expected capacity following changes in airspace / route availability due to small scale military activity	89	RESTRICTIONS AT AIRPORT OF DEPARTURE
		E		82	ATFM due to ATC STAFF/EQUIPMENT ENROUTE
Special event	P	A	Reduction in planned, declared or expected capacity or when demand exceeds the above capacities as a result of a major sporting, governmental or social event. It may also be used for ATM system upgrades and transitions. Large multinational military exercises may also use this reason. This category should only be used with prior approval during the planning process.	83	ATFM due to RESTRICTION AT DESTINATION AIRPORT
		D		89	RESTRICTIONS AT AIRPORT OF DEPARTURE
		E		82	ATFM due to ATC STAFF / EQUIPMENT ENROUTE
		A		83	ATFM due to RESTRICTION AT DESTINATION AIRPORT
Weather	W	D	Reduction in expected capacity due to any weather phenomena. This includes where weather impacts airport infrastructure capacity, but where aerodrome services are operating as planned / expected.	89	RESTRICTIONS AT AIRPORT OF DEPARTURE
		E		81	ATFM due to ATC ENROUTE DEMAND / CAPACITY
		A		84	ATFM due to WEATHER AT DESTINATION
Environmental issue	V	D	Reduction in any capacity or when demand exceeds any capacity due to agreed local noise, runway usage or similar procedures. This category should only be used with prior agreement in the planning process.	89	RESTRICTIONS AT AIRPORT OF DEPARTURE
		E		81	ATFM due to ATC ENROUTE DEMAND / CAPACITY
		A		83	ATFM due to RESTRICTION AT DESTINATION AIRPORT
Other	O	D	This should only be used in exceptional circumstances when no other category is sufficient. An explanatory ANM remark MUST be given to allow post ops analysis.	89	RESTRICTIONS AT AIRPORT OF DEPARTURE
		E		81	ATFM due to ATC ENROUTE DEMAND / CAPACITY
		A		83	ATFM due to RESTRICTION AT DESTINATION AIRPORT

Figura 4. Relación entre las diferentes causas de retrasos del NM con los códigos de IATA

2.3 Análisis de los retrasos en el año 2016

2.3.1 Media de retraso del año 2016

El año 2016 fue un año con malos datos de retrasos con respecto a años anteriores, en gran medida debido a la capacidad de los aeropuertos y las acciones industriales del ATC (Air Traffic Control), que causaron retrasos a las aerolíneas. La media de retraso de salida por vuelo varió entre 8 minutos por vuelo en febrero y 16 minutos por vuelo en julio. Esto se tradujo en un promedio anual de retraso de salida de 11.3 minutos por vuelo, es decir, un aumento de 0.9 minutos por vuelo con respecto al año anterior, al mismo tiempo que el número de vuelos diarios aumentó un 2.8% en el área ECAC. La red experimentó su mayor actividad el viernes 9 de septiembre de 2016.

Como se puede ver en la Figura 5, el 41% de los vuelos salieron en 2016 “a tiempo” o con 5 minutos de margen antes o después del STD y el 71% lo hizo con 15 minutos de margen. Además, un 42% se retrasó en la salida con más de 5 minutos y solo un 16% salió antes de tiempo.

Por otra parte, en las llegadas (Figura 6), un 25% de los vuelos llegó con 5 minutos de margen y un 79% lo hizo con 15 minutos o menos antes o después de su STA. Además, un 38% se retrasó en la llegada con más de 5 minutos y un 37% llegó antes de lo previsto, un número bastante mayor que en las salidas. Los vuelos que llegaron más de 15 minutos antes de lo programado fueron del 9.3%. Este alto valor puede afectar las operaciones de gestión del tránsito aéreo (turnos de demanda) del aeropuerto (disponibilidad del stand) en caso de que las aeronaves lleguen excesivamente antes de lo previsto.

Es interesante observar que hubo bastante menos retraso (incluso mucho adelanto) en las llegadas que en las salidas, por lo que se recortó bastante tiempo en vuelo.

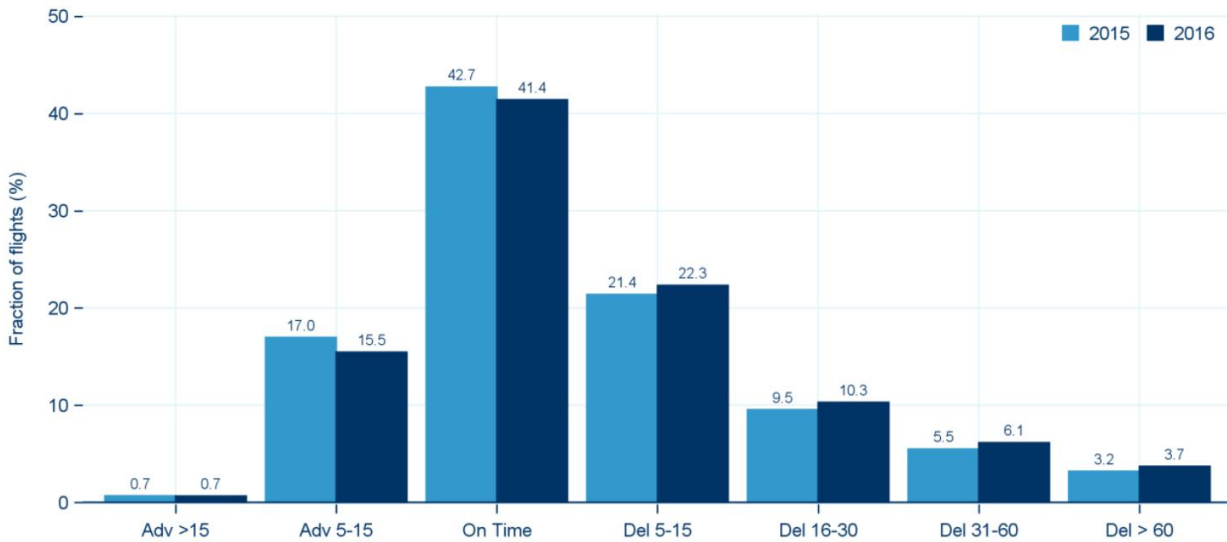


Figura 5. Puntualidad en las salidas en 2016 vs 2015

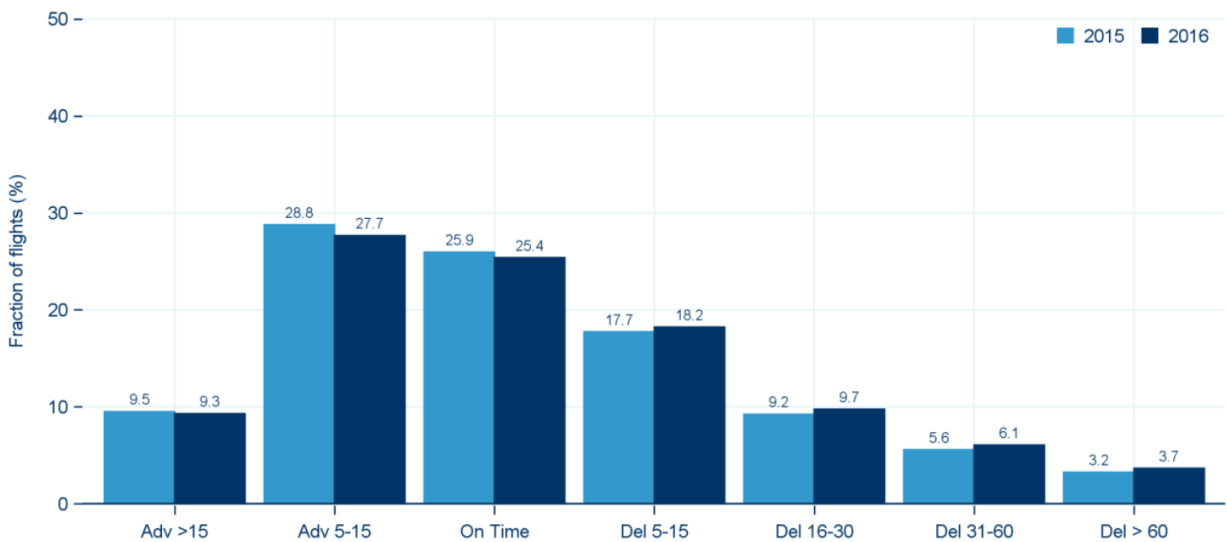


Figura 6. Puntualidad en las llegadas en 2016 vs 2015

Relacionado con la observación anterior con respecto a la puntualidad en las salidas y en las llegadas, se puede definir el parámetro denominado Indicador de Diferencia de Puntualidad por Vuelo (DDI-F, por sus siglas en inglés), que es la diferencia entre el retraso en la llegada y el retraso en la salida. Por ejemplo, un vuelo que saliera con 20 minutos de retraso y llegara con 30 minutos de retraso, tendría un DDI-F de +10 minutos. En 2016, el DDI-F europeo fue de -3.9 minutos, es decir, los vuelos tendieron a compensar los retrasos en las salidas.

Se observó que la causa principal de los retrasos en todo el 2016 y, concretamente, también en el mes de septiembre, fueron las causas tipo en cadena (Figura 7). En el 2016, de la media de retraso por vuelo de 11.3 minutos que hubo, 5.1 minutos se debían al tipo retraso en cadena (un 45%); o lo que es lo mismo, que por cada minuto de retraso primario producido se generaban 50 segundos de retraso en cadena.

Dentro de las causas primarias (Figura 8), los retrasos debido a las operaciones de las aerolíneas fueron la causa principal, contribuyendo con 3.1 minutos de la media de retrasos por vuelo. Los retrasos ATFM debido a los aeropuertos fueron la cuarta causa de retrasos, contribuyendo con solo 0.76 minutos sobre la media.

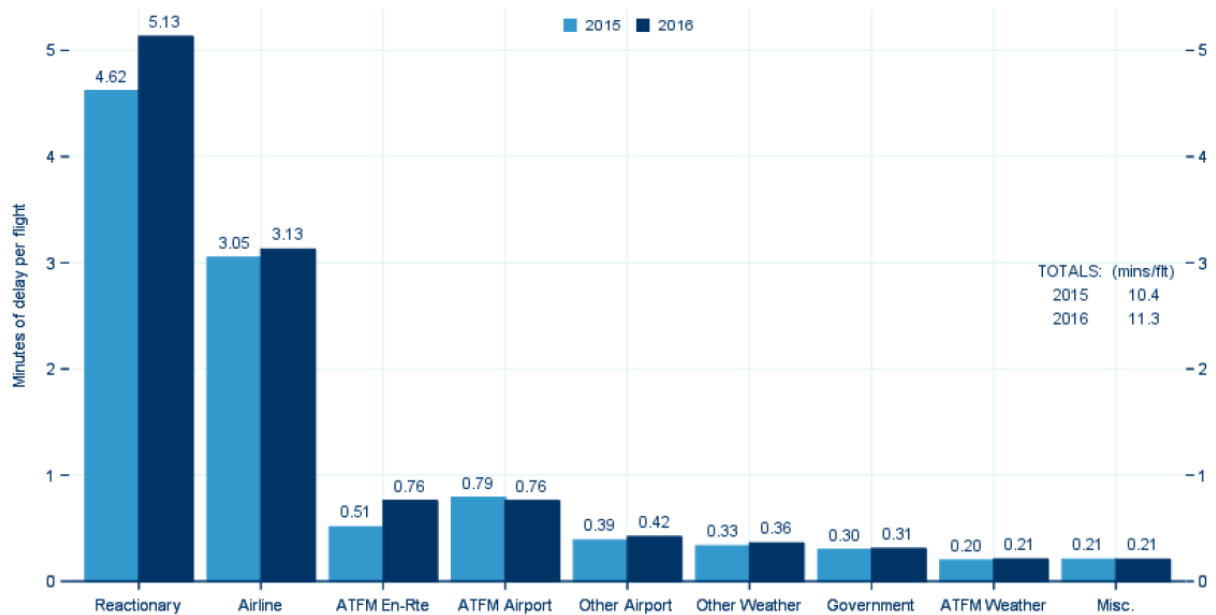


Figura 7. Principales causas y retrasos medios en 2016 vs 2015

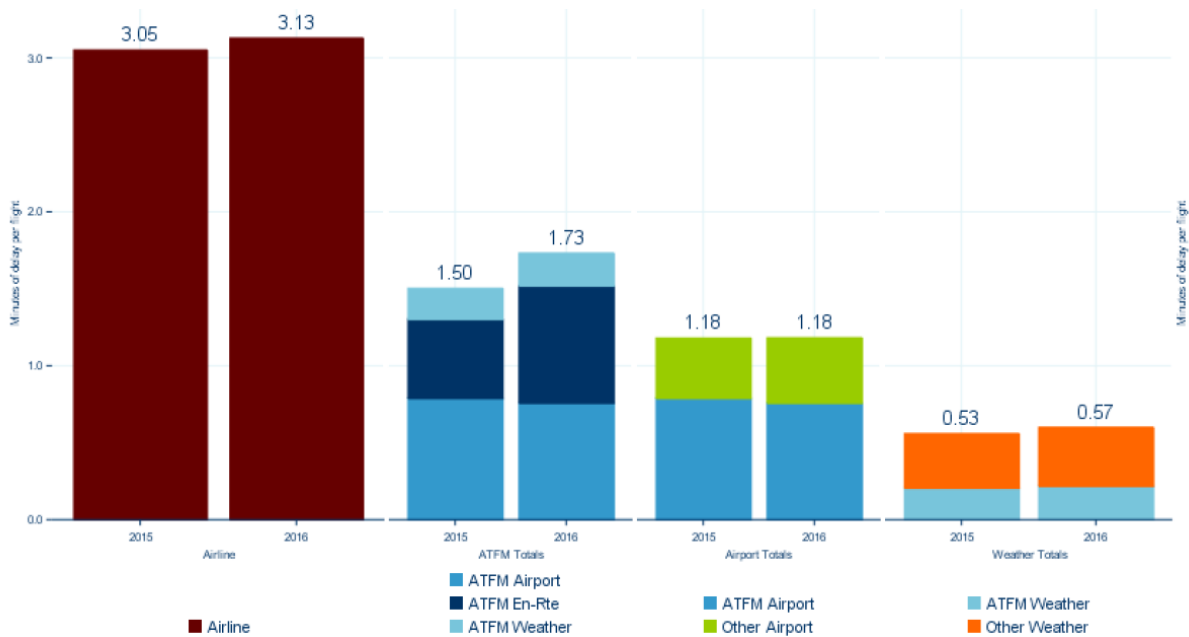


Figura 8. Retraso en las causas primarias en 2016 vs 2015

Los retrasos muy grandes (aquellos de más de 60 minutos) aumentaron con respecto a 2015, principalmente debido a los grandes retrasos en los meses de junio y julio, en los que estos vuelos llegaron al 6%.

Las cancelaciones operacionales se incrementaron llegando al 1.6 % de los vuelos planificados, comparado con el 1.5 % del año anterior; esto fue debido a acciones industriales del ATC observadas en Francia en 7 de los 12 meses de 2016, además de otros trastornos dentro de las aerolíneas Air France, Alitalia, Lufthansa y SAS, entre otros, que tuvieron que cancelar vuelos durante el año.

En cuanto a los 5 aeropuertos más afectados por los retrasos en todo 2016, fueron: en las salidas, London Gatwick, London Luton, Málaga, Barcelona y Palma de Mallorca; y en las llegadas, Estambul Sabiha, London Gatwick, Tel Aviv Ben Gurion, Barcelona y Alicante.

Por último, cabe destacar que mientras los retrasos notificados por las aerolíneas se mantuvieron relativamente estables durante los meses del año, los retrasos en cadena doblaron su valor durante los meses de verano. La Figura 9 muestra que en las primeras horas (desde las 0300 UTC hasta las 0600 UTC) el porcentaje de retrasos en ruta fue más alto que en el resto del día. Esto provocó que los retrasos en cadena subieran hasta un 60% sobre las 2100 UTC.

2.3.2 Septiembre de 2016

La acción industrial francesa del ATC entre el 14 y el 15 de septiembre generó retrasos ATFM en aeropuertos y en ruta. Los aeropuertos más afectados fueron Marsella y París Orly. El NM estimó que hubo 900 vuelos menos durante esta acción. Un aterrizaje de emergencia en Londres Heathrow el 9 de septiembre y un fallo de frecuencia en el ACC de Bruselas el 15 de septiembre generaron demoras ATFM en estos aeropuertos. El clima estacional afectó a Maastricht, Karlsruhe, Marsella, Burdeos, Barcelona y los ACC escoceses; tormentas eléctricas, fuertes lluvias y/o poca visibilidad afectaron a Londres Heathrow, Palma de Mallorca y, en menor medida, a los aeropuertos de Estambul Sabiha, Estambul Ataturk, Londres Gatwick, Barcelona y Zúrich [4].

Con respecto a la puntualidad, el 79% de los vuelos salieron con un margen de 15 minutos con respecto a su tiempo agendado. El 40.5% de los vuelos salieron con 5 minutos de margen antes o después del STD. En septiembre de 2016, el DDI-F europeo fue de -4.2 minutos, un incremento significativo (en minutos ganados en vuelo) comparado con el de 2015, que fue de -3.5 minutos.

En este mes de septiembre, de la media de retraso por vuelo de 10 minutos que hubo, 4.47 minutos se debían al tipo de retraso en cadena. Dentro de las causas primarias, los retrasos debidos a las operaciones de las aerolíneas fueron la causa principal, contribuyendo con 2.96 minutos de la media de retrasos por vuelo; y los retrasos ATFM debido a los aeropuertos fueron la cuarta causa de retrasos, contribuyendo con solo 0.73 minutos sobre la media.

La media de retraso por vuelo en salidas fue de 10.7 minutos, de los que 4.5 se debieron a retrasos en cadena. El 42% de los vuelos se retrasaron, saliendo con más de 5 minutos de retraso y el 37% de los vuelos se retrasaron en la llegada. Los retrasos muy grandes (aquellos de más de 60 minutos) se mantuvieron estables en un 3.3%.

En resumen, se ha podido observar que, en septiembre de 2016, el 39% de los retrasos se debieron a retrasos en cadena y el resto a causas primarias. Dentro de estas últimas, los retrasos debido a las operaciones de las aerolíneas fueron la causa principal, constituyendo un 26% de los retrasos totales. El resto de causas, en orden de importancia, fueron los aeropuertos, los retrasos en ruta y otras causas, como el clima.

A raíz de estos resultados, es importante destacar los retrasos tipo *reactionary*. Así [5], es un hecho curioso que aproximadamente el 50% de los retrasos de las aerolíneas low-cost fueron de este tipo, mientras que, en las aerolíneas regulares, fueron del 40%; estos datos se han ido manteniendo hasta el año de estudio.

Una vez observados los análisis realizados por CODA y STATFOR, el siguiente punto de este trabajo es tratar de analizar los datos recopilados del DDR para el día de mayor tráfico en Europa en 2016, el 9 de septiembre.

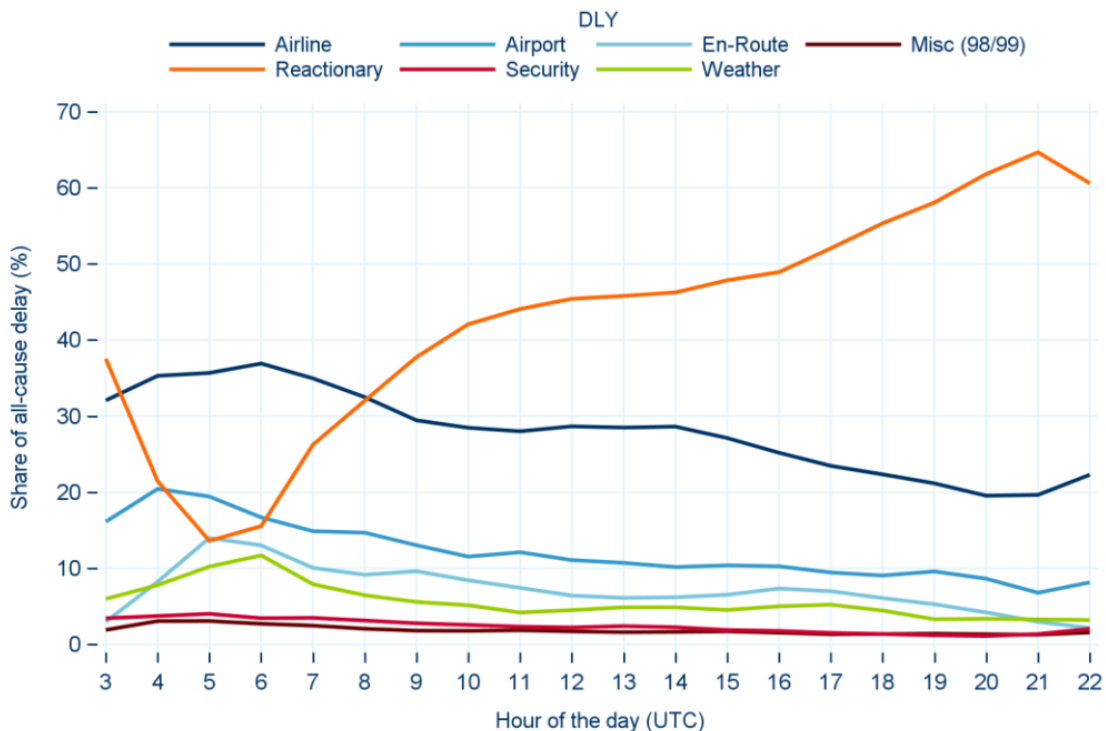


Figura 9. Retrasos por horas reportados por las aerolíneas en 2016

3 INTRODUCCIÓN A LAS TRAYECTORIAS DDR

En este capítulo, se realiza una introducción a la definición de las trayectorias de referencia que utiliza EUROCONTROL hoy en día para la revisión de las actuaciones operacionales, analizando sus características y de qué manera se ha llegado a ellas.

En Europa [1], la evaluación del rendimiento de los Servicios de Navegación Aérea (Air Navigation Services, ANS) no es algo nuevo. En 1997, EUROCONTROL inició un sistema de revisión independiente gobernado por la Comisión de Revisión de la Eficiencia (Performance Review Commission, PRC) y sostenido por la Unidad de Revisión del Rendimiento (PRU) para revisar las actuaciones de los ANS de los Estados Miembros. La PRU es responsable de las actividades diarias del PRC y, junto a los informes de revisión del rendimiento publicados anualmente, también publica mensualmente datos de rendimiento⁸.

Por otro lado, en 2004, La Comisión Europea (EC) desarrolló el marco legal de la iniciativa Cielo Único Europeo (SES), cuyo esquema de actuación se basa en el sistema de revisión de la eficiencia de la PRC. Así, de forma similar a la PRC, el Cuerpo de Revisión de la Eficiencia (Performance Review Body, PRB) apoya a la Comisión Europea en la ejecución del esquema de actuaciones proporcionando asesoramiento político.

Ambos sistemas de revisión de la eficiencia están destinados a impulsar la mejora social, económica y operacional, en particular la seguridad y el medio ambiente, del sistema de aviación europeo. Además, junto a estos esfuerzos europeos, la Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI) promueve también un enfoque de actuaciones a nivel mundial. Durante los últimos años, los esfuerzos regionales se han integrado en un marco más amplio bajo el Plan Global de Navegación Aérea (Global Air Navigation Plan, GANP). En este momento, existen 16 indicadores del rendimiento claves propuestos por el GANP de la ICAO, que se asientan en la experiencia europea adquirida con la PRC y están basados en el conjunto de indicadores que normalmente usan los ANS de Estados Unidos y Europa en sus análisis comparativos de las operaciones.

En este sentido, la PRU trabaja para que se pueda desarrollar un conjunto de datos de trayectorias de referencia que permitirán [1] definir una base para realizar estudios comparativos entre diferentes regiones del mundo (por ejemplo, EU-USA). Estas trayectorias son el componente básico para calcular una gran cantidad de parámetros de rendimiento operacional presentados por la PRU y se usan, entre otras cosas, para:

- encontrar intersecciones 4D con espacios aéreos (sectores, FIR) para así poder contar el número de vuelos en diferentes intervalos de tiempo;
- calcular las emisiones de CO₂;
- calcular las distancias voladas;
- evaluar la eficiencia de vuelo horizontal y vertical y la complejidad del tráfico aéreo;
- calcular el tiempo ASMA adicional, un indicador de rendimiento que sirve para tener una medida aproximada del tiempo promedio que el avión está esperando en la pista en su llegada durante los periodos en el que el aeropuerto está congestionado⁹.

Así, los parámetros de la PRU actuales utilizan trayectorias ensambladas por el NM, que son [1]:

- FTFM o Modelo 1: el Modelo de Vuelo Táctico Presentado, o Filed Tactical Flight Model, es la trayectoria de vuelo construida desde el último plan de vuelo (FPL) presentado por el sistema ETFMS (Enhanced Tactical Flow Management System) del NM. Pertenece, por tanto, a la etapa pre-táctica.
- RTFM o Modelo 2: el Modelo de Vuelo Táctico Regulado o Regulated Tactical Flight Model es la trayectoria de vuelo dada cuando se han aplicado las medidas del ATFCM (Air Traffic Flow and Capacity Management) sobre dicho vuelo (por ejemplo, que se haya retrasado).
- CTFM o Modelo 3: el Modelo de Vuelo Táctico Actual o Current Tactical Flight Model es una trayectoria de vuelo construida (por el sistema ETFMS del NM) para representar tácticamente un vuelo que se está volando. Esta trayectoria corrige los Modelos de Vuelo Tácticos (ya sea el Modelo 1 o el 2, dependiendo del caso) cuando el CPR muestra suficiente desviación y es igual a la FTFM cuando no se

⁸ Se pueden encontrar en <https://ansperformance.eu>.

⁹ Más información de este indicador se puede encontrar en la siguiente dirección: <https://ansperformance.eu/methodology/additional-asma-time-pi/>.

produce dicha desviación. Así, esta trayectoria se modificará cuando la realidad se desvíe demasiado de la FTFM, ya sean 20 MN horizontalmente, 5 minutos en tiempo o 1000 pies verticalmente. Además, también cambiará cuando existan mensajes de actualizaciones del ATC (DCT, solicitudes de nivel de vuelo, actualización del FPL). Pertenece, por tanto, a la etapa táctica.

- **CPF:** los informes de la posición correlacionada para un vuelo son trayectorias construidas (por el sistema ETFMS del NM) basadas en las CPRs.

Como se indicó en el capítulo primero, los datos de las trayectorias (concretamente, las FTFM, RTFM y CTFM) se podían descargar de la base de datos DDR de EUROCONTROL a través de NEST en el momento de la realización de este trabajo.

En la referencia [1], se lleva a cabo una comparativa entre estas trayectorias. En las Figuras 10 y 11 se muestra dicha comparación, en la que aparecen los perfiles laterales de las trayectorias CTFM, CPF, FA (Flight Aware) y FR24 (Flight Radar 24) para un mismo vuelo. FA y FR24 usan fuentes de datos como ADS-B¹⁰ y MLAT¹¹ (Multilateración). El zig-zag que se observa en la trayectoria CPF es debido al solapamiento de varios radares que están dando la posición y el NM coge la medida de uno u otro alternativamente. Se puede observar también la diferencia considerable de la trayectoria CTFM con las otras tres, debido a las correcciones de distancia y tiempo que la definen. Es importante notar que, en el ejemplo mostrado, esta trayectoria toma de forma errónea la orientación de salida del vuelo, ya que, en lugar de dibujar la trayectoria hacia el oeste, lo hace hacia el este. Además, tampoco capta el circuito de espera que realiza el vuelo en Zurich. Este ejemplo puede extenderse al caso general y es un factor a tener cuenta acerca de la exactitud de las trayectorias definidas por EUROCONTROL a la hora de realizar análisis que tengan en cuenta la posición de la aeronave.

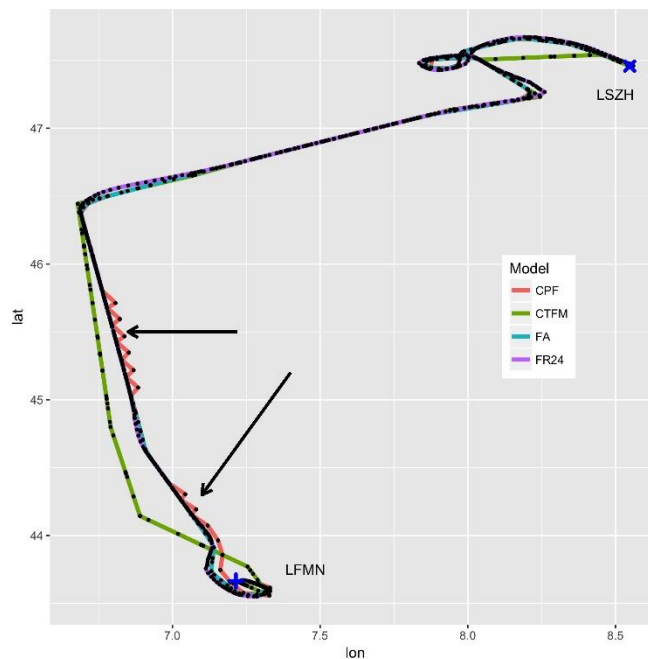


Figura 10. Comparación de las trayectorias CTFM, CPF y ADS-B para el vuelo SWR563, desde LFMN (Niza, Francia) hasta LSZH (Zurich, Suiza), el 15-07-2017

Por su parte, las trayectorias ADS-B pueden ser ruidosas, especialmente en tiempo (pueden realizar zig-zags

¹⁰ El sistema de Vigilancia Dependiente Automática – Difusión (ADS-B, por sus siglas en inglés) es una tecnología de vigilancia cooperativa en la que un avión determina su posición a través de la navegación por satélite y la emite periódicamente, pudiéndose realizar su seguimiento. La señal puede ser recibida por estaciones terrestres o por otras aeronaves. El ADS-B aumenta la seguridad al hacer una aeronave visible en tiempo real para el control de tráfico aéreo, gracias a los datos de posición y velocidad transmitidos cada segundo que, en la mayoría de los casos, resultan ser más precisos que la información de los sistemas actuales basados en radar. Los datos del ADS-B pueden ser registrados y descargados para un análisis posterior al vuelo. Debido a sus múltiples beneficios, como mejorar la seguridad y la eficiencia del vuelo, esta tecnología es un elemento de próxima generación que tanto Europa como Estados Unidos están integrando en sus aviones poco a poco de forma obligatoria.

¹¹ En las regiones que no posean receptores ADS-B, la monitorización del avión se realiza a través de la MLAT. Esta tecnología calcula su posición midiendo la diferencia de distancia a dos estaciones de posiciones conocidas por señales de emisión en tiempos conocidos. Una primera diferencia de distancias da un número infinito de puntos que satisfacen la medida y que forman una curva. Se realiza una segunda medida con dos estaciones diferentes y se intersecan las curvas, obteniendo la posición exacta de la aeronave.

hacia delante y hacia atrás). Por otro lado, los modelos de trayectorias que el NM elabora son simples en las llegadas y las salidas, lo que permite cumplir con su misión en el ATFCM: asignación de slots (y por lo tanto de retrasos) y seguimiento de las cargas de los sectores. Por tanto, la forma en que se modela un vuelo, un espacio aéreo, un aeródromo o una ruta sigue los objetivos anteriormente expuestos. Esto también es bueno para el sistema, ya que se convierte en un sistema robusto, que ahorra en memoria de la CPU y que es sostenible. Así, las SIDs¹² y las STARS¹³ se conciben como líneas rectas desde el último CPR (punto fijo) hasta el aeródromo. Además, en las trayectorias del NM no se hace distinción entre pistas derecha, central o izquierda a la hora de hacer la conexión con la fase en ruta.

Sin embargo, a pesar de las numerosas ventajas, estas trayectorias (FTFM, RTFM, CTFM y CPF) no son las más adecuadas para estudiar modelos de circuitos de espera y, además, es necesario tener modelos mejores para estudiar las Operaciones de Descenso Continuo (CDO). Además, la baja tasa de los CPRs (aproximadamente una medida cada 30 segundos) y una cobertura geográfica reducida, tal y como se puede observar en la Figura 12, podrían ser suficientes para los actuales propósitos operacionales del NM, pero limitan el alcance de los análisis del rendimiento que se pretenden llevar a cabo en un futuro inmediato.

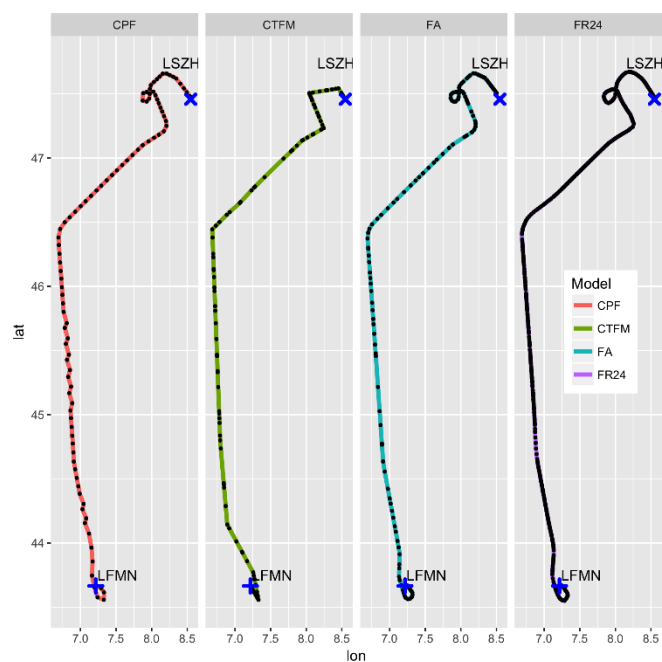


Figura 11. Comparación de las trayectorias CTFM, CPF y ADS-B para el vuelo SWR563, desde LFMN (Niza, Francia) hasta LSZH (Zurich, Suiza), el 15-07-2017

¹² La salida instrumental normalizada (SID, del inglés Standard Instrument Departure) o simplemente procedimientos de salida (DP, Departure Procedures), es una ruta ATS seguida por los aviones en vuelo IFR (reglas de vuelo instrumental) después de despegar y hasta la fase de ruta.

¹³ La llegada instrumental normalizada (STAR) es la ruta ATS que siguen los aviones desde el final de la fase en ruta y el inicio de la fase de aproximación, establecida por el punto IAF (Initial Approach Fix).

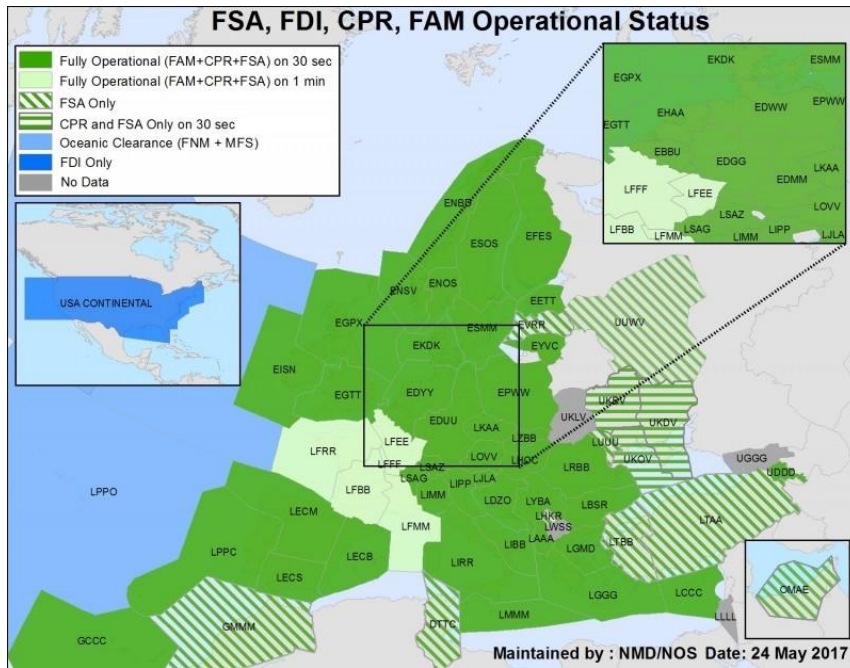


Figura 12. Mapa de recepción de CPRs – mayo de 2017

Una vez explicado cómo EUROCONTROL entiende y modela los retrasos, expuesto los datos oficiales de retrasos del año 2016 e indicado cómo EUROCONTROL proporciona los datos de las trayectorias de los aviones, en el siguiente punto se tratará de analizar los datos recopilados del DDR para el día de mayor tráfico en Europa en 2016, el 9 de septiembre.

4 CARACTERIZACIÓN DE LOS RETRASOS

En primer lugar, se expone una introducción en la que se explica cómo se han procesado los datos del DDR a través de NEST y, en segundo lugar, se estudian las trayectorias de las aeronaves el día de estudio considerado mediante varios análisis: duración de los vuelos, retrasos y casos extremos encontrados.

4.1 Trayectorias proporcionadas por DDR

Como ya se ha comentado, se pretende realizar en este trabajo un estudio de los retrasos en el día de mayor tráfico aéreo en Europa en el año 2016, es decir, el viernes 9 de septiembre.

El archivo que contiene los datos sobre el flujo de tráfico aéreo tiene la extensión .so6. Según EUROCONTROL, este archivo posee los campos que se muestran en la Tabla 1; muchos de ellos serán usados a lo largo de este documento.

Como se puede observar en la tabla, los vuelos están definidos por:

- el identificador de vuelo (campo número 17, que debe ser único),
- el tipo de aeronave (campo 4),
- origen y destino del vuelo (campos 2 y 3),
- el estado del vuelo (campo 9, según esté en fase de subida, descenso o crucero) y
- el call sign¹⁴ (campo 10).

Por otro lado, la trayectoria de estos vuelos está dividida en diferentes segmentos (dados por puntos de comunicación), que se definen con los siguientes campos:

- tiempos de inicio y fin del segmento (campos 5 y 6, en formato HHMMSS, es decir, horas, minutos y segundos),
- fecha de inicio y fin del segmento (campos 11 y 12, en formato YYMMDD, es decir, año, mes y día),
- nivel de vuelo (FL, por sus siglas en inglés) de inicio y fin del segmento (campos 7 y 8),
- longitud y latitud de inicio y fin del segmento (de los campos 13 al 16, en minutos decimales) y
- longitud del segmento (campo 19, en millas náuticas).

Además, cada segmento lleva asociado un número denominado *sequence* (campo 18), que toma el valor “1” cuando aparece un nuevo vuelo en el archivo y va incrementando su valor en uno con cada segmento de cada vuelo; este campo será muy útil ya que permitirá identificar la primera vez que aparece un nuevo vuelo en el archivo. El campo número 20 no se ha utilizado.

Así, el archivo utilizado .so6 contiene datos del viernes 9 de septiembre de 2016 de vuelos cuyo despegue y/o aterrizaje tuvieron lugar desde las 00h00 hasta las 23h59 de dicho día en el área ECAC. Se contabilizaron 35703 vuelos. EUROCONTROL asocia a cada vuelo varias trayectorias. Las que vienen de datos oficiales de AIRAC son 3 y están disponibles en NEST (tipo *available*): iniciales (las establecidas en el último plan de vuelo original), reguladas (son las planeadas pero modificadas antes de que se realice el vuelo debido a restricciones o meteorología) y reales (las realmente voladas por los aviones). En este trabajo se usarán las trayectorias tipo *available*. Estas trayectorias iniciales se corresponden con las trayectorias FTFM o Modelo 1 vistas en el Capítulo 2; las reguladas, con las RTFM o Modelo 2; y las reales, con las CTFM o Modelo 3.

¹⁴ Los distintivos de llamada de aviación (o call sign) son un grupo de caracteres alfanuméricos que se utilizan para identificar una aeronave en las comunicaciones aire-tierra. Las reglas que rigen el uso de los distintivos de llamada de las aeronaves se establecen en el Anexo 10 de la OACI: Comunicaciones aeronáuticas, Volumen II - Procedimientos de comunicación, Capítulo 5. Hay numerosos buscadores en Internet que permiten encontrar un call sign concreto y ver a qué aerolínea o empresa pertenece, por ejemplo: <http://www.avcodes.co.uk/callsignres.asp> o <https://www.flightradar24.com/data/aircraft/>.

NAME:	SegOut6			
extension:	so6			
origin:	SAAM profile processing or Eatchip Database			
separator:	blank			
sort:	by flight segment sequence from origin to destination			
comment:	input of SAAM conflict, 3DViewer, densities ... Describes final 4D trajectories.			
#	Field	Type	Size	Comment
1	segment identifier	char		first point name "_" last point name (see note)
2	origin of flight	char	4	ICAO code
3	destination of flight	char	4	ICAO code
4	aircraft type	char	4	
5	time begin segment	num	6	HHMMSS padded with 0's
6	time end segment	num	6	HHMMSS padded with 0's
7	FL begin segment	num	1 to 3	
8	FL end segment	num	1 to 3	
9	status	char	1	0=climb, 1=descent, 2=cruise
10	call sign	char		
11	date begin segment	num	6	YYMMDD padded with 0's
12	date end segment	num	6	YYMMDD padded with 0's
13	lat begin segment	float		in minute decimal
14	lon begin segment	float		in minute decimal
15	lat end segment	float		in minute decimal
16	lon end segment	float		in minute decimal
17	flight identifier	num		same as the one provided in expand file (must be unique)
18	sequence	num		start at 1 for every new flight, incremented at each lines. IMPORTANT !
19	segment length	float		in nautical miles
20	segment parity/colour	num		0=NO (grey, R=102, G=102, B=102), 1=ODD (green, R=60, G=255, B=60), 2=EVEN (blue, R=100, G=100, B=255), 3=ODD_LOW (dark green, R=0, G=200, B=0), 4=EVEN_LOW (light blue, R=160,G=160,B=255), 5=ODD_HIGH(light green, R=160, G=255, B=160), 6=EVEN_HIGH (dark blue, R=0, G=0, B=200), 7=General Purpose Red Colour (R=255, G=0, B=0), 8=General Purpose Orange Colour (R=255, G=128, B=0), 9=General Purpose Yellow Colour (R=255, G=255, B=0)

Tabla 1. Campos de los archivos de NEST tipo .so6 [6]

Ahora, a partir de los datos del DDR obtenidos a través de NEST, se van a realizar varios análisis a continuación. Así, en primer lugar, se van a estudiar la duración de los vuelos, para ver si hay diferencias entre las 3 trayectorias consideradas. Y, en segundo lugar, se van a estudiar las diferencias de tiempos en los despegues y los aterrizajes (a las que se llamarán "retrasos") entre estas tres trayectorias.

4.2 Estudio de la duración de los vuelos

Para calcular la duración de los vuelos para los tres tipos de trayectorias considerados se han restado el tiempo de llegada y el tiempo de salida de cada vuelo (último y primer dato de tiempo existente en el archivo .so6 para cada vuelo). Se han restado estas duraciones para ver la diferencia de tiempo entre cada pareja de tipos de vuelo: real-inicial, real-regulado e inicial-regulado. Se ha observado que las diferencias entre los vuelos inicial y regulado son prácticamente idénticas (del orden de 10^{-10}), por lo que no es necesario representar aquí el análisis de esta pareja de vuelos. Así, de las otras dos parejas posibles (real-inicial y real-regulado), se va a realizar únicamente el análisis de los vuelos real-inicial, mostrando:

- un histograma (con el comando *histogram* de Matlab) que relaciona la diferencia de tiempo en la duración del vuelo, en minutos, y la frecuencia, en número de vuelos en que se da esa diferencia¹⁵;
- el cálculo de la mediana y la media, en minutos, para caracterizar el centro de la distribución (comandos *mean* y *median*, respectivamente);
- el cálculo del máximo, el mínimo y la desviación estándar, en minutos, para analizar la variabilidad (comando *std* para la desviación estándar);
- un análisis de la forma, con la asimetría y la curtosis (comandos *skewness* y *kurtosis*, respectivamente);
- una curva de percentiles (con el comando *prctile*), para observar los retrasos y adelantos más y menos frecuentes, del valor 1 al 99 para mostrar 99 puntos.

La asimetría estadística muestra el grado de asimetría que presenta una distribución de probabilidad de una variable aleatoria. Una distribución simétrica presenta el mismo número de valores a la derecha y a la izquierda del eje de simetría, que se considera una recta paralela al eje de ordenadas que pasa por la media de la distribución; o, lo que es lo mismo, que existe el mismo número de desviaciones con signo positivo que con signo negativo. Será asimetría positiva si la “cola” de la derecha es más larga que la de la izquierda, es decir, si hay valores más separados a la derecha que a la izquierda; y asimetría negativa si es al contrario. En una distribución simétrica, la media es igual a la mediana. Las medidas de asimetría, como la curtosis, se usan para contrastar si se puede aceptar que una distribución estadística sigue una distribución normal, que es simétrica respecto a la media.

La curtosis de una variable estadística es una característica de forma de su distribución de probabilidad. Una curtosis alta indica una mayor concentración de valores de la variable tanto muy cerca de la media (pico) como muy lejos de ella (colas) y una menor proporción de valores intermedios entre el pico y las colas. Normalmente se utiliza el coeficiente de curtosis o exceso de curtosis, que establece un valor de 0 para la distribución normal, que se toma como referencia de curtosis. Así, una distribución puede ser: leptocúrtica (coeficiente mayor que 0, más apuntada y con colas más gruesas que la normal), platicúrtica (coeficiente menor que 0, menos apuntada y con colas menos gruesas que la normal) y mesocúrtica (coeficiente igual a 0, cuando tiene una distribución normal). Este coeficiente se usa, en combinación de otros, como indicador de la forma del pico y las colas y de la posible existencia de valores atípicos (lejos de la zona del pico).

El estudio de la variabilidad se realizará más en detalle en los capítulos siguientes; concretamente, se analizarán los valores extremos en el apartado 4.4. *Estudio de los casos extremos* y el estudio de las desviaciones en el Capítulo 6.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la diferencia en la duración de los vuelos realizando una comparativa entre los datos de vuelo real y los de vuelo inicial.

¹⁵ Nota: debido al gran número de datos (vuelos) con los que se realiza el histograma, su forma y el número de barras es meramente cualitativo, no correspondiendo el número de barras con el número de datos considerados. Esto es aplicable a todo el documento salvo indicación contraria.

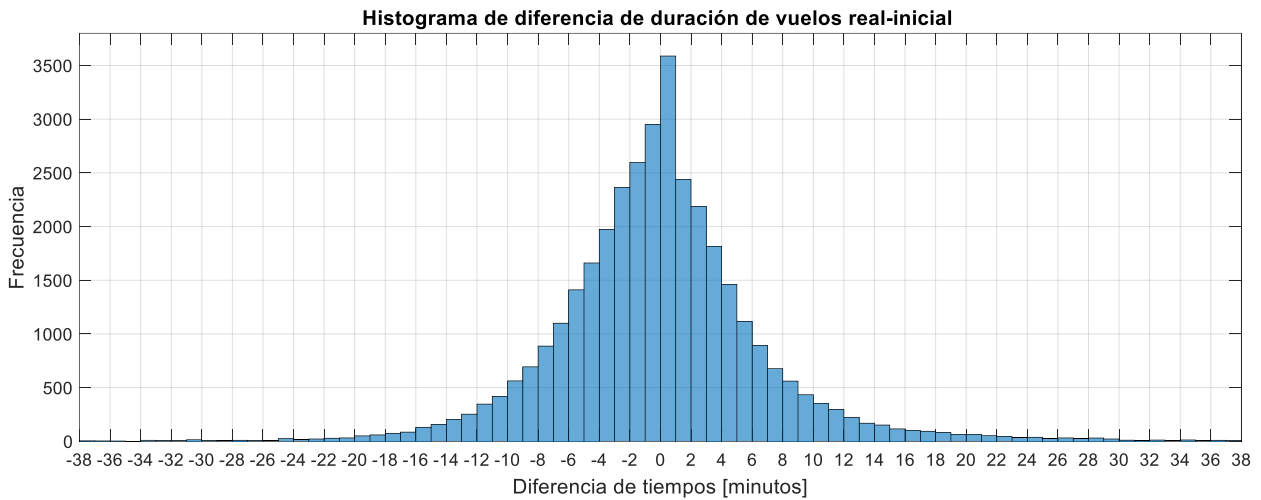


Figura 13. Histograma de diferencia de duración de vuelos real-inicial

Centro de la distribución	Mediana [minutos]	-0.08
	Media [minutos]	-0.22
Variabilidad	Máximo [minutos]	216.68
	Mínimo [minutos]	-822.85
	Desviación estándar [minutos]	12.87
Forma	Asimetría	-20.16
	Curtosis	1010.02

Tabla 2. Indicadores para análisis de duración de vuelos real-inicial

La curva de percentiles se muestra en la Figura 14.

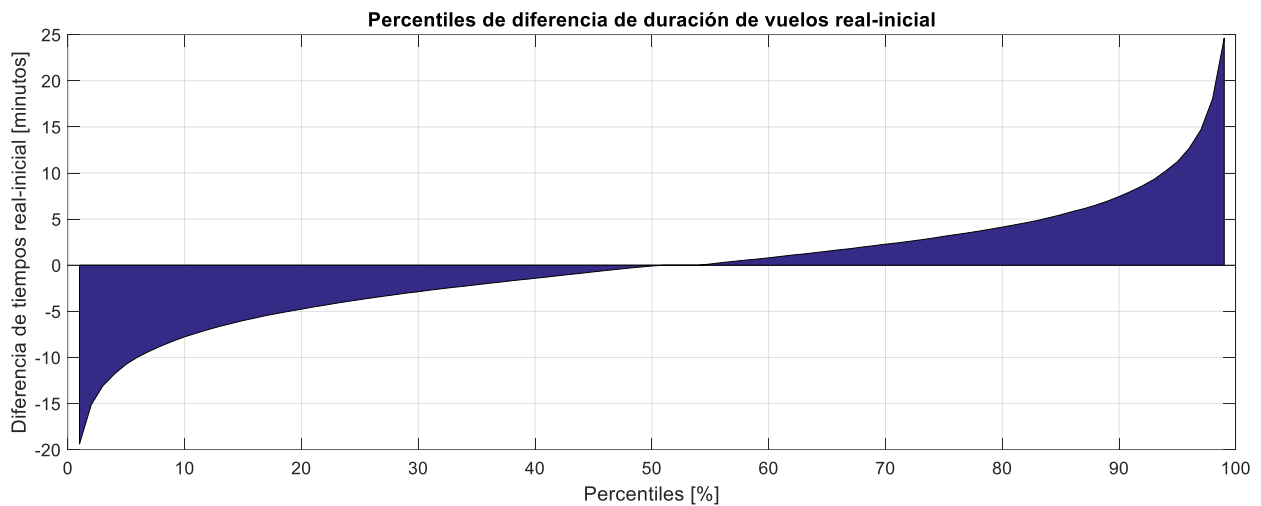


Figura 14. Percentiles de diferencia de duración de vuelos real-inicial

En cuanto al centro de la distribución, se puede observar de la figura anterior y de los valores de la media y la mediana, que es ligeramente negativo, encontrándose muy próximo al 0. Es decir, prácticamente la mitad de los vuelos (un 51%) presenta una disminución de la duración de vuelo real con respecto a lo que estaba planificado en el plan de vuelo.

En relación a la forma de la distribución, resulta un valor de -20.16 de asimetría y 1010.02 de curtosis. Ese valor de asimetría quiere decir que la cola a la izquierda de la media es mayor que la de la derecha. En el histograma mostrado no se puede observar bien este fenómeno porque está ajustado para ver mejor la distribución en la zona donde es interesante verla. En la figura siguiente se muestra el histograma tal y como se obtiene de los datos sin ajustar y donde se puede observar bien ese fenómeno de asimetría. Hay diferencia de tiempos de vuelo de valores muy altos (o muy bajos) cuyas barras no se ven porque corresponden a muy pocos vuelos; estos casos extremos tienen un impacto significativo en los resultados obtenidos y se estudiarán en capítulos posteriores.

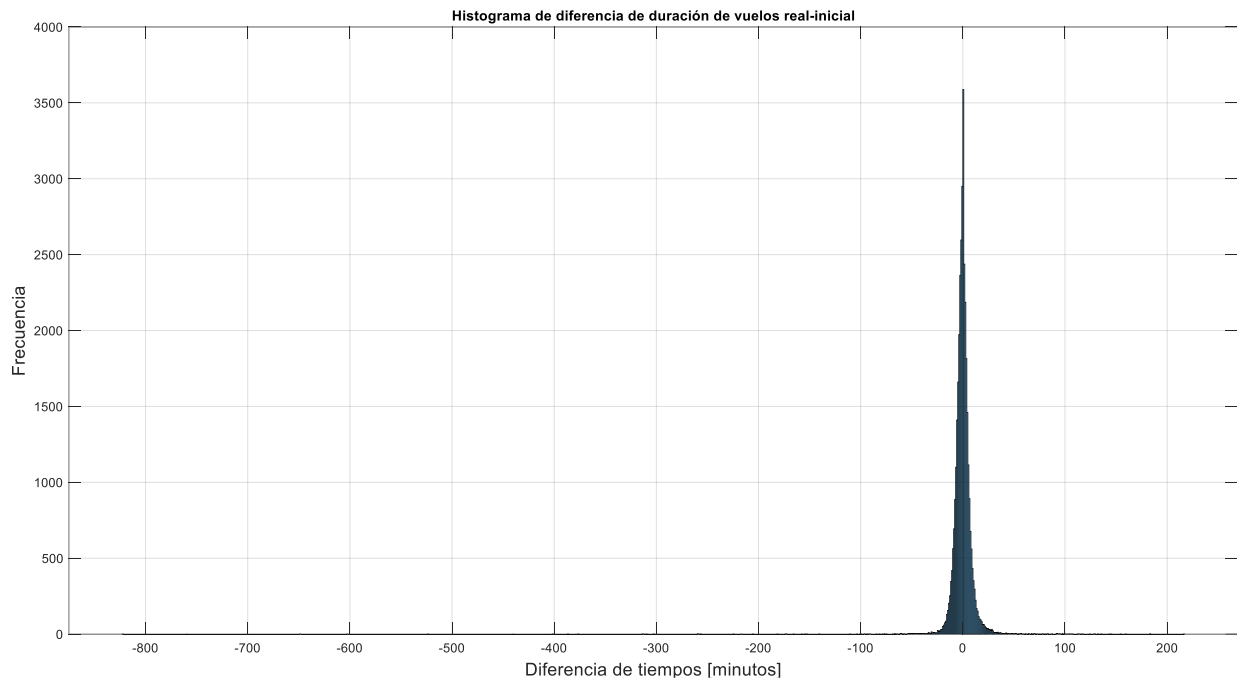


Figura 15. Histograma de diferencia de duración de vuelos real-inicial sin ajustar

Por último, en la siguiente figura se muestra cómo sería una distribución normal (en rojo) y cómo es la distribución de diferencias de duración de vuelos (real-inicial) de este estudio. Se puede observar que el valor de curtosis tan alto indica que la distribución de los datos dados dista mucho de seguir una distribución normal. En el Capítulo 7 se hará una introducción al ajuste de distribuciones de probabilidad a las desviaciones de la duración, el despegue y el aterrizaje de los vuelos a partir de los datos obtenidos a lo largo de este trabajo.

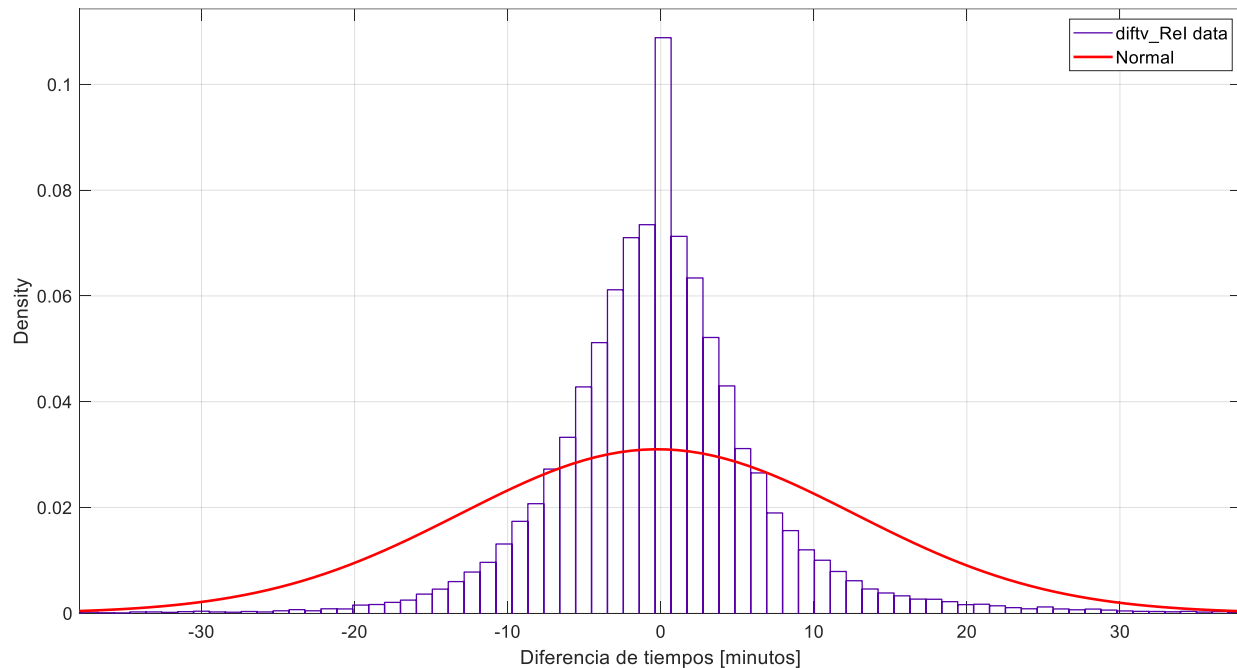


Figura 16. Comparación de distribución normal y distribución de diferencias de duración de vuelos

4.3 Estudio de las diferencias de tiempos de despegue y aterrizaje

Para calcular las diferencias de tiempos de despegue y aterrizaje, se han restado los tiempos primero y último de cada vuelo para cada tipo de trayectoria.

De forma general, se han analizado los retrasos entendidos como la diferencia de tiempos, en el despegue y en

el aterrizaje, de la trayectoria real con respecto a la inicial y a la regulada.

Realizando el mismo análisis que en el apartado anterior, a continuación, se muestran los resultados obtenidos para los retrasos en el despegue y el aterrizaje realizando una comparativa entre los datos de vuelo real y los de vuelo inicial.

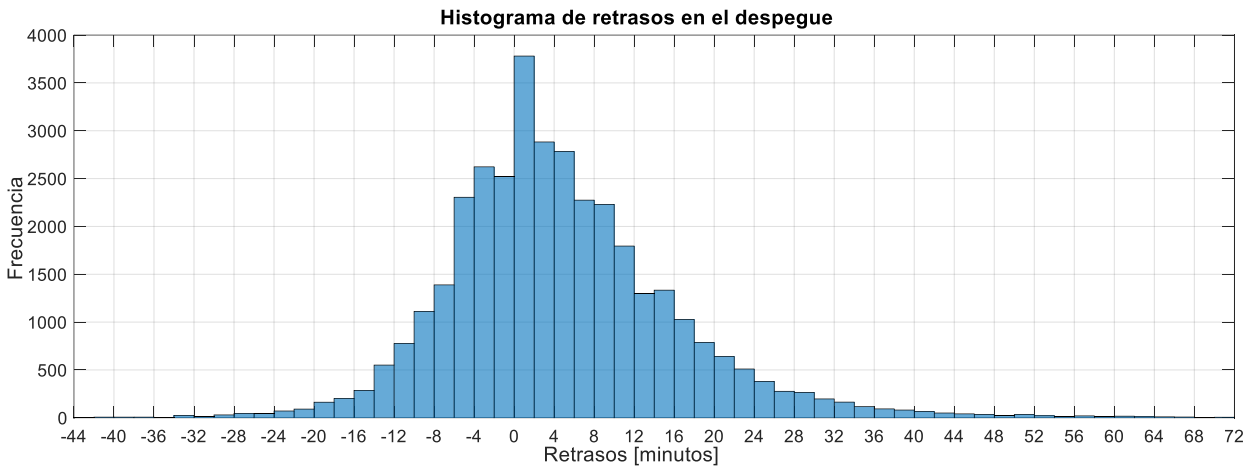


Figura 17. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial

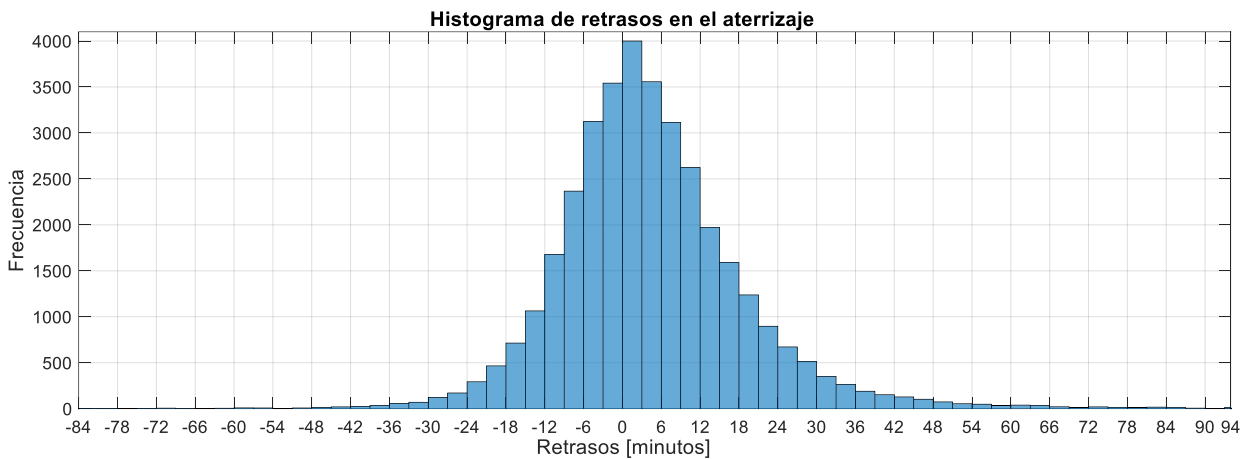


Figura 18. Histograma de retrasos en el aterrizaje de vuelos real-inicial

		Despegue	Aterrizaje
Centro de la distribución	Mediana [minutos]	3.00	3.00
	Media [minutos]	4.74	4.52
Variabilidad	Máximo [minutos]	1417.00	1425.07
	Mínimo [minutos]	-145.00	-835.85
	Desviación estándar [minutos]	19.97	23.56
Forma	Asimetría	38.43	20.41
	Curtosis	2527.81	1380.73

Tabla 3. Indicadores para análisis de retrasos de vuelos real-inicial

Las curvas de percentiles se muestran en la Figura 19 y Figura 20.

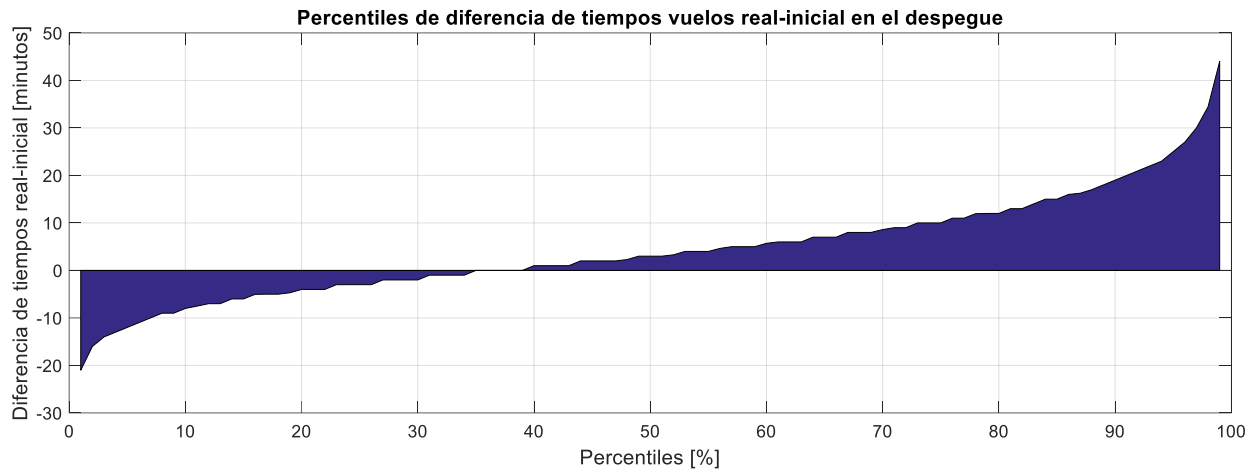


Figura 19. Percentiles de diferencia de tiempos en el despegue de vuelos real-inicial

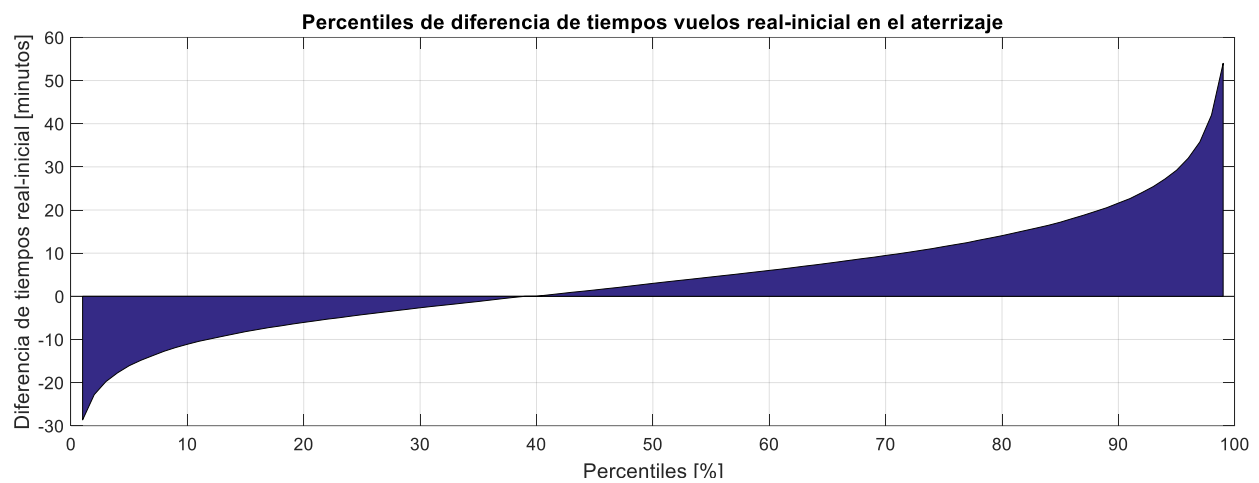


Figura 20. Percentiles de diferencia de tiempos en el aterrizaje de vuelos real-inicial

En cuanto al centro de la distribución, se han obtenido unos valores de 4.74 y 4.52 minutos para la media (despegues y aterrizajes, respectivamente) y de 3 minutos para la mediana en ambos casos. Estos valores positivos corresponden a retrasos en la salida y la llegada de los vuelos. Los percentiles muestran que un 35% de los vuelos salen antes de lo previsto y un 39% llega antes de lo esperado; por tanto, hay más retrasos que adelantos tanto en los despegues como en los aterrizajes.

En relación a la forma de la distribución, resulta un valor de asimetría de 38.43 y 20.41 para despegues y aterrizajes, respectivamente, y un valor de curtosis de 2527.81 y 1380.73. Ese valor de asimetría quiere decir que la cola a la derecha de la media es mayor que la de la izquierda. Recordar que los histogramas están ajustados para su correcta observación y el fenómeno es el mismo que el detallado en el caso de la duración de los vuelos, estando las distribuciones de retrasos muy alejadas de la distribución normal.

Es importante en este punto realizar una observación. Como ya se ha comentado, debido a que el 90% de los vuelos no presentan regulación, no hay diferencia importante en los análisis de vuelos real-inicial y real-regulado, al igual que ocurría en el cálculo de la diferencia de tiempos de vuelo. Sin embargo, es interesante observar que hay una mejora, en el análisis real-regulado, en el tanto por ciento de vuelos que salen antes de lo previsto con respecto a la comparativa real-inicial, ya que en este caso era de un 35% y en real-regulado ha sido del 40%. También ha mejorado el porcentaje de vuelos que llegan antes de lo esperado, siendo de un 39% en el real-inicial y un 42% en el real-regulado. También la media y la desviación disminuyen en este caso con respecto al primero, siendo de 3.14 y 2.92 y 19.41 y 22.95 minutos para despegues y aterrizajes respectivamente. La asimetría y la curtosis han resultado del mismo orden de magnitud.

A la vista de los resultados obtenidos, sería natural observar los resultados obtenidos y los datos proporcionados por STATFOR dados en el Capítulo 2 de este documento. Sin embargo, hay que ser cuidadosos con la comparación entre ambas estadísticas. Por un lado, los resultados presentados en este documento se refieren únicamente a un solo día y el estudio de STATFOR es agregado. Y, por otro lado, es importante recordar que,

tal y como se indicó en el Capítulo 2, EUROCONTROL, a través de CODA y STATFOR, proporciona información de los retrasos de dos formas diferentes: retrasos “all-causes” y retrasos ATFM. Estos últimos se miden como la diferencia entre el ETOT y el CTOT, por lo que incluyen, además del vuelo completo, los tiempos de los taxis¹⁶. Sin embargo, las trayectorias que proporcionaba NEST no incluían los tiempos de taxi. Por lo tanto, aunque los resultados obtenidos son razonables, no se pueden obtener más conclusiones de la comparación de ambas fuentes.

4.4 Estudio de los casos extremos

A continuación, se van a exponer los resultados (vuelos real-inicial) del estudio de los casos de máximos retrasos y adelantos, además de máximas diferencias en las duraciones de vuelo para intentar explicar a qué se deben ciertos valores que, a priori, podrían ser anómalos. Además, y aunque no se puedan estudiar todos los casos por la limitación del propio trabajo, este análisis sirve para conocer cómo se puede utilizar NEST para extraer información de los archivos .so6 que se publican. El análisis más detallado de estos casos se encuentra en el Anexo, al final de este documento.

1) Máximos aumentos en la duración de los vuelos:

	216.68 minutos (3.61 horas)	183.68 minutos (3.061 horas)	183.55 minutos (3.059 horas)
Origen	EGNV- Aeropuerto Durham Tees Valley (Reino Unido)	OJAM - Aeropuerto Civil de Amán (Jordania)	EDDW- Aeropuerto de Bremen (Alemania)
Destino	EGNX- Aeropuerto East Midlands (Reino Unido)	LIBR - Aeropuerto de Brindisi (Italia)	ETNH- Base Aérea de Hohn (Alemania)
Aeronave	Saab 2000	Lockheed C-130 Hercules	Cessna CitationJet/M2 (modelo 525)
Comentarios	El avión va por zonas que no estaban previstas y tarda mucho más. El Saab 2000 es un avión de pasajeros bimotor turbohélice, con operadores tanto comerciales como militares. Por lo tanto, podría tratarse de un vuelo militar.	El avión Lockheed C-130 Hercules es un avión de transporte táctico medio-pesado y es el principal avión de transporte de muchas fuerzas armadas del mundo. Por ello, este vuelo debería de ser militar. Por alguna razón, el vuelo se desvió y en lugar de aterrizar en LIBR, lo hizo en OJAM - Aeropuerto de Eindhoven (Holanda).	El Cessna CitationJet / CJ (Modelo 525) es un avión de negocios ligero, dotado de dos motores a reacción y con capacidad para 4 pasajeros, por lo que se trataría de un vuelo privado (de negocios).

	159.27 minutos (2.654 horas)	155.00 minutos (2.583 horas)	145.72 minutos (2.429 horas)
Origen	EGAA- Aeropuerto Internacional de Belfast (Reino Unido)	LKTB- Aeropuerto de Brno-Tuřany (República Checa)	ZZZZ. Aeropuerto Internacional John F. Kennedy (Estados Unidos) (por las coordenadas)
Destino	EHAM- Aeropuerto de Ámsterdam Schiphol (Holanda)	LKTB- Aeropuerto de Brno-Tuřany (República Checa)	ZZZZ. Aeropuerto Internacional John F. Kennedy (Estados Unidos) (por las coordenadas)
Aeronave	Airbus A319	Cessna 172	Cessna P210

¹⁶ Existen dos tiempos de taxi: el tiempo taxi-out, que se define como la diferencia entre el AOBT (Actual Off-Block Time) y el ATOT (Actual Take-Off Time); y el taxi-in, que es la diferencia entre el ALDT (Actual Landing Time) y el AIBT (Actual In-Block Time).

Comentarios	El Airbus A319 es un avión civil de pasajeros. Al buscar el call sign de este vuelo (EZY51BU), se observa que corresponde a EasyJet. No se encuentra más información que ayude a establecer el motivo de este retraso.	El Cessna 172 Skyhawk es un avión monomotor de ala alta con capacidad para cuatro personas y es un excelente aparato para operaciones de búsqueda y rescate y, además, figura en numerosos países como parte de las flotas de las Fuerzas Armadas para tareas, por ejemplo, de vigilancia aérea. Por lo tanto, se podría pensar que puede haber sido un vuelo militar.	El Cessna 210 Centurion es un avión monomotor de propósito general de altas prestaciones y capacidad de 6 plazas. Por lo tanto, este vuelo podría ser chárter o de prueba, por ejemplo. Además, según FlightRadar24, pertenece a un propietario privado.
-------------	--	--	--

	143.95 minutos (2.399 horas)
Origen	UKBB. Aeropuerto Internacional de Boryspil (Ucrania)
Destino	UKBB. Aeropuerto Internacional de Boryspil (Ucrania)
Aeronave	Boeing 737-300
Comentarios	Los 737-300 de pasajeros pueden ser también convertidos en versión carguera. En el caso militar, algunas Fuerzas Aéreas usan este avión como transporte multipropósito, mezclándose el uso carguero, con el de pasajeros, de estos mismos aviones. Por lo tanto, podría tratarse de un vuelo militar.

Tabla 4. Máximos aumentos en la duración de los vuelos

2) Máximos recortes en la duración de los vuelos:

	-822.85 minutos (-13.714 horas)	-648.71 minutos (-10.812 horas)	-603.00 minutos (-10.050 horas)
Origen	LICZ- Base Aérea de Sigonella (Italia)	OJMS- Base Aérea Muwaffaq Salti (Jordania)	OJMS- Base Aérea Muwaffaq Salti (Jordania)
Destino	LICZ- Base Aérea de Sigonella (Italia)	OJMS- Base Aérea Muwaffaq Salti (Jordania)	OJMS- Base Aérea Muwaffaq Salti (Jordania)
Aeronave	ZZZZ	ZZZZ	ZZZZ
Comentarios	Aunque con aeronave desconocida, se trataría presumiblemente de un vuelo militar.	Aunque con aeronave desconocida, se trataría presumiblemente de un vuelo militar.	Aunque con aeronave desconocida, se trataría presumiblemente de un vuelo militar.

	-523.88 minutos (-8.731 horas)	-401.28 minutos (-6.688 horas)	-386.40 minutos (-6.44 horas)
Origen	LTAN - Aeropuerto de Konya (Turquía)	KCLT - Aeropuerto Internacional de Charlotte-Douglas (Estados Unidos)	LTBA - Aeropuerto Internacional Atatürk (Turquía)
Destino	ETNG - Base Aérea Militar Geilenkirchen de la OTAN (Alemania)	EIDW - Aeropuerto Internacional de Dublín (Irlanda)	KJFK - Aeropuerto Internacional John F. Kennedy (Estados Unidos)
Aeronave	E3TF	Boeing 757-200	Boeing 777-300ER
Comentarios	El Boeing E-3 Sentry (Centinela) es un sistema de alerta y control aerotransportado (AWACS) derivado del avión comercial Boeing 707 y con	Se observa que en la trayectoria real solo hay un segmento de tiempo comunicado	Parece que el vuelo se ha desviado y ha aterrizado mucho antes de lo previsto y en otro

	un enorme radar rotativo que porta en la parte superior. Realiza tareas de vigilancia, mando, control y comunicaciones. Es usado por varias fuerzas aéreas. Se podría concluir que es un vuelo militar.	(unos 5 minutos) y ya no hay más datos de vuelo real.	aeropuerto. Podría haberse debido a incidencias en vuelo, del aeropuerto de destino, etc.
--	---	---	---

Tabla 5. Máximos recortes en la duración de los vuelos

3) Máximos retrasos:

- Despegues:

	1417 minutos (23.6 horas)	1406 minutos (23.4 horas)	1384 minutos (23.1 horas)
Origen	CYUL - Aeropuerto Internacional Pierre Elliott Trudeau (Canadá)	OISS - Aeropuerto Internacional de Shiraz (Irán)	LFOE - Base militar Évreux-Fauville (Francia)
Destino	USPP - Aeropuerto Internacional de Perm-Bolshoye Sávinov (Rusia)	UGTB - Aeropuerto Internacional de Tiflis (Georgia)	FEFF - Aeropuerto Internacional de Bangui M'Poko (República Centroafricana)
Aeronave	GLEX	ZZZZ	Boeing C17 Globemaster III
Comentarios	GLEX o Bombardier Global Express es un avión de negocios de reacción, por lo que se trataría de un vuelo de privado (de negocios).	La aeronave es desconocida, por lo que no es posible conocer el tipo de vuelo que fue.	El Boeing C-17 Globemaster III es un avión de transporte militar pesado de largo alcance, por lo que se podría concluir que este vuelo es de carácter militar o de carga.

	1222 minutos (20.4 horas)	911 minutos (15.2 horas)	285 minutos (4.7 horas)
Origen	EDBH – Aeropuerto Stralsund Barth (Alemania)	KMIA - Aeropuerto Internacional de Miami (Estados Unidos)	LTAN - Aeropuerto de Konya (Turquía)
Destino	LHFM - Aeropuerto Fertőszentmiklós (Hungría)	OTHH - Hamad International Airport (Qatar)	ETNG - Base Aérea Militar Geilenkirchen de la OTAN (Alemania)
Aeronave	Cessna Turbo Skylane RG (C82R)	Boeing 777-300ER (77W)	E3TF
Comentarios	El Cessna 182 Skylane es un avión ligero monomotor de 4 plazas (la versión RG es de tren de aterrizaje retráctil) y es el segundo modelo más popular de Cessna tras el 172. Se podría concluir que es un vuelo privado (de negocios).	El Boeing 777 es un avión comercial de reacción, bimotor, de largo alcance y fuselaje ancho; es el avión birreactor más grande del mundo. Parece comercial, aunque podría tratarse de un vuelo charter.	El Boeing E-3 Sentry (Centinela) es un sistema de alerta y control aerotransportado (AWACS) derivado del avión comercial Boeing 707 y con un enorme radar rotativo que porta en la parte superior. Realiza tareas de vigilancia, mando, control y comunicaciones. Es usado por varias fuerzas aéreas. Se podría concluir que es un vuelo militar.

Tabla 6. Máximos retrasos en los despegues

- Aterrizajes:

	1425 minutos (23.7 horas)	1406 minutos (23.4 horas)	1376 minutos (22.9 horas)
Comentarios	Es el mismo vuelo que daba el mayor retraso en	Es el mismo vuelo que daba el segundo mayor retraso en el	Es el mismo vuelo que daba el tercer mayor retraso en el

	el despegue (CYUL-USPP, aeronave GLEX).	despegue (OISS-UGTB, aeronave desconocida).	despegue (LFOE-FEFF, aeronave Boeing C17 Globemaster III).
--	---	---	--

	1222 minutos (20.4 horas)	911 minutos (15.2 horas)	299 minutos (5 horas)
Origen			LBPG - Base Aérea Graf (Bulgaria)
Destino			LBPG - Base Aérea Graf (Bulgaria)
Aeronave			McDonnell Douglas F-15 Eagle
Comentarios	Es el mismo vuelo que daba el cuarto mayor retraso en el despegue (EDBH-LHFM, aeronave Cessna Turbo Skylane RG (C82R)).	Es el mismo vuelo que daba el quinto mayor retraso en el despegue (KMIA-OTHH, aeronave Boeing 777-300ER (77W)).	El McDonnell Douglas F-15 Eagle es un caza todo tiempo bimotor diseñado para ganar y mantener la superioridad aérea en el combate aéreo. Se trataría de un vuelo militar.

Tabla 7. Máximos retrasos en los aterrizajes

4) Máximos adelantos:

- Despegues:

	-145 minutos (-2.4 horas)	-93 minutos (-1.6 horas)	-90 minutos (-1.5 horas)
Origen	ZZZZ - Aeropuerto Internacional John F. Kennedy (Estados Unidos) (por las coordenadas de la última posición comunicada)	LSZH- Aeropuerto Internacional de Zúrich (Suiza)	LTAU- Aeropuerto Internacional de Erkiyet (Turquía)
Destino	EKEB - Aeropuerto de Esbjerg (Dinamarca)	OJAI - Aeropuerto Internacional de Queen Alia (Jordania)	LTAG - Base aérea de Incirlik (Turquía)
Aeronave	AgustaWestland AW189	Airbus A319	CASA CN-235
Comentarios	El AgustaWestland AW189 es un helicóptero de tamaño medio de 18 plazas, bimotor y polivalente, de uso civil. Podría tratarse de un vuelo chárter o privado (de negocios).	El Airbus A319 es un avión civil de pasajeros. Sin embargo, al mirar el call-sign, se observa que la aerolínea Royal Jordanian tiene un A319 de carga, por lo que podría tratarse de un vuelo de carga.	El CASA CN-235 es un avión turbohélice de transporte táctico y patrulla marítima. En el transporte militar estándar, está destinado a misiones de transporte de corto y medio alcance, tanto de soldados como de cargas. Así que, presumiblemente, se trataría de un vuelo militar.

	-88 minutos (-1.47 horas)	-85 minutos (-1.4 horas)
Origen	LGIR- Aeropuerto Internacional de Heraclión Nikos Kazantzakis (Grecia)	LKPR- Aeropuerto Internacional de Praga Václav Havel (República Checa)
Destino	EGKK - Aeropuerto de Gatwick (Reino Unido)	EDDK - Aeropuerto Cologne Bonn (Alemania)
Aeronave	Airbus A320	Boeing 757-200
Comentarios	El Airbus A320 es un avión comercial de reacción, de fuselaje estrecho y de corto a medio alcance. Entre sus diversos modelos, se incluyen los aviones de negocios ACJ. Podría tratarse de un vuelo de negocios.	El Boeing 757 es un avión comercial de corto, medio y largo radio de acción y de fuselaje estrecho. Atendiendo al call sign, se trata de un vuelo de UPS, por lo que se tendría un vuelo de carga.

Tabla 8. Máximos adelantos en los despegues

- Aterrizajes:

	-836 minutos (-14 horas)	-630 minutos (-10.5 horas)	-468 minutos (-7.8 horas)
Origen	LICZ- Base Aérea de Sigonella (Italia)	OJMS- Base Aérea Muwaffaq Salti (Jordania)	OJMS- Base Aérea Muwaffaq Salti (Jordania)
Destino	LICZ- Base Aérea de Sigonella (Italia)	OJMS- Base Aérea Muwaffaq Salti (Jordania)	OJMS- Base Aérea Muwaffaq Salti (Jordania)
Aeronave	ZZZZ	ZZZZ	ZZZZ
Comentarios	Aunque con aeronave desconocida, se trataría presumiblemente de un vuelo militar.	Aunque con aeronave desconocida, se trataría presumiblemente de un vuelo militar.	Aunque con aeronave desconocida, se trataría presumiblemente de un vuelo militar.

	-401 minutos (-6.7 horas)	-400 minutos (-6.67 horas)	-368 minutos (-6.1 horas)
Origen	KCLT - Aeropuerto Internacional de Charlotte-Douglas (Estados Unidos)	ETNG - Base Aérea Militar Geilenkirchen de la OTAN (Alemania)	LTBA - Aeropuerto Internacional Atatürk (Turquía)
Destino	EIDW - Aeropuerto Internacional de Dublín (Irlanda)	ETNG - Base Aérea Militar Geilenkirchen de la OTAN (Alemania)	KJFK - Aeropuerto Internacional John F. Kennedy (Estados Unidos)
Aeronave	Boeing 757-200	E3TF	Boeing 777-300ER
Comentarios	Se observa que en la trayectoria real solo hay un segmento de tiempo comunicado (unos 5 minutos) y ya no hay más datos de vuelo real.	El Boeing E-3 Sentry (Centinela) es un sistema de alerta y control aerotransportado (AWACS) derivado del avión comercial Boeing 707 y con un enorme radar rotativo que porta en la parte superior. Realiza tareas de vigilancia, mando, control y comunicaciones. Es usado por varias fuerzas aéreas. Se podría concluir que es un vuelo militar.	Parece que el vuelo se ha desviado y ha aterrizado mucho antes de lo previsto y en otro aeropuerto. Podría haberse debido a incidencias en vuelo, del aeropuerto de destino, etc.

Tabla 9. Máximos adelantos en los aterrizajes

Es importante recordar la clasificación que hace STATFOR para los vuelos IFR en siete categorías o segmentos de mercado: de negocios, low-cost, regulares tradicionales, chárter, militares IFR, carga y otros. Esta clasificación, aunque no es perfecta, ayuda a entender mejor el comportamiento de los vuelos.

A la hora de entender los retrasos, se hace hincapié en cómo afecta a un pasajero que su vuelo despegue o aterrice en un horario diferente al que debería ser. Es decir, tanto las compañías como los estudios de retrasos que se realizan están encaminados a satisfacer al pasajero en términos de puntualidad. Por lo tanto, para estudiar estos retrasos, no se deberían tener en cuenta retrasos de vuelos militares, de carga, chárter o de negocios, porque ni directa ni indirectamente afectan al pasajero, usuario medio de vuelos regulares tradicionales y low-cost.

Así, se ha observado en este capítulo que la gran mayoría de grandes retrasos, adelantos y diferencias de duración de los vuelos se dieron en vuelos militares, de negocios, de carga y chárter (lo que parecía en principio lógico porque, salvo casos muy puntuales, un vuelo regular no debería tener retrasos tan grandes). También se han encontrado vuelos en los que el origen y el destino son el mismo, lo que podrían ser vuelos de entramiento o de prueba. Por ello, y para ver cómo en realidad el pasajero percibe los retrasos, en el siguiente capítulo se van a dividir los vuelos en dos grandes grupos: regular de pasajeros y resto de vuelos. En el primer grupo, se encontrarán los vuelos regulares tradicionales y low-cost; y en el segundo grupo, se encontrarán el resto de vuelos: de negocios, militares, carga, chárter, etc.

5 ESTUDIO DE LOS RETRASOS SEGÚN LOS SEGMENTOS DE MERCADO

En este capítulo, y para ver cómo en realidad el pasajero percibe los retrasos, se van a dividir los vuelos en dos grandes grupos, teniendo en cuenta las categorías definidas por EUROCONTROL según los segmentos de mercado: regular de pasajeros y resto de vuelos. En el primer grupo, se encuentran los vuelos regulares tradicionales y low-cost; y en el segundo grupo, se encuentran el resto de vuelos: de negocios, militares, carga, chárter, de escuela o de prueba, etc. Con esta división se pretende “filtrar” aquellos vuelos con retrasos muy grandes que se ha visto que corresponden, en su gran mayoría, a vuelos militares, de negocios, de carga o chárter, y así sacar las estadísticas de los retrasos únicamente de vuelos regulares. Es importante recalcar que algunas aerolíneas regulares tienen algún vuelo de carga o chárter; estos vuelos, al darse en muy poco número, se han dejado en el grupo llamado regular de pasajeros.

5.1 Estudio en dos grupos de vuelos: regular de pasajeros y resto (de negocios, militares, carga y chárter)

Para realizar la división, se han seguido una serie de pasos que se detallan a continuación:

- 1) Por un lado, se ha extraído de NEST en formato de Excel un archivo que contiene los 524 operadores que operaron el día 09/09/16 con un número mayor o igual a 5 vuelos y se han dispuesto de forma ordenada de más a menos vuelos operados. De ellos, 193 operadores volaron con más de 15 vuelos este día. De estos 193 se ha documentado:
 - nombre;
 - código OACI correspondiente;
 - categoría de usuario (regular tradicional, chárter, de carga, privado, de negocios, militar, academia de vuelo, ...);¹⁷
 - clasificación del usuario (1: regular tradicional (con o sin algo de chárter, carga, etc.), 2: resto);
 - low-cost (1: sí, 0: no);
 - aeronaves que opera (en fecha de mayo de 2018; fuente: FlightRadar);
 - aeronaves que operaron el 09/09/2016;
 - y algunas notas adicionales.

Un ejemplo de ello, que muestra los primeros operadores de la lista, se muestra en la Figura 21.

¹⁷ La categorización de cada aerolínea en un segmento de mercado se ha realizado manualmente, de acuerdo a la información proporcionada por la propia aerolínea y los vuelos que operan normalmente. Además, se ha hecho uso de las listas que proporciona STATFOR de operadores low-cost y de carga y aeronaves de negocios; el uso de estas listas se detallará más adelante.

Operador	Código OACI	Categoría de usuario	Clasificación categoría de usuario (1: regular tradicional (con o sin algo de chárter, carga, etc.); 2: privado, chárter, carga, ZZZ)	Low-cost (1: sí; 0: no)	Aeronaves que opera (MAYO 2018, FUENTE: FLIGHTRADAR)	Aeronaves que operaron el 16/09/09 (EN ROJO LOS QUE SE USARON)	Notas
Ryanair	RYR	Regular tradicional y charter	1	1	B737, B738, L145	B738, L145	
Turkish Airlines	THY	Regular tradicional, de carga y charter	1	0	A319, A320, A321, A332, A333, A343, B737, B738, B739, B77L, B77W	A310, A319, A320, A321, A332, A333, A343, B737, B738, B739, B77L, B77W, E190	
Lufthansa	DLH	Regular tradicional y chárter	1	0	A20N, A319, A320, A321, A333, A343, A346, A359, A388, B744, B748, C525, CRJ9, E190, E195	A20N, A319, A320, A321, A333, A343, A346, A359, A388, B733, B744, B748, C525, CRJ9, E190, E195	De vuelos de carga se encarga Lufthansa Cargo
EasyJet	EZY	Regular tradicional	1	1	A20N, A319, A320, B462, B463	A20N, A319, A320, B462, B463	
SAS (Scandinavian Airlines System)	SAS	Regular tradicional, carga y chárter	1	0	A20N, A319, A320, A321, A333, A343, AT76, B736, B737, B738, CRJ9, CRJX	A20N, A319, A320, A321, A333, A343, AT75, AT76, B736, B737, B738, CRJ9, CRJX	
	ZZZ		2	0			
British Airways	BAW	Regular tradicional y chárter	1	0	A20N, A318, A319, A320, A321, A388, B734, B738, B744, B763, B772, B77W, B788, B789, D328, E170, E190, J328, JS31, SB20	A20N, A318, A319, A320, A321, A388, B734, B738, B744, B763, B772, B77W, B788, B789, D328, E170, E190, J328, JS31, SB20	
Vueling	VLG	Regular tradicional	1	1	A319, A320, A321	A319, A320, A321	
KLM	KLM	Regular tradicional	1	0	A332, A333, B737, B738, B739, B744, B772, B77W, B789, E190, E75L	A332, A333, B737, B738, B739, B744, B772, B77W, B789, E190, E75L	
							No aparece en FlightRadar porque se declaró en bancarrota en 2017 (las

Figura 21. Extracto de la lista de aerolíneas clasificadas

- Por otro lado, se han extraído los datos del call sign de los archivos .so6.
- Después, se ha identificado a qué operador pertenece cada vuelo a través del call sign, quedando finalmente relacionados el vuelo, el operador, la clasificación de usuario y si es o no low-cost, tal y como se observa en la siguiente figura.

callsign	operador	clasificacion usuario	low cost
AFL2605	AFL	1	0
AFL2513	AFL	1	0
AFL2317	AFL	1	0
AFL525	AFL	1	0
AFL2135	AFL	1	0
AFL2415	AFL	1	0
AFL1893	AFL	1	0
AFL2619	AFL	1	0
AFL2193	AFL	1	0
BRU736	BRU	1	0
AFL2355	AFL	1	0
FPO5561	FPO	2	0
AFL2119	AFL	1	0
AFL2423	AFL	1	0
SBI907	SBI	1	0
AFL1864	AFL	1	0

Figura 22. Extracto de la lista de vuelos clasificados que se exporta a Matlab

- Posteriormente, se ha asociado la nueva información a la que ya se contemplaba en el .so6 para cada vuelo.
- Por último, se ha tenido en cuenta que STATFOR, de EUROCONTROL, publica cada año una lista de operadores que son considerados low-cost y de carga y aeronaves que se consideran business (o de negocios), junto con el tipo de vuelo correspondiente a cada clasificación y que debe aparecer en el plan de vuelo¹⁸¹⁹. Por ejemplo, se muestra en la Figura 23 un extracto de la lista de aeronaves que STATFOR consideró tipo business en 2016.

¹⁸ La OACI especifica que, en el plan de vuelo, casilla 8, debe indicarse el tipo de vuelo. Así, establece 5 tipos definidos por una letra como código: S – Servicio aéreo regular (Scheduled), N – Transporte aéreo no regular (non-scheduled), G – Aviación general (general aviation), M – Militar (military) y X – Otra categoría distinta a las indicadas (por ejemplo, vuelos de escuela o de pruebas).

¹⁹ STATFOR clasifica los movimientos IFR en 9 tipos: (1) Aviación de negocios (para todos los movimientos IFR dados por la lista de aeronaves de negocios); (2) Militares IFR (vuelos tipo M); (3) De carga (para todos los movimientos dados por el operador, aeronave y call sign en la lista); (4) Low-Cost (para todos los vuelos dados por el operador y el aeropuerto de salida y llegada en la lista); (5) Otros vuelos programados (vuelos tipo S); (6) Comerciales no programados (vuelos tipo N, por ejemplo, chárter, taxi aéreo, ..., no incluidos en las reglas de vuelos business); (7) Programados tradicionales (vuelos tipo S); (8) Aviación de negocios (todos los vuelos IFR restantes dados por aeronaves concretas en la lista y aeronaves concretas con tipo de vuelo G); y (9) Vuelos IFR restantes.

BUSINESS AVIATION RULES			
FLIGHT TYPE	OPERATOR ICAO CODE	AC TYPE ICAO CODE	Remark
Business	ALL	A318	ICAO flight type G only
Business	ALL	A319	ICAO flight type G only
Business	ALL	A320	ICAO flight type G only
Business	ALL	ASTR	
Business	ALL	B350	ICAO flight type G and N only
Business	ALL	B737	ICAO flight type G only
Business	ALL	B738	ICAO flight type G only
Business	ALL	B739	ICAO flight type G only
Business	ALL	B748	ICAO flight type G only
Business	ALL	B77L	ICAO flight type G only
Business	ALL	B77W	ICAO flight type G only
Business	ALL	B788	ICAO flight type G only
Business	ALL	B789	ICAO flight type G only
Business	ALL	B58T	
Business	ALL	BE10	
Business	ALL	BE20	
Business	ALL	BE30	
Business	ALL	BE40	
Business	ALL	BE55	

Figura 23. Extracto de la lista de aeronaves tipo business según STATFOR 2016

Como se puede observar (y es algo que ocurre en la lista completa), STATFOR no considera operadores tipo business, sino aeronaves, ya sea las de un tipo para todos los operadores o únicamente las de tipo G (y N, en algunas ocasiones) según la OACI. Tal y como se ha indicado anteriormente, los vuelos de negocios y algunos chárter se han dejado en el grupo 1, ya que constituyen un porcentaje muy bajo con respecto al total de vuelos y, además, muchos los operan aerolíneas regulares.

Por otro lado, sí se han filtrado los vuelos considerados de carga. Estos suelen ser más largos y sí hay operadores dedicados únicamente a este tipo de vuelos. Un extracto de la lista de STATFOR para vuelos de carga se encuentra en la Figura 24.

CARGO RULES			
FLIGHT TYPE	OPERATOR ICAO CODE	AC TYPE ICAO CODE	FLIGHT CALLSIGN
Cargo	AAR	B744	ALL
Cargo	ABR	ALL	ALL
Cargo	ABW	ALL	ALL
Cargo	ABX	ALL	ALL
Cargo	ACP	ALL	ALL
Cargo	ADB	ALL	ALL
Cargo	AEG	ALL	ALL
Cargo	AFR	B77L	AFR67xx
Cargo	AHS	ALL	ALL
Cargo	AHU	ALL	ALL
Cargo	ALL	A124	ALL
Cargo	ALL	A124	ALL
Cargo	ALL	A225	ALL
Cargo	ALL	A225	ALL
Cargo	ALL	A3ST	ALL
Cargo	ALL	A3ST	ALL

Figura 24. Extracto de la lista de operadores, aeronaves y call sign tipo de carga según STATFOR 2016

De esta lista, se han buscado en los datos de vuelos de los que se dispone de NEST para ver si en el día 09/09/2016 se produjo algún vuelo que cumpliera alguno de los requisitos. A los que se han encontrado en el grupo 1 (regular de pasajeros) se les ha llamado “excepciones”, ya que, aunque inicialmente se consideraron de este grupo por pertenecer a operadores principalmente regulares tradicionales, por encontrarse en esta lista se debían mover al grupo 2 (resto de vuelos). Las excepciones encontradas han sido las siguientes:

- Operador DAH, vuelos con aeronave C130 y todos los callsign.
- Operador AFR, vuelos con B77L y callsign AFR67xx.
- Operador ELY, vuelos con B744 y callsign ELY8xx.
- Operador ICE, vuelos con callsign ICE7xx y todas las aeronaves.

- Operador THY, vuelos con callsign THY6xxx y todas las aeronaves.
- Operador ETD, vuelos con A332, B77L, A306, B744 y callsign ETD9xx.
- Operador ETH, vuelos con B77L y callsign ETH37xx.
- Operador RAM, vuelos con B733 y todos los callsign.
- Operador QTR, vuelos con callsign QTR8xxx y todas las aeronaves.
- Operador SVA, vuelos con callsign SVA9xx y todas las aeronaves.
- Operador RJA, vuelos con A310 y todos los callsign.
- Operador UAE, vuelos con A310 y todos los callsign, vuelos con callsign UAE9xxx y todas las aeronaves y vuelos con B744 y todos los callsign.
- Aeronaves (independientemente del operador) que corresponden a vuelos de carga: A124, A225, A3ST, AN12, AN22, AN26, AN72, AN74, B742, CVLT, DC86, F27, IL76, SH36.

Así, en el día de estudio se han encontrado 119 excepciones.

- 6) Finalmente, ya es posible separar en los dos grupos establecidos. En el grupo 1 se incluyen todos los vuelos con clasificación de usuario valor 1 y se excluyen las excepciones anteriormente encontradas, dando un total de 26979 vuelos. En el grupo 2 se incluyen los vuelos con clasificación de usuario valor 2 y se incluyen las excepciones que se han eliminado del grupo 1, resultando 2344 vuelos. Se puede observar que 2344 vuelos de 29323 (el total de vuelos estudiados en la clasificación en dos grupos), constituyen un 8% de los vuelos. Teniendo en cuenta que, según STATFOR, cerca del 90% de los vuelos en 2016 fueron regulares tradicionales y low-cost y que se han obviado del estudio aquellos operadores con menos de 15 vuelos el día 09/09/2016 (que presumiblemente serán la mayoría del grupo 2), es a priori normal que el porcentaje de vuelos del grupo 1 sea un poco mayor.

Una vez hecho todo esto, se realiza un estudio similar al del Capítulo 4 que se hizo para todos los vuelos. Al final del capítulo se resumirán y analizarán los resultados obtenidos.

5.1.1 Grupo 1 – Regular de pasajeros

5.1.1.1 Estudio de la duración de los vuelos

Procediendo de igual forma que en el Capítulo 4, a continuación, se muestran los resultados obtenidos para la diferencia en la duración de los vuelos realizando una comparativa entre los datos de vuelo real y los de vuelo inicial.

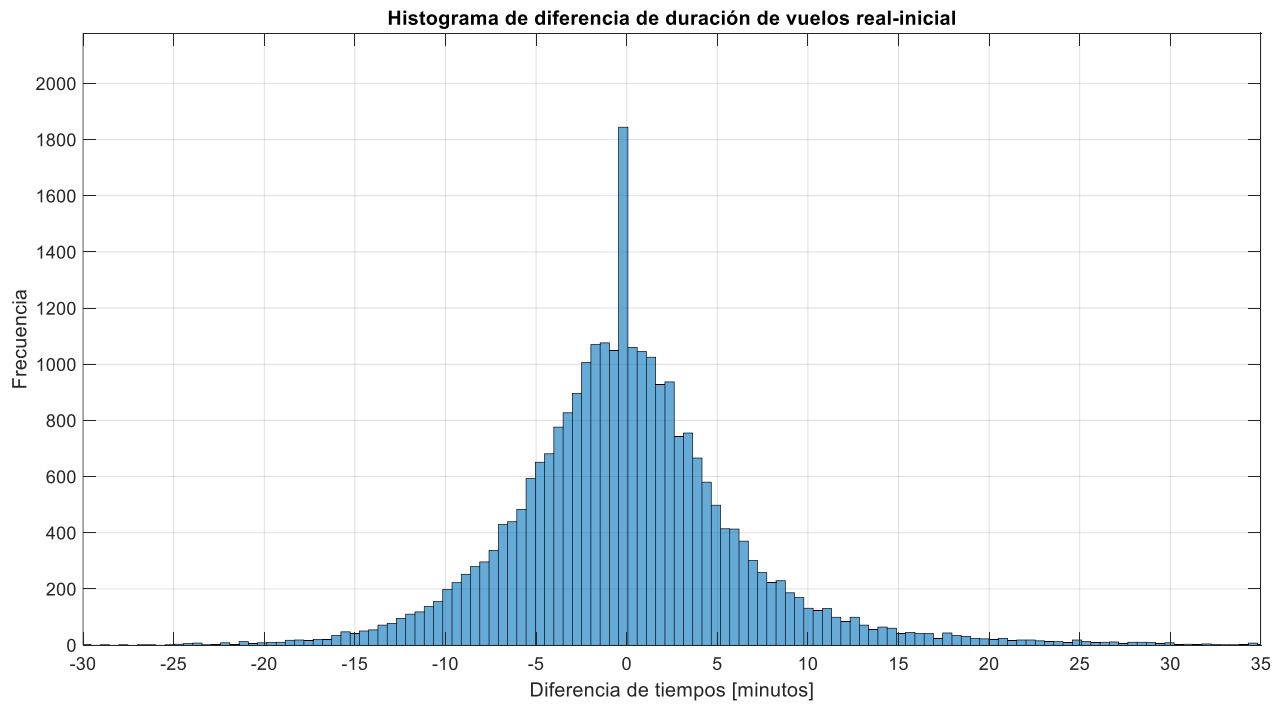


Figura 25. Histograma de diferencia de duración de vuelos real-inicial, grupo 1

Centro de la distribución	Mediana [minutos]	-0.12
	Media [minutos]	0.06
Variabilidad	Máximo [minutos]	216.68
	Mínimo [minutos]	-401.28
	Desviación estándar [minutos]	8.28
Forma	Asimetría	-6.40
	Curtosis	469.64

Tabla 10. Indicadores para análisis de duración de vuelos real-inicial, grupo 1

5.1.1.2 Estudio de las diferencias de tiempos de despegue y aterrizaje

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los retrasos en el despegue y el aterrizaje realizando una comparativa entre los datos de vuelo real y los de vuelo inicial para el grupo 1.

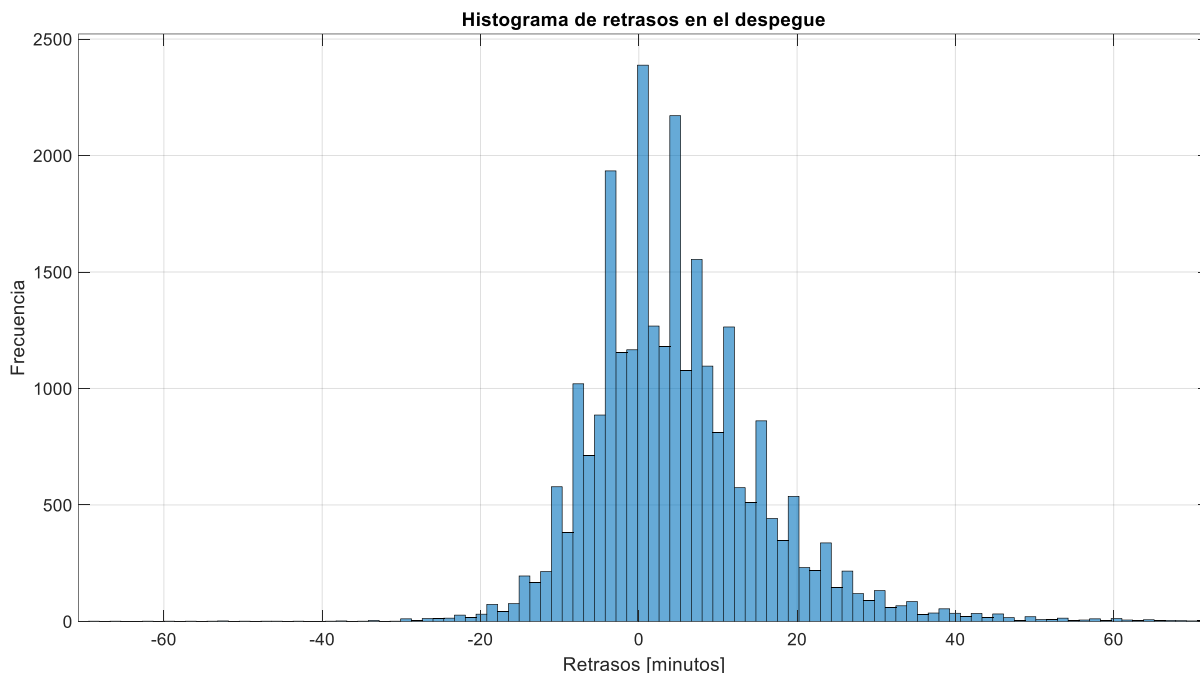


Figura 26. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial, grupo 1

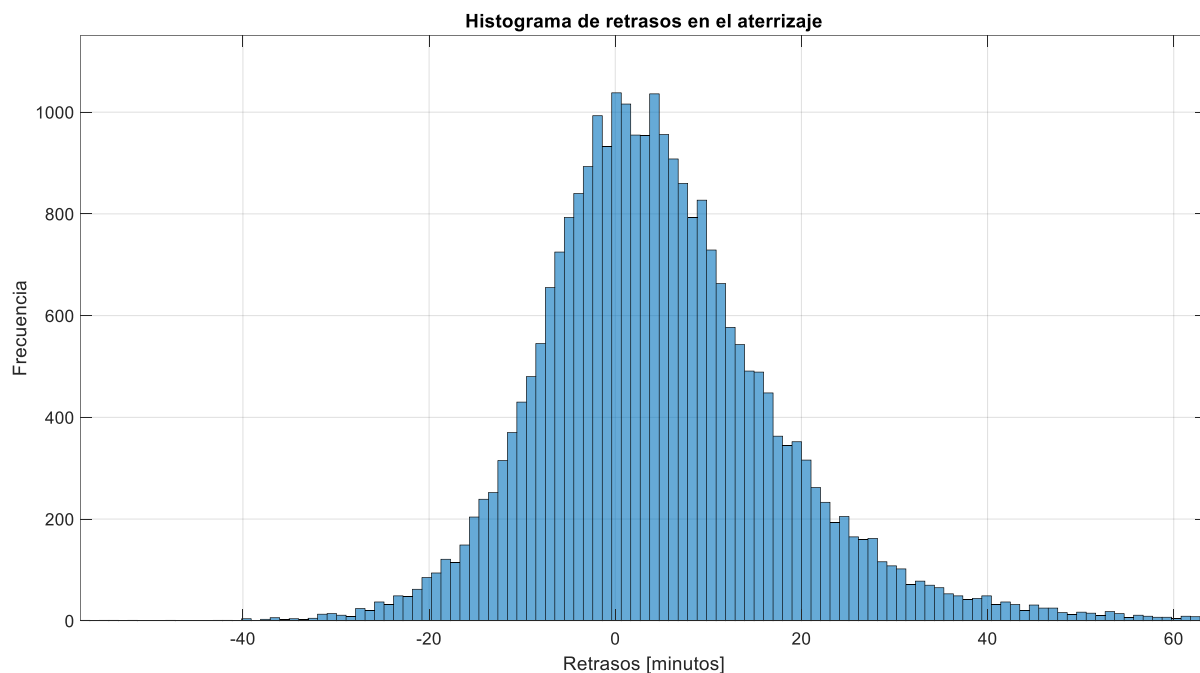


Figura 27. Histograma de retrasos en el aterrizaje de vuelos real-inicial, grupo 1

		Despegue	Aterrizaje
Centro de la distribución	Mediana [minutos]	3.00	3.62
	Media [minutos]	5.05	5.11
Variabilidad	Máximo [minutos]	910.73	886.50
	Mínimo [minutos]	-93.55	-400.28
	Desviación estándar [minutos]	13.08	15.64
Forma	Asimetría	13.86	6.70
	Curtosis	875.46	420.19

Tabla 11. Indicadores para análisis de retrasos de vuelos real-inicial, grupo 1

Al final del capítulo se relacionarán estos valores, junto con los calculados en el grupo 2, con los obtenidos para

todos los vuelos del día de estudio.

Es interesante observar los picos que aparecen de forma periódica en el histograma de los despegues, de forma que hay muchos más vuelos con retrasos de números enteros que con retrasos con parte decimal. Se ha comprobado que esto ocurre en el grupo 1, pero también ocurrirá en el grupo 2; además, también pasaba al representar los despegues de todos los vuelos, pero no se apreciaba debido al número tan alto de datos representados. Se ha comprobado que las horas de los despegues, tanto en trayectoria inicial (último plan de vuelo) como en real, son números “redondos” (con valor 0 segundos) en su gran mayoría (por ejemplo, 21:49:00). Sin embargo, mientras las horas de los aterrizajes en la trayectoria real también lo son, en la inicial no (por ejemplo, 02:14:03). Por lo tanto, las diferencias entre las horas de los despegues van a ser muchas números “redondos” y en los aterrizajes habrá más variedad. Esta es la razón de la existencia de esos picos. Se puede ajustar el número de barras en el histograma para ver mejor la forma de la distribución y el resultado sería el que se muestra en la siguiente figura.

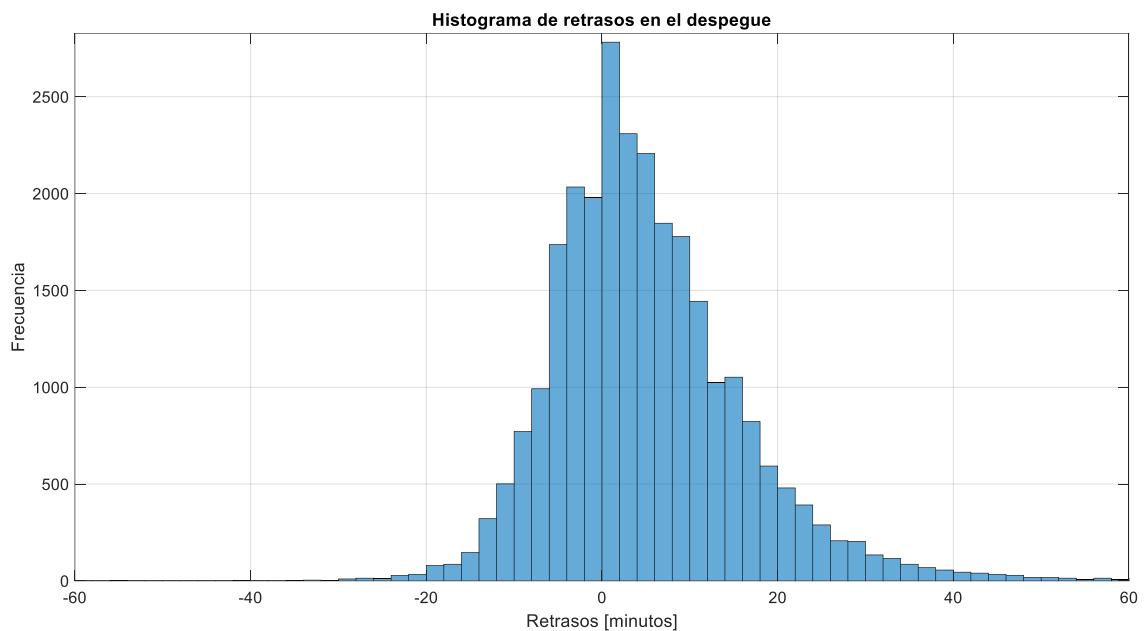


Figura 28. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial, grupo 1, editado

5.1.2 Grupo 2 – Resto de vuelos

5.1.2.1 Estudio de la duración de los vuelos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la duración de los vuelos realizando una comparativa entre los datos de vuelo real y los de vuelo inicial para el grupo 2.

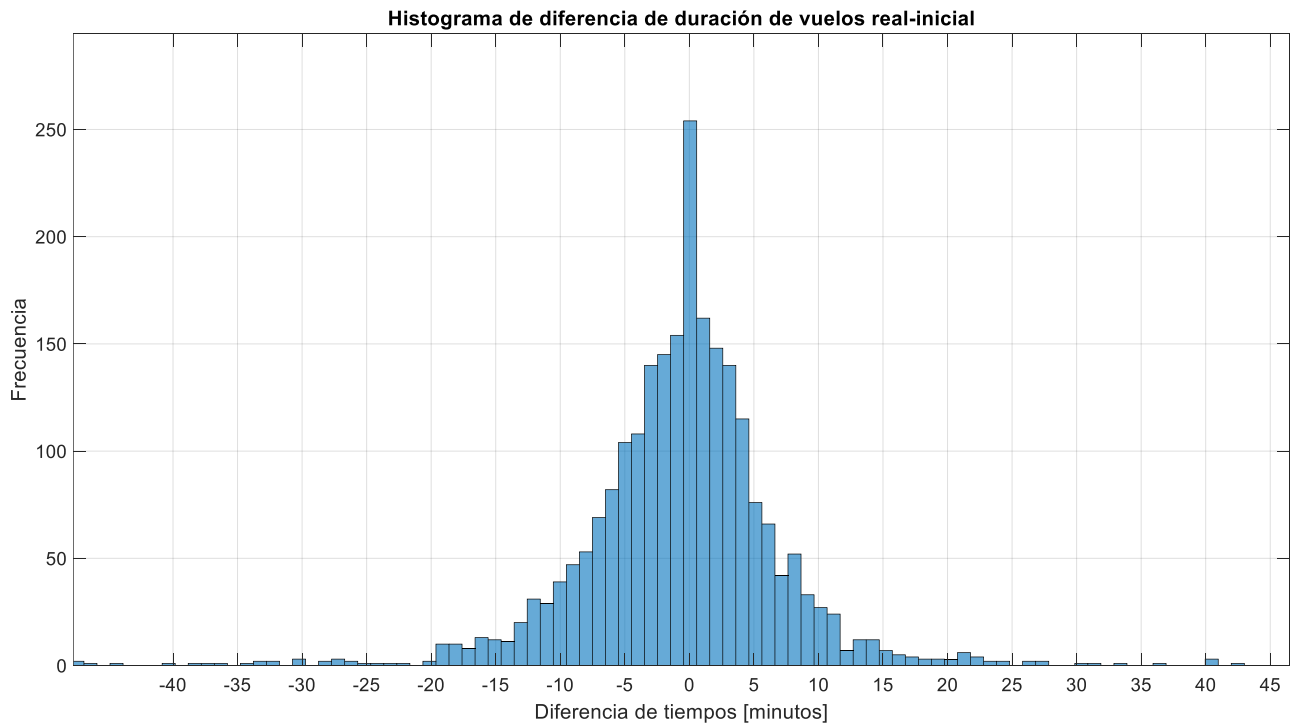


Figura 29. Histograma de diferencia de duración de vuelos real-inicial, grupo 2

Centro de la distribución	Mediana [minutos]	-0.10
	Media [minutos]	-0.60
Variabilidad	Máximo [minutos]	145.72
	Mínimo [minutos]	-158.00
	Desviación estándar [minutos]	10.45
Forma	Asimetría	-0.14
	Curtosis	79.75

Tabla 12. Indicadores para análisis de duración de vuelos real-inicial, grupo 2

5.1.2.2 Estudio de las diferencias de tiempos de despegue y aterrizaje

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los retrasos en el despegue y el aterrizaje realizando una comparativa entre los datos de vuelo real y los de vuelo inicial para el grupo 2.

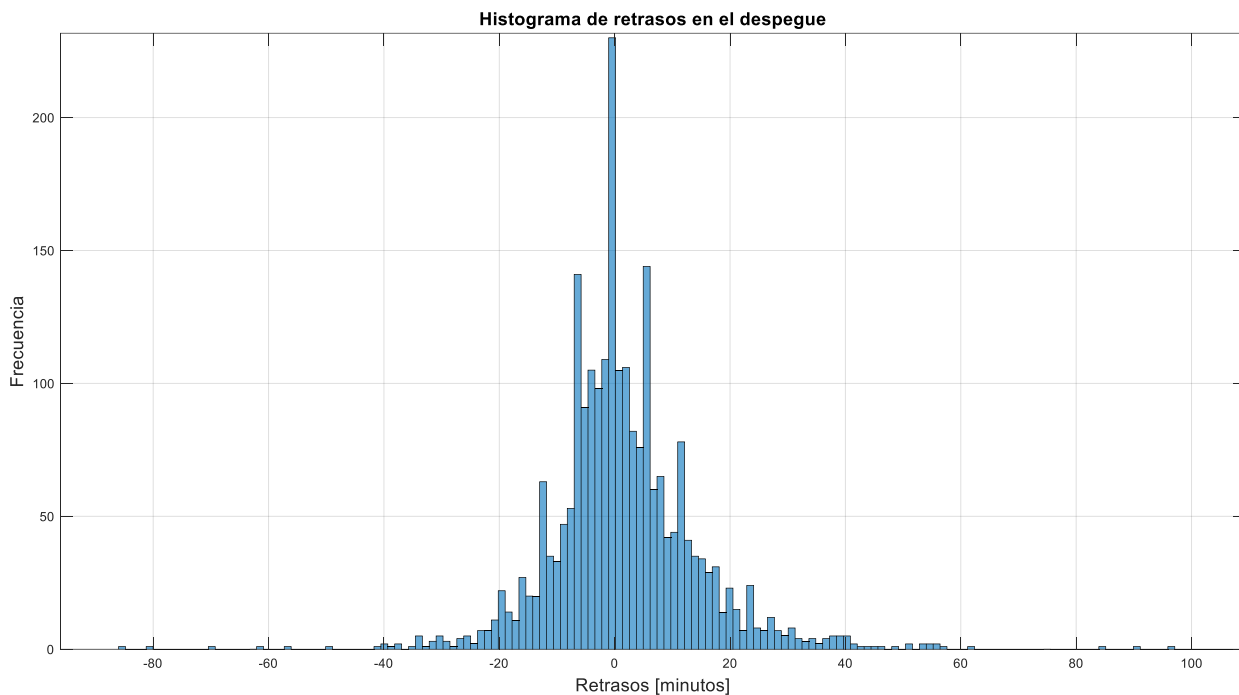


Figura 30. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial, grupo 2

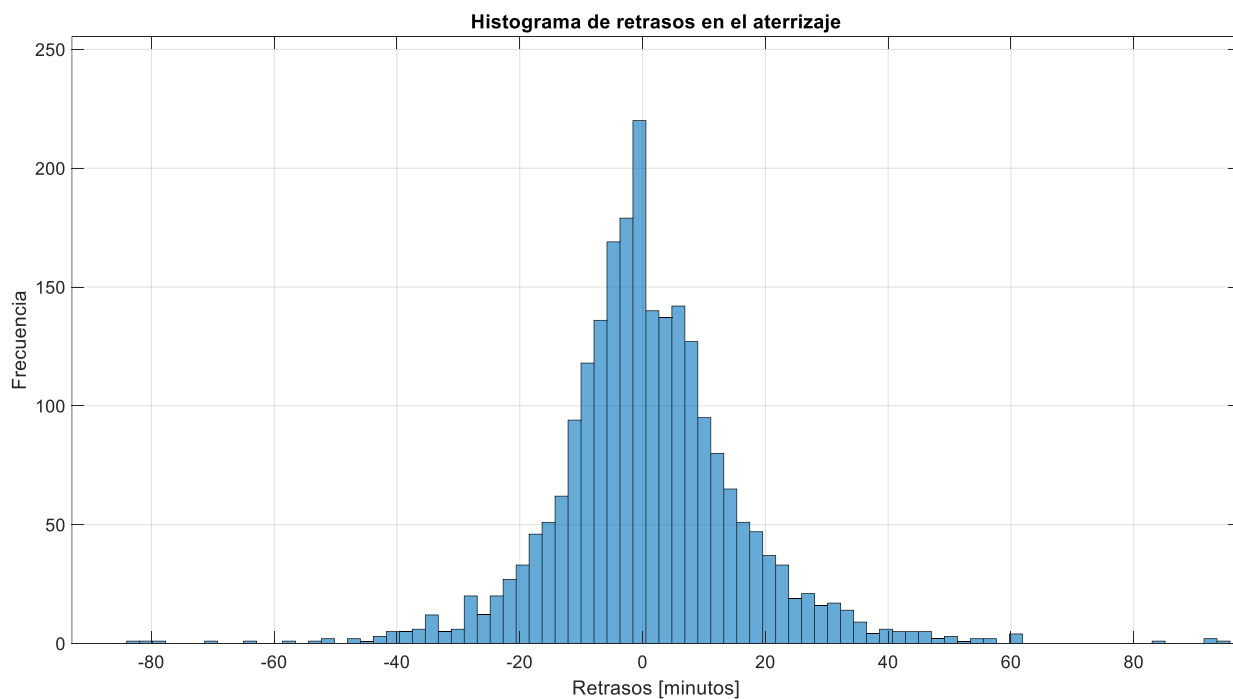


Figura 31. Histograma de retrasos en el aterrizaje de vuelos real-inicial, grupo 2

		Despegue	Aterrizaje
Centro de la distribución	Mediana [minutos]	0.00	0.00
	Media [minutos]	2.81	2.21
Variabilidad	Máximo [minutos]	1417.00	1425.07
	Mínimo [minutos]	-85.57	-158.00
	Desviación estándar [minutos]	41.12	42.48
Forma	Asimetría	28.61	26.23
	Curtosis	928.52	828.70

Tabla 13. Indicadores para análisis de retrasos de vuelos real-inicial, grupo 2

Al igual que ocurría en el grupo 1, en el caso de los despegues se vuelven a observar ciertos picos que, como ya se ha indicado, están justificados. A continuación, se muestra el mismo histograma, pero editado para ver mejor la forma de la distribución.

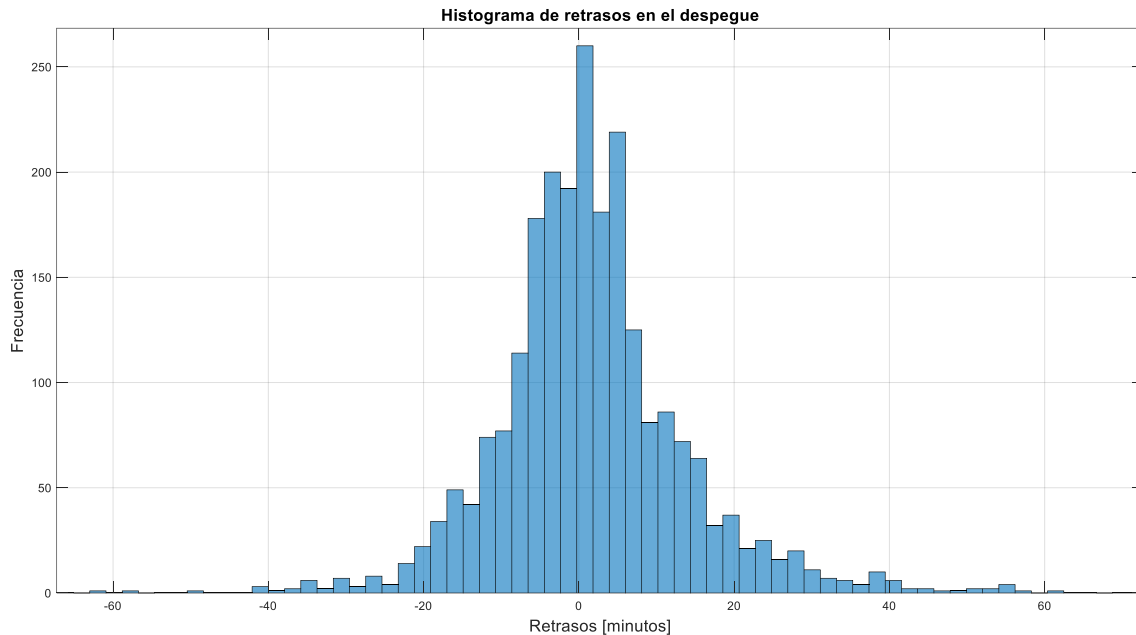


Figura 32. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial, grupo 2, editado

5.1.3 Resumen y comparativa

Con el fin de observar si la clasificación de los vuelos en estos dos grupos ha surtido algún efecto en el estudio de los retrasos, se van a presentar a continuación los resultados obtenidos, a modo de resumen, de todos los vuelos, del grupo 1 (regular de pasajeros) y del grupo 2 (resto de vuelos).

- Estudio de la duración de los vuelos:

		Total	Grupo 1	Grupo 2
Centro de la distribución	Mediana [min]	-0.08	-0.12	-0.10
	Media [min]	-0.22	0.06	-0.60
Variabilidad	Máximo [min]	216.68	216.68	145.72
	Mínimo [min]	-822.85	-401.28	-158.00
	Desviación estándar [min]	12.87	8.28	10.45
Forma	Asimetría	-20.16	-6.40	-0.14
	Curtosis	1010.02	469.64	79.75

Tabla 14. Indicadores para análisis de duración de vuelos real-inicial, total, grupo 1 y grupo 2

- Es interesante observar que, con respecto a todos los vuelos, la media de diferencia de duración de vuelos es muy diferente en los grupos 1 y 2. En todos los vuelos, la media es negativa, lo que querría decir que, de media, los vuelos reales tienen menor duración que los vuelos iniciales, es decir, que se absorbe retraso. En el grupo 1, la media es positiva, aunque muy pequeña, por lo que los vuelos se retrasan; y en el grupo 2, es negativa y menor que la de todos los vuelos. Es importante recordar que en el grupo 2 hay vuelos de carga, chárter, militares o de pruebas. Y tal y como se ha visto en el Capítulo 4, hay por ejemplo muchos vuelos de prueba que hacen recorridos mucho más cortos de lo previsto. Este tipo de vuelos ha podido contribuir a ese valor de media de diferencia de tiempos de vuelo.
- Con respecto a la mediana, ocurre igual que en los retrasos; es muy parecida en todos los casos ya que es poco sensible a valores extremos.
- Los valores extremos, mínimo y máximo, de los grupos 1 y 2 son menores con respecto a todos los

vuelos, sobre todo, en el grupo 1. Esto es lo que se pretendía con esta división ya que se pensó que los vuelos con grandes retrasos y adelantos no corresponderían en su mayoría a vuelos regulares tradicionales, por lo que irían al grupo 2.

- En cuanto a la desviación estándar, en el grupo 1, es unos 4 o 5 minutos menor que la de todos los vuelos y en el grupo 2 es unos 2 minutos menor. Un estudio más detallado de las desviaciones se realizará en el Capítulo 6.
- En relación a la forma de la distribución, se observan también resultados interesantes. En el grupo 1, tanto la asimetría como la curtosis son menores que en todos los vuelos; mientras que en el grupo 2, estos valores han disminuido más aún. El valor de asimetría es negativo en todos los casos, lo que indica que la cola a la izquierda de la media es más larga que la de la derecha. El valor de curtosis sigue también muy alto, lo que indica mayor pico que la distribución normal y mayor existencia de valores atípicos (lejos de la zona del pico).
 - Estudio de las diferencias de tiempos de despegue y aterrizaje:
 - La media del grupo 1 (regular de pasajeros) es mayor con respecto al total de vuelos y la del grupo 2 (el resto de vuelos) es bastante menor, tanto en despegues como en aterrizajes. Esta diferencia a priori no es muy representativa. Ha podido ocurrir que, en el grupo 2 por ejemplo, se hayan quedado los vuelos con adelantos muy grandes y eso ha hecho disminuir la media.
 - Con respecto a la mediana, que proporciona el valor que ocupa la posición central de todos los datos una vez ordenados, no ha sufrido grandes cambios. Es lo esperable, ya que la mediana es menos sensible a valores extremos (al contrario que la media, que es más sensible). En el caso de todos los vuelos y el grupo 1, son muy parecidas. En el grupo 2, es unos 3 minutos menor; esto quiere decir que, cuando se han ordenado los datos, se han encontrado más valores de retrasos que de adelantos que en el grupo 1 y en todos los vuelos.

		Despegue total	Despegue grupo 1	Despegue grupo 2	Aterrizaje total	Aterrizaje grupo 1	Aterrizaje grupo 2
Centro de la distribución	Mediana [min]	3.00	3.00	0.00	3.00	3.62	0.00
	Media [min]	4.74	5.05	2.81	4.52	5.11	2.21
Variabilidad	Máximo [min]	1417.00	910.73	1417.00	1425.07	886.50	1425.07
	Mínimo [min]	-145.00	-93.55	-85.57	-835.85	-400.28	-158.00
	Desviación estándar [min]	19.97	13.08	41.12	23.56	15.64	42.48
Forma	Asimetría	38.43	13.86	28.61	20.41	6.70	26.23
	Curtosis	2527.81	875.46	928.52	1380.73	420.19	828.70

Tabla 15. Indicadores para análisis de retrasos de vuelos real-inicial, total, grupo 1 y grupo 2

- Los valores extremos, mínimo y máximo, de los grupos 1 y 2 son menores con respecto a todos los vuelos, sobre todo, en el grupo 1. Era lo que se pretendía con esta división por la misma razón que en la duración de los vuelos.
- La diferencia más evidente se observa en las desviaciones estándar. En el grupo 1, la desviación estándar es unos 7 u 8 minutos menor que la de todos los vuelos y en el grupo 2 es unos 20 minutos mayor. El resultado es el esperado, porque en el grupo 1 deberían estar los vuelos con cierto retraso, pero con una dispersión en los datos bastante menor a la del grupo 2, al no haber presumiblemente muchos grandes retrasos. Un estudio más detallado de las desviaciones se realizará en el Capítulo 6.
- En relación a la forma de la distribución, se observan también resultados interesantes. En el grupo 1, tanto la asimetría como la curtosis son mucho menores que en todos los vuelos; en el grupo 2, los valores no han disminuido tanto como en el grupo 1. En el grupo 2, la asimetría es bastante grande (un poco mayor incluso que en todos los vuelos en el caso de los aterrizajes) y la curtosis es el doble en el grupo 2 que en el grupo 1 en los aterrizajes también. El valor de asimetría sigue siendo positivo, lo que indica que la cola a la derecha de la media es más larga que la de la izquierda. El valor de curtosis sigue también muy alto, lo que indica mayor pico que la distribución normal y mayor existencia de valores atípicos

(lejos de la zona del pico).

Por lo tanto, parece correcta la división establecida. Para pulir un poco más el estudio, ahora se plantea la posibilidad de dividir, a su vez, el grupo 1 en dos nuevos subgrupos: vuelos regulares tradicionales (subgrupo 1.1) y vuelos low-cost (subgrupo 1.2). Las diferentes características de los vuelos de uno y otro tipo y de las aerolíneas que los operan puede que influyan en las estadísticas calculadas.

5.2 Estudio en dos subgrupos de vuelos: regular tradicional y low-cost

Ahora, se van a dividir los vuelos del grupo 1, a su vez, en dos subgrupos: regular tradicional (no low-cost) (subgrupo 1.1) y low-cost (subgrupo 1.2). Para ello, se han cogido los 26979 vuelos del grupo 1 y se ha hecho uso de la clasificación que se hizo a estos vuelos (1, si era low-cost, y 0, si no lo era²⁰) para clasificarlos en los 2 subgrupos.

Así, de los 26979 vuelos del grupo 1, 10816 son low-cost y 16163 son regulares tradicionales. Los 10816 vuelos constituyen un 36% de los 29323 vuelos considerados en el estudio y los 16163, un 55%. Teniendo en cuenta que, según STATFOR, en el año 2016 aproximadamente un 30% de los vuelos diarios fueron low-cost y un 53% fueron regulares tradicionales, este porcentaje se acerca bastante a la realidad. De ambos grupos se vuelven a calcular todas las variables necesarias para realizar el estudio de los retrasos.

Una vez hecho todo esto, se realiza un estudio similar al del apartado anterior.

LOW-COST RULES							
FLIGHT TYPE	OPERATOR	IATA CODE	NAME	COUNTRY	COMMENTS	DEPARTURE	ARRIVAL
Lowcost	MAC	3O	Air Arabia Maroc	Morocco		ALL	ALL
Lowcost	ABY	G9	Air Arabia	United Arab Emirates		ALL	ALL
Lowcost	BTI	BT	Air Baltic	Latvia		ALL	ALL
Lowcost	BER	AB	AIR BERLIN	Germany		ALL	ALL
Lowcost	ABQ	PA	AIR BLUE	Pakistan		ALL	ALL
Lowcost	WOW	SZ	WOW Air	Iceland		ALL	ALL
Lowcost	KKK	KK	ATLASJET	Turkey	ONLY SCHEDULED FLIGHTS	ALL	ALL
Lowcost	BPA	BV	Blue Panorama Airlines	Italy		ALL	ALL
Lowcost	CFG	DE	CONDOR FLUGDIENST	Germany		ALL	ALL
Lowcost	CAI	XC	CORENDON AIRLINES	Turkey		ALL	ALL
Lowcost	EZY	U2	EASY JET	United Kingdom		ALL	ALL
Lowcost	EZS	DS	EASY JET SWITZERLAND	Switzerland		ALL	ALL
Lowcost	EWG	EW	EUROWINGS AG	Germany		ALL	ALL
Lowcost	BEE	BE	FLYBE	United Kingdom		ALL	ALL
Lowcost	TCX	MT	Thomas Cook Airlines UK Ltd.	United Kingdom	ONLY SCHEDULED FLIGHTS	ALL	ALL
Lowcost	FDB	FZ	FlyDubai	UAE		ALL	ALL
Lowcost	GMI	ST	GERMANIA	Germany		ALL	ALL
Lowcost	GWI	4U	GERMANWINGS	Germany		ALL	ALL
Lowcost	HOP	A5	HOP!	France		ALL	ALL
Lowcost	IBS	I2	Iberia Express	Spain		ALL	ALL
Lowcost	EXS	LS	JET 2.COM LTD	United Kingdom		ALL	ALL
Lowcost	ISS	IG	MERIDIANA	Italy		ALL	ALL
Lowcost	MON	ZB	MONARCH SCHEDULED	United Kingdom	ONLY SCHEDULED FLIGHTS	ALL	ALL

Figura 33. Extracto de la lista de operadores tipo low-cost según STATFOR 2016

5.2.1 Subgrupo 1.1 – Regular tradicional

5.2.1.1 Estudio de la duración de los vuelos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la duración de los vuelos realizando una comparativa entre los datos de vuelo real y los de vuelo inicial para el subgrupo 1.1.

²⁰ Para hacer esta clasificación, conviene recordar que, además de otras fuentes, se ha hecho uso de una de las listas que publica cada año STATFOR y en la que define cuáles son los operadores low-cost. En la Figura 33 se muestra un extracto de la lista de operadores que STATFOR consideró tipo low-cost en 2016.

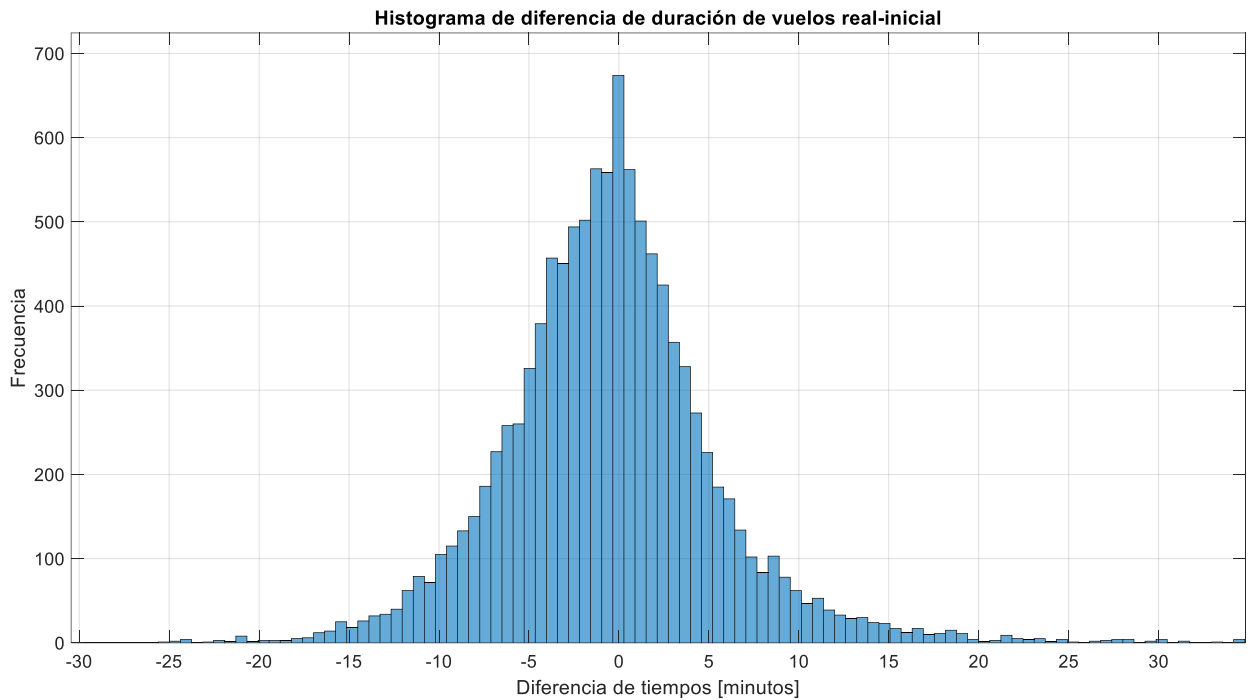


Figura 34. Histograma de diferencia de duración de vuelos real-inicial, subgrupo regular tradicional

Centro de la distribución	Mediana [minutos]	0.00
	Media [minutos]	0.40
Variabilidad	Máximo [minutos]	216.68
	Mínimo [minutos]	-401.28
	Desviación estándar [minutos]	8.86
Forma	Asimetría	-7.99
	Curtosis	538.25

Tabla 16. Indicadores para análisis de duración de vuelos real-inicial, subgrupo regular tradicional

En cuanto al centro de la distribución, se puede observar de la figura anterior y de los valores de la media y la mediana, que se encuentra muy próximo al 0. Es decir, prácticamente la mitad de los vuelos presenta una disminución de la duración de vuelo real con respecto a lo que estaba planificado en el plan de vuelo. La media es positiva, correspondiente a un aumento de la duración del vuelo.

En relación a la forma de la distribución, resulta un valor de -7.99 de asimetría y 538.25 de curtosis. Ese valor de asimetría quiere decir que la cola a la izquierda de la media es mayor que la de la derecha. En el histograma mostrado no se puede observar bien este fenómeno porque está ajustado para ver mejor la distribución en la zona donde es interesante verla. Los casos extremos se estudiarán en capítulos posteriores.

5.2.1.2 Estudio de las diferencias de tiempos de despegue y aterrizaje

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los retrasos en el despegue y el aterrizaje realizando una comparativa entre los datos de vuelo real y los de vuelo inicial para el subgrupo 1.1.

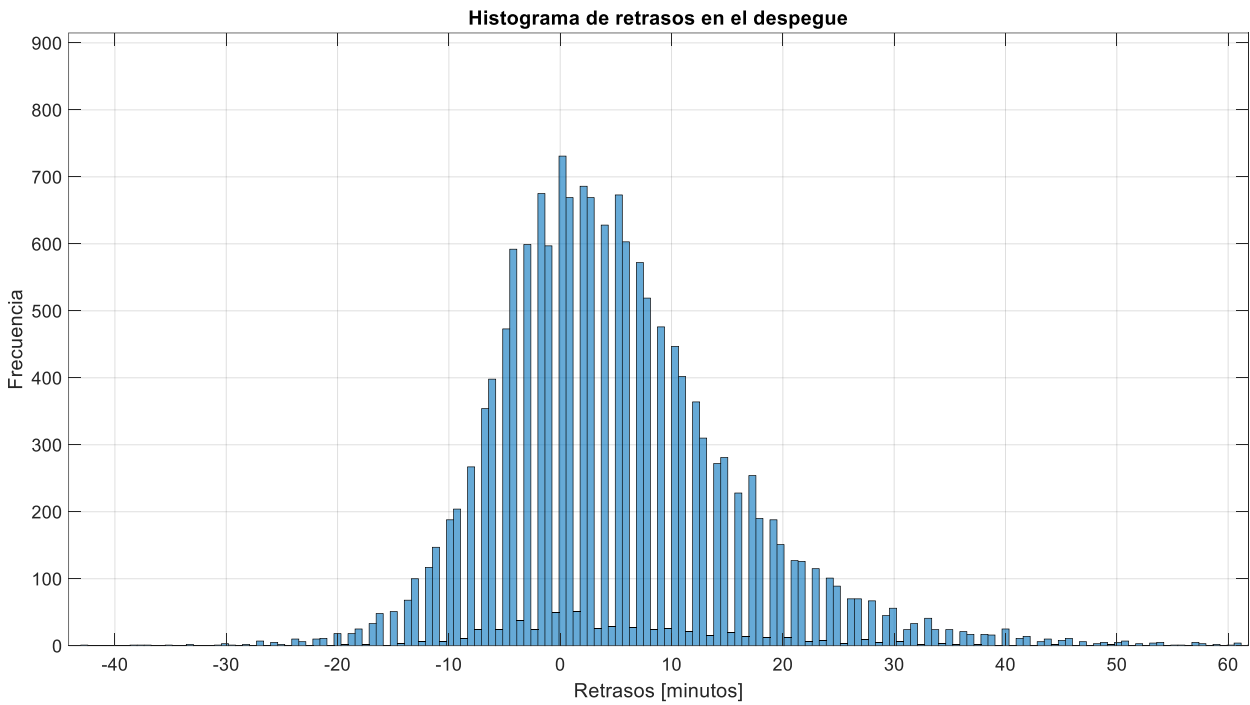


Figura 35. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial, subgrupo regular tradicional

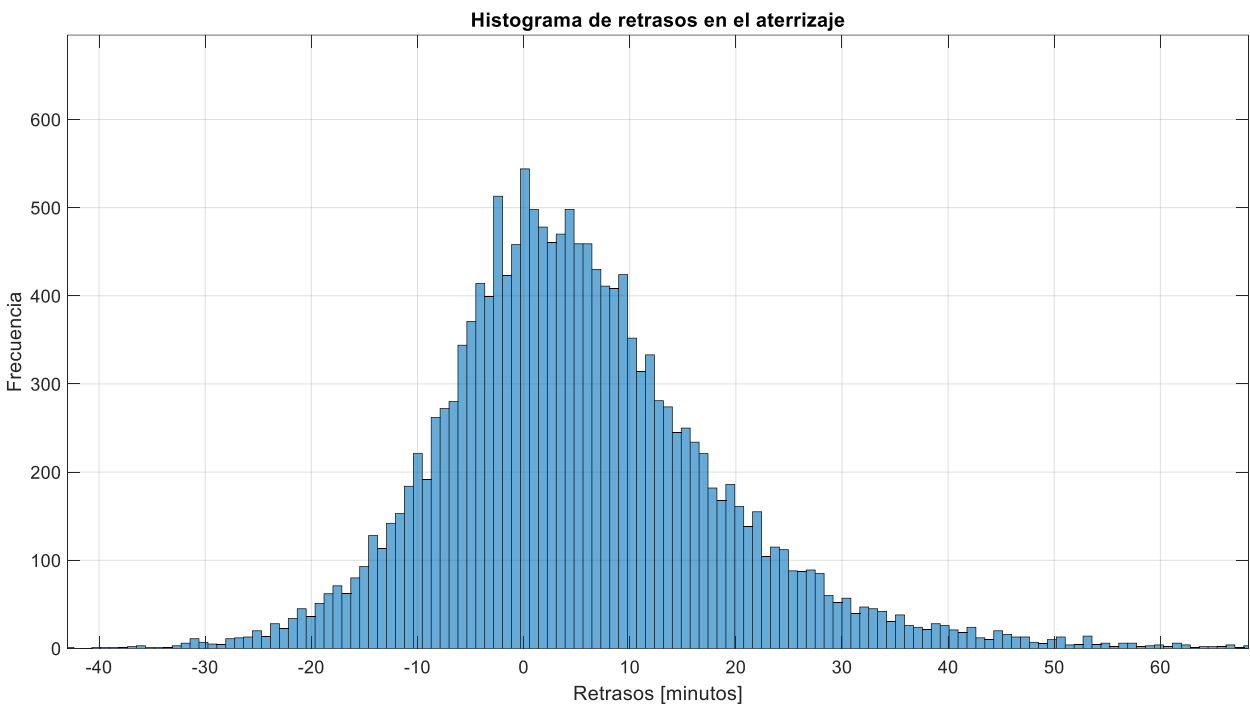


Figura 36. Histograma de retrasos en el aterrizaje de vuelos real-inicial, subgrupo regular tradicional

		Despegue	Aterrizaje
Centro de la distribución	Mediana [minutos]	3.90	3.98
	Media [minutos]	5.16	5.57
Variabilidad	Máximo [minutos]	910.73	886.50
	Mínimo [minutos]	-93.55	-400.28
	Desviación estándar [minutos]	14.08	16.75
Forma	Asimetría	17.90	8.77
	Curtosis	1071.89	521.67

Tabla 17. Indicadores para análisis de retrasos de vuelos real-inicial, subgrupo regular tradicional

Al final del capítulo se relacionarán estos valores, junto con los calculados en el subgrupo low-cost, con los

obtenidos los resultados anteriores.

Al igual que ocurría cuando se hizo la división en los dos primeros grupos (regular de pasajeros y resto de vuelos), es interesante observar los picos que aparecen de forma periódica en el histograma de los despegues, de forma que hay muchos más vuelos con retrasos de números enteros que con retrasos con parte decimal. Se ha comprobado que esto ocurre en el subgrupo 1.1, pero también ocurrirá en el subgrupo 1.2. A continuación, se muestra el mismo histograma, pero un poco adaptado para observar mejor la forma de la distribución.

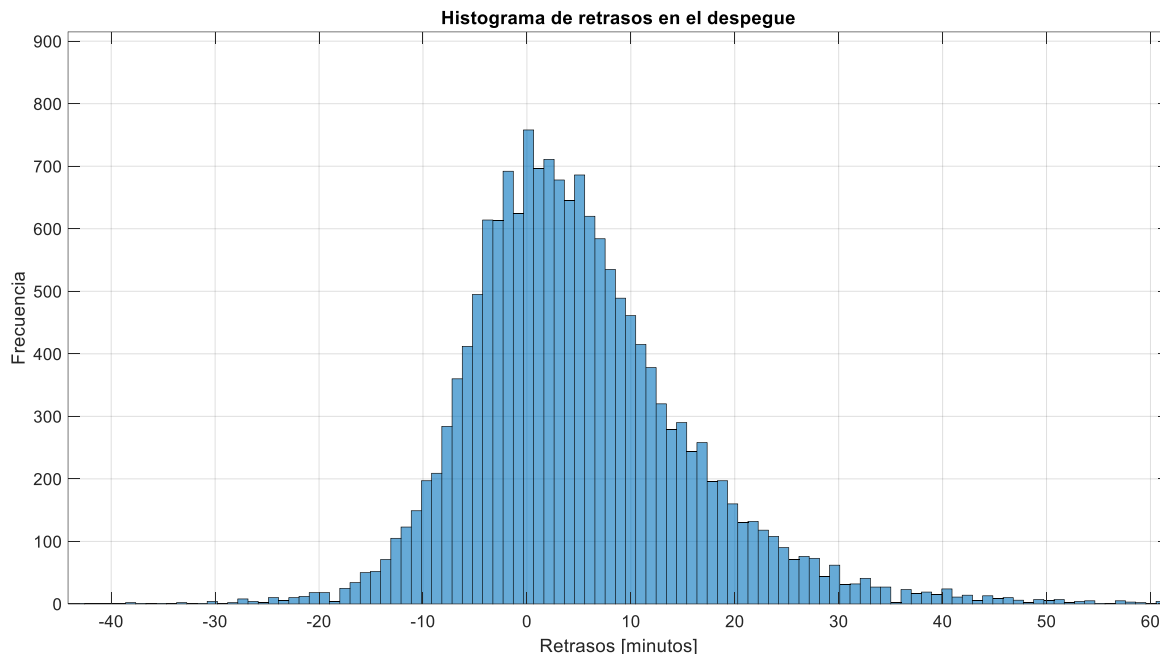


Figura 37. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial, subgrupo regular tradicional, editado

5.2.2 Subgrupo 1.2 – Low-cost

5.2.2.1 Estudio de la duración de los vuelos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la duración de los vuelos realizando una comparativa entre los datos de vuelo real y los de vuelo inicial para el subgrupo 1.2.

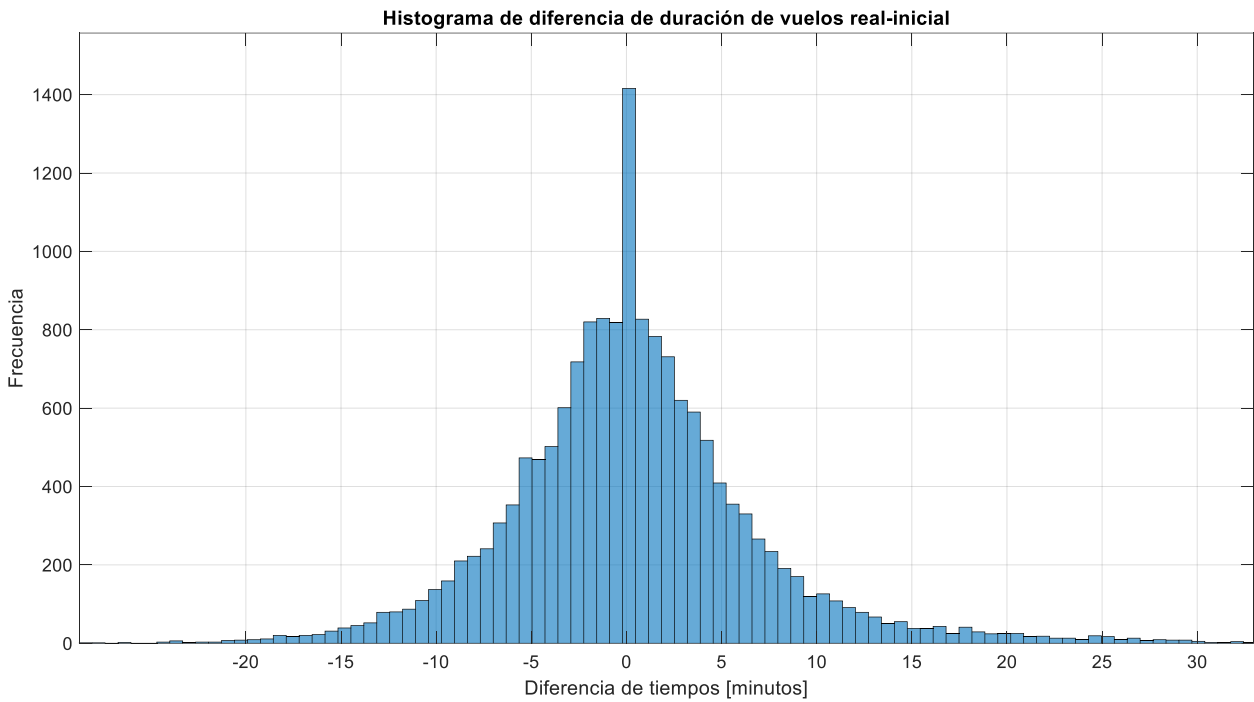


Figura 38. Histograma de diferencia de duración de vuelos real-inicial, subgrupo low-cost

Centro de la distribución	Mediana [minutos]	-0.58
	Media [minutos]	-0.45
Variabilidad	Máximo [minutos]	159.27
	Mínimo [minutos]	-259.48
	Desviación estándar [minutos]	7.29
Forma	Asimetría	-1.99
	Curtosis	193.76

Tabla 18. Indicadores para análisis de duración de vuelos real-inicial, subgrupo low-cost

En cuanto al centro de la distribución, se puede observar de la figura anterior y de los valores de la media y la mediana, que se encuentra muy próximo al 0. Es decir, prácticamente la mitad de los vuelos presenta una disminución de la duración de vuelo real con respecto a lo que estaba planificado en el plan de vuelo. La media es negativa, correspondiente a una disminución de la duración del vuelo.

En relación a la forma de la distribución, resulta un valor de -1.99 de asimetría y 193.76 de curtosis. Ese valor de asimetría quiere decir que la cola a la izquierda de la media es mayor que la de la derecha. En el histograma mostrado no se puede observar bien este fenómeno porque está ajustado para ver mejor la distribución en la zona donde es interesante verla. Los extremos se estudiarán en capítulos posteriores.

5.2.2.2 Estudio de las diferencias de tiempos de despegue y aterrizaje

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los retrasos en el despegue y el aterrizaje realizando una comparativa entre los datos de vuelo real y los de vuelo inicial para el subgrupo 1.2.

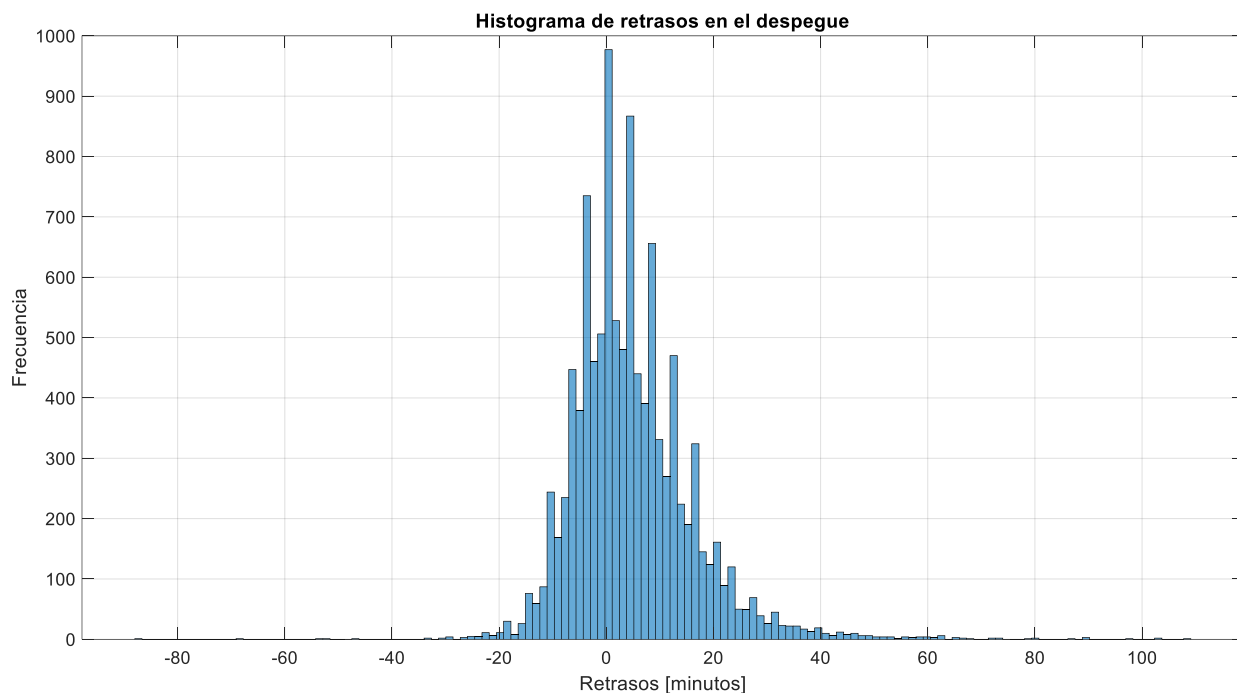


Figura 39. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial, subgrupo low-cost

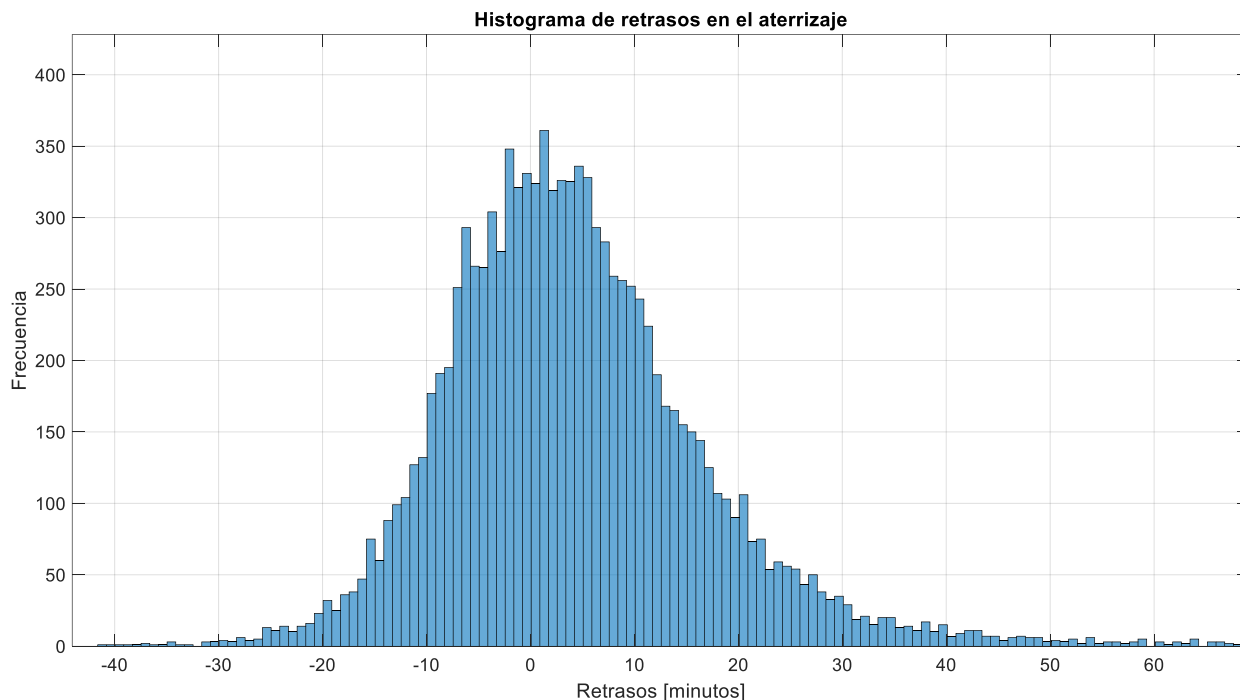


Figura 40. Histograma de retrasos en el aterrizaje de vuelos real-inicial, subgrupo low-cost

		Despegue	Aterrizaje
Centro de la distribución	Mediana [minutos]	3.00	3.00
	Media [minutos]	4.87	4.43
Variabilidad	Máximo [minutos]	109.00	159.27
	Mínimo [minutos]	-88.00	-256.48
	Desviación estándar [minutos]	11.31	13.71
Forma	Asimetría	1.37	0.71
	Curtosis	9.99	22.14

Tabla 19. Indicadores para análisis de retrasos de vuelos real-inicial, subgrupo low-cost

De igual forma, en la siguiente figura se muestra el histograma de los despegues ajustado para evitar los mencionados picos en la representación de los retrasos.

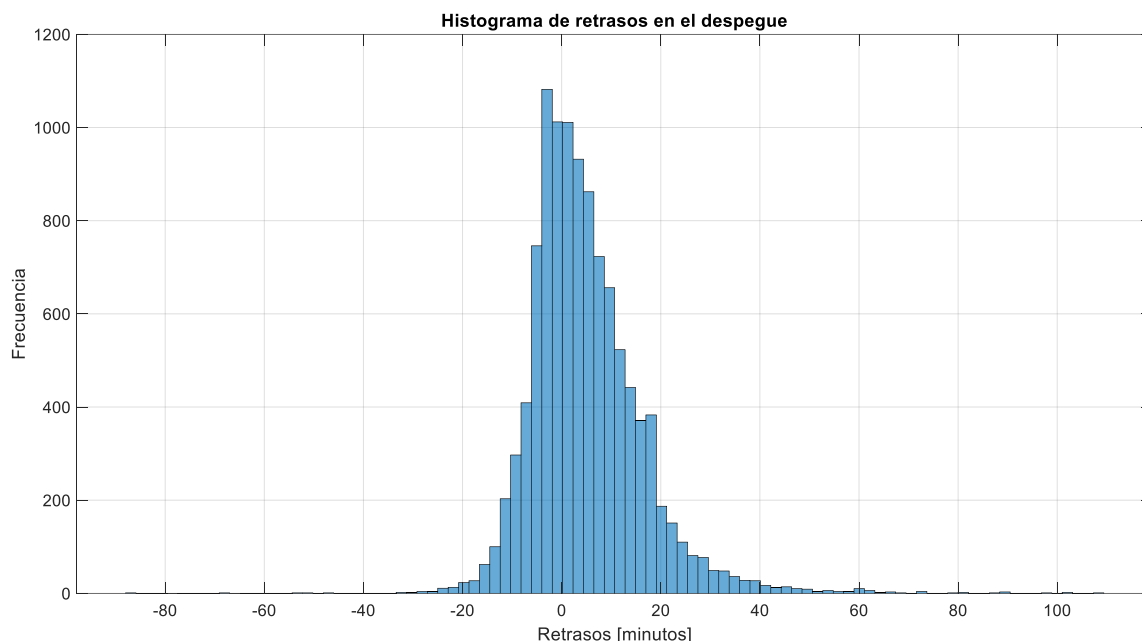


Figura 41. Histograma de retrasos en el despegue de vuelos real-inicial, subgrupo low-cost

Al final del capítulo se relacionarán estos valores, junto con los calculados en el subgrupo regular tradicional, con los obtenidos los resultados anteriores.

5.2.3 Resumen y comparativa

Con el fin de observar si la clasificación de los vuelos en estos dos subgrupos ha surtido algún efecto en el estudio de los retrasos, se van a presentar a continuación los resultados obtenidos, a modo de resumen, del grupo 1 (regular de pasajeros), del subgrupo 1.1 (regular tradicional) y del subgrupo 1.2 (low-cost). Además, en el Capítulo 6 se realizará un estudio más detallado de las diferencias en duración de vuelo obtenidas y la consiguiente absorción de retrasos.

- Estudio de la duración de los vuelos:

		Grupo 1	Subgrupo 1.1	Subgrupo 1.2
Centro de la distribución	Mediana [min]	-0.12	0.00	-0.58
	Media [min]	0.06	0.40	-0.45
Variabilidad	Máximo [min]	216.68	216.68	159.27
	Mínimo [min]	-401.28	-401.28	-259.48
	Desviación estándar [min]	8.28	8.86	7.29
Forma	Asimetría	-6.40	-7.99	-1.99
	Curtosis	469.64	538.25	193.76

Tabla 20. Indicadores para análisis de duración de vuelos real-inicial, grupo 1, subgrupo 1.1 y subgrupo 1.2

- Es interesante observar que, con respecto al grupo 1, la media del subgrupo 1.1 (regular tradicional) es mayor y la del subgrupo 1.2 (low-cost) es menor. En el grupo 1 y en el subgrupo 1.1 la media es positiva, lo que querría decir que, de media, los vuelos reales tienen mayor duración que los vuelos iniciales, es decir, que no se absorbe retraso. En el grupo 2, es negativa, por lo que sí se absorbe retraso en vuelo.
- Con respecto a la mediana, ésta es mayor en el subgrupo regular tradicional y menor en el subgrupo low-cost con respecto a los vuelos del grupo 1.
- Los valores extremos, mínimo y máximo, son menores en el subgrupo low-cost.

- En cuanto a la desviación estándar, en el subgrupo regular tradicional es un poco mayor que en el grupo 1 y en el low-cost es un minuto menor. Este dato, junto con el de los valores extremos, muestra que los valores de las desviaciones están menos dispersos en el subgrupo low-cost. Un estudio más detallado de las desviaciones se realizará en el Capítulo 6.
- En relación a la forma de la distribución, se observan resultados muy interesantes. En el subgrupo regular tradicional, tanto la asimetría como la curtosis son mayores (en valor absoluto) con respecto al grupo 1 y en el subgrupo low-cost son drásticamente menores. El valor de asimetría sigue siendo negativo, lo que indica que la cola a la izquierda de la media es más larga que la de la derecha, es decir, hay más absorciones que dilataciones en el tiempo de vuelos. El valor de curtosis en el subgrupo regular tradicional sigue también muy alto, lo que indica mayor pico que la distribución normal y mayor existencia de valores atípicos (lejos de la zona del pico); esto ya se había observado de los valores extremos y de la desviación estándar. En el subgrupo low-cost la asimetría tiene un valor muy pequeño, por lo que la distribución tiene forma prácticamente simétrica.
 - Estudio de las diferencias de tiempos de despegue y aterrizaje:
- La media del subgrupo 1.1 (regular tradicional) es mayor con respecto a la del grupo 1 (regular de pasajeros) y la del subgrupo 1.2 (low-cost) es menor, tanto en despegues como en aterrizajes. Tal y como ocurría en el apartado anterior, esta diferencia a priori no es muy representativa, al considerar retrasos (valores positivos) y adelantos.
- Con respecto a la mediana, que proporciona el valor que ocupa la posición central de todos los datos una vez ordenados, no ha sufrido grandes cambios. Como en el apartado anterior, es lo esperable, ya que la mediana es poco sensible a valores extremos (al contrario que la media, que es más sensible).

		Despegue grupo 1	Despegue subgrupo 1.1	Despegue subgrupo 1.2	Aterrizaje grupo 1	Aterrizaje subgrupo 1.1	Aterrizaje subgrupo 1.2
Centro de la distribución	Mediana [min]	3.00	3.90	3.00	3.62	3.98	3.00
	Media [min]	5.05	5.16	4.87	5.11	5.57	4.43
Variabilidad	Máximo [min]	910.73	910.73	109.00	886.50	886.50	159.27
	Mínimo [min]	-93.55	-93.55	-88.00	-400.28	-400.28	-256.48
	Desviación estándar [min]	13.08	14.08	11.31	15.64	16.75	13.71
Forma	Asimetría	13.86	17.90	1.37	6.70	8.77	0.71
	Curtosis	875.46	1071.89	9.99	420.19	521.67	22.14

Tabla 21. Indicadores para análisis de retrasos de vuelos real-inicial, grupo 1, subgrupo 1.1 y subgrupo 1.2

- Los valores extremos sí han sufrido cambios. Se puede observar que tanto los mayores retrasos como los mayores adelantos del grupo 1 están en el subgrupo 1.1 (regular tradicional), mientras el subgrupo low-cost tiene valores extremos de retrasos más pequeños.
- Con respecto a la desviación estándar, ésta es mayor en el subgrupo regular tradicional (con respecto al grupo 1) y es menor en el low-cost. Este dato, junto con el de los valores extremos, muestra que los valores de los retrasos están menos dispersos en el subgrupo low-cost. Un estudio más detallado de las desviaciones se realizará en el Capítulo 6.
- En relación a la forma de la distribución, se observan resultados muy interesantes. En el subgrupo regular tradicional, tanto la asimetría como la curtosis son mayores con respecto al grupo 1 y en el subgrupo low-cost son drásticamente menores. El valor de asimetría sigue siendo positivo, lo que indica que la cola a la derecha de la media es más larga que la de la izquierda, es decir, hay más retrasos que adelantos. El valor de curtosis en el subgrupo regular tradicional sigue también muy alto, lo que indica mayor pico que la distribución normal y mayor existencia de valores atípicos (lejos de la zona del pico); esto ya se había observado de los valores extremos y de la desviación estándar. En el subgrupo low-cost

tanto la asimetría como la curtosis tienen valores muy pequeños; de hecho, tanto en despegues como en aterrizajes la distribución tiene forma prácticamente simétrica (con respecto a la media). En la siguiente figura se puede ver cómo sería una distribución normal con respecto a la distribución de retrasos de vuelos low-cost. Se observa que encaja mejor que como lo hacía la distribución de retrasos de todos los vuelos (ver Capítulo 4, Figura 16). Nuevamente, recordar que en el Capítulo 7 se hará una introducción al ajuste de distribuciones de probabilidad a las desviaciones de la duración, el despegue y el aterrizaje de los vuelos a partir de los datos obtenidos a lo largo de este trabajo.

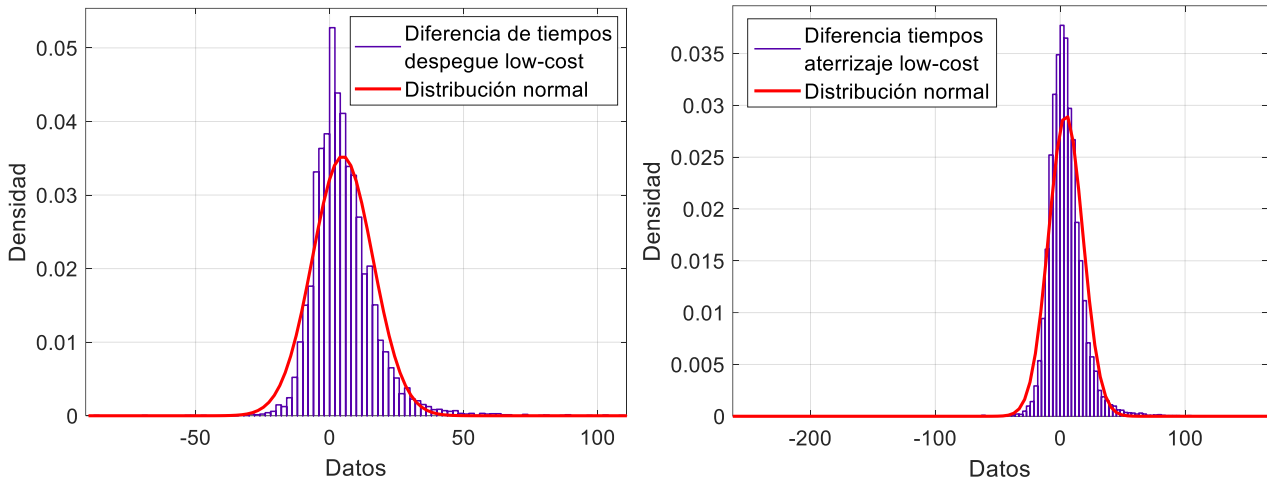


Figura 42. Comparación de distribución de retrasos de vuelos low-cost con distribución normal

Por lo tanto, estos resultados son positivos, ya que muestran una clara tendencia cuando se separan los vuelos en estos dos grupos. Recordar que, con las divisiones que se han realizado hasta ahora, se ha conseguido que los estadísticos cambien tal y como se resume en las Figura 43 y 44.

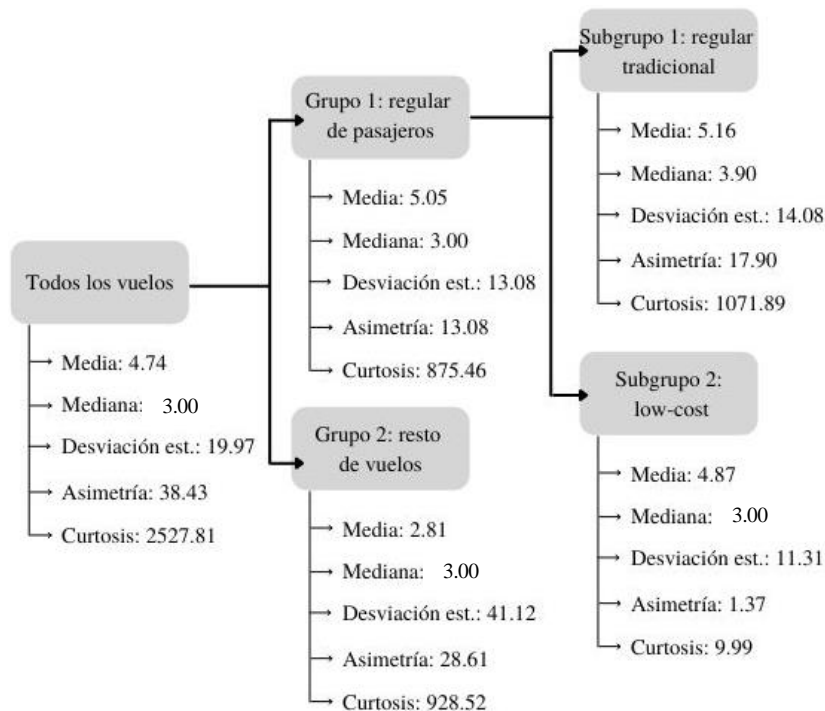


Figura 43. Resumen de los valores de desviación estándar en despegues tras la clasificación de los vuelos

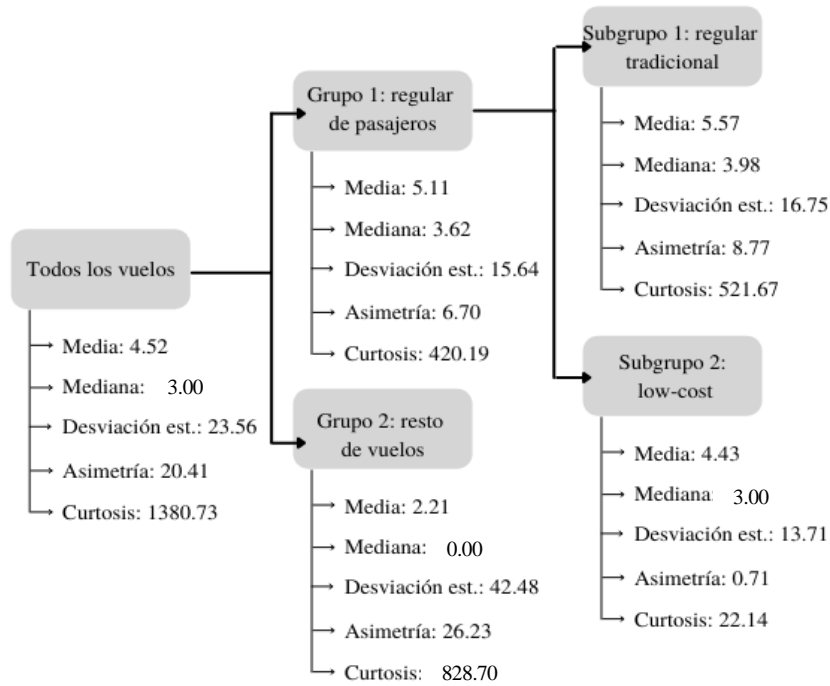


Figura 44. Resumen de los valores de desviación estándar en aterrizajes tras la clasificación de los vuelos

Para finalizar, es importante observar que mientras al hacer la división entre los grupos regular de pasajeros y el resto de vuelos se esperaban ciertos resultados (a los que se ha llegado satisfactoriamente), a la hora de dividir en vuelos tipo regular tradicional y low-cost, no estaba claro si iba a darse cierta tendencia. Al haberse dado, el siguiente paso es intentar encontrar una explicación a los resultados obtenidos. En el siguiente capítulo se profundizará en el estudio de las desviaciones según los tipos de vuelos.

6 ESTUDIO DE LAS DESVIACIONES

Tal y como se ha comentado, en este capítulo se va a profundizar en el estudio de las desviaciones para así intentar comprender la causa de la diferencia en las desviaciones entre los vuelos regulares tradicionales y los low-cost.

6.1 Introducción

Es importante recordar que la desviación estándar es un índice numérico de la dispersión de un conjunto de datos de forma que, cuanto mayor sea, mayor es la dispersión de los datos. La desviación estándar es un promedio de las desviaciones individuales de cada observación con respecto a la media de una distribución.

Tal y como se pudo ver en las figuras 43 y 44 del capítulo anterior, la desviación estándar tiene claras diferencias según el grupo de vuelos considerado, tanto en despegues como en aterrizajes, siendo en los vuelos low-cost unos 3 minutos menor que en los vuelos regulares tradicionales. Esto sin duda es un dato llamativo y en este capítulo se va a intentar averiguar si tiene alguna explicación y, si es así, cuál es, realizando unos análisis locales.

Para ver qué puede estar causando tal diferencia en la desviación estándar en los vuelos low-cost, es necesario conocer qué diferencia a los operadores low-cost de los regulares tradicionales.

Es importante recalcar que un vuelo low-cost no se refiere a los precios más económicos que se pagan por él, sino a que los costos de la aerolínea son más bajos que los habituales. Y, para lograr bajar los costos, los operadores low-cost poseen varias estrategias que se detallan a continuación [7] [8]:

- 1) Uso eficiente de la capacidad de los aviones. Las compañías low-cost vuelan siempre con aviones llenos y hacen muchos vuelos para poder amortizar los costos. Así, en general realizan vuelos cortos (de no más de 3 horas) y muy frecuentes.
- 2) Más asientos en un avión. Además de llevar los aviones llenos, intentan poner más asientos, por ejemplo, achicando los pasillos y los baños. Este proceso que comenzó hace 30 años sigue creciendo hoy en día.
- 3) Aviones modernos e iguales. Las flotas de las low-cost están formadas por aeronaves nuevas y de un solo modelo o pocos modelos (por ejemplo, un Airbus A320 o un Boeing 737), de forma que sean de fácil gestión y mantenimiento para tenerlas siempre operando con la máxima eficiencia y lograr altos índices de utilización. Por ejemplo, hoy en día, Ryanair solo usa el Boeing 737-800, que permite, según la propia compañía, ahorrar costes y mantener un estándar de seguridad. Además, esto significa que pilotos, azafatas, ingenieros, mecánicos y personal de operaciones no requieren de entrenamientos diferentes para cada nave. Y, por otro lado, sólo se necesita tener un stock de repuestos para un solo modelo.
- 4) Menor peso. El combustible es uno de los mayores costos y, por lo tanto, hacen que el avión vuele lo más ligero posible. Así, entre otros ajustes, se cambian los asientos por otros más ligeros y pequeños o se reemplazan los carros de comida y ventas por otros más livianos.
- 5) Menores tiempos de carga y descarga de pasajeros. Estos operadores tienen tiempos de carga y descarga de pasajeros muy rápidos (de unos 25-35 minutos) con respecto a los regulares tradicionales (de unas 2 horas), por lo que consiguen que los aviones estén poco tiempo en tierra.
- 6) Regresos más rápidos. Relacionado con el punto anterior y siguiendo la premisa de que las aerolíneas low-cost están interesadas en mantener el avión en el aire (que es donde generan ganancias), tienen la política de programar las vueltas a los 25 minutos de aterrizar, mientras que las aerolíneas tradicionales lo hacen a la hora. Además, muchas aerolíneas prefieren arrancar sus vuelos lo más temprano posible y finalizarlos a la medianoche. Esto significa que el avión está en el aire unas 12 horas al día, mientras que un avión de una aerolínea regular tradicional vuela 8 horas diarias.
- 7) Requerimientos básicos reconvertidos en extras. Por ejemplo, estas aerolíneas cobran por sentarse delante o elegir asiento con antelación, elegir filas con más espacio para las piernas, embarcar primero,

hacer el check-in en el mostrador o facturar una maleta en la puerta de embarque. Además, al no servir comida ni bebida gratis, las venden a bordo y a altos precios.

- 8) Aeropuertos más pequeños y menos congestionados. En muchas ocasiones, los vuelos low-cost despegan y aterrizan en los aeropuertos que les resultan más baratos que, a veces, se encuentran más lejos del centro de las ciudades de destino.
- 9) Horarios. En general, los vuelos que salen o muy temprano o muy tarde son los más económicos y los días martes, miércoles y jueves, los pasajes suelen ser más baratos. Este punto está relacionado con los slots aeroportuarios en la aviación, que es el permiso o turno que tiene una compañía aérea para aterrizar o despegar en un aeropuerto en una hora determinada. Antes de ir al aire, se debe asegurar que el avión puede despegar y aterrizar y que se evite la congestión en los aeropuertos de origen y destino.

Entonces, para saber qué puede estar causando estas diferencias de desviación, se pueden usar en este trabajo los puntos 8 y 9 de la anterior lista. Así, se va a analizar si, en el día de estudio considerado, hubo diferencias en las horas de operación de los vuelos low-cost con respecto a los regulares tradicionales y si operaron en aeropuertos muy diferentes y con ciertas características. Por último, se va a analizar si los vuelos low-cost tuvieron mayor capacidad de absorber los retrasos en vuelo que los regulares tradicionales.

6.2 Primer análisis: los horarios de operación

Como se ha comentado, se va a analizar en primer lugar la desviación según la hora de vuelo en los vuelos regulares tradicionales y low-cost.

Para ello, se han dividido los vuelos en sus categorías y, a su vez, en las horas del día dentro de este estudio manualmente, para despegues y para aterrizajes; se han considerado las horas de despegues y aterrizajes reales a la hora de representar las desviaciones en las horas del día. Así, se ha calculado la desviación estándar de las diferencias de despegues y aterrizajes (retrasos y adelantos) en cada una de estas horas. Ya que hay vuelos que despegan el día anterior al estudiado y otros que aterrizan el día después a dicho día, se ha visto cuál es el primer despegue y cuál es el último aterrizaje correspondiente al día de estudio y los límites horarios estudiados han quedado de la siguiente forma:

- Despegues: desde las 12:00:00 del día 08/09/2016 hasta las 07:00:00 del día 10/09/2016, siendo un total de 43 intervalos de una hora.
- Aterrizajes: desde las 23:00:00 del día 08/09/2016 hasta las 15:00:00 del día 10/09/2016, siendo un total de 40 intervalos de una hora.

Sin embargo, tan solo se han representado los vuelos con despegue o aterrizaje en el intervalo que va desde las 00:00 hasta las 23:59 del día 09/09 (correspondientes a las 24 barras de las siguientes figuras), que es el intervalo de tiempo que se está estudiando. Así, se muestra a continuación un resumen de los resultados obtenidos: a la izquierda, una gráfica que muestra el número de despegues por horas (low-cost y regulares tradicionales) en el eje Y y las divisiones por horas en el eje X; y a la derecha, una gráfica que muestra las desviaciones, en minutos, en el eje Y y las divisiones por horas en el eje X. Las gráficas están escaladas de igual manera para que se puedan comparar correctamente.

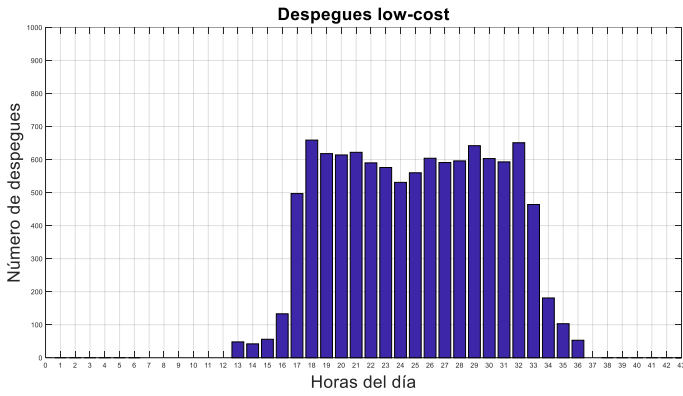


Figura 45. Despegues low-cost por horas

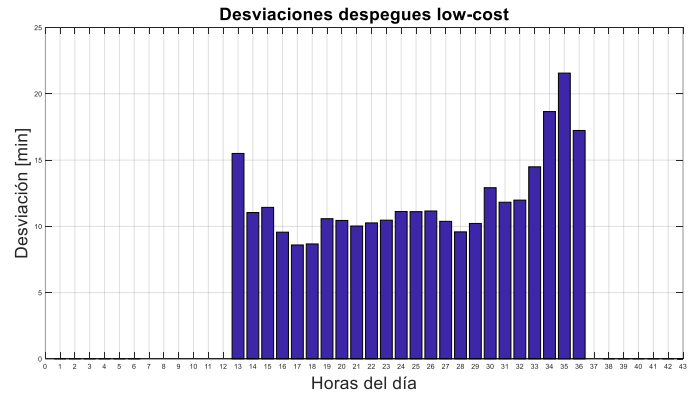


Figura 46. Desviaciones despegues low-cost por horas

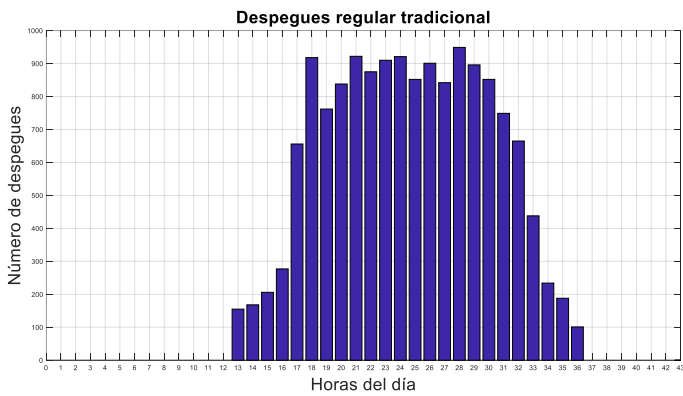


Figura 47. Despegues regular tradicional por horas

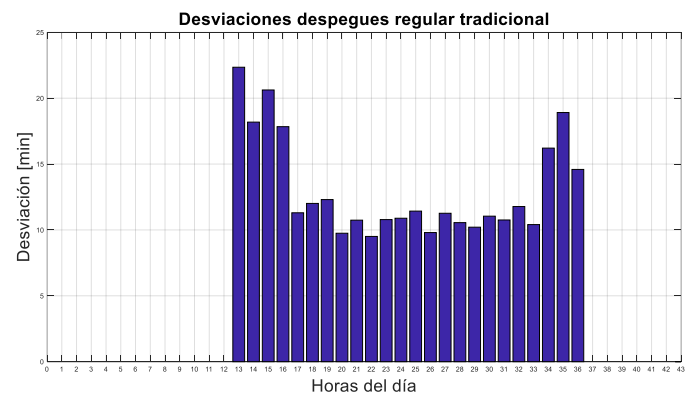


Figura 48. Desviaciones despegues regular tradicional por horas

En las siguientes figuras se encuentra el mismo resumen, pero para los aterrizajes.

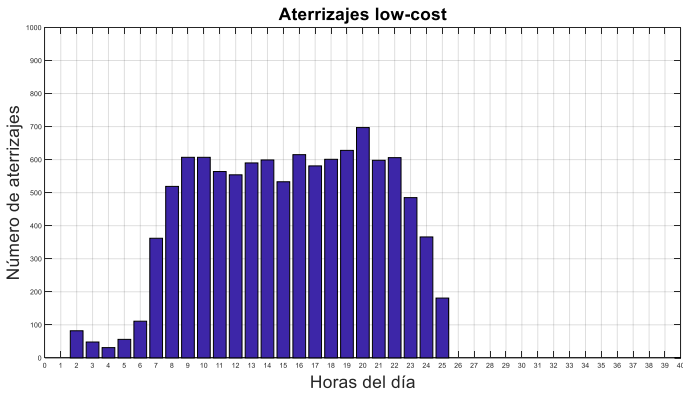


Figura 49. Aterrizajes low-cost por horas

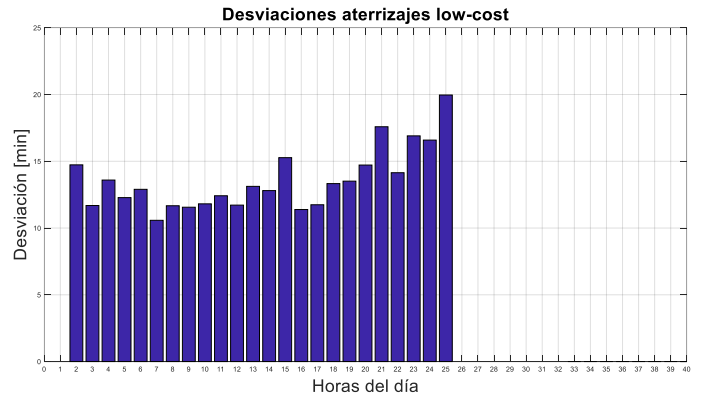


Figura 50. Desviaciones aterrizajes low-cost por horas

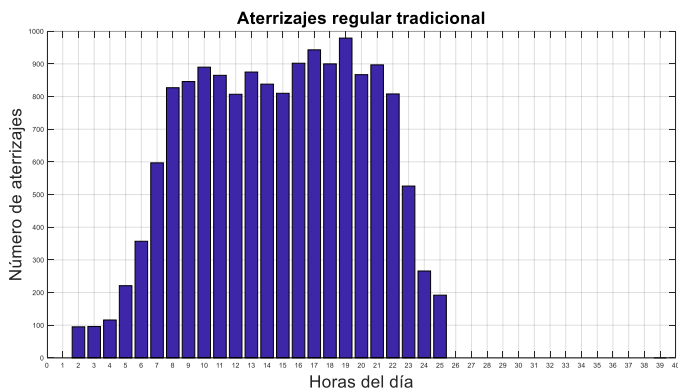


Figura 51. Aterrizajes regular tradicional por horas

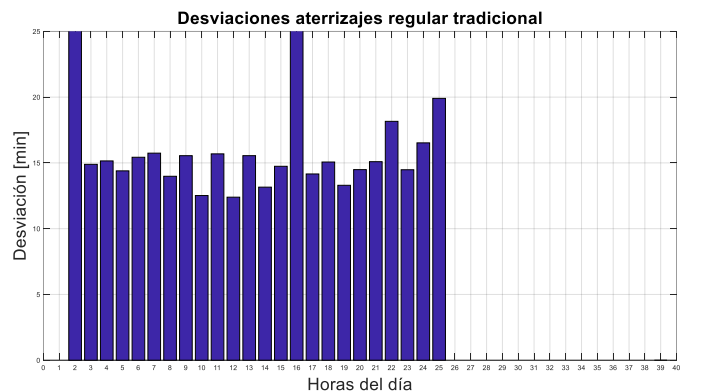


Figura 52. Desviaciones aterrizajes regular tradicional por horas²¹

Así, tanto en despegues como en aterrizajes, se observa un aumento en el número de vuelos en las horas centrales del día y una disminución de las desviaciones en estas horas. Es importante recordar del capítulo anterior, que al dividir los vuelos en regulares tradicionales y low-cost, en los low-cost se apreció una diferencia de desviación estándar de 8.66 puntos en los despegues (de 19.97 a 11.31) y de 9.85 puntos en los aterrizajes (de 23.56 a 13.71), mientras que en los regulares tradicionales aumentó considerablemente (a 41.12 y 42.48 respectivamente). En las figuras siguientes se puede observar más fácilmente cuándo los vuelos low-cost cobran más importancia, ya que se muestra un gráfico del ratio de movimientos low-cost frente a regulares tradicionales.

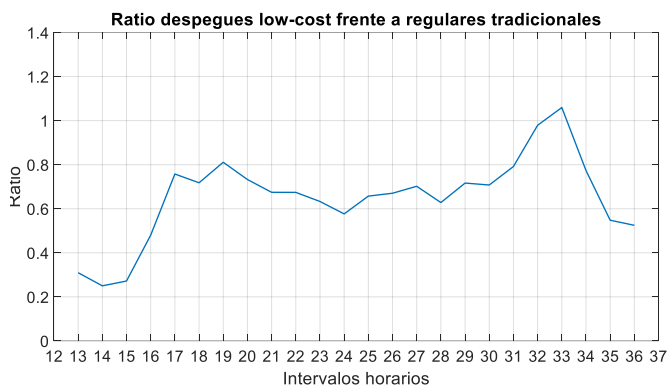


Figura 53. Ratio de despegues low-cost frente a regulares tradicionales

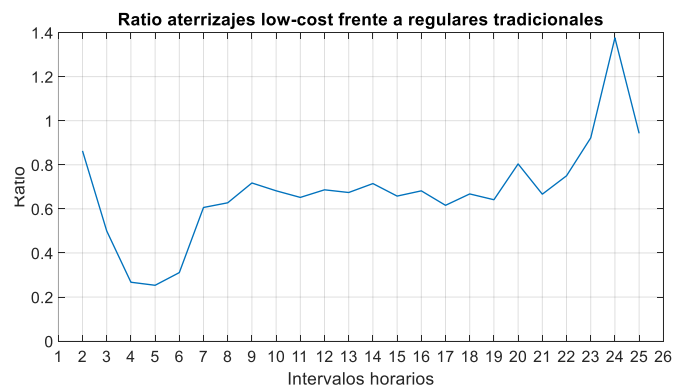


Figura 54. Ratio de aterrizajes low-cost frente a regulares tradicionales

²¹ En esta figura, las desviaciones en los dos picos tienen valores de 45.25 y 34.33, de izquierda a derecha. Se ha recortado la representación para poder comparar mejor visualmente con las desviaciones de los aterrizajes low-cost.

En las figuras anteriores se han mostrado los resultados, en despegues y aterrizajes, en el mismo intervalo de estudio: desde las 00:00 del 09/09 a las 23:59 del mismo día. Es interesante observar que, en las primeras horas de la madrugada (desde las 00:00 hasta sobre las 02:00), los vuelos low-cost disminuyen con respecto a los regulares tradicionales. Después, desde las 02:00 hasta sobre las 05:00, empiezan a aumentar los vuelos low-cost. Así, en las horas centrales del día (desde aproximadamente las 05:00 o 06:00 hasta más o menos las 18:00 o 19:00) la proporción de vuelos low-cost y regular tradicional se mantiene aproximadamente constante²². Ya es a esta hora cuando los vuelos low-cost experimentan otra subida, llegando a superar, tanto en despegues como en aterrizajes, a los vuelos regulares tradicionales en proporción; esto ocurre a las 20:00 en los despegues y sobre las 21:00 en los aterrizajes, llegando a ser los aterrizajes low-cost casi 1.4 veces los regulares tradicionales a las 22:00.

Quizá entonces cabría preguntarse si, cuando los vuelos low-cost cobran más importancia, la desviación pudiera ser menor por algún motivo. Sin embargo, en las figuras 45-48 y 49-52, se observa que esto no sucede así, sino más bien al contrario, siendo las desviaciones a las últimas horas del día mayores que en el resto de horas.

Concluyendo, se ha observado que en el día de estudio considerado los vuelos se comportan como cabría esperar (subida de número de vuelos low-cost considerable con respecto a los regulares tradicionales a primera y última hora del día), pero no es posible concluir que este fenómeno tenga consecuencia directa en las desviaciones. No obstante, se debe recordar el hecho de que se está analizando un solo día, y éste puede no ser representativo del fenómeno que se ha intentado observar, siendo quizá necesario un estudio más amplio. En el siguiente apartado se va a realizar un segundo análisis: los aeropuertos de operación.

6.3 Segundo análisis: los aeropuertos de operación

Conviene recordar que este análisis está basado en el punto 8 del apartado de introducción, en el que se explicó que, en muchas ocasiones, los vuelos low-cost despegan y aterrizan en los aeropuertos que les resultan más baratos que, a veces, se encuentran más lejos del centro de las ciudades de destino.

Así, en el caso de las aerolíneas low-cost, los valores de retrasos podrían variar más con respecto a la media en los aeropuertos en los que este tipo de aerolíneas opera y, en el caso de las regulares tradicionales, que estos valores de retrasos sean más parecidos a la media en los aeropuertos en los que estas operan. Es decir, se puede suponer que hay aeropuertos que, por su propio funcionamiento, causen retrasos en las aerolíneas; y puede ser que las aerolíneas low-cost operen en aeropuertos con medias de retrasos bastante diferentes y que, al final, esto se vea reflejado en los retrasos de estas aerolíneas.

Así, se va a hacer un estudio simbólico de los retrasos de 3 aeropuertos españoles diferentes entre sí: Adolfo Suárez Madrid-Barajas (LEMD), Málaga-Costa del Sol (LEMG) y Sevilla-San Pablo (LEZL). Para conocer los vuelos que tienen origen o destino uno de estos 3 aeropuertos, se han usado las variables extraídas del .so6 que proporcionaban información sobre el origen y el destino de los 29323 vuelos del día de estudio. Así, se han encontrado 1135 vuelos para LEMD, 405 vuelos para LEMG y 104 vuelos para LEZL. De los 3 aeropuertos se vuelven a calcular todas las variables necesarias para realizar el estudio de los retrasos.

Por otro lado, según STATFOR [3], el top 5 de países con más porcentaje de movimientos low-cost fueron: Reino Unido, Alemania, España, Italia y Francia. Las tres aerolíneas con más movimientos low-cost fueron: Ryanair (22%), easyJet (15%) y airberlin (6%) y las tres aeronaves más usadas fueron: B737-800 (38%), A320 (24%) y A319 (14%). Además, los 5 aeropuertos con más movimientos low-cost por día fueron (de mayor a menor número): Aeropuerto Josep Tarradellas Barcelona-El Prat LEBL (con 550 movimientos/día), Aeropuerto de Londres-Gatwick EGKK (548), Aeropuerto de Londres-Stansted EGSS (409), Aeropuerto Internacional de Düsseldorf EDDL (374) y Aeropuerto Internacional Sabiha Gökçen LTFJ (356). Por lo tanto, puede resultar interesante estudiar los tres primeros aeropuertos con más movimientos low-cost, ver si existe una correspondencia con el valor de la desviación y comparar los resultados obtenidos con los aeropuertos LEMD, LEMG y LEZL que, en principio, no tienen tantos vuelos low-cost.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para los aeropuertos estudiados.

²² Conviene recordar que, en el estudio considerado, 10816 vuelos fueron low-cost y 16163 fueron regulares tradicionales. Por lo tanto, el ratio de vuelos low-cost frente a regulares tradicionales fue de 0.67. En las figuras, puede apreciarse que, efectivamente, en las horas centrales del día esta proporción se mantiene alrededor de este valor.

		LEMD		LEMG		LEZL	
		Despegue	Aterrizaje	Despegue	Aterrizaje	Despegue	Aterrizaje
Centro de la distribución	Mediana [min]	4.00	5.57	4.07	4.47	2.52	1.90
	Media [min]	5.23	7.19	5.22	5.38	3.73	4.08
Variabilidad	Máximo [min]	107.00	111.33	56.00	81.00	42.00	61.25
	Mínimo [min]	-21.00	-31.35	-23.00	-32.93	-13.00	-18.90
	Desviación estándar [min]	9.78	12.62	9.54	12.85	8.61	11.94
Forma	Asimetría	2.32	1.63	0.99	0.93	1.16	1.46
	Curtosis	18.61	11.05	6.44	6.84	6.00	7.43
Porcentaje vuelos low-cost		28.72		68.88		67.31	
		LEBL		EGKK		EGSS	
		Despegue	Aterrizaje	Despegue	Aterrizaje	Despegue	Aterrizaje
Centro de la distribución	Mediana [min]	9.40	10.07	5.00	8.03	2.45	3.28
	Media [min]	11.09	11.77	6.03	9.16	3.65	4.01
Variabilidad	Máximo [min]	73.00	107.27	89.00	91.12	67.00	77.18
	Mínimo [min]	-23.00	-35.87	-88.00	-34.38	-24.00	-22.22
	Desviación estándar [min]	11.98	14.09	12.28	15.35	9.98	11.14
Forma	Asimetría	1.09	1.10	0.59	0.62	1.28	1.31
	Curtosis	5.29	6.70	10.27	4.33	8.17	8.58
Porcentaje vuelos low-cost		27.71		75.57		93.15	

Tabla 22. Indicadores obtenidos para los aeropuertos estudiados

Es útil recordar los datos que se obtuvieron en el subcapítulo anterior (en la Tabla 21) para el grupo de los vuelos regulares tradicionales (subgrupo 1.1) y low-cost (subgrupo 1.2) y que se muestran a continuación.

		Despegue grupo 1	Despegue subgrupo 1.1	Despegue subgrupo 1.2	Aterrizaje grupo 1	Aterrizaje subgrupo 1.1	Aterrizaje subgrupo 1.2
Centro de la distribución	Mediana [min]	3.00	3.90	3.00	3.62	3.98	3.00
	Media [min]	5.05	5.16	4.87	5.11	5.57	4.43
Variabilidad	Máximo [min]	910.73	910.73	109.00	886.50	886.50	159.27
	Mínimo [min]	-93.55	-93.55	-88.00	-400.28	-400.28	-256.48
	Desviación estándar [min]	13.08	14.08	11.31	15.64	16.75	13.71
Forma	Asimetría	13.86	17.90	1.37	6.70	8.77	0.71
	Curtosis	875.46	1071.89	9.99	420.19	521.67	22.14

Los resultados obtenidos son interesantes. Por una parte, en el día de estudio se han encontrado, en los aeropuertos con más movimientos low-cost, las siguientes operaciones: 1004 movimientos en LEBL (casi el

doble de la media para este aeropuerto en todo el año 2016, 550), 938 movimientos en EGKK (1.7 veces la media en todo el año, 548) y 511 en EGSS (un poco más que su media al año, 409). Por lo tanto, el día de estudio fue un día con mucho más tráfico aéreo del habitual para Barcelona (LEBL) y Londres Gatwick (EGKK), y esto hay que tenerlo en cuenta en los resultados obtenidos.

Por otro lado, es interesante recordar que, mientras las compañías tradicionales (o también llamadas *full services*, FSC), suelen centrar su red alrededor de un aeropuerto hub principal, lo que se conoce como sistema HS (*Hub and Spoke*), las aerolíneas low-cost prefieren hacerlo a través del sistema del punto a punto (*Point to Point*, PP), en el que se utilizan los servicios de múltiples aeropuertos distintos. Por ejemplo, el caso de Iberia sería una aerolínea tradicional que centra su oferta en el aeropuerto hub de Madrid Barajas LEMD. Esto le permite aglutinar una flota grande de aviones y operar rutas de largo recorrido, algo que suele ser más complicado para las aerolíneas de bajo coste.

Utilizar un hub principal suele ser más costoso, normalmente por la ubicación del propio aeropuerto y por tener excelentes conexiones internacionales, y las tasas para operar desde ellos suelen ser más elevadas. Por otro lado, con el sistema punto a punto es posible apoyarse en aeropuertos distintos, muchos de los cuales suelen estar en ciudades secundarias (o ser aeropuertos secundarios en ciudades donde ya hay un aeropuerto principal, como Londres) y, en ellos, las tasas son menores en muchas ocasiones. Además, el sistema PP favorece la disminución de retrasos y cancelaciones, ya que no depende tanto de inclemencias puntuales en una ciudad concreta; en un hub, cualquier problema puede afectar a toda una red de vuelos.

En Europa, los principales aeropuertos hub son [9]: Frankfurt, Londres Heathrow, París Charles de Gaulle, Ámsterdam Schipol y Madrid, aunque Barcelona está haciéndose un hueco en esta clasificación. Es por ello que, en los aeropuertos elegidos para el estudio, Madrid y Barcelona muestran un porcentaje de vuelos low-cost bastante menor que el resto.

No obstante, el caso de Barcelona es un poco especial. Siendo el aeropuerto con mayor número de vuelos low-cost de media anual, se comporta como un aeropuerto hub para la compañía de bajo coste Vueling. Esta compañía, aun teniendo un hub principal en este aeropuerto, imita el funcionamiento del Point to Point, ya que complementa su actividad con otras bases operativas en el extranjero. Este sistema es conocido como *MultiHub and Spoke* (MHS) y es un híbrido que se correspondería con una combinación del HS y el PP. Por lo tanto, hoy en día, los modelos están avanzando y cada vez es más complicado establecer que una aerolínea es “puramente” low-cost, ya que muchas están adoptando ventajitas de uno u otro método de trabajo; y eso explicaría el valor tan bajo de vuelos low-cost en este aeropuerto.

Volviendo a la Tabla 22, se puede observar que las medias de retrasos son mayores con respecto al total de vuelos low-cost de este estudio, salvo en los aeropuertos LEZL y EGSS, cuyos valores de media de retrasos son un poco menores. En cuanto a la desviación estándar, ésta es menor, tanto en despegues y en aterrizajes, en todos los aeropuertos estudiados salvo en los aeropuertos LEBL y EGKK. Hay que recordar que el día de estudio, estos dos aeropuertos sufrieron un tráfico aéreo mucho mayor al habitual, por lo que éste podría ser el motivo.

Efectivamente, se puede observar que hay diferencias en las desviaciones estándar según los aeropuertos de operación y que pueden ser significativas. No obstante, y nuevamente, se ha de recordar que sería interesante ampliar este estudio a un mayor número de días y de aeropuertos estudiados para llegar a resultados más concluyentes. Como se ha indicado, hay aeropuertos que tuvieron mucho más tráfico del habitual en el día de estudio y esto puede afectar a los resultados obtenidos.

6.4 Tercer análisis: la capacidad para absorber los retrasos en vuelo

Según EUROCONTROL [10], las operaciones low-cost y el sistema PP muestran menores valores de retrasos en cadena, ya que, como se ha explicado en los subcapítulos anteriores, a menudo trabajan con servicios independientes y sin tener que esperar a pasajeros o carga conectados con otro vuelo. Ya se ha intentado explicar en los dos primeros análisis que esta diferencia en cómo le afectan los retrasos a las low-cost puede deberse a las horas de operación y a los aeropuertos donde operan (y por lo tanto el sistema que usan las aerolíneas). Ahora se plantea que, además, los vuelos low-cost podrían tener mayor capacidad para absorber los retrasos en vuelo.

Se plantean dos intervalos de tiempos en los que podría ocurrir:

- En el *block-to-block time*, es decir, desde el SOBT (Scheduled Off Block Time o el tiempo programado

en el que el avión deja su posición de parking, que es el inicio del taxi-out) hasta el SIBT (Scheduled In Block Time o el tiempo programado en que el avión llega al parking, que es el final del taxi-in). Es decir, comprende los tiempos del taxi-out, del vuelo y del taxi-in.

- En el *turn-around time*, es decir, desde el final del taxi-in hasta el inicio del taxi-out (que es como el tiempo en que el avión está “parado” en tierra).

Según EUROCONTROL, las aerolíneas low-cost son capaces de absorber notablemente más retraso en la fase block-to-block que el resto de operadores, mientras que, en la fase de tierra, apenas absorben nada. En esta última fase, son las aerolíneas que operan en aeropuertos hub las que consiguen absorber retraso y, en general, la mayor parte de los vuelos están en tierra más tiempo del esperado.

Además, las aerolíneas low-cost tienen el Indicador de Diferencia de Puntualidad (DDI-F) más bajo [10]. Recordar que, en el subcapítulo 3.3.1 se definió este parámetro como la diferencia de puntualidad, expresada en minutos, entre las salidas y las llegadas. Por ejemplo, un vuelo que saliera con 20 minutos de retraso y llegara con 30 minutos de retraso, tendría un DDI-F de +10 minutos. En 2016, el DDI-F europeo fue de -3.9 minutos, es decir, los vuelos tendieron a compensar los retrasos en las salidas. Este parámetro tiene un impacto importante en el número de vuelos retrasados, ya que cuando es positivo, las aerolíneas tienden incluso a doblar el tiempo de retraso que presentaba el primer vuelo del día. Además, las aerolíneas cuyos vuelos fueran capaces de absorber al menos 2 minutos durante la primera fase block-to-block, podrían reducir el número de vuelos retrasados.

Para realizar este análisis, se han tomado dos caminos:

- En primer lugar, se han realizado unas gráficas de dispersión. En la Figura 55, se comparan la diferencia de tiempos de despegue y la diferencia de tiempos de aterrizaje, y en la Figura 56, la diferencia de duración de los vuelos y la diferencia de tiempos de despegue.

En estos gráficos es interesante conocer un parámetro denominado índice o coeficiente de correlación de Pearson, que indica el grado de dependencia lineal entre dos variables o, de manera menos formal, el grado de relación de dos variables, siempre que ambas sean cuantitativas y continuas. Este índice varía en el intervalo $[-1,1]$ y su valor puede estimarse mirando la forma que componen el conjunto de puntos del gráfico.

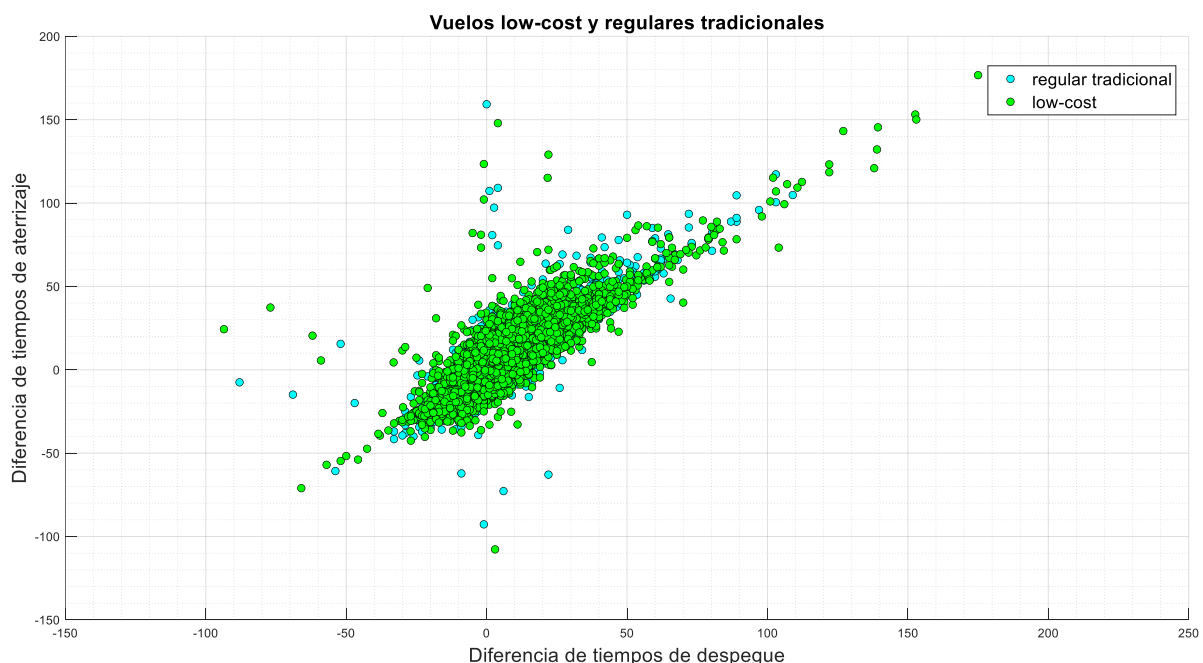


Figura 55. Gráfico de dispersión: diferencia de tiempos de despegue vs diferencia de tiempos de aterrizaje

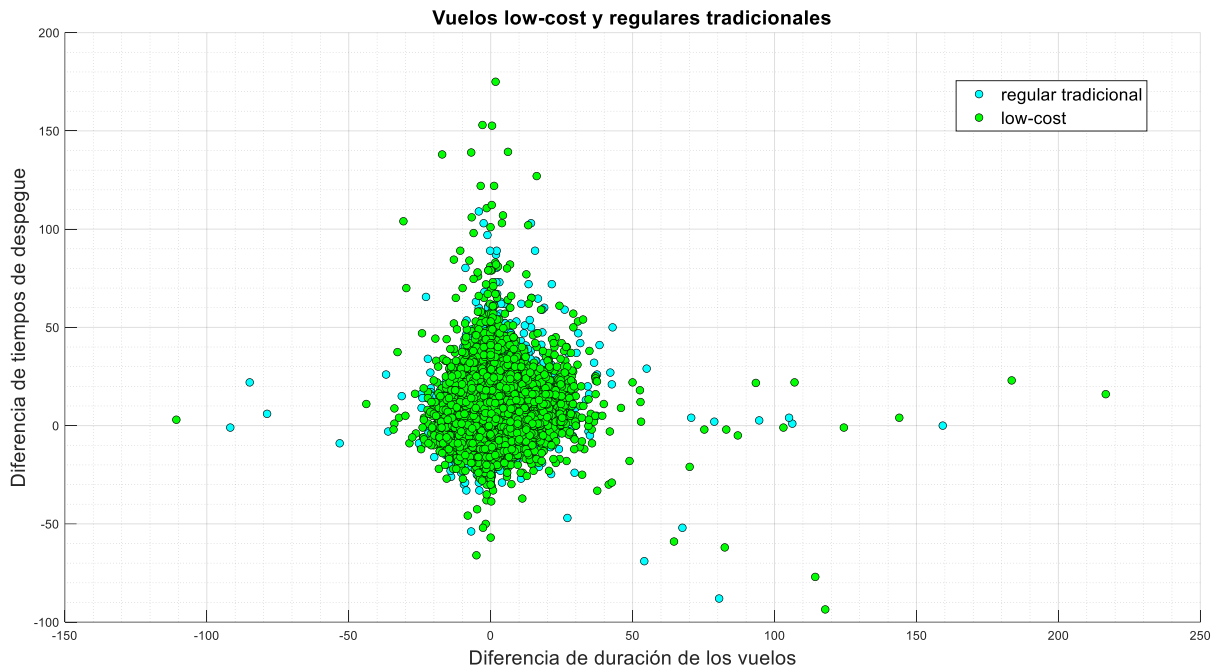


Figura 56. Gráfico de dispersión: diferencia de duración de los vuelos vs diferencia de tiempos de despegue

Así, cuando se relacionan la diferencia de tiempos de despegue y de aterrizaje, la nube de puntos se asemeja a una recta, luego el valor del índice de correlación estaría entre 0 y 1 y más próximo a 1. Esto indicaría que existe una dependencia, que no es perfecta, pero positiva: cuando una de las variables aumenta, la otra también lo hace (con valor 1, si una aumenta, la otra lo hace en proporción constante). Esto tiene sentido, ya que, si un vuelo se retrasa o adelanta en el despegue, su aterrizaje será adelantado o retrasado de forma parecida. Efectivamente, se ha calculado este índice y ha dado un valor de 0.85, tanto para los vuelos low-cost como para los regulares tradicionales.

Por otro lado, la nube de puntos de la Figura 56 indica que el índice de correlación es próximo a 0, lo que significa que no existe relación lineal entre las dos variables; pero no implica necesariamente que las variables sean independientes, ya que pueden existir relaciones no lineales entre ellas. Así, se ha calculado su valor para este segundo caso y ha resultado ser de 0.04 para los vuelos low-cost y 0.02 para los regulares tradicionales.

- En segundo lugar, se ha calculado el DDI-F para los vuelos low-cost y los regulares tradicionales en el día de estudio considerado. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos.

	Subgrupo 1.1: regular tradicional	Subgrupo 1.2: low-cost
Porcentaje de vuelos con absorción	49.12	55.29
DDI-F	0.40	-0.45

Tabla 23. Porcentaje de vuelos con absorción y DDI-F para vuelos regulares tradicionales y low-cost

Los resultados obtenidos, por tanto, son coherentes. Se observa que el 49% de los vuelos regulares tradicionales que volaron en el día de estudio fueron capaces de absorber retraso durante el vuelo, mientras que el porcentaje sube hasta el 55% en el caso de los low-cost. Por otro lado, se cumple también en el día de estudio que el DDI-F de los low-cost es más bajo que el de los regulares tradicionales, es decir, los low-cost son capaces de absorber más retraso durante el vuelo que los regulares tradicionales. Además, de media en el día, los regulares tradicionales no fueron capaces de bajar del valor 0 del DDI-F, es decir, añadieron retraso en la fase de vuelo. Sin embargo, este día, los vuelos low-cost sí fueron capaces de absorber retraso, ya que el DDI-F ha salido negativo, por lo que pudieron, por este motivo, haber reducido el valor de la desviación.

Como en los otros dos análisis, es importante hacer hincapié en que, aunque positivos, estos resultados son de un solo día de estudio, por lo que sería interesante ampliar su alcance; no obstante, parece ser un buen punto de partida.

7 AJUSTE DE DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD A LAS DESVIACIONES

En este capítulo, se va a realizar una introducción al ajuste de distribuciones de probabilidad a las desviaciones en la duración, el despegue y el aterrizaje de los vuelos a partir de los datos obtenidos a lo largo de este trabajo.

En los capítulos 4 y 5 se han calculado los valores de asimetría y curtosis que caracterizan a las distribuciones de diferencia de duración de los vuelos y de retrasos, tanto para despegues como para aterrizajes, así como para los distintos grupos de vuelos que se han establecido en este trabajo y que han sido: grupo 1 (regular de pasajeros), grupo 2 (resto de vuelos), subgrupo 1.1 (regular tradicional) y subgrupo 1.2 (low-cost).

En la Figura 16 (Capítulo 4), se mostró la comparación de la distribución de desviación de duración de todos los vuelos de este estudio y la distribución normal y se observó cuán diferentes eran ambas, tal y como mostraban los valores tan elevados de asimetría y curtosis.

A partir de aquí, es natural pensar que puede haber otras distribuciones que se ajusten mejor a las distribuciones de los datos obtenidos. Para ello, se va a hacer uso del comando *dfittool* de Matlab, que abre la aplicación *Distribution Fitter*, que permite importar datos y ajustar diferentes distribuciones de probabilidad a estos datos. En este caso, se ha escogido representar la función de densidad de probabilidad de la distribución de los datos obtenidos, aunque Matlab ofrece la probabilidad de representar también otras funciones como la de distribución acumulativa. La función de densidad de probabilidad de los datos se comparará con la función de diferentes distribuciones. Matlab ofrece 22 distribuciones de probabilidad incorporadas, aunque se puede crear una propia distribución personalizada.

En cuanto a las distribuciones utilizadas, se han escogido 3, aparte de la normal, debido a que, a priori, podrían encajar mejor con las características de los datos obtenidos:

- Distribución normal. Es una distribución de probabilidad continua cuya función de densidad tiene forma acampanada y es simétrica con respecto al valor de la media (que coincide con la mediana y la moda). Se caracteriza por los parámetros μ (parámetro de localización, con $-\infty < \mu < \infty$) y σ o s (parámetro de escala, con $0 < \sigma < \infty$). El parámetro de localización determina la “ubicación” o desplazamiento de la distribución y pueden ser la media, la mediana y la moda. El parámetro de escala es un parámetro numérico que, cuanto más grande sea, más amplia será la distribución (viéndose más expandida horizontalmente), y cuanto menor sea, será más concentrada. Así, este parámetro es la desviación típica e indica la “escala” o dispersión de una distribución de probabilidad. A menudo se usa al cuadrado, correspondiendo a la varianza de la distribución. La varianza es una medida de dispersión que representa la variabilidad de una serie de datos respecto a su media.
- Distribución *logistic*. Es una distribución de probabilidad continua cuya función de distribución es la función logística. Es similar a la distribución normal en forma pero tiene colas más pesadas, por lo tanto, mayor curtosis. Se caracteriza por los parámetros μ y σ o s .
- Distribución *stable*. Las distribuciones estables son una familia de distribuciones de probabilidad adecuadas para modelar distribuciones de dos colas, pesadas y con asimetría. Se caracteriza por 4 parámetros: α (primer parámetro de forma), β (segundo parámetro de forma), γ (parámetro de escala) y δ (parámetro de localización). α ($0 < \alpha \leq 2$) describe las colas de la distribución, de forma que un valor alto de α indica un pico más bajo y, por lo tanto, colas más gruesas; y un valor bajo indica un pico alto y unas colas estrechas. β ($-1 \leq \beta \leq 1$) indica la asimetría de la distribución, de forma que si β es 0 la distribución es simétrica, si es mayor que 0 es asimétrica a la derecha y si es menor que 0 es asimétrica a la izquierda. Conforme α aumenta, el efecto de β disminuye.
- Distribución *t Location-Scale*. Esta distribución es adecuada para modelar distribuciones de datos con colas más pesadas (o más propensas a valores atípicos) que la distribución normal y con asimetría. Está caracterizada por 3 parámetros: μ (parámetro de localización), σ (parámetro de escala) y ν (parámetro de forma, con $0 < \nu < \infty$). Esta distribución se aproxima a la distribución normal a medida que ν se acerca al infinito, mientras que valores más pequeños de ν indican colas más pesadas.

Al aplicar estas distribuciones, se evaluará la bondad del ajuste. La bondad del ajuste de un modelo estadístico describe lo bien que se ajusta un conjunto de observaciones a una distribución²³ y para evaluarla existen numerosas pruebas. Aunque es difícil usar estas pruebas como medidas absolutas de la bondad del ajuste, sí pueden ser útiles como medidas relativas. Matlab propone, en primer lugar, realizar un examen visual de la curva ajustada y, posteriormente, utilizar algún método de los que proporciona, ya sea un método gráfico (representando valores residuales y límites de predicción) o numéricos (calculando estadísticas de bondad del ajuste y límites de confianza de coeficientes) [12].

En este caso, se usará la función proporcionada por Matlab *log-likelihood* o función de verosimilitud logarítmica. En estadística, la estimación por máxima verosimilitud (Maximum Likelihood Estimation, MLE) es un método para estimar los parámetros de una supuesta distribución de probabilidad dados unos datos observados. Esto se consigue maximizando la función de verosimilitud, de forma que, bajo el modelo estadístico asumido, los datos observados sean los más probables. Por lo tanto, un método de verosimilitud es una medida de cómo de bien un modelo encaja en unos datos dados. Por facilidad de optimización, se usa el logaritmo de la verosimilitud, que es lo que proporciona el *log-likelihood*. Los valores logarítmicos de la verosimilitud no se pueden usar de forma separada, ya que dependen del tamaño de la muestra, por lo que solo se pueden comparar entre diferentes distribuciones, pero para una misma muestra. Así, la que tenga el mayor valor de esta función (sin valor absoluto), será la que mejor modele la distribución de datos.

De esta forma, en primer lugar y para todos los grupos, es apropiado realizar una inspección visual de la curva ajustada con las diferentes distribuciones. A modo de ejemplo, se muestra en la Figura 57 el caso de las desviaciones en la duración de todos los vuelos y las 4 distribuciones candidatas a modelar dichas desviaciones.

A simple vista, se puede observar que la distribución normal no se ajusta correctamente a los datos. Sin embargo, las otras tres los modelan mucho mejor. Como se ha comentado, esto es debido a las características del conjunto de datos, con más pico que la distribución normal y colas más pesadas, además de ser asimétrico; justo las distribuciones de este tipo son las que modelan bien la Stable y la t Location-Scale.

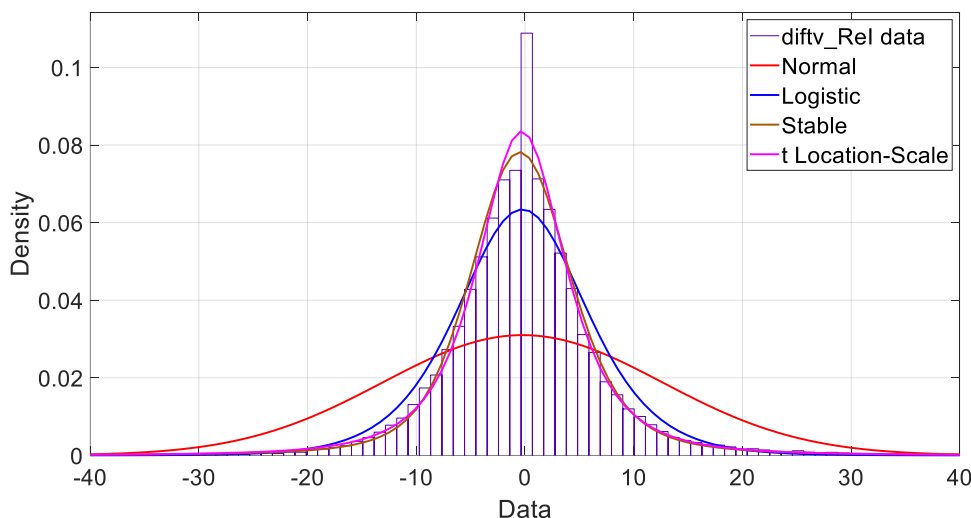


Figura 57. Comparación de distribuciones candidatas y distribución de diferencias de duración de todos los vuelos (real-inicial)

En segundo lugar, se puede observar el valor de *log-likelihood*. Para ello, a continuación se muestra un resumen de las distribuciones que se han utilizado, sus parámetros característicos y el *log-likelihood* como indicador de bondad del ajuste, para las desviaciones en la duración de los vuelos, en los despegues y en los aterrizajes, y tanto comparando vuelos real-inicial como real-regulado.

1. Comparación entre vuelos reales e iniciales:
 - a. Duración de los vuelos:

²³ Un "buen ajuste" en estadística se puede usar con diferentes sentidos, de forma que un buen ajuste puede ser un modelo o bien del que razonablemente podrían proceder sus datos (suponiendo un ajuste por mínimos cuadrados), en el que sus coeficientes pueden estimarse con poca incertidumbre o que es capaz de predecir nuevas observaciones con gran certeza.

	Todos los vuelos		Grupo 1 (regular de pasajeros)		Grupo 2 (resto de vuelos)	
	Parámetros	Log-likelihood	Parámetros	Log-likelihood	Parámetros	Log-likelihood
Normal	mu = -0.22	-141871	mu = 0.06	-95304	mu = -0.60	-8825
	sigma = 12.87		sigma = 8.28		sigma = 10.45	
Logistic	mu = -0.26	-122474	mu = -0.20	-88239	mu = -0.54	-8138
	sigma = 3.94		sigma = 3.45		sigma = 4.14	
Stable	alpha = 1.55	-118430	alpha = 1.66	-87137	alpha = 1.56	-7929
	beta = 0.10		beta = 0.26		beta = -0.16	
	gam = 3.66		gam = 3.61		gam = 3.93	
	delta = -0.42		delta = -0.51		delta = -0.32	
t Location-Scale	mu = -0.31	-118364	mu = -0.29	-87069	mu = -0.42	-7928
	sigma = 4.33		sigma = 4.37		sigma = 4.68	
	nu = 2.49		nu = 3.19		nu = 2.55	
	Subgrupo 1.1 (regular tradicional)		Subgrupo 1.2 (low-cost)			
	Parámetros	Log-likelihood	Parámetros	Log-likelihood		
Normal	mu = 0.40	-58201	mu = -0.45	-36828		
	sigma = 8.86		sigma = 7.29			
Logistic	mu = 0.10	-53473	mu = -0.64	-34675		
	sigma = 3.58		sigma = 3.26			
Stable	alpha = 1.63	-52742	alpha = 1.72	-34317		
	beta = 0.26		beta = 0.24			
	gam = 3.67		gam = 3.51			
	delta = -0.24		delta = -0.88			
t Location-Scale	mu = -0.01	-52686	mu = -0.69	-34306		
	sigma = 4.42		sigma = 4.29			
	nu = 3.00		nu = 3.56			

Tabla 24. Distribuciones, parámetros característicos y log-likelihood para la duración de vuelos (real-inicial)

b. Despegues:

	Todos los vuelos		Grupo 1 (regular de pasajeros)		Grupo 2 (resto de vuelos)	
	Parámetros	Log-likelihood	Parámetros	Log-likelihood	Parámetros	Log-likelihood
Normal	mu = 4.74	-157569	mu = 5.05	-107563	mu = 2.81	-12037
	sigma = 19.97		sigma = 13.04		sigma = 41.12	
Logistic	mu = 3.71	-139266	mu = 4.12	-102745	mu = 1.10	-9570
	sigma = 6.50		sigma = 6.00		sigma = 7.46	
Stable	alpha = 1.67	-136896	alpha = 1.70	-101490	alpha = 1.58	-9132
	beta = 0.69		beta = 0.85		beta = 0.37	
	gam = 2.41		gam = 6.41		gam = 6.71	
	delta = -0.42		delta = 2.75		delta = 0.13	
t Location-Scale	mu = 3.31	-137513	mu = 3.80	-102165	mu = 0.63	-9143
	sigma = 8.50		sigma = 8.27		sigma = 8.07	
	nu = 3.61		nu = 4.12		nu = 2.71	
	Subgrupo 1.1 (regular tradicional)		Subgrupo 1.2 (low-cost)			
	Parámetros	Log-likelihood	Parámetros	Log-likelihood		
Normal	mu = 5.16	-65680	mu = 4.87	-41581		
	sigma = 14.08		sigma = 11.31			

Logistic	mu = 4.20	-61869	mu = 4.02	-40867
	sigma = 6.10		sigma = 5.84	
Stable	alpha = 1.70	-61029	alpha = 1.71	-40456
	beta = 0.84		beta = 0.87	
	gam = 6.48		gam = 6.29	
	delta = 2.79		delta = 2.66	
t Location-Scale	mu = 3.85	-61433	mu = 3.72	-40727
	sigma = 8.35		sigma = 8.16	
	nu = 4.04		nu = 4.25	

Tabla 25. Distribuciones, parámetros característicos y log-likelihood para los despegues (real-inicial)

c. Aterrizajes (real-inicial):

	Todos los vuelos		Grupo 1 (regular de pasajeros)		Grupo 2 (resto de vuelos)	
	Parámetros	Log-likelihood	Parámetros	Log-likelihood	Parámetros	Log-likelihood
Normal	mu = 4.88	-128268	mu = 5.11	-112416	mu = 2.21	-12113
	sigma = 19.21		sigma = 15.61		sigma = 42.48	
Logistic	mu = 3.91	-118114	mu = 4.18	-107953	mu = 0.61	-10001
	sigma = 7.43		sigma = 7.27		sigma = 9.03	
Stable	alpha = 1.73	-116697	alpha = 1.74	-106905	alpha = 1.60	-9633
	beta = 0.70		beta = 0.80		beta = 0.24	
	gam = 7.98		gam = 7.94		gam = 8.34	
	delta = 2.59		delta = 2.78		delta = -0.13	
t Location-Scale	mu = 3.57	-117111	mu = 3.85	-107360	mu = 0.25	-9636
	sigma = 10.05		sigma = 10.04		sigma = 10.04	
	nu = 3.93		nu = 4.13		nu = 2.77	
	Subgrupo 1.1 (regular tradicional)		Subgrupo 1.2 (low-cost)			
	Parámetros	Log-likelihood	Parámetros	Log-likelihood		
Normal	mu = 5.56	-68486	mu = 4.42	-43661		
	sigma = 16.75		sigma = 13.71			
Logistic	mu = 4.61	-65142	mu = 3.54	-42765		
	sigma = 7.48		sigma = 6.95			
Stable	alpha = 1.75	-64469	alpha = 1.74	-42397		
	beta = 0.80		beta = 0.81			
	gam = 8.18		gam = 7.58			
	delta = 3.22		delta = 2.160			
t Location-Scale	mu = 4.28	-64724	mu = 3.24	-42597		
	sigma = 10.27		sigma = 9.68			
	nu = 4.102		nu = 4.21			

Tabla 26. Distribuciones, parámetros característicos y log-likelihood para los aterrizajes (real-inicial)

En el caso de los despegues y los aterrizajes, se observa que la distribución Stable es la que mejor modela las desviaciones, aunque el valor de log-likelihood de la t Location-Scale está muy poco por debajo, por lo que también sería una buena distribución (con respecto a las demás). En la siguiente figura se muestra el caso de las desviaciones en los aterrizajes de los vuelos low-cost a modo de ejemplo.

Se puede observar que, efectivamente, la distribución normal se ajusta mejor en los vuelos low-cost que en el resto de grupos, aunque sigue sin ser una buena candidata a modelar sus desviaciones. Así, y como también indica el valor del log-likelihood, la mejor distribución entre las que se están estudiando, tanto para despegues como para aterrizajes, parece ser la Stable.

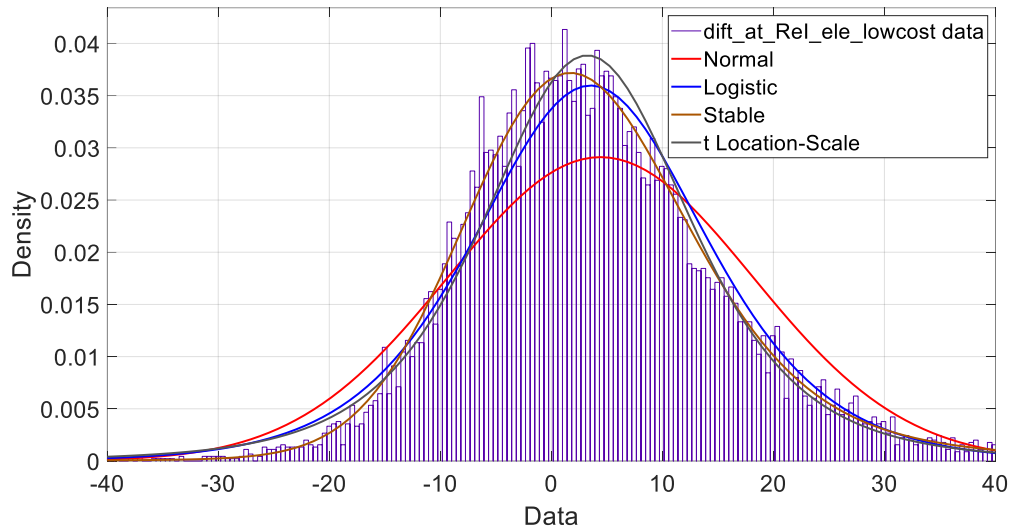


Figura 58. Comparación de distribuciones candidatas y distribución de desviaciones en los aterrizajes (real-inicial)

2. Comparación de vuelos reales y regulados:

- a. Duración de los vuelos: los resultados en la comparación de vuelos real y regulado son iguales a los mostrados para los vuelos real e inicial.
- b. Despegues:

	Todos los vuelos		Grupo 1 (regular de pasajeros)		Grupo 2 (resto de vuelos)	
	Parámetros	Log-likelihood	Parámetros	Log-likelihood	Parámetros	Log-likelihood
Normal	mu = 3.15	-123650	mu = 3.24	-105629	mu = 2.04	-12024
	sigma = 16.41		sigma = 12.14		sigma = 40.90	
Logistic	mu = 2.28	-109391	mu = 2.43	-99769	mu = 0.46	-9449
	sigma = 5.49		sigma = 5.35		sigma = 7.06	
Stable	alpha = 1.65	-107520	alpha = 1.66	-98391	alpha = 1.56	-8992
	beta = 0.70		beta = 0.77		beta = 0.29	
	gam = 5.64		gam = 5.58		gam = 6.25	
	delta = 1.12		delta = 1.22		delta = -0.27	
t Location-Scale	mu = 1.92	-108074	mu = 2.08	-98997	mu = 0.08	-8994
	sigma = 7.19		sigma = 7.18		sigma = 7.49	
	nu = 3.60		nu = 3.77		nu = 2.64	
	Subgrupo 1.1 (regular tradicional)		Subgrupo 1.2 (low-cost)			
	Parámetros	Log-likelihood	Parámetros	Log-likelihood		
Normal	mu = 3.72	-65163	mu = 2.54	-39609		
	sigma = 13.64		sigma = 9.42			
Logistic	mu = 2.77	-60752	mu = 1.94	-38894		
	sigma = 5.66		sigma = 4.87			
Stable	alpha = 1.64	-59741	alpha = 1.71	-38588		
	beta = 0.77		beta = 0.76			
	gam = 5.79		gam = 5.29			
	delta = 1.41		delta = 0.98			
t Location-Scale	mu = 2.35	-60148	mu = 1.74	-38769		
	sigma = 7.42		sigma = 6.89			
	nu = 3.54		nu = 4.45			

Tabla 27. Distribuciones, parámetros característicos y log-likelihood para los despegues (real-regulado)

c. Aterrizajes:

	Todos los vuelos		Grupo 1 (regular de pasajeros)		Grupo 2 (resto de vuelos)	
	Parámetros	Log-likelihood	Parámetros	Log-likelihood	Parámetros	Log-likelihood
Normal	$\mu = 3.16$	-127022	$\mu = 3.30$	-110605	$\mu = 1.44$	-12101
	$\sigma = 18.41$		$\sigma = 14.60$		$\sigma = 42.26$	
Logistic	$\mu = 2.37$	-115553	$\mu = 2.56$	-105477	$\mu = -0.05$	-9908
	$\sigma = 6.80$		$\sigma = 6.63$		$\sigma = 8.65$	
Stable	$\alpha = 1.73$	-114141	$\alpha = 1.75$	-104489	$\alpha = 1.58$	-9520
	$\beta = 0.61$		$\beta = 0.70$		$\beta = 0.18$	
	$\gamma = 7.30$		$\gamma = 7.26$		$\gamma = 7.87$	
	$\delta = 1.36$		$\delta = 1.48$		$\delta = -0.59$	
t Location-Scale	$\mu = 2.10$	-114440	$\mu = 2.31$	-104824	$\mu = -0.32$	-9520
	$\sigma = 9.16$		$\sigma = 9.15$		$\sigma = 9.43$	
	$\nu = 3.91$		$\nu = 4.15$		$\nu = 2.69$	
	Subgrupo 1.1 (regular tradicional)		Subgrupo 1.2 (low-cost)			
	Parámetros	Log-likelihood	Parámetros	Log-likelihood		
Normal	$\mu = 4.12$	-67865	$\mu = 2.09$	-42101		
	$\sigma = 16.12$		$\sigma = 11.86$			
Logistic	$\mu = 3.28$	-64095	$\mu = 1.54$	-41215		
	$\sigma = 6.99$		$\sigma = 6.05$			
Stable	$\alpha = 1.74$	-63398	$\alpha = 1.78$	-40972		
	$\beta = 0.69$		$\beta = 0.69$			
	$\gamma = 7.59$		$\gamma = 6.77$			
	$\delta = 2.12$		$\delta = 0.67$			
t Location-Scale	$\mu = 2.98$	-63603	$\mu = 1.39$	-41086		
	$\sigma = 9.48$		$\sigma = 8.68$			
	$\nu = 3.94$		$\nu = 4.78$			

Tabla 28. Distribuciones, parámetros característicos y log-likelihood para los aterrizajes (real-regulado)

En el caso de los despegues y los aterrizajes comparando los vuelos reales y regulados, se observa prácticamente el mismo comportamiento que en la comparación de vuelos reales e iniciales: según el log-likelihood, la Stable es la distribución que mejor modela los datos (estando muy cerca la t Location-Scale), salvo en el caso del grupo 2, en el que la t Location-Scale parece ser un poco mejor. El valor de ν también es mayor en el subgrupo low-cost, siendo entonces el conjunto de datos que más se aproxima a la distribución normal.

Como se ha recalado a lo largo de este trabajo, debido a la extensión de los datos se ha analizado un solo día. Esto conlleva que pueda haber comportamientos concretos en el día de estudio considerado que pueden no darse si se amplía el estudio. No obstante, se ha llegado a la conclusión de que hay distribuciones de probabilidad que se ajustan mejor a las desviaciones de los datos, por lo que es un buen punto de partida para continuar en un estudio que abarque un tiempo más amplio.

8 CONCLUSIONES

Dentro de las estadísticas que se pueden estudiar, los retrasos constituyen uno de los valores más importantes. Reducir los retrasos en la aviación supone muchas ventajas para las aerolíneas y para el tráfico aéreo en general, pero también de cara al pasajero. Es importante conocer cómo afectan los retrasos a los pasajeros y es por ello que tanto las compañías como las instituciones de la aviación realizan numerosos estudios que están encaminados a satisfacer al pasajero en términos de puntualidad.

Cuando se han estudiado los retrasos y las desviaciones a partir de los resultados obtenidos, se ha observado la importancia de establecer grupos de división en los vuelos, ya que los diferentes operadores tienen modelos de actuación completamente distintos y las estadísticas de cada grupo así lo han reflejado. Así, se ha procedido a hacer una clasificación que, aunque no es perfecta, ayuda a entender mejor el comportamiento de los vuelos.

De esta forma, se ha dividido en primer lugar en dos grandes grupos (1: regular de pasajeros y 2: resto de vuelos), con el objetivo de filtrar aquellos vuelos con retrasos muy grandes que se ha visto que corresponden, en su gran mayoría, a vuelos militares, de negocios, de carga o chárter, y así obtener las estadísticas de los retrasos únicamente de vuelos regulares de pasajeros. Los resultados más llamativos han sido los referentes a la desviación estándar. Así, en la duración de los vuelos, se ha observado que ésta disminuye en gran medida en el grupo 1 (concretamente, unos 5 minutos) y disminuye algo menos en el grupo 2 (unos 3 minutos). Por otro lado, la desviación de los retrasos en despegues y aterrizajes disminuye también bastante en el grupo 1 (unos 7 minutos en despegues y 8 en aterrizajes) y aumenta considerablemente en el grupo 2 (unos 21 minutos en despegues y 19 en aterrizajes).

Profundizando el estudio, se ha dividido, a su vez, el grupo 1 en dos nuevos subgrupos: vuelos regulares tradicionales (subgrupo 1.1) y vuelos low-cost (subgrupo 1.2). Se ha considerado que podía haber diferencias en las estadísticas calculadas dadas las diferentes características de los vuelos de uno y otro tipo y de las aerolíneas que los operan. Finalmente, han llamado particularmente la atención los vuelos low-cost frente a los regulares tradicionales, que son capaces de disminuir los valores de retrasos y desviación estándar. Concretamente, en cuanto a la duración de los vuelos, la desviación estándar disminuye 1 minuto en vuelos low-cost (con respecto al grupo 1) mientras que la de los regulares tradicionales aumenta 0.6 minutos. Y en despegues y aterrizajes, disminuye unos 2 minutos en vuelos low-cost y aumenta 1 minuto en regulares tradicionales.

Al haberse dado una diferencia tan sustancial en las desviaciones al separar los vuelos, se ha procedido a intentar encontrar una explicación a los resultados obtenidos. Para ello, se han estudiado en profundidad las características que diferencian a los vuelos low-cost de los que no lo son y, a partir de ellas, se han realizado varios análisis de lo que podía estar sucediendo:

- Al analizar las horas de operación de los vuelos low-cost frente a los regulares tradicionales, se ha visto que en el día de estudio considerado hubo una subida de número de vuelos low-cost considerable con respecto a los regulares tradicionales a primera y última hora del día, pero no se ha podido concluir que este fenómeno tenga consecuencia directa en las desviaciones. Sería positivo ver si hay alguna relación entre horas de operación y desviaciones de retrasos en un estudio más amplio, ya que un solo día puede no ser representativo.
- Se han analizado varios aeropuertos diferentes entre sí y con diversos porcentajes de vuelos low-cost que operan en ellos. Finalmente, se ha observado que hay diferencias en las desviaciones estándar según los aeropuertos de operación y que pueden ser significativas. No obstante, también sería interesante ampliar este estudio a un mayor número de días y de aeropuertos estudiados para llegar a resultados más concluyentes, ya que, por ejemplo, hay aeropuertos que tuvieron mucho más tráfico del habitual en el día de estudio y esto puede afectar a los resultados obtenidos.
- Por último, se ha obtenido que los regulares tradicionales añadieron retraso en la fase de vuelo, mientras que los low-cost sí fueron capaces de absorber retraso, lo que pudo ser un factor para reducir la desviación en los low-cost.

Por otro lado, y para finalizar, también se han observado resultados muy interesantes en la forma de la distribución de las desviaciones en la duración de los vuelos, los despegues y los aterrizajes. Al calcular los parámetros asimetría y curtosis, se ha comprobado que las distribuciones de desviación distan mucho de la

distribución normal en todos los vuelos, siendo los vuelos low-cost los que más se aproximan en su distribución a la normal. Así, se han probado varias distribuciones que podían modelar mejor a priori las distribuciones de los datos obtenidos y se ha indicado la bondad del ajuste de cada una de ellas. Se han obtenido dos distribuciones interesantes: la *stable* y la *t Location-Scale*, que son capaces de ajustarse, mejor que otras distribuciones, a las distribuciones de datos obtenidos, que se caracterizan por ser asimétricas y tener colas más pesadas que la distribución normal.

A partir de los resultados obtenidos, a continuación, se describen posibles trabajos futuros que podrían desarrollarse a partir de este proyecto:

- Aumentar el alcance del estudio. Es posible que un solo día de un año concreto esté bien para establecer una metodología de trabajo de análisis de datos, pero puede que no sea representativo de un intervalo de tiempo más amplio como un año, dado que pueden surgir eventos inesperados en un día que afecten a las estadísticas. Así, y aunque los resultados han sido bastante satisfactorios, aumentaría la precisión del estudio.
- Relacionado con el punto anterior, realizar un análisis más detallado y más amplio, a partir del llevado a cabo en este trabajo, del comportamiento de los vuelos low-cost frente a los regulares tradicionales. Así, se podría seguir profundizando en la relación entre las diferencias de comportamiento de estos vuelos y las diferencias en las desviaciones. También podrían hacerse estudios para cada aeropuerto, aerolínea, época del año, etc.
- Mejorar la clasificación de los vuelos. En el día de estudio considerado, ya se han encontrado vuelos cuyas estadísticas difieren mucho de la tendencia general. Son pocos, en comparación con los más de 35000 vuelos estudiados, pero sería positivo entender qué está detrás de grandes retrasos y cómo estos afectan al funcionamiento de la red. Además, y como ya se ha comentado, la clasificación de los vuelos ha resultado ser bastante correcta, pero se podría mejorar. Por ejemplo, hay aerolíneas que realizan algunos vuelos que se salen de su actividad habitual. Así, algunas aerolíneas generalmente regulares tradicionales realizan algunos pocos vuelos de carga o chárter; sería interesante tenerlos en cuenta.
- Estudiar los diferentes perfiles de las aerolíneas. Relacionado con el punto anterior, y a partir de los KPIs correspondientes, calcular parámetros como DDI-F, PDI, DDI-G, ..., y así poder estudiar los diferentes perfiles de las aerolíneas, ya que cada tipo de operador trabaja de manera diferente y esto se ve reflejado en sus estadísticas. Es interesante conocer la capacidad de cada una para absorber los retrasos en las diferentes etapas que lleva a cabo una aeronave, ya sea en tierra o en el aire.
- Utilizar y fusionar datos de trayectorias obtenidas de ADS-B que permitirían otros análisis más detallados. El ADS-B tiene una cobertura geográfica más amplia y también una tasa mayor (hasta un informe de posición cada 5 segundos para el FR24, por ejemplo). Esto será muy interesante especialmente alrededor de los aeropuertos y dentro del espacio aéreo terminal, donde es necesario tener unos datos de referencia más fiables. Un aumento de información beneficia a los Indicadores de Rendimiento (PI) actuales, para los cuales la identificación de circuitos de espera, los procedimientos de fusión de puntos, los segmentos de nivel de vuelo, etc., pueden ayudar a caracterizar mejor el rendimiento operacional.

Así, se puede seguir con algunas investigaciones que están reconstruyendo las trayectorias voladas reales usando los datos de ADS-B, ampliando el ADS-B con los datos del CPR y de los aeropuertos. Esto permitiría llenar el espacio de las “últimas millas” y unir correctamente la parte en ruta de la trayectoria con los segmentos de salida y aproximación. Además, las posiciones en tierra ADS-B y los datos del movimiento de las aeronaves dados por los aeropuertos pueden proporcionar información esencial en futuros modelos de movimiento de aeronaves en superficie, ayudando a caracterizar mejor los retrasos del taxi-in/out.

- Estudiar los retrasos en cadena (o *reactionary*). En el año considerado en este estudio, aproximadamente la mitad de la media de retraso por vuelo que hubo, se debían a los retrasos en cadena; es decir, que por cada minuto de retraso primario producido se generaban 50 segundos de retraso en cadena. Por lo tanto, se hace evidente la importancia de este tipo de retrasos en la red. En este trabajo, se ha introducido el estudio de esos retrasos y cómo afectan de forma diferente a unos tipos de vuelos, debido a las diferentes estrategias que tienen para reducir los retrasos, pero sería muy interesante ampliar este tema. Además, y a raíz de estos retrasos, se abre la ventana a posibles estudios de modelización de retrasos en cadena

y propagación de retrasos, cuyos resultados se podrían comparar con un estudio similar al que se ha hecho en este trabajo a partir de los datos del DDR. Es importante destacar que estudiar este tipo de retrasos exigiría conocer las matrículas de las aeronaves, que es una información que no está disponible en DDR, por lo que habría que acudir a otras fuentes de información para obtenerlas.

- Continuar con el ajuste de distribuciones de probabilidad de las desviaciones. En un solo día de estudio se ha comprobado que hay distribuciones que modelan mejor las desviaciones de la duración de los vuelos y de los retrasos que otras. Se podrían estudiar más en profundidad estas distribuciones e incluso se podría crear una distribución de probabilidad personalizada para cada una de las distribuciones de desviación de cada grupo de vuelos. Además, sería conveniente ahondar en el cálculo de la bondad del ajuste ya que, como se ha indicado en este trabajo, hay más métodos, además del desarrollado, para ello.

9 REFERENCIAS

- [1] EUROCONTROL, SID Initial Implementation of Reference Trajectories for Performance Review, vol. 2, 2017.
- [2] EUROCONTROL, «Demand Data Repository (DDR)». Available: <https://www.eurocontrol.int/ddr>.
- [3] EUROCONTROL, «CODA Digest 2016» n° CDA_2017_005.
- [4] EUROCONTROL, «CODA DIGEST Q3 2016» n° CDA_2016_003.
- [5] P. F. V. E. J. R. B. Campanelli, «Modeling Reactionary Delays in the European Air Transport Network» *SID*.
- [6] EUROCONTROL, «NEST Help» 2017.
- [7] «Así consiguen las aerolíneas de bajo coste ser tan baratas» 2018. Available: <https://www.elblogsalmon.com/sectores/asi-consiguen-aerolineas-coste-ser-baratas>.
- [8] «Los Slots». Available: <https://megustavolar.iberia.com/2013/10/los-slots/>.
- [9] F. D. & Statistics, «OAG: Flight Database & Statistics». Available: <https://www.oag.com>.
- [10] M. Jetzki, The propagation of air transport delays in Europe, RWTH AACHEN UNIVERSITY: EUROCONTROL, 2009.

ANEXO

En este anexo se describe con detalle el estudio de los casos de máximas diferencias en las duraciones de vuelo y máximos retrasos y adelantos para intentar explicar a qué se deben ciertos valores que, a priori, podrían ser anómalos. De este modo, se pretende facilitar la lectura del documento principal al lector y servir este anexo de consulta y de guía para conocer cómo se puede utilizar NEST para extraer información de los archivos .so6 que se publican.

A.1 Máximos aumentos en la duración de los vuelos

Usando los datos obtenidos en el Capítulo 4, se van a analizar las máximas diferencias positivas en la duración de los vuelos (cuando se comparan los datos de vuelos real e inicial), es decir, cuando existe un aumento de duración del vuelo. A continuación, se muestran los primeros valores extremos de las diferencias en la duración de los vuelos que ocurrieron en el día de estudio considerado.

	Valor máximo					
Dif_Duración de vuelo	216.68	186.68	183.55	159.27	155.00	145.72
						Valor mínimo
Dif_Duración de vuelo	-386.40	-401.28	-523.88	-603.00	-648.72	-822.85

Tabla 29. Valores extremos de diferencias en la duración de los vuelos

A.1.1 216.68 minutos

- Se calcula una diferencia de tiempo de vuelo de 216.68 minutos o 3.61 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicha diferencia, que efectivamente se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: EGNV- Aeropuerto Durham Tees Valley (Reino Unido).
 - Destino: EGNX- Aeropuerto East Midlands (Reino Unido).
 - Tipo de aeronave: Saab 2000.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 54.509 (latitud), -1.429 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto EGNV.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 15:40:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 15:56:00.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 52.831 (latitud), -1.328 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto EGNX.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 16:07:58.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 20:00:39.

El avión va por zonas que no estaban previstas y tarda mucho más. El Saab 2000 es un avión de pasajeros bimotor turbohélice. Es uno de los aviones turbohélice más rápidos de la historia de la aviación, pudiendo alcanzar 665 km/h. Tiene operadores tanto comerciales como militares; de hecho, algunos van equipados con el radar Erieye y sistemas asociados, que les confieren capacidades de Alerta temprana y control aerotransportado (AEW&C), pudiendo ser operado como un avión de vigilancia y reconocimiento. Por lo tanto, podría tratarse

de un vuelo militar.

A.1.2 183.683 minutos

- Se calcula una diferencia de tiempo de vuelo de 183.68 minutos o 3.061 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicha diferencia, que efectivamente se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: OJAM - Aeropuerto Civil de Amán (Jordania).
 - Destino: LIBR - Aeropuerto de Brindisi (Italia).
 - Tipo de aeronave: Lockheed C-130 Hercules.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 31.973 (latitud), 35.992 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto OJAM.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 06:40:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 06:40:40.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - (Inicial) 40.661 (latitud), 17.948 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LIBR.
 - (Real) 51.450 (latitud), 5.374 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas corresponden al aeropuerto EHEH - Aeropuerto de Eindhoven (Holanda).
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 10:40:33.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 13:44:54.

El avión Lockheed C-130 Hercules es un avión de transporte táctico medio-pesado propulsado por cuatro motores turbohélice y es el principal avión de transporte de muchas fuerzas armadas del mundo. Ha prestado servicio en más de 50 países, en sus cerca de 40 versiones y modelos distintos, en incontables operaciones militares, civiles y de ayuda humanitaria. Por ello, este vuelo debería de ser militar. Por alguna razón, el vuelo se desvió y en lugar de aterrizar en LIBR, lo hizo en OJAM - Aeropuerto de Eindhoven (Holanda).

A.1.3 183.55 minutos

- Se calcula una diferencia de tiempo de vuelo de 183.55 minutos o 3.059 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicha diferencia, que efectivamente se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: EDDW- Aeropuerto de Bremen (Alemania).
 - Destino: ETNH- Base Aérea de Hohn (Alemania).
 - Tipo de aeronave: Cessna CitationJet/M2 (modelo 525).
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 53.048 (latitud), 8.787 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto EDDW.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 12:20:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 12:43:00.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 54.312 (latitud), 9.581 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto ETNH.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 12:45:47.

- Vuelo real: 16-09-09 a las 16:12:20.

El Cessna CitationJet / CJ (Modelo 525) es un avión de negocios ligero, dotado de dos motores a reacción y con capacidad para 4 pasajeros, por lo que se trataría de un vuelo privado (de negocios).

A.1.4 159.27 minutos

- Se calcula una diferencia de tiempo de vuelo de 159.27 minutos o 2.654 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicha diferencia, que efectivamente se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: EGAA- Aeropuerto Internacional de Belfast (Reino Unido).
 - Destino: EHAM- Aeropuerto de Ámsterdam Schiphol (Holanda).
 - Tipo de aeronave: Airbus A319.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 64.658 (latitud), -6.216 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto EGAA.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 09:40:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 09:40:00.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 52.308 (latitud), 4.7647 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto EHAM.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 10:46:38.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 13:25:54.

El Airbus A319 es un avión civil de pasajeros. Al buscar el call sign de este vuelo (EZY51BU), se observa que corresponde a EasyJet. No se encuentra más información que ayude a establecer el motivo de este retraso.

A.1.5 155.00 minutos

- Se calcula una diferencia de tiempo de vuelo de 155.00 minutos o 2.583 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicha diferencia, que efectivamente se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: LKTB- Aeropuerto de Brno-Tuřany (República Checa).
 - Destino: LKTB- Aeropuerto de Brno-Tuřany (República Checa).
 - Tipo de aeronave: Cessna 172.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 49.151 (latitud), 16.694 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LKTB.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 08:50:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 08:56:00.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 49.151 (latitud), 16.694 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LKTB.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 10:50:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 13:31:00.

El Cessna 172 Skyhawk es un avión monomotor de ala alta con capacidad para cuatro personas y es un excelente aparato para operaciones de búsqueda y rescate y, además, figura en numerosos países como parte de las flotas

de las Fuerzas Armadas para tareas, por ejemplo, de vigilancia aérea. Por lo tanto, se podría pensar que puede haber sido un vuelo militar.

A.1.6 145.72 minutos

- Se calcula una diferencia de tiempo de vuelo de 145.72 minutos o 2.429 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicha diferencia, que efectivamente se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: ZZZZ. Aeropuerto Internacional John F. Kennedy (Estados Unidos) (por las coordenadas).
 - Destino: ZZZZ. Aeropuerto Internacional John F. Kennedy (Estados Unidos) (por las coordenadas).
 - Tipo de aeronave: Cessna P210.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 40.640 (latitud), -73.779 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto KJFK.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 10:15:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 09:47:58.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 40.640 (latitud), -73.779 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto KJFK.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 00:48:28.
 - Vuelo real: 16-09-10 a las 02:47:09.

Como se puede observar en la Figura 59 y la Figura 60, se puede observar que el último segmento va, en el inicial, de las 11:03:28 a las 00:48:28 (del día 10), que es un intervalo de tiempo bastante grande. Igual ocurre en el real, que va de las 12:35:07 a las 02:47:09.

```

OLBA_UGBUD LLLL LLLL C10T 104549 104831 180 180 2 N23KY 160909 160909 3107.233333 -219.166667 3109.166667 -231.683333 200383739 12 7.977646 0
UGBUD_INRUB ZZZZ ZZZZ C10T 104549 104831 180 180 2 N23KY 160909 160909 3107.233333 -219.166667 3109.166667 -231.683333 200383739 12 7.977646 0
INRUB_AMMAN ZZZZ ZZZZ C10T 104831 105008 180 180 2 N23KY 160909 160909 3109.166667 -231.683333 3110.433333 -239.900000 200383739 13 5.233473 0
AMMAN_STU ZZZZ ZZZZ C10T 105008 110328 180 180 2 N23KY 160909 160909 3110.433333 -239.900000 3119.683333 -302.416667 200383739 14 39.653450 0
STU_ZZZZ ZZZZ ZZZZ C10T 110328 004828 180 0 1 N23KY 160909 160910 3119.683333 -302.416667 2438.416667 -4426.700000 200383739 15 2817.018575 0
OLBA_*KAD OLBA LCLK A320 115500 115512 0 5 0 MEA273 160909 160909 2029.150000 2129.400000 2028.450000 2129.166667 200387237 1 0.726350 0
*KAD_!IvpY OLBA LCLK A320 115512 115602 5 25 0 MEA273 160909 160909 2028.450000 2129.166667 2029.700000 2127.050000 200387237 2 2.157543 0
!IvpY_!IvpZ OLBA LCLK A320 115602 115624 25 35 0 MEA273 160909 160909 2029.700000 2127.050000 2030.633333 2125.466667 200387237 3 1.612694 0
!IvpZ_!IvpA OLBA LCLK A320 115624 115654 35 50 0 MEA273 160909 160909 2029.633333 2125.466667 2031.566667 2123.000000 200387237 4 1.612694 0

```

Figura 59. Datos vuelo con la sexta máxima diferencia de duración de vuelo, trayectoria inicial

```

!HWCT_!HWCT LLLL LLLL C10T 114900 115235 120 120 2 N23KY 160909 160909 3142.966667 -549.950000 3150.200000 -458.800000 200383739 87 56.028242 0
!HWCT_ABAGU ZZZZ ZZZZ C10T 115235 120745 120 120 2 N23KY 160909 160909 3142.966667 -549.950000 3150.200000 -458.800000 200383739 87 56.028242 0
ABAGU_SLANY ZZZZ ZZZZ C10T 120745 122635 120 120 2 N23KY 160909 160909 3150.200000 -458.800000 3129.516667 -350.533333 200383739 88 69.317109 0
SLANY_STU ZZZZ ZZZZ C10T 122635 123507 120 120 2 N23KY 160909 160909 3129.516667 -350.533333 3119.683333 -302.416667 200383739 89 31.164619 0
STU_ZZZZ ZZZZ ZZZZ C10T 123507 024709 120 0 1 N23KY 160909 160910 3119.683333 -302.416667 2438.416667 -4426.700000 200383739 90 2817.018575 0
OLBA_*KAD OLBA LCLK A320 115943 115955 0 15 0 MEA273 160909 160909 2029.150000 2129.400000 2028.450000 2129.166667 200387237 1 0.726350 0
*KAD_!HWCS OLBA LCLK A320 115955 120031 15 20 0 MEA273 160909 160909 2028.450000 2129.166667 2029.383333 2127.583333 200387237 2 1.612956 0
!HWCS_!HWCT OLBA LCLK A320 120031 120047 20 20 2 MEA273 160909 160909 2029.383333 2127.583333 2030.016667 2126.533333 200387237 3 1.077925 0
!HWCT_!HWCA OLBA LCLK A320 120047 120104 20 35 0 MEA273 160909 160909 2029.016667 2126.533333 2030.016667 2126.000000 200387237 4 0.544546 0

```

Figura 60. Datos vuelo con la sexta máxima diferencia de duración de vuelo, trayectoria real

El Cessna 210 Centurion es un avión monomotor de propósito general de altas prestaciones y capacidad de 6 plazas. Por lo tanto, este vuelo podría ser chárter o de prueba, por ejemplo. Además, según FlightRadar24, pertenece a un propietario privado.

A.1.7 143.95 minutos

- Se calcula una diferencia de tiempo de vuelo de 143.95 minutos o 2.399 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.

- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicha diferencia, que efectivamente se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: UKBB. Aeropuerto Internacional de Boryspil (Ucrania).
 - Destino: UKBB. Aeropuerto Internacional de Boryspil (Ucrania).
 - Tipo de aeronave: Boeing 737-300.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 50.345 (latitud), 30.893 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto UKBB.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 06:15:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 06:19:00.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 50.345 (latitud), 30.893 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto UKBB.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 09:00:00.
 - Vuelo real: 16-09-10 a las 11:27:57.

Los 737-300 de pasajeros pueden ser también convertidos en versión carguera. En el caso militar, algunas Fuerzas Aéreas usan este avión como transporte multipropósito, mezclándose el uso carguero, con el de pasajeros, de estos mismos aviones. Por lo tanto, podría tratarse de un vuelo militar.

A.2 Máximos recortes en la duración de los vuelos

Se van a analizar las máximas diferencias negativas en la duración de los vuelos (cuando se comparan los datos de vuelos real e inicial), es decir, cuando existe un recorte de duración del vuelo. A continuación, se recuerdan los valores extremos recogidos en la Tabla 29.

	Valor máximo					
Dif_Duración de vuelo	216.68	186.68	183.55	159.27	155.00	145.72
						Valor mínimo
Dif_Duración de vuelo	-386.40	-401.28	-523.88	-603.00	-648.72	-822.85

A.2.1 -822.85 minutos

- Se calcula una diferencia de tiempo de vuelo de 822.85 minutos o 13,714 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el aterrizaje, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: LICZ- Base Aérea de Sigonella (Italia).
 - Destino: LICZ- Base Aérea de Sigonella (Italia).
 - Tipo de aeronave: ZZZZ.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 37.406 (latitud), 14.924 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LICZ.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 01:55:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 07:59:09.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 37.406 (latitud), 14.924 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LICZ.

- Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 21:55:00.
 - Vuelo real: 16-09-10 a las 20:00:39.

Aunque con aeronave desconocida, se trataría presumiblemente de un vuelo militar.

A.2.2 -648.72 minutos

- Se calcula una diferencia de tiempo de vuelo de 648.72 minutos o 10.812 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el aterrizaje, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: OJMS- Base Aérea Muwaffaq Salti (Jordania).
 - Destino: OJMS- Base Aérea Muwaffaq Salti (Jordania).
 - Tipo de aeronave: ZZZZ.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 31.826 (latitud), 36.782 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto OJMS.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-08 a las 04:10:00.
 - Vuelo real: 16-09-08 a las 07:10:22.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 31.826 (latitud), 36.782 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto OJMS.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 01:10:00.
 - Vuelo real: 16-09-08 a las 17:21:39.

Sucede igual que en el caso anterior.

A.2.3 -603.00 minutos

fila_inicial = 2635

fila_real = 3384

- Se calcula una diferencia de tiempo de vuelo de 603.00 minutos o 10.050 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el aterrizaje, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: OJMS- Base Aérea Muwaffaq Salti (Jordania).
 - Destino: OJMS- Base Aérea Muwaffaq Salti (Jordania).
 - Tipo de aeronave: ZZZZ.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 31.826 (latitud), 36.782 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto OJMS.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-08 a las 04:10:00.
 - Vuelo real: 16-09-08 a las 03:42:25.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 31.826 (latitud), 36.782 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto OJMS.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 01:10:00.

- Vuelo real: 16-09-08 a las 14:39:25.

Sucede igual que en el caso anterior.

A.2.4 -523.88 minutos

fila_inicial = 86963

fila_real = 127315

- Se calcula una diferencia de tiempo de vuelo de 523.88 minutos o 8.731 horas.
- Se observa un solo segmento en la trayectoria real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho retraso en el despegue, que efectivamente dicho retraso se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: LTAN - Aeropuerto de Konya (Turquía).
 - Destino: ETNG - Base Aérea Militar Geilenkirchen de la OTAN (Alemania).
 - Tipo de aeronave: E3TF²⁴.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 37.981 (latitud), 32.563 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LTAN.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 08:36:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 13:20:00.
 - Última posición comunicada: (no existe para la real)
 - 50.961 (latitud), 6.042 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden a ETNG.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 17:19:57.
 - Vuelo real: no hay datos.

En la Figura 61 se puede observar que en el plan de vuelo es un vuelo normal, planificado con 55 segmentos y una duración de 8 horas y 44 minutos (igual en el regulado, en la Figura 62). Sin embargo, como se puede apreciar en la Figura 63, este vuelo solo tiene un segmento ya que, en la línea siguiente, aparece otro vuelo diferente. Una posibilidad es que haya podido ser un error y que falten los datos reales de este vuelo. Se revisa si aparece en otra parte del documento y se encuentra el mismo vuelo con el mismo avión el mismo día a las 15:10:43 (vuelo real). Se comprueba en el inicial y sale también este mismo vuelo planificado a las 13:20:56. Sin embargo, estos 2 vuelos tienen número de identificación diferente. No es posible determinar qué pasó con este vuelo.

```

!IZMU_!IVIS E55B LZIB GLF4 084443 084518 20 20 1 SVF639 160909 160909 2893.210000 1040.055555 2893.085555 1034.783333 200377356 67 2.143973 0
!IVIS_!IVIT E55B LZIB GLF4 084518 084641 20 10 1 SVF639 160909 160909 2893.683333 1037.783333 2891.350000 1034.450000 200377356 67 3.221656 0
!IVIT_!IVIU E55B LZIB GLF4 084641 084722 10 5 1 SVF639 160909 160909 2891.350000 1034.450000 2890.583333 1033.333333 200377356 68 1.068702 0
!IVIU_LZIB E55B LZIB GLF4 084722 084730 5 0 1 SVF639 160909 160909 2890.583333 1033.333333 2890.200000 1032.766667 200377356 69 0.538286 0
LTAN !IZME LTAN ETNG E3TF 083600 083637 0 50 0 NATO07 160909 160909 2278.833333 1953.750000 2281.000000 1954.516667 200380785 1 2.249321 0
!IZME_*3KNY LTAN ETNG E3TF 083637 083659 50 60 0 NATO07 160909 160909 2281.000000 1954.516667 2282.633333 1955.100000 200380785 2 1.696733 0
*3KNY_!IZMF LTAN ETNG E3TF 083659 083804 60 90 0 NATO07 160909 160909 2282.633333 1955.100000 2282.133333 1961.016667 200380785 3 4.686618 0
!IZMF_*4KNY LTAN ETNG E3TF 083804 083906 90 117 0 NATO07 160909 160909 2282.133333 1961.016667 2281.450000 1968.900000 200380785 4 6.247106 0
*4KNY_ORRRIK LTAN ETNG E3TF 083906 084116 117 168 0 NATO07 160909 160909 2281.450000 1968.900000 2281.433333 1987.133333 200380785 5 14.363357 0
    
```

Figura 61. Datos vuelo con el sexto máximo retraso en el despegue, trayectoria inicial

```

!IZMU_!IVIS E55B LZIB GLF4 084443 084518 20 20 1 SVF639 160909 160909 2893.210000 1040.055555 2893.085555 1034.783333 200377356 67 2.143973 0
!IVIS_!IVIT E55B LZIB GLF4 084518 084641 20 10 1 SVF639 160909 160909 2893.683333 1037.783333 2891.350000 1034.450000 200377356 67 3.221656 0
!IVIT_!IVIU E55B LZIB GLF4 084641 084722 10 5 1 SVF639 160909 160909 2891.350000 1034.450000 2890.583333 1033.333333 200377356 68 1.068702 0
!IVIU_LZIB E55B LZIB GLF4 084722 084730 5 0 1 SVF639 160909 160909 2890.583333 1033.333333 2890.200000 1032.766667 200377356 69 0.538286 0
LTAN !IZME LTAN ETNG E3TF 083600 083637 0 50 0 NATO07 160909 160909 2278.833333 1953.750000 2281.000000 1954.516667 200380785 1 2.249321 0
!IZME_*3KNY LTAN ETNG E3TF 083637 083659 50 60 0 NATO07 160909 160909 2281.000000 1954.516667 2282.633333 1955.100000 200380785 2 1.696733 0
*3KNY_!IZMF LTAN ETNG E3TF 083659 083804 60 90 0 NATO07 160909 160909 2282.633333 1955.100000 2282.133333 1961.016667 200380785 3 4.686618 0
!IZMF_*4KNY LTAN ETNG E3TF 083804 083906 90 117 0 NATO07 160909 160909 2282.133333 1961.016667 2281.450000 1968.900000 200380785 4 6.247106 0
*4KNY_ORRRIK LTAN ETNG E3TF 083906 084116 117 168 0 NATO07 160909 160909 2281.450000 1968.900000 2281.433333 1987.133333 200380785 5 14.363357 0
    
```

Figura 62. Datos vuelo con el sexto máximo retraso en el despegue, trayectoria regulada

²⁴ Gran cantidad de información sobre las aeronaves se puede encontrar en la página web *Air Performance Database*: <https://contentzone.EUROCONTROL.int/aircraftperformance>.

```

!AEEJ !AEEJ ESSB LZIB GLF4 092054 092223 25 15 1 SVF639 160909 160909 2884.583333 1041.566667 2887.583333 1036.866667 200377356 80 4.341844 0
!AeEj !AeEk ESSB LZIB GLF4 092223 092400 15 5 1 SVF639 160909 160909 2887.583333 1036.866667 2889.833333 1033.350000 200377356 81 3.250919 0
!AeEk !AeEl ESSB LZIB GLF4 092400 092410 5 0 1 SVF639 160909 160909 2889.833333 1033.350000 2890.200000 1032.766667 200377356 82 0.534615 0
!AeEl !AeEm LTAN LTAN ETNG E3TF 132056 132100 0 0 2 NATO07 160909 160909 2278.833333 1953.750000 2278.833333 1953.750000 200380785 1 0.000000 0
LTAN LTAN LTAN ETNG E3TF 132056 132100 0 0 2 NATO07 160909 160909 2278.833333 1953.750000 2278.833333 1953.750000 200380785 1 0.000000 0
LGIR IRA LGIR LBBG J328 075500 075507 0 10 0 ADN24B 160909 160909 2120.383333 1510.816667 2120.450000 1511.116667 200379581 1 0.253638 0
IRA !AcVX LGIR LBBG J328 075507 075514 10 10 2 ADN24B 160909 160909 2120.450000 1511.116667 2121.950000 1510.300000 200379581 2 1.641235 0
!AcVX !AAup LGIR LBBG J328 075514 075517 10 15 0 ADN24B 160909 160909 2121.950000 1510.300000 2122.450000 1510.016667 200379581 3 0.550798 0
!AAup !ADu LGIR LBBG J328 075517 075517 15 20 0 ADN24B 160909 160909 2122.450000 1510.016667 2123.050000 1500.750000 200379581 4 0.545770 0

```

Figura 63. Datos vuelo con el sexto máximo retraso en el despegue, trayectoria real

El Boeing E-3 Sentry (Centinela) es un sistema de alerta y control aerotransportado (AWACS) derivado del avión comercial Boeing 707 y con un enorme radar rotativo que porta en la parte superior y puede realizar tareas de vigilancia todo tiempo, mando, control y comunicaciones. Es usado por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (USAF), la OTAN, la Real Fuerza Aérea británica (RAF), el Armée de l'air y la Real Fuerza Aérea Saudí. Se podría concluir que es un vuelo militar.

A.2.5 -401.28 minutos

- Se calcula una diferencia de tiempo de vuelo de 401.28 minutos o 6.688 horas.
- Se observa un solo segmento en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el aterrizaje, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: KCLT - Aeropuerto Internacional de Charlotte-Douglas (Estados Unidos).
 - Destino: EIDW - Aeropuerto Internacional de Dublín (Irlanda).
 - Tipo de aeronave: Boeing 757-200.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 35.217 (latitud), -80.950 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto KCLT.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 00:20:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 00:21:00.
 - Última posición comunicada: (no existe para la real)
 - 53.421 (latitud), -6.270 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto EIDW.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 07:29:17.
 - Vuelo real: no hay datos.

En la trayectoria real se puede observar que solo hay un segmento. Podría ser que el vuelo se haya cancelado. En el regulado está el vuelo completo.

A.2.6 -386.40 minutos

- Se calcula una diferencia de tiempo de vuelo de 368.40 minutos o 6.140 horas.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el aterrizaje, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: LTBA - Aeropuerto Internacional Atatürk (Turquía).
 - Destino: KJFK - Aeropuerto Internacional John F. Kennedy (Estados Unidos).
 - Tipo de aeronave: Boeing 777-300ER.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 40.97611112 (latitud), 28.81416667 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LTBA.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 11:00:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 11:18:00.
 - Última posición comunicada: (en el real es diferente)

- (inicial) 50.961 (latitud), 6.042 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto JFK.
- (real) 60.203 (latitud), 11.084 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas corresponden a ENGM – Aeropuerto de Oslo (Suecia).
- Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 20:43:24.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 14:35:00.

Parece que el vuelo se ha desviado y ha aterrizado mucho antes de lo previsto y en otro aeropuerto. Podría haberse debido a incidencias en vuelo, del aeropuerto de destino, etc.

A.3 Máximos retrasos en el despegue (real-inicial)

Ahora, se van a analizar los máximos retrasos en el despegue (cuando se comparan los datos de vuelos real e inicial). A continuación, se muestran los primeros valores extremos de las diferencias en el despegue (retrasos y adelantos) en el día de estudio considerado.

	Máximos retrasos					
Despegues	1417.00	1406.53	1384.00	1222.23	910.73	284.93
Aterrizajes	1425.07	1406.53	1375.85	1222.23	886.50	299.33
						Máximos adelantos
Despegues	-83.00	-85.57	-88.00	-90.00	-93.55	-145.00
Aterrizajes	-368.40	-399.93	-400.28	-468.35	-630.58	-835.85

Tabla 30. Valores extremos de diferencias en los despegues

A.3.1 1417.00 minutos

- Se calcula un retraso en el despegue de 1417.00 minutos o 23.617 horas.
- Se observa el mismo número de segmentos en el inicial y en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho retraso en el despegue, que efectivamente dicho retraso se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: CYUL - Aeropuerto Internacional Pierre Elliott Trudeau (Canadá).
 - Destino: USPP - Aeropuerto Internacional de Perm-Bolshoye Sávinó (Rusia).
 - Tipo de aeronave: GLEX.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 2728.083 (latitud), -4424.483 (longitud), en minutos decimales.
 - 45.468 (latitud), -73.741 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto CYUL.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 00:21:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 23:58:00.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 57.914 (latitud), 56.021 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto USPP.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 09:13:40.
 - Vuelo real: 16-09-10 a las 08:58:44.

Al ser el primer vuelo, se va a ilustrar cómo aparecen estos datos en el archivo original .so6 de NEST, tanto para vuelo inicial (Figura 64) como real (Figura 65).

```

!JJKU !JJKP LFJY LFJL P28A 103531 103711 35 25 1 FGEDO 160909 160909 2942.700000 374.283333 2941.516667 374.433333 200382368 11 1.187412 0
!JJKP !JJKQ LFJY LFJL P28A 103531 103711 35 25 1 FGEDO 160909 160909 2942.700000 374.283333 2941.516667 374.433333 200382368 11 1.187412 0
!JJKQ !ItiD LFJY LFJL P28A 103855 103855 25 15 1 FGEDO 160909 160909 2941.516667 374.433333 2940.116667 374.616667 200382368 12 1.405154 0
!ItiD LFJL LFJY LFJL P28A 103855 104203 15 0 1 FGEDO 160909 160909 2940.116667 374.616667 2938.700000 374.800000 200382368 13 1.421765 0
CYUL !JJKR CYUL USPP GLEX 002100 002126 0 50 0 N700GX 160909 160909 2728.083333 -4424.483333 2733.333333 -4420.366667 200370246 1 5.990375 0
!JJKR !JJKS CYUL USPP GLEX 002126 002204 50 70 0 N700GX 160909 160909 2733.333333 -4420.366667 2735.733333 -4418.500000 200370246 2 2.732622 0
!JJKS !JJKT CYUL USPP GLEX 002204 002243 70 90 0 N700GX 160909 160909 2735.733333 -4418.500000 2738.600000 -4416.250000 200370246 3 3.270214 0
!JJKT !JJKU CYUL USPP GLEX 002243 002323 90 110 0 N700GX 160909 160909 2738.600000 -4416.250000 2741.950000 -4413.616667 200370246 4 3.822105 0
!JJKU !JJKV CYUL USPP GLEX 002323 002451 110 150 0 N700GX 160909 160909 2741.950000 -4413.616667 2740.583333 -4407.633333 200370246 5 5.700077 0
    
```

Figura 64. Datos vuelo con máximo retraso en el despegue, trayectoria inicial

```

!BIYK !BIYL LFJY LFJL P28A 101420 101520 50 25 1 FGEDO 160909 160909 2944.710000 385.850000 2945.910000 382.850000 200382368 19 1.121008 0
!BIYL !BIYM LFJY LFJL P28A 101526 101648 25 20 1 FGEDO 160909 160909 2943.916667 382.650000 2942.716667 380.833333 200382368 20 1.690364 0
!BIYM !BIYN LFJY LFJL P28A 101648 102201 20 20 2 FGEDO 160909 160909 2942.716667 380.833333 2939.100000 375.400000 200382368 21 5.077286 0
!BIYN LFJL LFJY LFJL P28A 102201 102227 20 0 1 FGEDO 160909 160909 2939.100000 375.400000 2938.700000 374.800000 200382368 22 0.561305 0
CYUL !BIYO CYUL USPP GLEX 235800 235826 0 50 0 N700GX 160909 160909 2728.083333 -4424.483333 2733.333333 -4420.366667 200370246 1 5.990375 0
!BIYO !BIYP CYUL USPP GLEX 235826 235905 50 70 0 N700GX 160909 160909 2733.333333 -4420.366667 2735.733333 -4418.500000 200370246 2 2.732622 0
!BIYP !BIYQ CYUL USPP GLEX 235905 235945 70 90 0 N700GX 160909 160909 2735.733333 -4418.500000 2738.600000 -4416.250000 200370246 3 3.270214 0
!BIYQ !BIYR CYUL USPP GLEX 235945 000027 90 110 0 N700GX 160909 160910 2738.600000 -4416.250000 2741.950000 -4413.616667 200370246 4 3.822105 0
!BIYR !BIYS CYUL USPP GLEX 000027 000157 110 150 0 N700GX 160910 160910 2741.950000 -4413.616667 2740.583333 -4407.633333 200370246 5 5.700077 0
    
```

Figura 65. Datos vuelo con máximo retraso en el despegue, trayectoria real

El GLEX o Bombardier Global Express (también conocido como BD-700) es un avión de negocios de reacción, por lo que se trataría de un vuelo de negocios. Se ha comprobado, además, que los datos de vuelo regulado son iguales a los datos de vuelo inicial, por lo que este vuelo no ha sido modificado por causas meteorológicas, por ejemplo.

A.3.2 1406.53 minutos

- Se calcula un retraso en el despegue de 1406.53 minutos o 23.442 horas.
- Se observa el mismo número de segmentos en el inicial y en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho retraso en el despegue, que efectivamente dicho retraso se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: OISS - Aeropuerto Internacional de Shiraz (Irán).
 - Destino: UGTB - Aeropuerto Internacional de Tiflis (Georgia).
 - Tipo de aeronave: ZZZZ²⁵ (desconocido).
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 23.540 (latitud), 52.589 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto OISS.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 00:33:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 23:59:32.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 41.669 (latitud), 44.955 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto UGTB.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 02:30:28.
 - Vuelo real: 16-09-10 a las 01:57:00.

La aeronave es desconocida, por lo que no es posible conocer el tipo de vuelo que fue.

A.3.3 1384.00 minutos

- Se calcula un retraso en el despegue de 1384 minutos o 23.067 horas.
- Se observa un menor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho retraso en el despegue, que efectivamente dicho retraso se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: LFOE - Base militar Évreux-Fauville (Francia).
 - Destino: FEFF - Aeropuerto Internacional de Bangui M'Poko (República Centroafricana).

²⁵ Según el documento EuroFPL-ICAO_Flightplan_Form_Basics-latest, "If no designator exists for your aircraft, or there is more than one type of aircraft in your sight, enter "ZZZZ" here and specify number and type(s) in 18 OTHER INFORMATION preceded by "TYP/" tags."

- Tipo de aeronave: Boeing C17 Globemaster III.
- Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 49.029 (latitud), 1.22 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LFOE.
- Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 00:23:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 23:27:00.
- Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 4.398 (latitud), 18.52 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto FFFF.
- Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 07:09:44.
 - Vuelo real: 16-09-10 a las 06:05:35.

El Boeing C-17 Globemaster III es un avión de transporte militar pesado de largo alcance, usado como avión de transporte estratégico rápido de tropas y suministros para realizar misiones de transporte táctico, evacuación médica, despliegue de tropas aerotransportadas y lanzamiento de paracaidistas. Por lo tanto, se trataría de un vuelo de carácter militar o de carga.

A.3.4 1222.23 minutos

- Se calcula un retraso en el despegue de 1222.23 minutos o 20.371 horas.
- Se observa el mismo número de segmentos en el inicial y en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho retraso en el despegue, que efectivamente dicho retraso se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: EDBH – Aeropuerto Stralsund Barth (Alemania).
 - Destino: LHFH - Aeropuerto Fertőszentmiklós (Hungria).
 - Tipo de aeronave: Cessna Turbo Skylane RG (C82R).
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 54.338 (latitud), 12.71 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto EDBH.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 09:56:00.
 - Vuelo real: 16-09-10 a las 06:18:14.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 47.584 (latitud), 16.845 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LHFH.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 13:32:46.
 - Vuelo real: 16-09-10 a las 09:55:00.

El Cessna 182 Skylane es un avión ligero monomotor de 4 plazas (la versión RG es de tren de aterrizaje retráctil) y es el segundo modelo más popular de Cessna tras el 172. Se podría concluir que es un vuelo privado (de negocios).

A.3.5 910.73 minutos

- Se calcula un retraso en el despegue de 910.73 minutos o 15.179 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho retraso en el despegue, que efectivamente dicho retraso se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: KMIA - Aeropuerto Internacional de Miami (Estados Unidos).
 - Destino: OTHH - Hamad International Airport (Qatar).

- Tipo de aeronave: Boeing 777-300ER (77W).
- Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 25.8 (latitud), -80.283 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto KMIA.
- Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-08 a las 08:41:00.
 - Vuelo real: 16-09-08 a las 23:51:44.
- Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 25.574 (latitud), 54.603 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto OTHH.
- Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-08 a las 23:33:54.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 14:20:24.

El Boeing 777 es un avión comercial de reacción, bimotor, de largo alcance y fuselaje ancho fabricado por la compañía estadounidense Boeing Commercial Airplanes. Es el avión birreactor más grande del mundo y es conocido frecuentemente como «Triple Siete». Primer caso de gran retraso de un vuelo que parece comercial. Comprobado que los datos son idénticos en el inicial y en el regulado. Parece comercial, aunque podría tratarse de un vuelo chárter.

A.3.6 284.93 minutos

- Se calcula un retraso en el despegue de 284.93 minutos o 4.75 horas.
- Se observa un solo segmento en la trayectoria real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho retraso en el despegue, que efectivamente dicho retraso se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: LTAN - Aeropuerto de Konya (Turquía).
 - Destino: ETNG - Base Aérea Militar Geilenkirchen de la OTAN (Alemania).
 - Tipo de aeronave: E3TF.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 37.981 (latitud), 32.563 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LTAN.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 08:36:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 13:20:00.
 - Última posición comunicada: (no existe para la real)
 - 50.961 (latitud), 6.042 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden a ETNG.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 17:19:57.
 - Vuelo real: no hay datos.

Es el mismo vuelo analizado en el apartado A.2.4.

A.3.7 250.92 minutos

- Se calcula un retraso en el despegue de 250.92 minutos o 4.182 horas.
- Se observa un cambio en la longitud de los segmentos entre ambas trayectorias.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho retraso en el despegue, que efectivamente dicho retraso se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: LBPG - Base Aérea Graf (Bulgaria).
 - Destino: LBPG - Base Aérea Graf (Bulgaria).
 - Tipo de aeronave: McDonnell Douglas F-15 Eagle.

- Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 42.291 (latitud), 24.714 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LBPG.
- Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 07:32:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 11:42:55.
- Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 42.291 (latitud), 24.714 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LBPG.
- Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 07:55:01.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 12:54:21.

El McDonnell Douglas F-15 Eagle es un caza todo tiempo (es decir, que opera bajo cualquier circunstancia meteorológica, de día o de noche) bimotor, por lo que este vuelo sería de tipo militar.

A.4 Máximos retrasos en el aterrizaje (real-inicial)

Se van a analizar los máximos retrasos en el aterrizaje (cuando se comparan los datos de vuelos real e inicial). A continuación, se recuerdan los valores extremos recogidos en la Tabla 30.

	Máximos retrasos					
Despegues	1417.00	1406.53	1384.00	1222.23	910.73	284.93
Aterrizajes	1425.07	1406.53	1375.85	1222.23	886.50	299.33
						Máximos adelantos
Despegues	-83.00	-85.57	-88.00	-90.00	-93.55	-145.00
Aterrizajes	-368.40	-399.93	-400.28	-468.35	-630.58	-835.85

A.4.1 1425.07 minutos

- Se calcula un retraso en el aterrizaje de 1425.07 minutos o 23.751 horas.
- Se observa el mismo número de segmentos en el inicial y en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho retraso en el despegue, que efectivamente dicho retraso se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: CYUL - Aeropuerto Internacional Pierre Elliott Trudeau (Canadá).
 - Destino: USPP - Aeropuerto Internacional de Perm-Bolshoye Sávino (Rusia).
 - Tipo de aeronave: GLEX.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 2728.083 (latitud), -4424.483 (longitud), en minutos decimales.
 - 45.468 (latitud), -73.741 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto CYUL.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 00:21:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 23:58:00.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 57.914 (latitud), 56.021 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto USPP.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 09:13:40.
 - Vuelo real: 16-09-10 a las 08:58:44.

Es el mismo vuelo que daba el mayor retraso en el despegue.

A.4.2 1406.53 minutos

- Se calcula un retraso en el aterrizaje de 1406.53 minutos o 23.442 horas.
- Se observa el mismo número de segmentos en el inicial y en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho retraso en el despegue, que efectivamente dicho retraso se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: OISS - Aeropuerto Internacional de Shiraz (Irán).
 - Destino: UGTB - Aeropuerto Internacional de Tiflis (Georgia).
 - Tipo de aeronave: ZZZZ²⁶ (desconocido).
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 23.540 (latitud), 52.589 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto OISS.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 00:33:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 23:59:32.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 41.669 (latitud), 44.955 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto UGTB.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 02:30:28.
 - Vuelo real: 16-09-10 a las 01:57:00.

Es el mismo vuelo que daba el segundo mayor retraso en el despegue.

A.4.3 1375.85 minutos

- Se calcula un retraso en el aterrizaje de 1375.85 minutos o 22.931 horas.
- Se observa un menor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho retraso en el despegue, que efectivamente dicho retraso se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: LFOE - Base militar Évreux-Fauville (Francia).
 - Destino: FEFB - Aeropuerto Internacional de Bangui M'Poko (República Centroafricana).
 - Tipo de aeronave: Boeing C17 Globemaster III.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 49.029 (latitud), 1.22 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LFOE.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 00:23:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 23:27:00.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 4.398 (latitud), 18.52 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto FEFB.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 07:09:44.
 - Vuelo real: 16-09-10 a las 06:05:35.

Es el mismo vuelo que daba el tercer mayor retraso en el despegue.

²⁶ Según el documento EuroFPL-ICAO_Flightplan_Form_Basics-latest, "If no designator exists for your aircraft, or there is more than one type of aircraft in your sight, enter "ZZZZ" here and specify number and type(s) in 18 OTHER INFORMATION preceded by "TYP/" tags."

A.4.4 1222.23 minutos

- Se calcula un retraso en el aterrizaje de 1222.23 minutos o 20.371 horas.
- Se observa el mismo número de segmentos en el inicial y en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho retraso en el despegue, que efectivamente dicho retraso se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: EDBH – Aeropuerto Stralsund Barth (Alemania).
 - Destino: LHFH - Aeropuerto Fertőszentmiklós (Hungria).
 - Tipo de aeronave: Cessna Turbo Skylane RG (C82R).
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 54.338 (latitud), 12.71 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto EDBH.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 09:56:00.
 - Vuelo real: 16-09-10 a las 06:18:14.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 47.584 (latitud), 16.845 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LHFH.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 13:32:46.
 - Vuelo real: 16-09-10 a las 09:55:00.

Es el mismo vuelo que daba el cuarto mayor retraso en el despegue.

A.4.5 886.5 minutos

- Se calcula un retraso en el aterrizaje de 886.5 minutos o 14.775 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho retraso en el despegue, que efectivamente dicho retraso se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: KMIA - Aeropuerto Internacional de Miami (Estados Unidos).
 - Destino: OTHH - Hamad International Airport (Qatar).
 - Tipo de aeronave: Boeing 777-300ER (77W).
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 25.8 (latitud), -80.283 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto KMIA.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-08 a las 08:41:00.
 - Vuelo real: 16-09-08 a las 23:51:44.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 25.574 (latitud), 54.603 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto OTHH.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-08 a las 23:33:54.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 14:20:24.

Es el mismo vuelo que daba el quinto mayor retraso en el despegue.

A.4.6 299.33 minutos

- Se calcula un retraso en el aterrizaje de 250.92 minutos o 4.182 horas.
- Se observa un cambio en la longitud de los segmentos entre ambas trayectorias.

- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho retraso en el despegue, que efectivamente dicho retraso se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: LBPG - Base Aérea Graf (Bulgaria).
 - Destino: LBPG - Base Aérea Graf (Bulgaria).
 - Tipo de aeronave: McDonnell Douglas F-15 Eagle.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 42.291 (latitud), 24.714 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LBPG.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 07:32:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 11:42:55.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 42.291 (latitud), 24.714 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LBPG.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 07:55:01.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 12:54:21.

Es el mismo vuelo que daba el séptimo mayor retraso en el despegue.

A.5 Máximos adelantos en el despegue (real-inicial)

Ahora, se van a analizar los máximos adelantos en el despegue (cuando se comparan los datos de vuelos real e inicial). A continuación, se recuerdan los valores extremos recogidos en la Tabla 30.

	Máximos retrasos					
Despegues	1417.00	1406.53	1384.00	1222.23	910.73	284.93
Aterrizajes	1425.07	1406.53	1375.85	1222.23	886.50	299.33
						Máximos adelantos
Despegues	-83.00	-85.57	-88.00	-90.00	-93.55	-145.00
Aterrizajes	-368.40	-399.93	-400.28	-468.35	-630.58	-835.85

A.5.1 -145.00 minutos

- Se calcula un adelanto en el despegue de 145.00 minutos o 2.417 horas.
- Se observa el mismo número de segmentos en el inicial y en el real, aunque cambia su longitud.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el despegue, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: ZZZZ²⁷ - Aeropuerto Internacional John F. Kennedy (Estados Unidos) (por las coordenadas de la última posición comunicada).
 - Destino: EKEB - Aeropuerto de Esbjerg (Dinamarca).
 - Tipo de aeronave: AgustaWestland AW189.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 40.640 (latitud), -73.778 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto JFK.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 13:35:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 11:10:00.

²⁷ En la región L (al sur de Europa), todos los prefijos disponibles de 2 letras se han agotado y por lo tanto no se pueden añadir otros países. El código ZZZZ es un código especial que se utiliza cuando no existe código de la OACI para el aeropuerto y se utiliza normalmente en los planes de vuelo.

- Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 55.526 (latitud), 8.553 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto EKEB.
- Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 14:44:46.
 - Vuelo real: 16-09-10 a las 12:18:07.

El AgustaWestland AW189 es un helicóptero de tamaño medio de 18 plazas, bimotor y polivalente, de uso civil. Podría tratarse de un vuelo chárter o privado (de negocios).

A.5.2 -93.55 minutos

- Se calcula un adelanto en el despegue de -93.55 minutos o 1.559 horas.
- Se observa el mismo número de segmentos en el inicial y en el real, aunque cambia su longitud.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el despegue, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: LSZH- Aeropuerto Internacional de Zúrich (Suiza).
 - Destino: OJAI - Aeropuerto Internacional de Queen Alia (Jordania).
 - Tipo de aeronave: Airbus A319.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 47.458 (latitud), 8.548 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LSZH.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 11:45:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 10:11:27.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 31.722 (latitud), 35.993 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto OJAI.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 15:26:29.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 15:50:48.

El Airbus A319 es un avión civil de pasajeros. Sin embargo, al mirar el call-sign, se observa que la aerolínea Royal Jordanian tiene un a319 de carga, por lo que podría tratarse de un vuelo de carga.

A.5.3 -90 minutos

- Se calcula un adelanto en el despegue de 90 minutos o 1.5 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el despegue, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: LTAU- Aeropuerto Internacional de Erkiilet (Turquía).
 - Destino: LTAG - Base aérea de Incirlik (Turquía).
 - Tipo de aeronave: CASA CN-235.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 38.770 (latitud), 35.495 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LTAU.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 18:10:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 16:40:00
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 36.999 (latitud), 35.433 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden a LTAG.

- Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 18:53:05.
 - Vuelo real: 16-09-10 a las 17:25:14.

El CASA CN-235 es un avión turbohélice de transporte táctico y patrulla marítima. En el transporte militar estándar, está destinado a misiones de transporte de corto y medio alcance, tanto de soldados como de cargas. Así que, presumiblemente, se trataría de un vuelo militar.

A.5.4 -88 minutos

- Se calcula un adelanto en el despegue de 88 minutos o 1.467 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el despegue, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: LGIR- Aeropuerto Internacional de Heraclión Nikos Kazantzakis (Grecia).
 - Destino: EGKK - Aeropuerto de Gatwick (Reino Unido).
 - Tipo de aeronave: Airbus A320.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 35.340 (latitud), 25.180 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LGIR.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-08 a las 22:05:00.
 - Vuelo real: 16-09-08 a las 20:37:00.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 51.148 (latitud), -0.190 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto EGKK.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 01:30:57.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 01:23:26.

El Airbus A320 es un avión comercial de reacción, de fuselaje estrecho y de corto a medio alcance. Entre sus diversos modelos, se incluyen los aviones de negocios ACJ. Podría ser uno de este último tipo y tratarse de un vuelo de negocios.

A.5.5 -85.57 minutos

- Se calcula un adelanto en el despegue de 88.57 minutos o 1.476 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el despegue, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: LKPR- Aeropuerto Internacional de Praga Václav Havel (República Checa).
 - Destino: EDDK - Aeropuerto Cologne Bonn (Alemania).
 - Tipo de aeronave: Boeing 757-200.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 35.340 (latitud), 25.180 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LKPR.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 21:12:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 19:46:26.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 50.866 (latitud), 7.143 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto EDDK.
 - Fecha y hora de la última comunicación:

- Vuelo inicial: 16-09-09 a las 22:03:05.
- Vuelo real: 16-09-09 a las 20:40:58.

El Boeing 757 es un avión comercial de corto, medio y largo radio de acción y de fuselaje estrecho. Atendiendo al call sign, se trata de un vuelo de UPS, por lo que se tendría un vuelo de carga.

A.6 Máximos adelantos en el aterrizaje (real-inicial)

Por último, se van a analizar los máximos adelantos en el aterrizaje (cuando se comparan los datos de vuelos real e inicial). A continuación, se recuerdan los valores extremos recogidos en la Tabla 30.

	Máximos retrasos					
Despegues	1417.00	1406.53	1384.00	1222.23	910.73	284.93
Aterrizajes	1425.07	1406.53	1375.85	1222.23	886.50	299.33
						Máximos adelantos
Despegues	-83.00	-85.57	-88.00	-90.00	-93.55	-145.00
Aterrizajes	-368.40	-399.93	-400.28	-468.35	-630.58	-835.85

A.6.1 -835.85 minutos

- Se calcula un adelanto en el aterrizaje de 835.85 minutos o 13.931 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el aterrizaje, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: LICZ- Base Aérea de Sigonella (Italia).
 - Destino: LICZ- Base Aérea de Sigonella (Italia).
 - Tipo de aeronave: ZZZZ.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 37.406 (latitud), 14.924 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LICZ.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 01:55:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 01:42:00.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 37.406 (latitud), 14.924 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LICZ.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 21:55:00.
 - Vuelo real: 16-09-10 a las 07:59:09.

Es el mismo vuelo analizado en el apartado A.2.1.

A.6.2 -630.58 minutos

- Se calcula un adelanto en el aterrizaje de 630.58 minutos o 10.510 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el aterrizaje, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: OJMS- Base Aérea Muwaffaq Salti (Jordania).
 - Destino: OJMS- Base Aérea Muwaffaq Salti (Jordania).
 - Tipo de aeronave: ZZZZ.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)

- 31.826 (latitud), 36.782 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto OJMS.
- Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-08 a las 04:10:00.
 - Vuelo real: 16-09-08 a las 03:42:25.
- Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 31.826 (latitud), 36.782 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto OJMS.
- Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 01:10:00.
 - Vuelo real: 16-09-08 a las 14:39:25.

Es el mismo vuelo analizado en el apartado A.2.3.

A.6.3 -468.35 minutos

- Se calcula un adelanto en el aterrizaje de 468.35 minutos o 7.806 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el aterrizaje, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: OJMS- Base Aérea Muwaffaq Salti (Jordania).
 - Destino: OJMS- Base Aérea Muwaffaq Salti (Jordania).
 - Tipo de aeronave: ZZZZ.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 31.826 (latitud), 36.782 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto OJMS.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 04:10:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 07:10:22.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 31.826 (latitud), 36.782 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto OJMS.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-10 a las 01:10:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 17:21:39.

Es el mismo vuelo analizado en el apartado A.2.2.

A.6.4 -400.28 minutos

- Se calcula un adelanto en el aterrizaje de 400.28 minutos o 6.67 horas.
- Se observa un solo segmento en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el aterrizaje, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: KCLT - Aeropuerto Internacional de Charlotte-Douglas (Estados Unidos).
 - Destino: EIDW - Aeropuerto Internacional de Dublín (Irlanda).
 - Tipo de aeronave: Boeing 757-200.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 35.217 (latitud), -80.950 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto KCLT.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 00:20:00.

- Vuelo real: 16-09-09 a las 00:21:00.
- Última posición comunicada: (no existe para la real)
 - 53.421 (latitud), -6.270 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto EIDW.
- Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 07:29:17.
 - Vuelo real: no hay datos.

Es el mismo vuelo analizado en el apartado A.2.5.

A.6.5 -399.93 minutos

- Se calcula un adelanto en el aterrizaje de 399.93 minutos o 6.67 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el aterrizaje, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: ETNG - Base Aérea Militar Geilenkirchen de la OTAN (Alemania).
 - Destino: ETNG - Base Aérea Militar Geilenkirchen de la OTAN (Alemania).
 - Tipo de aeronave: E3TF o Boeing E-3 Sentry.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 50.961 (latitud), 6.042 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto ETNG.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 08:05:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 07:42:00.
 - Última posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 50.961 (latitud), 6.042 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto ETNG.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 16:35:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 09:55:04.

Es similar a otros vuelos realizados con el avión provisto de radar E3TF o Boeing E-3 Sentry, por lo que se trataría de un vuelo militar.

A.6.6 -368.40 minutos

- Se calcula un adelanto en el aterrizaje de 368.40 minutos o 6.14 horas.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el aterrizaje, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: LTBA - Aeropuerto Internacional Atatürk (Turquía).
 - Destino: KJFK - Aeropuerto Internacional John F. Kennedy (Estados Unidos).
 - Tipo de aeronave: Boeing 777-300ER.
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 40.97611112 (latitud), 28.81416667 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LTBA.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 11:00:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 11:18:00.
 - Última posición comunicada: (en el real es diferente)
 - (inicial) 50.961 (latitud), 6.042 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto KJFK.

- (real) 60.203 (latitud), 11.084 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas corresponden a ENGM – Aeropuerto de Oslo (Suecia).
- Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 20:43:24.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 14:35:00.

Es el mismo vuelo analizado en el apartado A.2.6.

A.6.7 -334.5 minutos

- Se calcula un adelanto en el aterrizaje de 334.50 minutos o 5.58 horas.
- Se observa un mayor número de segmentos en el real.
- Se demuestra, buscando el vuelo correspondiente a dicho adelanto en el aterrizaje, que efectivamente dicho adelanto se produce. Los datos de este vuelo son:
 - Origen: LGSA - Aeropuerto Internacional de La Canea (Grecia).
 - Destino: LGSA - Aeropuerto Internacional de La Canea (Grecia).
 - Tipo de aeronave: de Havilland Canada DHC-7 (Dash 7).
 - Primera posición comunicada: (la misma para inicial y real)
 - 35.531 (latitud), 24.151 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LGSA.
 - Fecha y hora de la primera comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 06:00:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 05:39:00.
 - Última posición comunicada: (en el real es diferente)
 - 35.531 (latitud), 24.151 (longitud), en grados decimales. Estas coordenadas SÍ corresponden al aeropuerto LGSA.
 - Fecha y hora de la última comunicación:
 - Vuelo inicial: 16-09-09 a las 12:30:00.
 - Vuelo real: 16-09-09 a las 06:55:30.

El avión de Havilland Canada DHC-7 (Dash 7) es una aeronave comercial propulsada por cuatro motores turbohélice que tiene operadores tanto comerciales como militares. La aerolínea es DAR. Se ve en NEST que hay varios (4) vuelos el mismo día que hacen lo mismo y se adelantan unas 5 horas. Podrían ser vuelos de entrenamiento o similar.