Universitat Autònoma de Barcelona

Aplicación mixta de medidas ATFCM a corto plazo para reducir la complejidad del espacio aéreo

Memoria del Trabajo Fin de Grado en Gestión Aeronáutica

realizado por
Llibert Verdaguer Utset
y dirigido por
José Luis Muñoz Gamarra
Manuel Ángel Amaro Carmona

Escuela de Ingeniería

Sabadell, junio de 2023

El abajo firmante, José Luis Muñoz Gamarra director/a del Trabajo de Fin de Grado, profesor de la Escuela de Ingeniería de la UAB,

CERTIFICA:

Que el trabajo al que corresponde la presente memoria ha sido realizado bajo su dirección por

Llibert Verdaguer Utset

Y para que conste firma la presente en Sabadell, junio de 2023

Firmado: José Luis Muñoz Gamarra

HOJA DE RESUMEN – TRABAJO DE FIN DE GRADO DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA

Título del Trabajo de Fin de Grado:

Aplicación mixta de medidas ATFCM a corto plazo para reducir la complejidad del espacio aéreo.

Aplicació mixta de mesures ATFCM a curt termini per reduir la complexitat de l'espai aeri.

Application of mixed Short-Term ATFCM Measures to reduce airspace complexity.

Autor: Llibert Verdaguer Utset

Fecha: *Junio* de 2021

Tutores: José Luis Muñoz Gamarra y Manuel Ángel Amaro Carmona

Titulación: Grado en Gestión Aeronáutica

Palabras clave:

- Catalán: Regulacions, Air Traffic Flow and Capacity Management (ATFCM), Short-Term ATFCM Measures (STAM), Single European Sky ATM Research (SESAR).
- Castellano: Regulaciones, Air Traffic Flow and Capacity Management (ATFCM), Short-Term ATFCM Measures (STAM), Single European Sky ATM Research (SESAR).
- Inglés: Regulations, Air Traffic Flow and Capacity Management (ATFCM), Short-Term ATFCM Measures (STAM), Single European Sky ATM Research (SESAR).

Resumen del Trabajo de Fin de Grado:

- Catalán: En el present treballa es realitza un anàlisis del treball realitzat prèviament per Nosedal et al. [2] amb l'objectiu de crear i implementar un procediment amb el que resoldre conflictes entre parells de vols amb mesures a curt termini (STAM). Per fer-ho s'explica com es gestiona actualment el flux de tràfic aeri a l'actualitat i l'alternativa que ofereix l'aplicació de mesures STAM. Després s'elabora un model amb el que aplicar STAM en funció del context dels conflictes, per a una posterior aplicació del model amb conflictes imaginaris.

  Finalment, es valoren els resultats obtinguts amb l'aplicació del model envers el conflictes imaginaris i s'extreuen les conclusions pertinents del seu funcionament.
- Castellano: En el presente trabajo se realiza un análisis del trabajo realizado previamente por Nosedal et al. [2] con el objetivo de crear e implementar un procedimiento con el que resolver conflictos entre pares de vuelos con medidas a corto plazo (STAM). Para ello se explica cómo se gestiona actualmente el flujo de tráfico aéreo en la actualidad y la alternativa que ofrece la aplicación de medidas STAM. Luego se elabora un modelo con el que aplicar STAM en función del contexto de los conflictos, para una posterior aplicación del modelo con conflictos imaginarios. Por último, se valoran los resultados obtenidos con la aplicación del modelo hacia los conflictos imaginarios y se extraen las conclusiones pertinentes de su funcionamiento.

- Inglés: In the present work an analysis of the work carried out previously by Nosedal et al. [2] with the aim of creating and implementing a procedure to resolve conflicts between pairs of flights with short-term measures (STAM). For this, it is explained how air traffic flow is currently managed and the alternative offered by the application of STAM measures. Then a model is elaborated with which to apply STAM depending on the context of the conflicts, for a later application of the model with imaginary conflicts.

  Finally, the results obtained with the application of the model towards the imaginary conflicts are valued and the pertinent conclusions of its operation are drawn.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS ..... *G*

GLOSARIO ..... *I*

1. INTRODUCCIÓN *1*

1.1. Objetivo general **2**

1.1.1. Objetivos específicos 2

1.2. Origen y motivación **3**

1.3. Planificación del trabajo **3**

1.4. Contenido de la memoria **4**

2. MARCO TEÓRICO *5*

2.1. Air Traffic Managment (ATM) **5**

2.1.1. Air Traffic Services (ATS) 6

2.1.2. Air Traffic Flow and Capacity Management (ATFCM) 7

2.1.3. Airspace Managment (ASM) 8

2.2. European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL) **9**

2.2.1. Funciones de EUROCONTROL 9

2.2.2. Sectorización 9

2.3. Single European Sky ATM Research (SESAR) **11**

2.4. Short Term ATFCM Measures (STAM) **12**

2.4.1. Level Capping 13

2.4.2. Rerouting 13

2.4.3. Minim Departure Interval 13

2.4.4. Miles in Trail (MIT) 14

3. ESTADO DEL ARTE *15*

4. MODELO PRESENTADO *17*

4.1. Simbología del modelo **17**

4.1.1. Acciones 17

4.1.2. Estados 17

4.2. Aplicación del modelo **18**

4.3. Estructura del modelo **18**

4.3.1. Elección del conflicto 18
4.3.1.1. Inputs de la elección del conflicto 18
4.3.1.1.1. Conflictos detectados 19
4.3.1.2. Condicionantes de la elección del conflicto 19
4.3.1.2.1. Cronología de los conflictos 19
4.3.1.2.2. Vuelos implicados 19
4.3.1.3. Outputs de la elección del conflicto 19
4.3.1.3.1. Conflicto seleccionado 19
4.3.2. Elección de la STAM 19
4.3.2.1. Inputs de la elección de la STAM 19
4.3.2.1.1. Conflicto seleccionado 19
4.3.2.1.2. Level Capping 20
4.3.2.1.3. Rerouting 20
4.3.2.1.4. Minimum Departure Interval 20
4.3.2.1.5. MIT 20
4.3.2.2. Condicionantes de la elección de la STAM 20
4.3.2.2.1. Situación de los vuelos 20
4.3.2.2.2. STAM implementadas 20
4.3.2.2.3. Costo operativo 21
4.3.2.3. Outputs de la elección de la STAM 21
4.3.2.3.1. STAM a aplicar 21
4.3.3. Elección del vuelo 21
4.3.3.1. Inputs de la elección del vuelo 21
4.3.3.1.1. STAM a aplicar 21
4.3.3.2. Condicionantes de la elección del vuelo 21
4.3.3.2.1. Opciones implementadas 21
4.3.3.2.2. Fase del vuelo 21
4.3.3.2.3. Situación meteorológica 23
4.3.3.2.4. Situación del vuelo 23
4.3.3.2.5. Categoría de estela turbulenta 23
4.3.3.2.6. Compañía afectada 23
4.3.3.3. Outputs de la elección del vuelo 23
4.3.3.3.1. Vuelo a modificar 23
4.3.3.3.2. Conflicto seleccionado 24
4.3.4. Modificación del vuelo 24
4.3.4.1. Inputs de la Modificación del vuelo 24
4.3.4.1.1. Vuelo a modificar 24
4.3.4.2. Outputs de la Modificación del vuelo 24
4.3.4.2.1. Conflictos resueltos 24
4.3.4.2.2. Conflictos generados 24

4.3.5. Valoración de los resultados 24
4.3.5.1. Inputs de la valoración de los resultados 24
4.3.5.1.1. Conflictos resueltos 24
4.3.5.1.2. Conflictos generados 24
4.3.5.2. Condicionantes de la Valoración de los resultados 25
4.3.5.2.1. Situación general 25
4.3.5.2.2. Balance de conflictos 25
4.3.5.3. Outputs de la valoración de los resultados 25
4.3.5.3.1. Conflictos detectados 25
4.3.5.3.2. STAM a aplicar 25

5. CASO DE USO 27

5.1. Creación de los conflictos 27

5.2. Conflictos imaginarios 27

5.2.1. Primer conflicto imaginario 27
5.2.1.1. From LEZL to LEBL 27
5.2.1.2. From LEBL to LEMG 28
5.2.1.3. Puntos conflictivos del primer conflicto imaginario 29
5.2.2. Segundo conflicto imaginario 29
5.2.2.1. From LEPA to LEMD 29
5.2.2.2. From LEMH to LEMD 30
5.2.2.3. Puntos conflictivos del segundo conflicto imaginario 31
5.2.3. Tercer conflicto imaginario 31
5.2.3.1. From LEBL to LEZL 31
5.2.3.2. From LEZL to LEBL 32
5.2.3.3. Puntos conflictivos del tercer conflicto imaginario 32

5.3. Aplicación del modelo a los conflictos imaginarios 33

5.3.1. Resolución del primer conflicto imaginario 33
5.3.1.1. Elección de la STAM del primer conflicto imaginario 33
5.3.1.2. Elección del vuelo del primer conflicto imaginario 34
5.3.1.3. Modificación del vuelo del primer conflicto imaginario 34
5.3.1.4. Valoración de los resultados del primer conflicto imaginario 35
5.3.2. Resolución del segundo conflicto imaginario 35
5.3.2.1. Elección de la STAM del segundo conflicto imaginario 36
5.3.2.2. Elección del vuelo del segundo conflicto imaginario 36
5.3.2.3. Modificación del vuelo del segundo conflicto imaginario 37
5.3.2.4. Valoración de los resultados del segundo conflicto imaginario 37
5.3.3. Resolución del tercer conflicto imaginario 38
5.3.3.1. Elección de la STAM del tercer conflicto imaginario 38

5.3.3.2. Elección del vuelo del tercer conflicto imaginario 38
5.3.3.3. Modificación del vuelo del tercer conflicto imaginario 39
5.3.3.4. Valoración de los resultados del tercer conflicto imaginario 39

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 40

6.1. Resultados del primer conflicto 40

6.2. Resultados del segundo conflicto 40

6.3. Resultados del tercer conflicto 41

6.4. Compatibilidad entre primer y tercer conflicto 42

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO 43

7.1. Conclusiones por objetivos 43

7.2. Trabajo a futuro 44

8. REFERENCIAS 45

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Planificación del TfG. *3*

Fig. 2.1. Organización ATM. Fuente [6]. *6*

Fig. 2.2. Fases de las acciones de ATFCM. *8*

Fig. 2.3. Logotipo de EUROCONTROL. Fuente [17]. *9*

Fig. 2.4. Representación en ISIGNIA del sector LECBVNI. Fuente [20]. *10*

Fig. 2.5. Logotipo de SESAR. Fuente [22]. *11*

Fig. 3.1. Macroceldas con la trayectoria proyectada. Fuente [2]. *15*

Fig. 3.2 Microceldas con las trayectorias proyectadas. Fuente [2]. *16*

Fig. 4.1. Representación de una acción el modelo. Fuente [28]. *17*

Fig. 4.2. Representación de un estado en el modelo. Fuente [28]. *17*

Fig. 4.3. Representación de un condicionante en el modelo. Fuente [28]. *17*

Fig. 4.4. Representación de un input en el modelo. Fuente [28]. *18*

Fig. 4.5. Representación de un output en el modelo. Fuente [28]. *18*

Fig. 4.6 Modelo creado para la resolución de conflictos. Fuente [28]. *26*

Fig. 5.1. Plan de vuelo de LEZL to LEBL. Fuente [39]. *28*

Fig. 5.2. Plan de vuelo de LEBL to LEMG. Fuente [40]. *28*

Fig. 5.3. Conflicto en XEBAR/ASTRO/VLC. Fuente [20]. *29*

Fig. 5.4. Plan de vuelo de LEPA to LEMD. Fuente [41]. *30*

Fig. 5.5. Plan de vuelo de LEMH to LEMD. Fuente [42]. *30*

Fig. 5.6. Conflicto en CENTA/CATON/CLS/VLC/ARGOR. Fuente [20]. *31*

Fig. 5.7. Plan de vuelo de LEBL to LEZL. Fuente [43]. *32*

Fig. 5.8. Conflicto en YES/XEBAR/ASTRO/VLC. Fuente [20]. *33*

Fig. 5.9. Puntos de ruta durante fase Crucero (LEZL to LEBL). Fuente [39]. *34*

Fig. 5.10. Puntos de ruta durante fase Crucero (LEBL to LEMG). Fuente [40]. *34*

Fig. 5.11. Resolución del primer conflicto con Level Capping. Fuente [20]. *35*

Fig. 5.12. Puntos de ruta en común de LEPA to LEMD con LEMH to LEMD. Fuente [41]..... 36

Fig. 5.13. Puntos de ruta en común de LEMH to LEMD con LEPA to LEMD. Fuente [42]..... 36

Fig. 5.14. Puntos de ruta durante fase Crucero (LEBL to LEZL). Fuente [43]..... 38

Fig. 5.15. Resolución del tercer conflicto con Level Capping. Fuente [20]..... 39

Fig. 6.1. Comparación de la fase Crucero de LEBL to LEMG después del Level Capping. Fuente [20]..... 40

Fig. 6.2. Comparación de la fase Crucero de LEZL to LEBL después del Level Capping. Fuente [20]..... 41

Fig. 6.3. Niveles de vuelo en fase de crucero de LEBL to LEZL, LEZL to LEBL y LEBL to LEMG. 42

GLOSARIO

ACC Area Control Center

ANSP Air Navigation Service Provider

ASM Airspace Managment

ATC Air Traffic Control

ATFCM Air Traffic Flow and Capacity Managment

ATM Air Traffic Managment

ATS Air Traffic Service

CTOT Calculated Take-Off Time

EUROCONTROL European Organisation for the Safety of Air Navigation

FIS Flight Information Service

FL Flight Level

FMP Flow Management Position

FUA Flexible Use of Airspace

IFPS Integrated Initial Flight Plan Processing System

MIT Miles In Trail

NM Nautical Miles

NMOC Network Manager Operations Center

SES Single European Sky

SESAR Single European Sky ATM Research

STAM Short Term ATFCM Measures

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, las métricas que permiten identificar la carga de un sector se basan oficialmente en una comparación entre entry-counts/occupancies y la capacidad de un sector. Es decir, en función de la densidad de aviones que pueden circular por un sector del espacio aéreo se valora la dificultad que implica gestionar los vuelos. Pero se ha demostrado que este método de evaluar un sector no tiene en cuenta la complejidad. Es decir, hay situaciones donde la complejidad viene dada por la unión de varios vuelos en puntos críticos donde se centran muchas rutas y tráficos.

Por ello, desde hace años se plantea una reformulación del diseño de los sistemas de soporte de decisión para mejorar los procedimientos de gestión del tránsito aéreo. A partir de aquí nacen propuestas dentro del programa europeo Single European Sky ATM Research (SESAR), en las cuales se busca mejorar la sincronización y la predictibilidad del transporte aéreo [1].

Hoy en día, cuando se prevé que hay un desequilibrio entre la capacidad y la demanda, se aplican regulaciones, las cuales retrasan la salida de los vuelos para que no haya una sobrecarga de sectores en momentos del día. Estas regulaciones se consideran retrasos verdes, porque tiene la aprobación de las autoridades pertinentes. Como alternativa a estas regulaciones existen las intervenciones tácticas Air Traffic Control (ATC[1]) que los controladores aéreos pueden aplicar, pero estas implican un alto costo operativo y un consumo de combustible superior, por lo que es más rentable un incremento de los costes de tierra en vez de los costes en aire. El objetivo cuando se aplican estas regulaciones es no superar las limitaciones de capacidad que imponen los Area Control Center (ACC[2]), que indican el número de aeronaves que pueden coexistir en un tiempo determinado.

La cantidad de aeronaves es la variable más estudiada y evaluada cuando se está valorando la carga de un sector, pero realmente no es un indicador fiable de esta. En contraste, la complejidad viene dada por la valoración individual de cada vuelo respecto a los que lo rodean. Sin embargo, para poder plantear un análisis individual hay que tener una perspectiva global que permita identificar las consecuencias a terceros que

[1] ATC: Servicio operado por la autoridad correspondiente para promover el flujo seguro, ordenado y expedito del tránsito aéreo.

[2] ACC: Dependencia establecida para prestar el servicio de control de tránsito aéreo a los vuelos controlados en las áreas de control bajo su jurisdicción.

genera cada vuelo, y así evitar efectos dominó. De esta manera se evitarían regulaciones innecesarias y se mejoraría la gestión del tráfico aéreo.

Este proyecto, plantea el uso de una metodología que permite estudiar la carga de un sector, a partir de la detección de conflictos entre pares de vuelos y aplicar medidas tácticas / pre-tácticas con la finalidad de reducir la complejidad.

La metodología planteada por Nosedal et al. [2], se basa en poder detectar conflictos entre aeronaves. Para ello se divide el espacio aéreo en micro-regiones y se valora como interactúan las trayectorias de cada vuelo, así se puede calcular cuáles tienen potenciales conflictos para posteriormente resolverlos evitando el uso de regulaciones que puedan afectar a muchos más vuelos o evitando la intervención del controlador.

La metodología de Nosedal et al. [2] plantea la demora del Calculated Take-Off Time (CTOT[3]) para mitigar los conflictos detectados previamente a partir de la interacción de las trayectorias calculadas previamente.

El desarrollo de este proyecto plantea buscar alternativas al cambio de CTOT para poder ofrecer soluciones a estos conflictos que puedan mejorar la solución ofrecida por Nosedal et al. [2], por lo cual se plantea el siguiente objetivo general.

1.1. Objetivo general

"Buscar alternativas STAM que permitan reducir la complejidad"

Para lograr este objetivo se han estipulado unos objetivos específicos:

1.1.1. Objetivos específicos

- O1: Análisis del estado del arte: Comprensión del articulo 'An efficient algorithm for smoothing airspace congestion by fine-tuning take-off times' y del proyecto de RoadMap de SESAR: A partir de la lectura del trabajo hecho previamente por (Nosedal et al. [2]), asentar los conceptos previos necesarios para la ejecución del trabajo, y replicar el modelo de identificación de conflictos planteado. Además, trabajando a partir del contexto que se plantea en el RoadMap de SESAR [1] respecto al futuro del espacio aéreo europeo.
- O2: Análisis y aplicación del método para identificar conflictos: A través del trabajo hecho previamente por Nosedal et al. [2], formular el método de detección de conflictos con el que se justificará la validez de estos y la existencia.

[3] CTOT: Tiempo de asignación de franjas tácticas calculado para determinar el tiempo en el que se requiere que un vuelo esté en el aire.

- O3: Identificar la medida para la resolución de conflictos: Con el contexto adquirido por las lecturas previas elegir la medida que permite solucionar los conflictos identificados previamente.
- O4: Formulación del algoritmo: Planteamiento del algoritmo que resolverá los conflictos detectados a partir de las medidas que se hayan decidido aplicar.

1.2. Origen y motivación

A partir de mi estancia en prácticas el departamento de Air Traffic Flow and Capacity Management (ATFCM) de la Región Este de ENAIRE, me interesé por la gestión del tráfico aéreo de España. Durante mi etapa, pude obtener conocimientos básicos sobre la gestión de los flujos de tráfico aéreo que me permitían tener una base sobre la cual poder entender el tema planteado por la universidad.

Además, al empezar las prácticas simultáneamente con el trabajo, mi interés ha ido creciendo exponencialmente junto a mis bases sobre el tema, de este modo siempre ha sido interesante poder tratar con temas relacionados al ATFCM.

También quiero destacar mi interés en formar parte de empresas dedicadas al flujo del tráfico aéreo en mi futuro laboral, como ENAIRE, lo cual ha generado que la motivación por aprender nuevos conceptos nunca haya menguado. Ya que a la vez lo he visto como una oportunidad para poder adquirir algunos conocimientos que quizás no se han tratado tan profundamente durante el transcurso de la carrera.

1.3. Planificación del trabajo

A continuación, se muestra la planificación inicial hecha al inicio del trabajo, con el objetivo de trabajar de forma estructurada y desarrollar adecuadamente el contenido del proyecto.

Nombre de la tarea	Fecha de inicio	Fecha de fin	Duración (días)
Realización del TfG	9/2/23	20/6/23	131
Analisis del estado de Nosedal et al.	9/2/23	20/3/23	39
Analisis del estado del arte	9/2/23	10/3/23	29
Analisis de RoadMap de SESAR	7/2/23	20/3/23	41
Marco teórico	20/3/23	24/4/23	35
Planteamiento de los conceptos básicas	20/3/23	5/4/23	16
Recopilación de información de las STAM	5/4/23	24/4/23	19
Creación del modelo	10/3/23	1/5/23	52
Formulación del lenguaje	10/3/23	20/3/23	10
Estructuración del modelo	20/3/23	15/5/23	56
Creacción de los conflictos imaginarios	15/5/23	1/6/23	17
Resolución de los conflictos	1/6/23	15/6/23	14
Redacción del TfG	24/3/23	20/6/23	88

Fig. 1. Planificación del TfG.

1.4. Contenido de la memoria

En el capítulo 1 se lleva a cabo la introducción del trabajo, el origen y motivación de este y la organización de su contenido.

En el capítulo 2 se plantean los conceptos teóricos necesarios para comprender el posterior desarrollo del trabajo.

En el capítulo 3 se expone la metodología implementada en el trabajo realizado por Nosedal et al. [2] para la detección de conflictos.

En el capítulo 4 se presenta el modelo diseñado en el trabajo para la resolución de conflictos mediante STAM.

En el capítulo 5 se explican los conflictos imaginarios a los que se les va a aplicar el modelo presentado, y la posterior resolución de estos.

En el capítulo 6 se comentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo a los conflictos imaginarios planteados.

En el capítulo 7 se presentan las conclusiones obtenidas a partir de la realización del trabajo, en las que se exponen los conocimientos obtenidos, los cambios respecto la planificación inicial y las conclusiones personales obtenidas.

2. MARCO TEÓRICO

Para el planteamiento y resolución del trabajo es necesaria la comprensión de algunos conceptos básicos relacionados con la gestión del tráfico aéreo europeo. A continuación, se irán planteando conceptos que están relacionados con el posterior desarrollo del trabajo, extraídos de las fuentes más oficiales que se han tenido a disposición.

2.1. Air Traffic Managment (ATM)

Para comprender como funciona el tráfico aéreo europeo es fundamental entender cómo se gestiona. El ATM es un sistema que se encarga de supervisar y gestionar el movimiento de aeronaves en el aire y en tierra [3].

El objetivo principal del ATM es asegurar que las aeronaves operen de manera segura y eficiente en el espacio aéreo designado. Para lograr esto, se necesitan sistemas y tecnologías avanzadas para ayudar a coordinar y gestionar los movimientos de las aeronaves. El ATM es un sistema altamente automatizado que utiliza tecnologías avanzadas como la comunicación de datos, los sistemas de radar, los sistemas de navegación y los sistemas de gestión del tráfico aéreo, para controlar el flujo de tráfico en el aire [4].

El ATM es esencial para garantizar la seguridad del tráfico aéreo. El sistema se encarga de asegurar que los aviones mantengan la separación mínima y que sigan sus rutas de vuelo designadas. Los controladores de tráfico aéreo también trabajan para evitar colisiones entre aviones, supervisando el movimiento de las aeronaves y proporcionando instrucciones de vuelo a los pilotos. En caso de emergencias, el controlador de tráfico aéreo también puede proporcionar asistencia y asesoramiento [5].

El ATM también es responsable de la planificación del espacio aéreo. Los ingenieros de ATM diseñan y construyen el espacio aéreo para garantizar que se pueda acomodar el tráfico aéreo de manera segura y eficiente. Esto incluye la planificación de las rutas de vuelo, la creación de zonas restringidas para la seguridad nacional y la gestión de las operaciones de vuelo durante eventos especiales como festivales y eventos deportivos [4].

Los sistemas ATM también son esenciales para la eficiencia del tráfico aéreo. Los controladores de tráfico aéreo pueden proporcionar información actualizada sobre las condiciones meteorológicas y el tráfico aéreo a los pilotos, lo que les permite tomar decisiones informadas sobre la ruta y la altitud de vuelo. El uso de sistemas ATM avanzados también puede reducir los retrasos en los vuelos, ya que los controladores de

tráfico aéreo pueden optimizar el flujo de tráfico aéreo para minimizar los tiempos de espera en las pistas de aterrizaje y despegue [4].

La gestión del tráfico está formada por tres servicios principales: ATS, ATFCM y ASM [6].

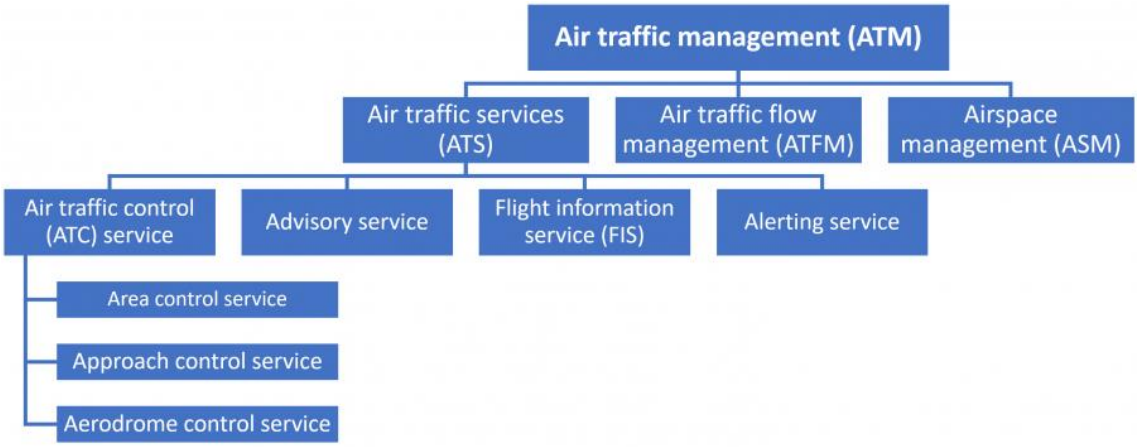


Fig. 2.1. Organización ATM. Fuente [6].

2.1.1. Air Traffic Services (ATS)

ATS conforma todos los servicios de tránsito aéreo que tienen como propósito general garantizar un flujo de tránsito seguro y ordenado, a través de la proporción de información necesaria para las tripulaciones de vuelo y en caso de emergencia, a los organismos apropiados [7].

El ATS es realizado por controladores de tránsito aéreo, y sus objetivos principales son los siguientes [8]:

- Prevención de colisiones entre aeronaves.
- Prevención de colisiones entre aeronaves en el área de maniobras y obstrucciones en esa área.
- Agilización y mantenimiento de un flujo ordenado del tránsito aéreo.
- Proporción de asesoramiento e información útil para la realización segura y eficiente de los vuelos.
- Notificación a las organizaciones apropiadas acerca de las aeronaves que necesitan ayuda para búsqueda y salvamento, y ayudar a tales organizaciones según sea necesario.

En España el responsable de esta actividad es ENAIRE[4] y principalmente ofrece estos tres servicios [9]:

[4] ENAIRE: Proveedor de servicios de navegación aérea y de información aeronáutica en España.

- Air Traffic Control (ATC): Este servicio es prestado por controladores aéreos, que aplican separaciones entre los aviones y emiten autorizaciones de control a petición de los pilotos, a propia iniciativa, en función de las condiciones del tránsito y del entorno [10].
- Flight Information Service (FIS): Este servicio consiste en ofrecer información aeronáutica en tiempo real para un desarrollo seguro y eficaz en todas las fases de cada vuelo [11].
- Alertar: Este servicio se preocupa del desarrollo del vuelo de las aeronaves, estableciendo las medidas necesarias para su auxilio y alerta, además de las comunicaciones oportunas con el organismo competente para indicar la posición del avión [12].

2.1.2. Air Traffic Flow and Capacity Management (ATFCM)

ATFCM es el sistema encargado de garantizar un flujo de tránsito óptimo cuando se espera que la demanda pueda superar la capacidad disponible del sistema ATC. La capacidad se expresa a través de las aeronaves que pueden ingresar en una porción específica del espacio aéreo en un período de tiempo determinado [13].

ATFCM busca la máxima efectividad a través de la cooperación y coordinación de las unidades ATC y los usuarios del espacio aéreo. Aunque, no siempre es posible conseguir un tráfico óptimo y fluido debido a diversas limitaciones, como los requisitos de los usuarios en conflicto, las limitaciones del sistema de navegación aérea o las condiciones meteorológicas inesperadas. Para reducir estos problemas se aplican medidas paliativas, como el control del flujo de tránsito aéreo a través de regulaciones (limitación de la salida de algunos vuelos que pueden sobrecargar sectores del espacio aéreo). Estas medidas suelen implicar retrasos en los vuelos antes de la salida, esperas en los vuelos, uso de niveles de vuelo no económicos (niveles de vuelo que implican menos eficiencia en la utilización de la aeronave y ,por lo tanto, más costes), cambios en la ruta y/o desvíos, interrupción de horarios de vuelo, sanciones económicas y de combustibles para los operadores de aeronaves, congestión de los aeródromos o en los edificios terminales que puede acabar generando insatisfacción en los pasajeros [14].

Las acciones de ATFCM se desarrollan en tres fases:

- Planificación estratégica: Esta fase incluye las medidas que se llevan a cabo con meses de antelación, a través de una consulta previa con los proveedores de servicios ATC y los operadores de aeronaves. Un ejemplo de este tipo de medidas

es la destinación de controladores desde otro centro ACC para hacer frente a picos de tráfico estacionales o temporales [14].

- Planificación pre-táctica: Esta fase incluye medidas que se llevan a cabo con un día de antelación, normalmente con el objetivo de ajustar medidas estratégicas previas. Un ejemplo de este tipo de medidas es la desviación de ciertos flujos de tráfico [14].
- Operaciones tácticas: Esta fase incluye las medidas que se aplican durante el mismo día de su implementación. Esto no siempre implica decisiones del mismo día, también pueden ser medidas que previamente se ha acordado aplicar. Un ejemplo de este tipo de medidas son las regulaciones que se aplican cuando sé ante la previsión de superar la capacidad de un sector [14].

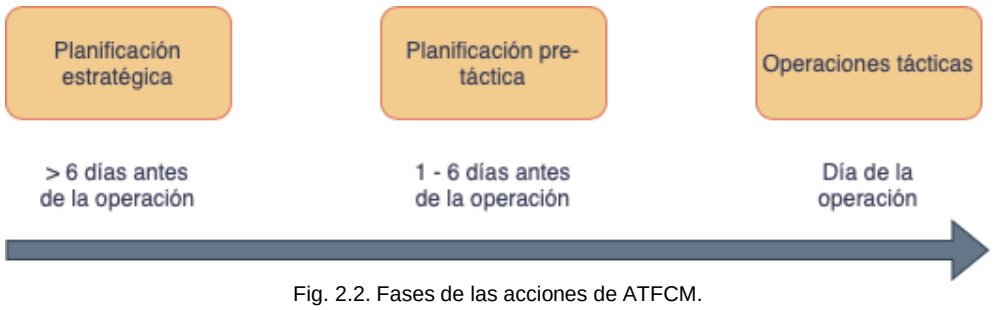


Fig. 2.2. Fases de las acciones de ATFCM.

Los objetivos del sistema ATFCM son:

- El refuerzo de la seguridad en las operaciones, intentando evitar una demanda de tráfico aéreo excesiva en comparación a la capacidad ATC declarada (de los sectores y aeródromos, incluidas las pistas) [15].
- La optimización de la eficiencia de la red, haciendo el máximo uso de la capacidad posible, a la vez, intentando minimizar los efectos adversos para los operadores de servicios [15].
- La optimización de la capacidad de la red puesta a disposición mediante la implantación de medidas de mejora de la capacidad coordinadas con el Network Manager[5] [15].

2.1.3. Airspace Managment (ASM)

ASM es el sistema encargado de gestionar el espacio aéreo de la forma más eficiente posible para poder satisfacer a sus usuarios, tanto civiles como militares. Esto es posible, a través de la asignación del espacio aéreo (mediante rutas, zonas, niveles de vuelo, etc.),

[5] Network Manager: Entidad que aborda los problemas de rendimiento de forma estratégica, operativa y técnica.

y la estructuración de este espacio para poder prestar servicio al máximo tránsito aéreo [6].

ASM mejora el concepto de Flexible Use of Airspace (FUA[6]) a través de que el desarrollo del espacio aéreo europeo sea flexible y reactivo, cambiando en función de las necesidades de los usuarios del espacio aéreo con el objetivo de optimizar la capacidad y el rendimiento de la red europea [16].

2.2. European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL)

La entidad encargada de gestionar este sistema es la EUROCONTROL, es la organización civil-militar paneuropea dedicada a apoyar la aviación europea [17].

Fig. 2.3. Logotipo de EUROCONTROL. Fuente [17].

2.2.1. Funciones de EUROCONTROL

El objetivo principal de EUROCONTROL es garantizar la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad medioambiental de la gestión del tráfico aéreo en Europa. Lo logra mediante la colaboración con proveedores nacionales de servicios de navegación aérea (ANSPs), partes interesadas de la industria y otras organizaciones internacionales involucradas en la aviación [17].

EUROCONTROL es el Network Manager del ATM, coordina y planifica el uso del espacio aéreo europeo, optimizando el flujo de tráfico aéreo y asegurando que la capacidad satisfaga la demanda. Establece estructuras, rutas y procedimientos comunes del espacio aéreo para mejorar la eficiencia y la seguridad [18].

2.2.2. Sectorización

Para que la fluidez del tráfico aéreo sea la idónea, el espacio aéreo está dividido en sectores tridimensionales. El proceso de definición de los sectores implica la división

[6] FUA: Concepto de gestión del espacio aéreo basado en el principio de que el espacio aéreo no debe designarse como puramente civil o militar, sino como un continuo en el que se acomodan todos los requisitos de los usuarios en la mayor medida posible.

virtual del espacio aéreo, con el objetivo de dividir la carga de trabajo y que sea más manejable para los centros ACC [19].

Fig. 2.4. Representación en ISIGNIA del sector LECBVNI. Fuente [20].

Los sectores tienen una capacidad, esta se expresa como el número de aeronaves que pueden ingresar en esa porción específica del espacio aéreo en un periodo de tiempo dado (en una hora), teniendo en cuenta el clima, la configuración de la unidad ATC, el personal y equipo disponible, y cualquier otro factor que pueda afectar a la carga de trabajo del controlador responsable del espacio aéreo [22].

Los sectores normalmente están orientados en función de las necesidades del ATS, pero también están condicionados por los siguientes factores:

- Límites estatales o acuerdos bilaterales para la provisión de ATS [21].
- Acuerdos internacionales para el suministro de ATS sobre aguas internacionales [21].
- Ubicación de áreas de uso especial/peligroso, prohibido, segregado temporalmente [21].
- Características geográficas del área, tipo de servicio a brindar, cobertura de radio y radar [21].
- Dirección del flujo de tráfico principal, tiempo de vuelo en el sector, distribución de puntos de conflicto, etc [21].
- Satisfacer la demanda de capacidad [21].

Cada sector implica un controlador ejecutivo[7] y un controlador planificador[8], por eso cuando la carga de trabajo se espera que sea baja se abren sectores que engloban a varios y así con menos personas pueden abastecer a todo el tráfico. Los sectores que no son fruto de uniones y son indivisibles, se llaman sectores elementales [21].

2.3. Single European Sky ATM Research (SESAR)

El proyecto SESAR es un programa europeo que busca modernizar la infraestructura de control del tráfico aéreo europeo. El objetivo de SESAR es el desarrollo de un nuevo sistema de gestión del tráfico aéreo (ATM) que garantice la seguridad y la fluidez del transporte aéreo durante los próximos 30 años [22].

Fig. 2.5. Logotipo de SESAR. Fuente [22].

SESAR forma parte de una iniciativa nacida en 2004 y creada por la Unión Europea llamada Single European Sky (SES), que tiene como objetivo fundamental la restructuración del sistema de gestión de navegación aérea del continente europeo, junto a una armonización y mejora de la eficiencia de estos servicios [22].

El proyecto nace ante la previsión de duplicar con creces la demanda de tráfico e incluso triplicarla en algunas regiones. Sin embargo, el sistema utilizado hasta el momento para gestionar los flujos aéreos ha tenido pocas modificaciones y cada vez tiene más dificultades para mantenerse al día. Según la Comisión Europea poder mantener estos índices de fiabilidad y seguridad se requiere un salto cualitativo de cara a futuro [23].

SESAR busca tratar la gestión del tráfico aéreo desde una visión más global, intentado reducir la complejidad del tráfico aéreo a partir de una gestión más específica de los vuelos [1].

[7] Controlador ejecutivo: Controlador encargado de la gestión del tráfico aéreo dentro del sector (área de responsabilidad, AoR) y la realización de las tareas tácticas (por lo que a veces se les llama "controlador táctico").

[8] Controlador planificador: Controlador encargado de coordinar con los sectores y unidades vecinas las condiciones bajo las cuales las aeronaves ingresarán o saldrán del AoR.

2.4. Short Term ATFCM Measures (STAM)

Una vez planteados los conceptos básicos sobre la gestión del tráfico aéreo, es fundamental entender que papel tiene las STAM dentro de todo esto. Las STAM son medidas tácticas que permiten solucionar conflictos entre el flujo de vuelos en un periodo tiempo corto [24].

Usualmente, cuando se detecta una posible sobrecarga de un sector, se aplican retrasos a los vuelos que pueden contribuir a la carga, esto se realiza mediante las estimaciones que se hacen a través de los CTOT emitidos por el Network Manager. Estos CTOT se asignan con dos horas de antelación respecto el despegue del vuelo, y aunque el retraso de la salida de vuelos ayuda a reducir la carga de sectores, no siempre es una opción eficaz ni eficiente. Otra opción para la gestión del tráfico es la imposición de restricciones para separar flujos de tráfico y reducir la complejidad del espacio aéreo, estas restricciones implican que algunas rutas solo si los vuelos cumplen ciertas condiciones, como cruzar un punto de ruta o en función del aeródromo de salida y de destino [25].

A diferencia de las medidas comentadas, las STAM tienen más flexibilidad para manejar la sobrecarga, ya que se aplican en una etapa posterior (durante la fase de operaciones tácticas) y así mejora su eficacia. Estas medidas se pueden aplicar a vuelos en concreto o a flujos de tráfico (un ejemplo de esto, sería aplicar un medida STAM a todos los tráficos que van a un destino determinado o aeronaves que vuelan sobre un área específica o en una ruta específica) [26].

El objetivo de las STAM es ajustar la carga de trabajo de forma dinámica, de esta forma cuando un sector está a punto de sobrecargarse se puede redistribuir a otros que se encuentran en una situación más cómoda. Aunque esto acabe implicando una pérdida de eficiencia de los vuelos, el impacto que acaba generando es mucho menor que las alternativas que existen actualmente, en primer lugar, debido a que estas medidas acaban afectando a vuelos más localizados y, en segundo lugar, debido a que la intervención tiene un impacto temporal [26].

Las STAM son implementadas por los Flow Managment Position (FMP[9]) locales, pero como estas medidas pueden afectar a terceros, se coordinan con el Network Manager para

[9] FMP: Puesto de trabajo establecido en las dependencias de control de tránsito aéreo (ATC) apropiadas para garantizar la interfaz necesaria con una unidad central de gestión (Network Manager) en asuntos relacionados con la prestación del servicio de gestión de afluencia de tránsito aéreo.

hacer una evaluación de su impacto. Las 4 medidas principales son las siguientes: Level Capping, Rerouting, Minim Departure Interval y Miles in Trail [27].

2.4.1. Level Capping

Esta medida implica que vuelos que cumplan ciertas condiciones deban cumplir con una restricción de nivel de vuelo, un ejemplo sería; que los vuelos despegados de LEPA deben estar en un nivel de vuelo (FL) XXX o menos. Esta STAM es la más usada, normalmente con el propósito de proteger un sector superior, que si no se aplicara la medida acabaría sobrecargado. La restricción se aplica a niveles prácticos retrasando su ascenso o anticipando su descenso. En los dos casos es muy probable que el nivel de crucero solicitado acabe cumpliéndose [26].

Es fundamental que haya coordinación entre el centro ACC que quiere aplicar el Level Capping y los centros ACC adyacentes, ya que estas medidas pueden afectar a los perfiles verticales. Cuando las medidas se propongan para el tránsito, el ACC solicitará que los vuelos afectados vuelvan a presentar la solicitud en consecuencia con la Initial Flight Plan Processing System (IFPS[10]). Aun así, no requerirán la coordinación individual con el Network Manager Operations Center (NMOC) [27].

2.4.2. Rerouting

Esta medida implica el desvío obligatorio de flujos para descargar el tráfico de ciertas áreas [26]. El cambio de ruta se aplica dentro del ACC para mejorar la distribución del tráfico y reducir la ocupación y complejidad del sector. Esta medida no requiere coordinación individual con el NMOC [27].

2.4.3. Minim Departure Interval

Esta medida implica que las salidas secuenciales desde ciertos aeródromos deben estar espaciadas por X minutos si se dirigen a una dirección específica. Las restricciones son similares a la asignación de CTOT, con la diferencia de que la aplicación de la medida es temporal [26].

Normalmente, se coordinan entre el centro ACC, los aeropuertos y los FMP adyacentes. Estas medidas pueden evitar el uso de regulaciones en el área ACC, al ser medidas más precisas que una regulación el impacto a los usuarios es inferior. Aunque se apliquen estas

[10] IFPS: Sistema que recopila, procesa y distribuye planes de vuelo que cubren la parte de la Región EUR de la OACI conocida como Zona IFPS (IFPZ).

medidas, hay que seguir adhiriéndose a Estimated Off Block Time (EOBT[11]) y CTOT [27].

2.4.4. Miles in Trail (MIT)

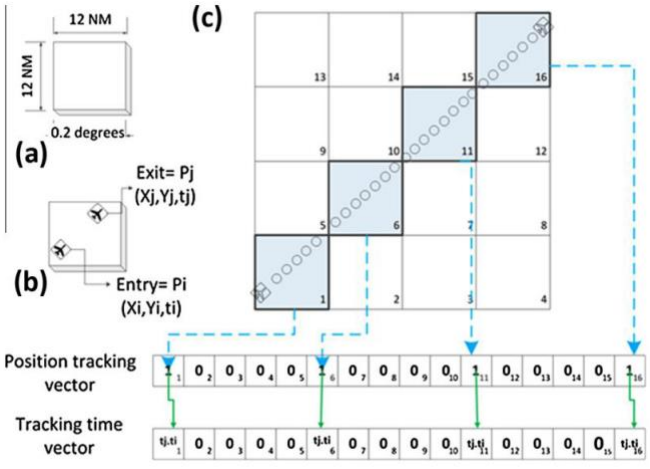
Esta medida implica que el tráfico se regula exigiendo una separación mínima de millas en estela entre una serie de aeronaves sucesivas que se dirigen a una ruta específica [26]. Generalmente se coordinan entre sectores dentro de un ACC y con el resto de ACC adyacentes [27].

[11] EOBT: Hora estimada en que una aeronave iniciará el movimiento asociado con la salida.

3. ESTADO DEL ARTE

El desarrollo del trabajo ha tenido como referencia el procedimiento de detección de conflictos implementado en Nosedal et al. [2], en el que se busca reducir la complejidad del espacio aéreo europeo a partir de la modificación de los tiempos de despegue (CTOT). En el trabajo realizado por Nosedal et al. [2], se hace una detección de conflictos mediante "microrregiones colectivas" (celdas cuadradas de seis millas náuticas (NM) utilizadas por dos o más vuelos en el mismo nivel de vuelo (FL)) proyectando las trayectorias de las rutas de todos los vuelos en una cuadrícula discreta (100.000 macro celdas cuadradas de 12 NM) que abarca longitudes de 20 a 30 grados y latitudes de 0 a 80 grados [2].

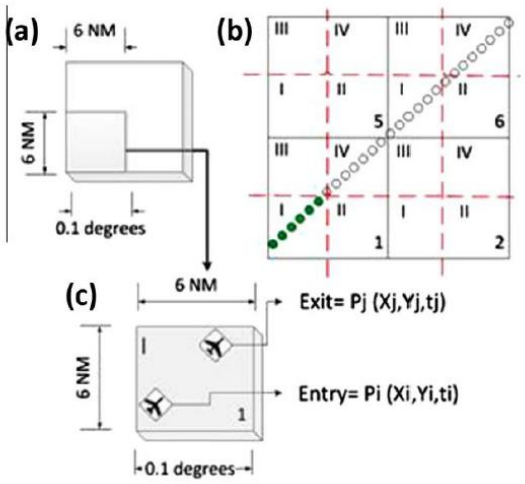
Una vez mapeadas y cargadas todas las trayectorias, se discretizan (añadir puntos de ruta que equidistantes) para poder tener puntos más intermedios que los puntos de ruta. Después con la intención de ilustrar, se representa en la Figura 3.1. La trayectoria en 16 celdas con todos los puntos del vuelo. El seguimiento de la posición de cada vuelo se almacena como un vector donde se representa con 0 aquella celda que no forma parte de la trayectoria, y con 1 se representa aquellas celdas que sí que forman parte de la trayectoria, por lo tanto, estarán ocupadas en algún momento. En la Figura 3.1. Se pueden observar marcadas en azul las celdas que representarían un 1 en el vector, en este caso la celda 1, la celda 6, la celda 11 y la celda 16. Cada vector también le corresponde un tiempo de entrada del vuelo (tj) y tiempo de salida del vuelo (ti), para identificar en que franja de tiempo estará ocupada [2].



(a)Macroceldas, (b) macro-mapeo y (c) tiempo de seguimiento de ocupación.
Fig. 3.1. Macroceldas con la trayectoria proyectada. Fuente [2].

Cada macrocelda (contendor cuadrado de 12 NM) con posibles eventos de concurrencia se divide entre cuatro microceldas o cuadrantes (llamados I, II, III, y IV en la Figura 3.2.).

Para determinar si la trayectoria ocupa alguna de las cuatro microceldas se analizan las posiciones dentro de la macrocelda [2].



(a) Microceldas, (b) micro-mapeo y (c) tiempo de seguimiento de ocupación.
Fig. 3.2 Microceldas con las trayectorias proyectadas. Fuente [2].

En la Figura 3.2, los círculos sólidos representan el segmento de trayectoria dentro del cuadrante I de la macrocelda 1. Este segmento ocupa la microcelda en una ventana de tiempo [ti,tj] donde ti representa el tiempo de entrada y el tj el tiempo de salida [2].

A partir del micro mapeo se compara las aeronaves de una micro celda y se observa si habrá conflictos entre ellas. Con la operación de Min (tjx, tjy) – Max (tix, tiy) = H, si H es positiva indica una superposición si es negativo indica la eliminación de este conflicto. Para reducir la lista de conflictos se eliminan las redundancias y los que son mínimos.
Como se tiene que respetar el tiempo de asignación, y el tiempo máximo de ajuste para los CTOT es de 900 s, los que impliquen una concurrencia con un tiempo superior a 900 se eliminan. También se eliminan los que tiene una concurrencia con un valor H inferior a 1200 s (300 segundos de seguridad) [2].

Para el proceso de ajustamiento se usa el Modelo CP, que define la siguiente función [2]:

- Minimizar Hm.

Hm representa el tiempo máximo de autorización para los eventos de concurrencia más ajustados o el tiempo mínimo de superposición después de aplicar el conjunto de ajustes. También se implementan restricciones para evitar efectos dominó y eventos emergentes [2].

4. MODELO PRESENTADO

Para la aplicación de STAM para la resolución de conflictos se ha diseñado el modelo siguiente. En él se plantea un sistema, a partir del cual se busca resolver conflictos aplicando medidas en función del contexto de los vuelos involucrados.

4.1. Simbología del modelo

Para la adecuada comprensión del modelo es necesario entender cuál es el lenguaje emprado en este.

4.1.1. Acciones

Los rectángulos simbolizan acciones, en este caso son los diferentes procesos que se harán previos a la elección y aplicación de las STAM (Figura 4.1.).

Fig. 4.1. Representación de una acción el modelo. Fuente [28].

4.1.2. Estados

Los círculos representan estados, los estados simbolizan resultados, situaciones u opciones que interactúan con las acciones dentro del modelo (Figura 4.2.).

Fig. 4.2. Representación de un estado en el modelo. Fuente [28].

- Condicionantes: cuando el circulo se encuentra situado dentro de un rectángulo, pasa a ser una condición de la acción en la que sitúa. Por lo tanto, es un punto para tener en cuenta cuando se está aplicando esa acción (Figura 4.3.).

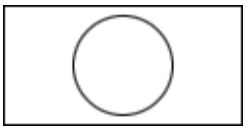


Fig. 4.3. Representación de un condicionante en el modelo. Fuente [28].

- Inputs: Cuando el circulo está apuntando una acción, indica una información externa fruto de una acción anterior o una de las opciones disponibles que tiene esa acción (Figura 4.4.).

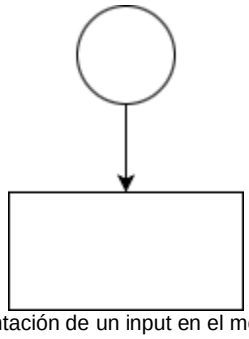


Fig. 4.4. Representación de un input en el modelo. Fuente [28].

- Outputs: Cuando el circulo está siendo apuntado por una acción, indica que ese estado es el resultado fruto de la acción que la está señalando (Figura 4.5.).

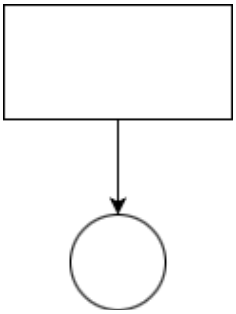


Fig. 4.5. Representación de un output en el modelo. Fuente [28].

4.2. Aplicación del modelo

El modelo está creado para resolver conflictos ya detectados previamente, en su desarrollo no se hace una detección de conflictos simplemente se busca la mejor medida a aplicar y dónde aplicarla. La detección de conflictos se haría previamente mediante el procedimiento empleado en Nosedal et al. [2], explicado en el capítulo 3. Estado del arte.

4.3. Estructura del modelo

El modelo tiene como estructura el procedimiento lógico que se considera adecuado para la toma de decisiones a la hora de implementar STAM para la resolución de conflictos. A continuación, se hace una explicación del modelo a partir de las acciones y los estados enlazados a ellas.

4.3.1. Elección del conflicto

Esta acción tiene como objetivo elegir el conflicto, en el caso que haya varios, al cual se le buscará solución en el proceso de aplicación de las STAM.

4.3.1.1. Inputs de la elección del conflicto

Los inputs son todos aquellos parámetros e informaciones externas que recibe la acción para la toma de decisiones. A continuación, se muestran los inputs relacionados con la elección del conflicto.

4.3.1.1.1. Conflictos detectados

Como se ha comentado anteriormente, el modelo parte de un punto de partida dónde los conflictos ya han sido detectados previamente mediante el procedimiento implementado en Nosedal et al. [2]. Estos conflictos se muestran en pares de vuelos que no respetarán la distancia lateral y/o vertical entre ellos en algún momento de sus trayectos.

4.3.1.2. Condicionantes de la elección del conflicto

Los condicionantes son todos aquellos parámetros que hay que tener en cuenta para la elección del resultado de una acción. Los condicionantes están ordenados y numerados por orden de relevancia en el momento de tomar decisiones. A continuación, se muestran los condicionantes en la elección del conflicto.

4.3.1.2.1. Cronología de los conflictos

Al tratarse de decisiones tácticas el tiempo de reacción es fundamental, por lo que se prioriza los conflictos que se prevé que pasarán antes.

4.3.1.2.2. Vuelos implicados

Cuando un vuelo está implicado en más de un conflicto también se le da prioridad para intentar solucionar varios conflictos a la vez con una misma acción.

4.3.1.3. Outputs de la elección del conflicto

Los outputs son los resultados o decisiones que han salido al realizar la acción actual. A continuación, se muestran los outputs en la elección del conflicto.

4.3.1.3.1. Conflicto seleccionado

El conflicto seleccionado es el resultado de la decisión tomada durante la elección de conflicto, por lo tanto, es el que se anticipa más cercano al momento actual y/o el que contiene a uno de los vuelos más implicado en conflictos.

4.3.2. Elección de la STAM

Esta acción tiene como objetivo la elección de la STAM a aplicar al conflicto que se ha seleccionado en la acción anterior.

4.3.2.1. Inputs de la elección de la STAM

A continuación, se muestran los inputs relacionados con la elección de la STAM.

4.3.2.1.1. Conflicto seleccionado

El conflicto seleccionado muestra la información relevante fruto de la decisión tomada previamente en la elección del conflicto, de este modo se trabaja con la información necesaria para afrontar los conflictos en un proceso ordenado.

4.3.2.1.2. Level Capping

El Level Capping es una de las STAM disponibles para aplicar a los conflictos detectados, tal y como se explica en el subapartado 2.4.1 Level Capping, implica que vuelos que cumplan ciertas condiciones deban cumplir con una restricción de nivel de vuelo, para evitar el incumplimiento de la separación obligatoria mínima (5 NM de lateral [29] y 1.000 pies de vertical [30]) [27].

4.3.2.1.3. Rerouting

El Rerouting es una de las STAM disponibles para aplicar a los conflictos detectados, tal y como se explica en el subapartado 2.4.2. Rerouting, implica el desvío obligatorio de un vuelo, para evitar el incumplimiento de la separación obligatoria mínima.

4.3.2.1.4. Minimum Departure Interval

El Minimum Departure Interval es una de las STAM disponibles para aplicar a los conflictos detectados, tal y como se explica en el subapartado 2.4.3. Minimum Departure Interval, implica que las salidas secuenciales desde ciertos aeródromos deben estar espaciadas por X minutos si se dirigen a una dirección específica, para evitar el incumplimiento de la separación obligatoria mínima.

4.3.2.1.5. MIT

El MIT es una de las STAM disponibles para aplicar a los conflictos detectados, tal y como se explica en el subapartado 2.4.4. Miles In Trail (MIT), implica que el tráfico se regula exigiendo una separación mínima de millas en estela entre una serie de aeronaves sucesivas que se dirigen a una ruta específica, para evitar el incumplimiento de la separación obligatoria mínima.

4.3.2.2. Condicionantes de la elección de la STAM

A continuación, se muestran los condicionantes en la elección de la STAM.

4.3.2.2.1. Situación de los vuelos

En función de la situación de los vuelos, hay algunas medidas que se consideran inviables para aplicar. Por ejemplo, en el caso que los dos vuelos coincidan en gran parte del trayecto porque tienen el mismo destino, aplicar un Level Capping podría perjudicar mucho al vuelo afectado y no sería viable.

4.3.2.2.2. STAM implementadas

Para evitar bucles en el proceso de decisión se mantiene un historial de las STAM implementadas previamente en cada conflicto, de este modo no se aplica dos veces al mismo conflicto una medida que no ha resultado eficaz.

4.3.2.2.3. Costo operativo

Uno de los factores que se tiene en cuenta para la elección de la STAM para solucionar un conflicto es el coste que genera está modificación en el trayecto de los vuelos, siempre se prioriza las que impliquen un coste menos elevado a los agentes involucrados.

4.3.2.3. Outputs de la elección de la STAM

A continuación, se muestran los outputs en la elección de la STAM a aplicar.

4.3.2.3.1. STAM a aplicar

La STAM a aplicar es la decisión tomada durante la acción actual, fruto de las opciones disponibles, teniendo en cuenta los condicionantes comentados anteriormente.

4.3.3. Elección del vuelo

Esta acción tiene como objetivo elegir el vuelo al cual se le aplicará la STAM elegida anteriormente.

4.3.3.1. Inputs de la elección del vuelo

A continuación, se muestran los inputs relacionados con la elección del vuelo.

4.3.3.1.1. STAM a aplicar

En este caso solo hay un input disponible, la STAM que se ha adecua más al contexto del conflicto elegido.

4.3.3.2. Condicionantes de la elección del vuelo

A continuación, se muestran los condicionantes en la elección del vuelo.

4.3.3.2.1. Opciones implementadas

Para evitar bucles en el proceso de decisión se mantiene un historial del vuelo al que se le ha aplicado la STAM, de este modo no se aplica dos veces la STAM a un vuelo en el que no ha resultado eficaz.

4.3.3.2.2. Fase del vuelo

Durante el trayecto de un vuelo se identifican 7 fases [31]:

- Carreteo: Es la fase en la que la aeronave se desplaza por tierra en el aeropuerto [32].
- Despegue: Es la fase en la que el vuelo acelera desde velocidad cero hasta que llega a 35 ft de altitud [33].
- Ascenso: Es la fase en la que la aeronave asciende hasta llegar al punto dónde empieza el vuelo de crucero [34].

- Crucero: Es la fase en la que la aeronave toma una altitud de vuelo constante y nivelada [35].
- Descenso: Es la fase en la que la aeronave pierde altitud de forma controlada y empieza una trayectoria descendente [31].
- Aproximación: Es la fase en la que la aeronave se prepara para el aterrizaje previa a la autorización de la torre de control [31].
- Aterrizaje: Es la fase la que la aeronave se aproxima al aeropuerto de destino finalizando con un estacionamiento [36].

En función de la fase en la que se encuentre es inviable realizar la aplicación de la STAM. A continuación, se muestran las incompatibilidades entre STAM y fases de vuelo:

1) La medida Level Capping no se puede aplicar cuando el vuelo está realizando:
    a. Carreteo: ya que el vuelo se encuentra en la pista.
    b. Aproximación: ya que el vuelo estará en disposición de aterrizar.
    c. Aterrizaje: ya que el vuelo ya estará aterrizando y las medidas ya no servirían para nada.
2) La medida Rerouting no se puede aplicar cuando el vuelo está realizando:
    a. Carreteo: ya que el vuelo se encuentra en la pista.
    b. Aproximación: ya que el vuelo estará en disposición de aterrizar.
    c. Aterrizaje: ya que el vuelo ya estará aterrizando y las medidas ya no servirían para nada.
3) La medida Minimum Departure Interval no se puede aplicar cuando el vuelo está realizando:
    a. Despegue: ya que el vuelo ya se encontrará en el aire.
    b. Ascenso: ya que el vuelo ya se encontrará en el aire.
    c. Crucero: ya que el vuelo ya se encontrará en el aire.
    d. Descenso: ya que el vuelo ya se encontrará en el aire.
    e. Aterrizaje: ya que el vuelo ya estará aterrizando y las medidas ya no servirían para nada.
4) La medida MIT no se puede aplicar cuando el vuelo está realizando:
    a. Carreteo: ya que el vuelo se encuentra en la pista.
    b. Aproximación: ya que el vuelo estará en disposición de aterrizar.
    c. Aterrizaje: ya que el vuelo ya estará aterrizando y las medidas ya no servirían para nada.

4.3.3.2.3. Situación meteorológica

En función de la situación meteorológica es inviable aplicar la medida a un vuelo, ya que esta condiciona las acciones que debe hacer el piloto en función de las circunstancias. Por ejemplo, si el hecho de aplicar un Rerouting acaba mandando a un vuelo en dirección a una tormenta, hace que la medida deje de ser eficaz y pueda poner en riesgo al vuelo.

4.3.3.2.4. Situación del vuelo

En función de la situación en la que se encuentre un vuelo es inviable aplicar una medida al vuelo, en el caso que fuera con el combustible justo para el trayecto sería inviable aplicarle según que medida.

4.3.3.2.5. Categoría de estela turbulenta

Normalmente se clasifica las aeronaves en función de su estela turbulenta. A continuación, se muestran las categorías ordenadas de menor a mayor:

- Light (L): Con un peso de 7.000 kg o menos [37].
- Medium (M): Con un peso inferior a 136.000 kg [37].
- Heavy (H): Con un peso superior o igual a 136.000 kg [37].
- Super (J): Actualmente el único modelo de este tipo es Airbus A380-800 [37].

El criterio que se ha estipulado para establecer prioridades es bastante sencillo, siempre se modificará la aeronave con menor categoría de estela turbulenta. Por ejemplo, en el caso que haya un conflicto entre una aeronave Medium y Heavy, se intentará aplicar la medida a la Medium.

4.3.3.2.6. Compañía afectada

La aplicación de STAM implica costes operativos y afectación en el plan de vuelo del vuelo modificado, es por ello por lo que es necesario tener en cuenta a que compañías se ha perjudicado anteriormente para tener un balance e intentar ser justo en la medida de lo posible.

4.3.3.3. Outputs de la elección del vuelo

A continuación, se muestran los outputs en la elección del vuelo.

4.3.3.3.1. Vuelo a modificar

El vuelo a modificar es el resultado de esta acción, teniendo en cuenta el contexto de los dos vuelos involucrados en el conflicto, se elige a cuál de los dos se le debe aplicar la STAM elegida en la acción anterior.

4.3.3.3.2. Conflicto seleccionado

En el caso que la STAM sea incompatible con los dos vuelos involucrados en el conflicto, se vuelve al conflicto seleccionado para volver a realizar la elección de la STAM, y con el historial de STAM implementadas se elige la medida más favorable dentro de las restantes.

4.3.4. Modificación del vuelo

Esta acción tiene como objetivo la modificación del vuelo elegido con la STAM que se ha considerado más adecuada.

4.3.4.1. Inputs de la Modificación del vuelo

A continuación, se muestran los inputs relacionados con la modificación del vuelo.

4.3.4.1.1. Vuelo a modificar

En este caso solo hay un input disponible, el vuelo que se debe modificar en la acción actual.

4.3.4.2. Outputs de la Modificación del vuelo

A continuación, se muestran los outputs en la modificación del vuelo.

4.3.4.2.1. Conflictos resueltos

A partir de esta acción se calcula la cantidad de conflictos resueltos con la aplicación de la medida.

4.3.4.2.2. Conflictos generados

A partir de esta acción se calcula la cantidad de conflictos generados con la aplicación de la medida.

4.3.5. Valoración de los resultados

En esta acción se hace una valoración de la aplicación de la medida.

4.3.5.1. Inputs de la valoración de los resultados

A continuación, se muestran los inputs relacionados con valoración de los resultados.

4.3.5.1.1. Conflictos resueltos

Esta acción recibe el resultado de la acción anterior para poder valorar si los resultados son positivos.

4.3.5.1.2. Conflictos generados

Esta acción recibe el resultado de la acción anterior para poder valorar si los resultados son positivos

4.3.5.2. Condicionantes de la Valoración de los resultados

A continuación, se muestran los condicionantes en la valoración de los resultados.

4.3.5.2.1. Situación general

En el caso que la aplicación de la medida haya resuelto todos los conflictos generados se da por finalizado el proceso de resolución de conflictos.

4.3.5.2.2. Balance de conflictos

A partir de los conflictos resueltos y los generados se valora si la aplicación de la medida a ese vuelo ha sido positiva. Si la aplicación de la medida genera dos conflictos y resuelve uno se considera que la aplicación de la medida ha sido negativa.

4.3.5.3. Outputs de la valoración de los resultados

A continuación, se muestran los outputs en valoración de los resultados.

4.3.5.3.1. Conflictos detectados

Si la aplicación de la medida da un resultado positivo o directamente resuelve todos los conflictos, se vuelve al punto inicial para resolver los conflictos pendientes o finalizar el proceso de resolución de conflictos.

4.3.5.3.2. STAM a aplicar

En el caso que la aplicación de la medida sea negativa, se vuelve al estado de STAM a aplicar para volver a iniciar la acción de elección de vuelo y escoja el otro vuelo si es posible. Si no fuera posible la propia acción tomaría las acciones necesarias para buscar alternativas.

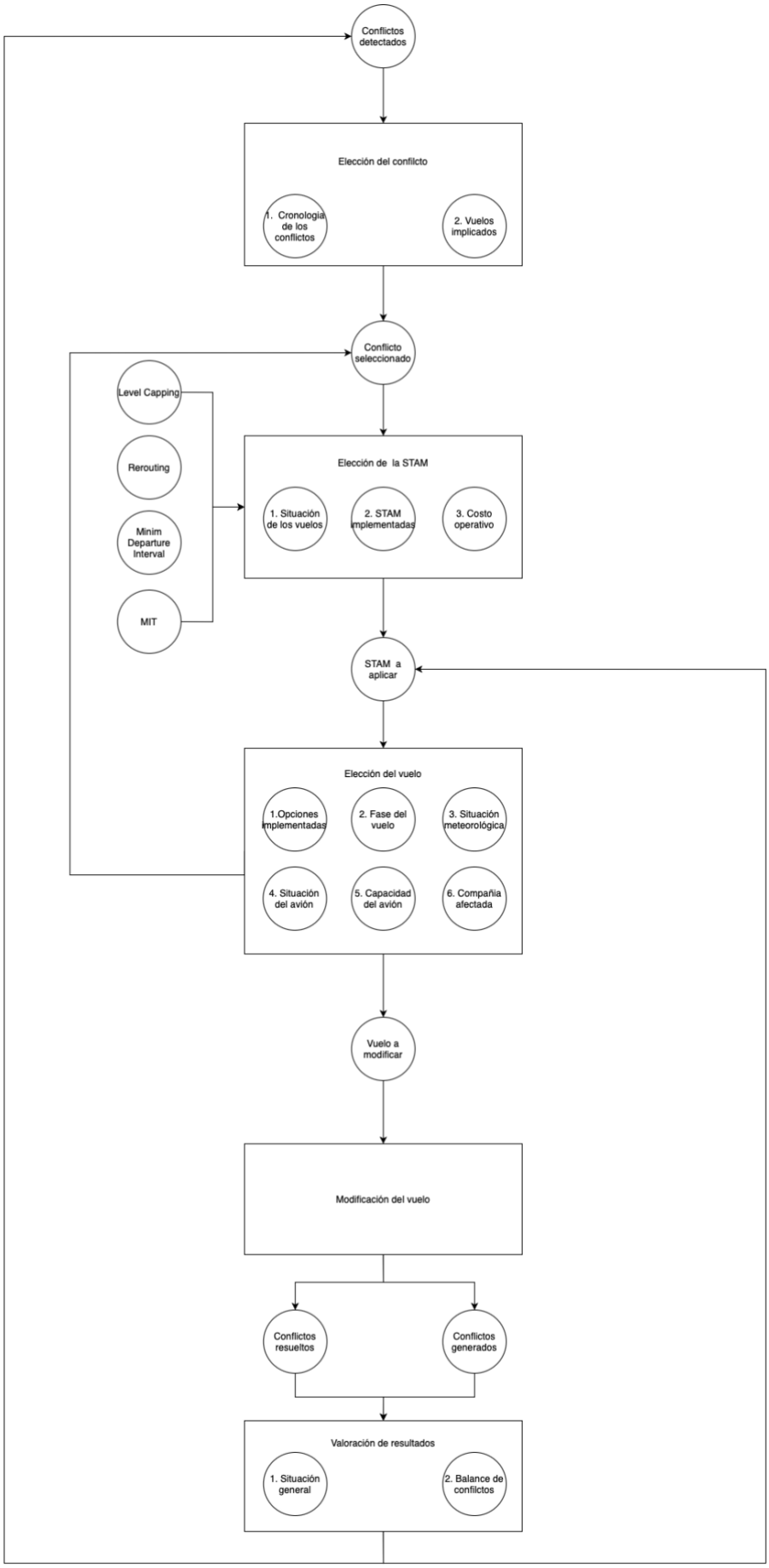


Fig. 4.6 Modelo creado para la resolución de conflictos. Fuente [28].

5. CASO DE USO

Una vez planteado el modelo, se han creado conflictos imaginarios para poder aplicar la metodología comentada anteriormente.

5.1. Creación de los conflictos

Los conflictos imaginarios se han creado a través de los planes de vuelo extraídos de la web Flight Planner [38]. Ante la imposibilidad de hacer el procedimiento visto en Nosedal et al. [2], por la carencia de datos reales y conocimiento en programación, se han generado conflictos imaginarios con un sistema más sencillo.

A través de la web Flight Planner [38] se ha buscado rutas nacionales que coincidieran por el mismo punto fijo del mapa con una distancia vertical de menos de 1.000 pies (10 FL), siendo posibles conflictos si coincidieran en ese punto en el mismo momento [30].

5.2. Conflictos imaginarios

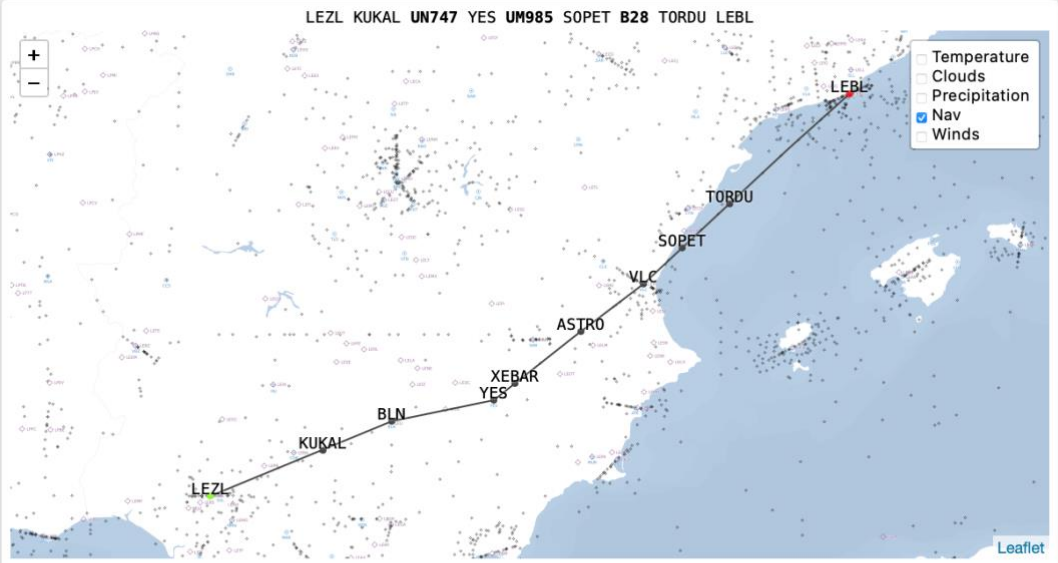
A partir de ir probando combinaciones entre dos planes de vuelo, se encuentran los conflictos imaginarios con los que se podrá aplicar la metodología implementada en el trabajo. Mediante este proceso se han podido detectar 3 conflictos.

5.2.1. Primer conflicto imaginario

El primer conflicto que se ha creado con Flight Planner [38], está compuesto por un par de vuelos con direcciones opuestas, ya que uno tiene como origen LEBL (LEBL to LEMG) y el otro lo tiene como destinación (LEZL to LEBL).

5.2.1.1. From LEZL to LEBL

El vuelo con origen en Sevilla-San Pablo (LEZL) y destinación en Josep Tarradellas-El Prat (LEBL), pasa por los puntos observados en la Figura 5.1.

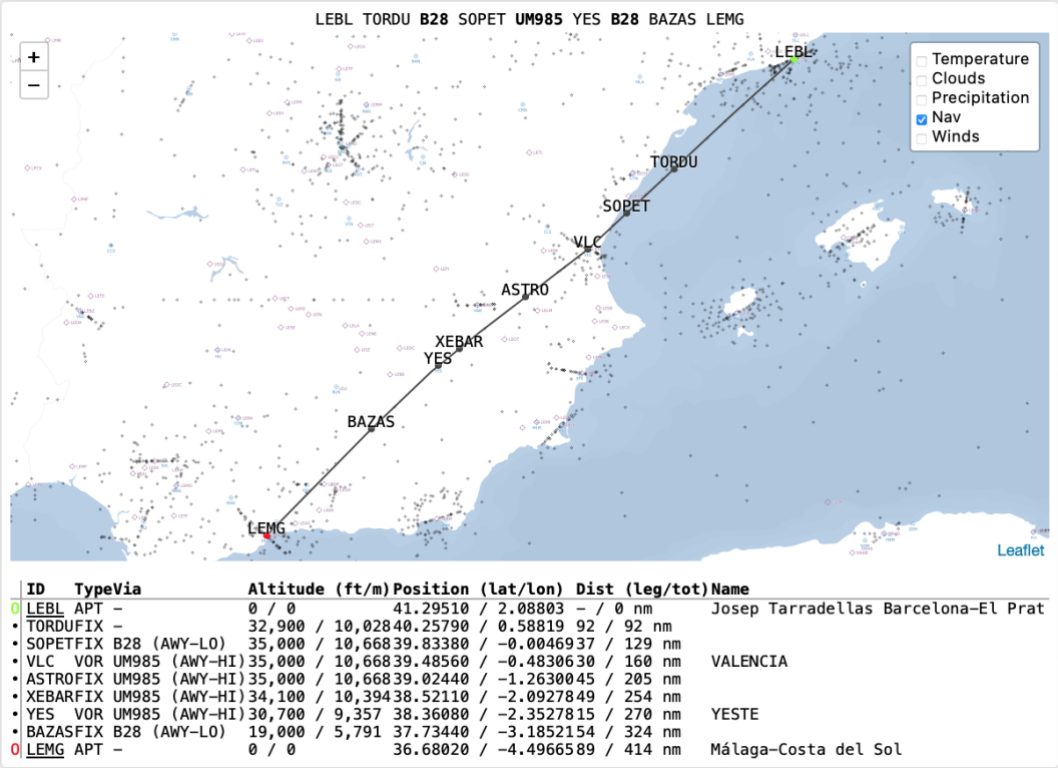


	ID	TypeVia	Altitude (ft/m)	Position (lat/lon)	Dist (leg/tot)	Name
0	LEZL	APT –	0 / 0	37.41790 / -5.89309	- / 0 nm	Sevilla-San Pablo
•	KUKAL	FIX –	25,800 / 7,864	37.86870 / -4.4808172	/ 72 nm	
•	BLN	VOR UN747 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	38.15250 / -3.6250043	/ 116 nm	BAILEN
•	YES	VOR UN747 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	38.36080 / -2.3527861	/ 177 nm	YESTE
•	XEBAR	FIX UM985 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	38.52110 / -2.0927815	/ 193 nm	
•	ASTRO	FIX UM985 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	39.02440 / -1.2630049	/ 242 nm	
•	VLC	VOR UM985 (AWY-HI)	34,300 / 10,455	39.48560 / -0.4830645	/ 288 nm	VALENCIA
•	SOPET	FIX UM985 (AWY-HI)	27,700 / 8,443	39.83380 / -0.0046930	/ 318 nm	
•	TORDU	FIX B28 (AWY-LO)	19,700 / 6,005	40.25790 / 0.58819	37 / 355 nm	
0	LEBL	APT –	0 / 0	41.29510 / 2.08803	92 / 448 nm	Josep Tarradellas Barcelona-El Prat

Fig. 5.1. Plan de vuelo de LEZL to LEBL. Fuente [39].

5.2.1.2. From LEBL to LEMG

El vuelo con origen en Josep Tarradellas-El Prat (LEBL) y destinación en Málaga-Costa del Sol (LEMG), pasa por los puntos observados en la Figura 5.2.



	ID	TypeVia	Altitude (ft/m)	Position (lat/lon)	Dist (leg/tot)	Name
0	LEBL	APT –	0 / 0	41.29510 / 2.08803	- / 0 nm	Josep Tarradellas Barcelona-El Prat
•	TORDU	FIX –	32,900 / 10,028	40.25790 / 0.58819	92 / 92 nm	
•	SOPET	FIX B28 (AWY-LO)	35,000 / 10,668	39.83380 / -0.0046937	/ 129 nm	
•	VLC	VOR UM985 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	39.48560 / -0.4830630	/ 160 nm	VALENCIA
•	ASTRO	FIX UM985 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	39.02440 / -1.2630045	/ 205 nm	
•	XEBAR	FIX UM985 (AWY-HI)	34,100 / 10,394	38.52110 / -2.0927849	/ 254 nm	
•	YES	VOR UM985 (AWY-HI)	30,700 / 9,357	38.36080 / -2.3527815	/ 270 nm	YESTE
•	BAZAS	FIX B28 (AWY-LO)	19,000 / 5,791	37.73440 / -3.1852154	/ 324 nm	
0	LEMG	APT –	0 / 0	36.68020 / -4.4966589	/ 414 nm	Málaga-Costa del Sol

Fig. 5.2. Plan de vuelo de LEBL to LEMG. Fuente [40].

5.2.1.3. Puntos conflictivos del primer conflicto imaginario

El conflicto entre los dos vuelos se produce en los puntos XEBAR, ASTRO y VLC, ya que los dos vuelos pasan por esos puntos con una distancia vertical de menos de 1.000 pies. Como se puede observar en la Figura 5.3. los FL de los dos vuelos en los puntos redondeados de rojo, no tienen una diferencia superior a 10 (equivalencia a 1.000 pies cuando se trata del FL).

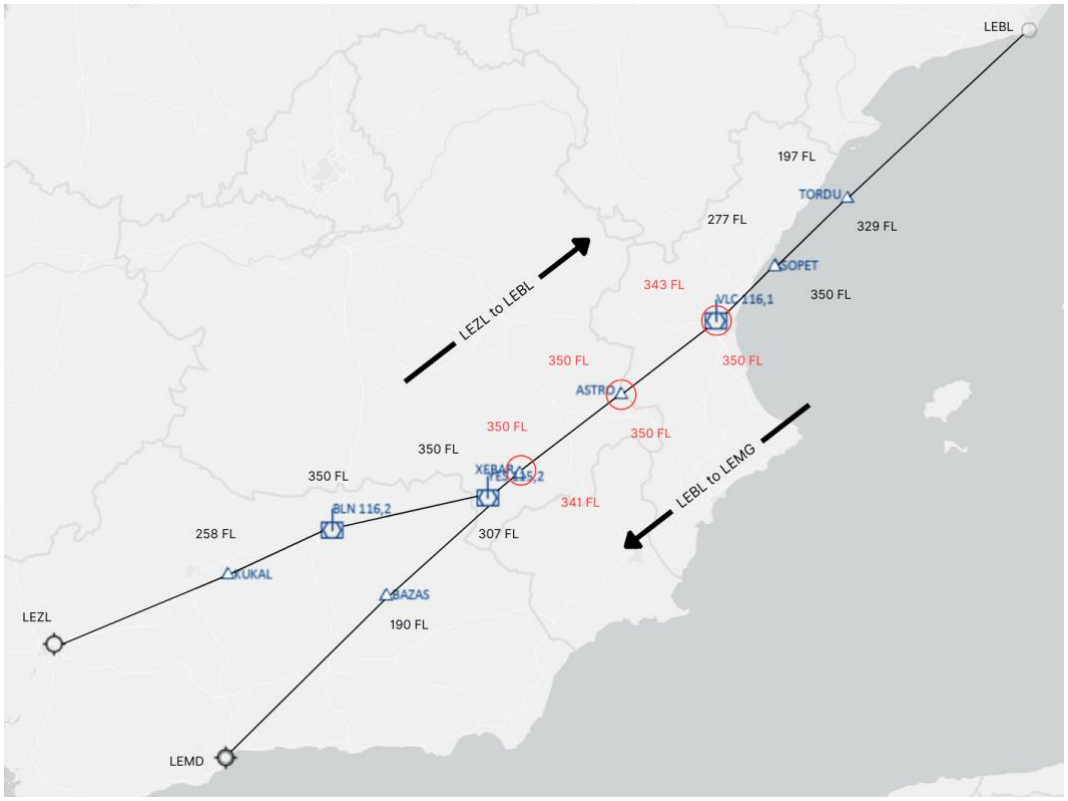


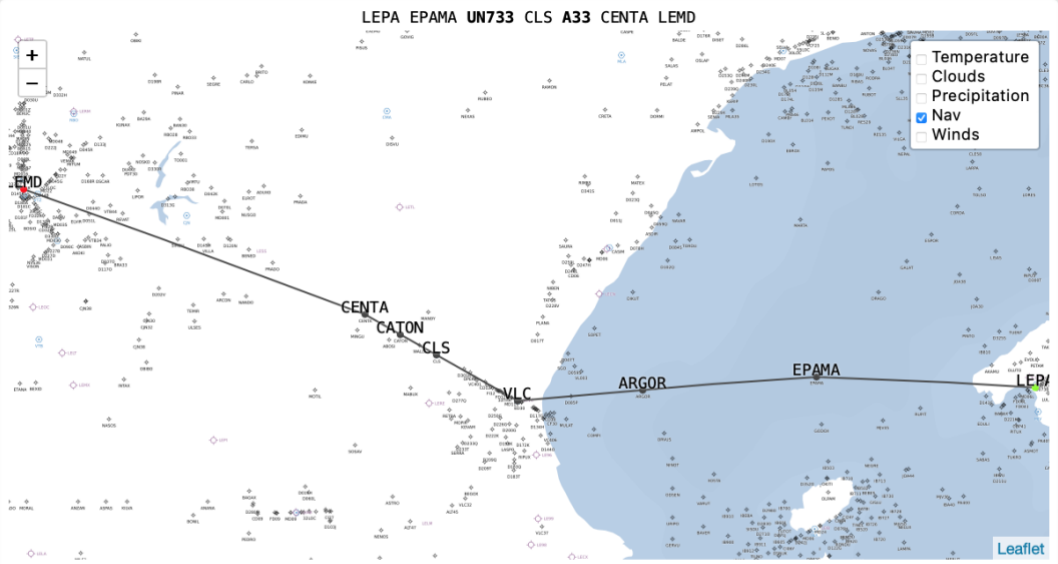
Fig. 5.3. Conflicto en XEBAR/ASTRO/VLC. Fuente [20].

5.2.2. Segundo conflicto imaginario

El segundo conflicto que se ha creado con Flight Planner [38] está compuesto por un par de vuelos con la misma destinación, LEPA to LEMD y LEMH to LEMD, para poder ver un contexto diferente donde aplicar el modelo.

5.2.2.1. From LEPA to LEMD

El vuelo con origen en Palma de Mallorca (LEPA) y destinación en Adolfo Suarez Madrid-Barajas (LEMD), pasa por los puntos observados en la Figura 5.4.

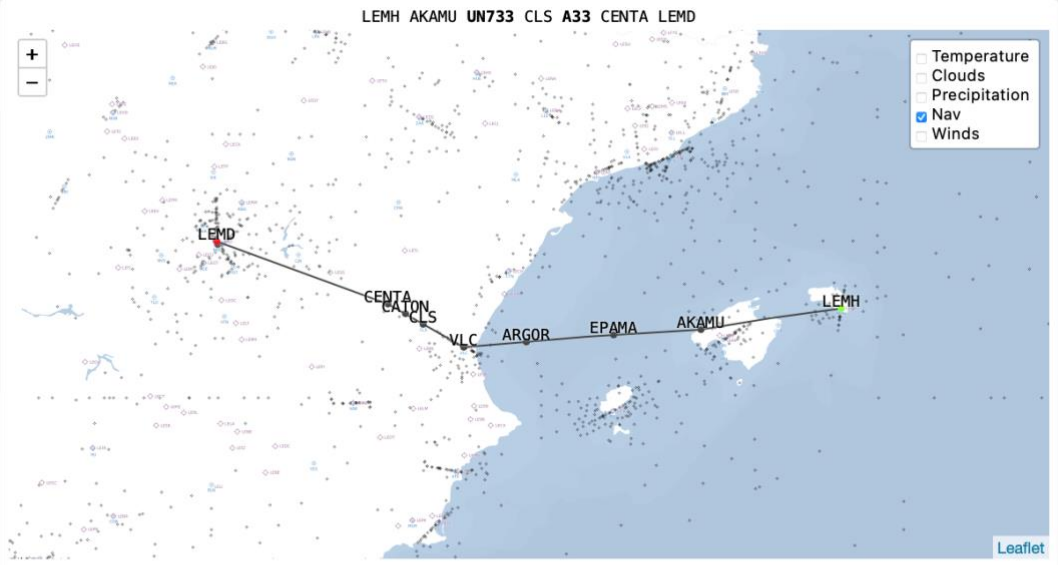


	ID	Type	Via	Altitude (ft/m)	Position (lat/lon)	Dist (leg/tot)	Name
0	LEPA	APT	–	0 / 0	39.55170 / 2.73889	– / 0 nm	Palma de Mallorca
•	EPAMA	FIX	–	22,400 / 6,828	39.60310 / 1.38038	62 / 62 nm	
•	ARGOR	FIX	UN733 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	39.53860 / 0.29872	50 / 113 nm	
•	VLC	VOR	UN733 (AWY-HI)	33,000 / 10,058	39.48560 / -0.48306	36 / 149 nm	VALENCIA
•	CLS	VOR	UN733 (AWY-HI)	27,300 / 8,321	39.70720 / -0.98633	26 / 176 nm	CALLES (VALENCIA)
•	CATON	FIX	A33 (AWY-LO)	24,700 / 7,529	39.80530 / -1.21167	11 / 188 nm	
•	CENTA	FIX	A33 (AWY-LO)	22,200 / 6,767	39.90060 / -1.43200	11 / 199 nm	
0	LEMD	APT	–	0 / 0	40.49530 / -3.56020	103 / 303 nm	Adolfo Suárez Madrid-Barajas

Fig. 5.4. Plan de vuelo de LEPA to LEMD. Fuente [41].

5.2.2.2. From LEMH to LEMD

El vuelo con origen en Menorca (LEMH) y destinación en Adolfo Suarez Madrid-Barajas (LEMD), pasa por los puntos observados en la Figura 5.5.



	ID	Type	Via	Altitude (ft/m)	Position (lat/lon)	Dist (leg/tot)	Name
0	LEMH	APT	–	0 / 0	39.86260 / 4.21866	– / 0 nm	Menorca
•	AKAMU	FIX	–	29,100 / 8,870	39.65790 / 2.47139	81 / 81 nm	
•	EPAMA	FIX	UN733 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	39.60310 / 1.38038	50 / 132 nm	
•	ARGOR	FIX	UN733 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	39.53860 / 0.29872	50 / 182 nm	
•	VLC	VOR	UN733 (AWY-HI)	33,000 / 10,058	39.48560 / -0.48306	36 / 218 nm	VALENCIA
•	CLS	VOR	UN733 (AWY-HI)	27,300 / 8,321	39.70720 / -0.98633	26 / 245 nm	CALLES (VALENCIA)
•	CATON	FIX	A33 (AWY-LO)	24,700 / 7,529	39.80530 / -1.21167	11 / 257 nm	
•	CENTA	FIX	A33 (AWY-LO)	22,200 / 6,767	39.90060 / -1.43200	11 / 269 nm	
0	LEMD	APT	–	0 / 0	40.49530 / -3.56020	103 / 373 nm	Adolfo Suárez Madrid-Barajas

Fig. 5.5. Plan de vuelo de LEMH to LEMD. Fuente [42].

5.2.2.3. Puntos conflictivos del segundo conflicto imaginario

El conflicto se produce a partir del punto ARGOR hasta el final de los dos vuelos, ya que hacen la misma ruta con una distancia vertical inferior a 1.000 pies. Como se puede observar en la Figura 5.6, el FL coincide en los puntos ARGOR, VLC, CLS, CATON y CENTA.

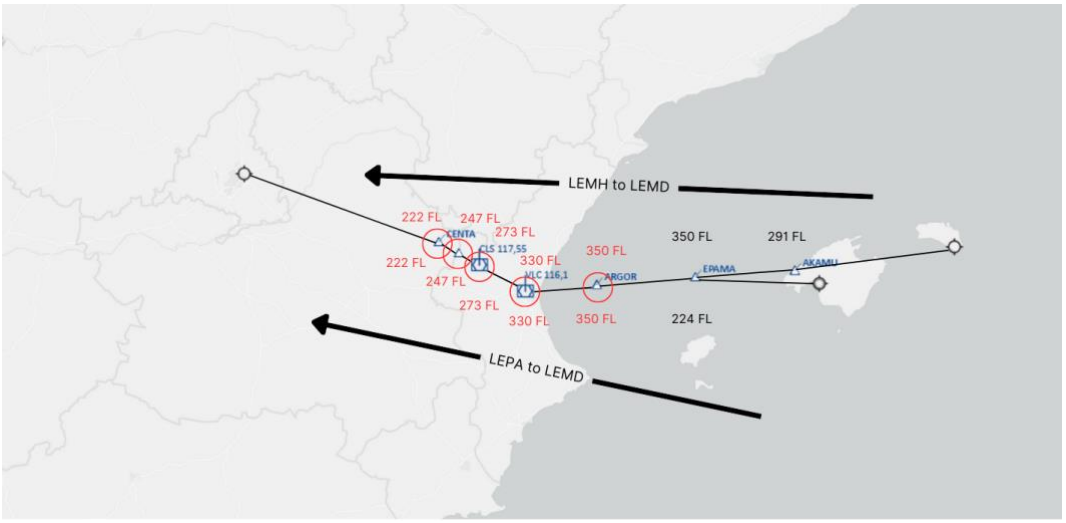


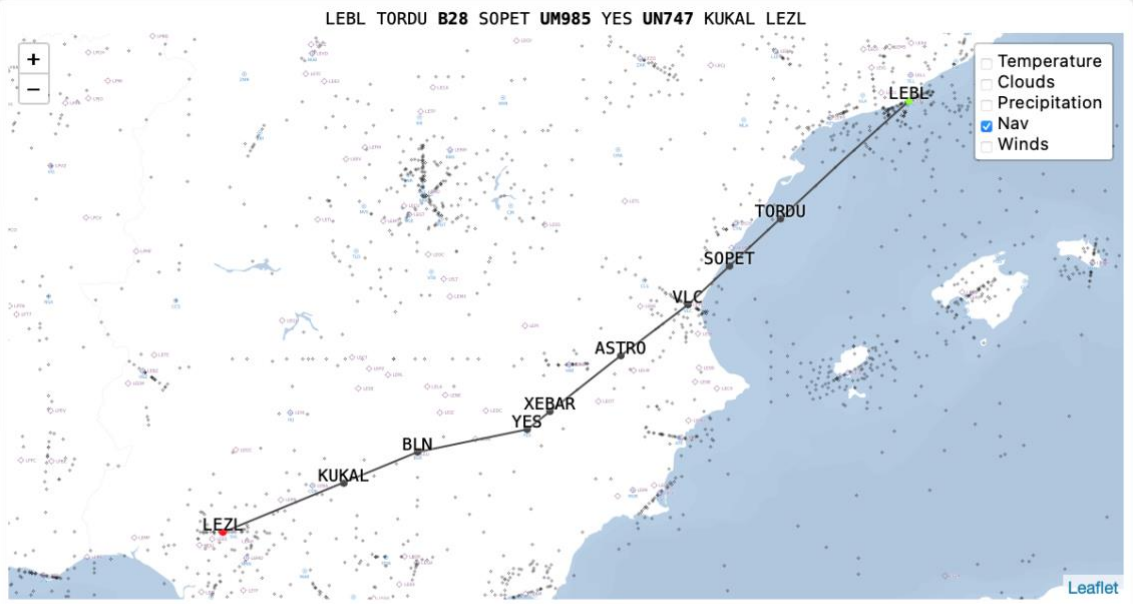
Fig. 5.6. Conflicto en CENTA/CATON/CLS/VLC/ARGOR. Fuente [20].

5.2.3. Tercer conflicto imaginario

El tercer conflicto imaginario que se ha creado a través de Flight Planner [38] está compuesto por un par de vuelos que hacen la misma ruta, pero de forma opuesta. Los vuelos que lo componen son LEBL to LEZL y LEZL to LEBL.

5.2.3.1. From LEBL to LEZL

El vuelo con origen en Josep Tarradellas-El Prat (LEBL) y destinación en Sevilla-San Pablo (LEZL), pasa por los puntos observados en la Fig. 5.7.



	ID	TypeVia	Altitude (ft/m)	Position (lat/lon)	Dist (leg/tot)	Name
0	LEBL	APT –	0 / 0	41.29510 / 2.08803	– / 0 nm	Josep Tarradellas Barcelona-El Prat
•	TORDUFIX	–	32,900 / 10,028	40.25790 / 0.58819	92 / 92 nm	
•	SOPETFIX	B28 (AWY-LO)	35,000 / 10,668	39.83380 / -0.0046937	129 nm	
•	VLC	VOR UM985 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	39.48560 / -0.4830630	160 nm	VALENCIA
•	ASTROFIX	UM985 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	39.02440 / -1.2630045	205 nm	
•	XEBARFIX	UM985 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	38.52110 / -2.0927849	254 nm	
•	YES	VOR UM985 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	38.36080 / -2.3527815	270 nm	YESTE
•	BLN	VOR UN747 (AWY-HI)	24,900 / 7,590	38.15250 / -3.6250061	331 nm	BAILEN
•	KUKALFIX	UN747 (AWY-HI)	15,500 / 4,724	37.86870 / -4.4808143	375 nm	
0	LEZL	APT –	0 / 0	37.41790 / -5.8930972	448 nm	Sevilla-San Pablo

Fig. 5.7. Plan de vuelo de LEBL to LEZL. Fuente [43].

5.2.3.2. From LEZL to LEBL

El vuelo con origen en Sevilla-San Pablo (LEZL) y destinación en Josep Tarradellas-El Prat (LEBL), pasa por los puntos observados en la Fig. 5.1.

5.2.3.3. Puntos conflictivos del tercer conflicto imaginario

El conflicto se produce en los puntos YES, XEBAR, ASTRO y VLC, debido a que coinciden por el mismo punto con una distancia inferior a 1.000 pies. Como se puede observar en la Figura 5.8. la diferencia entre los FL en los puntos YES, XEBAR, ASTRO y VLC es inferior a 10 (equivalencia a 1.000 pies cuando se trata del FL).

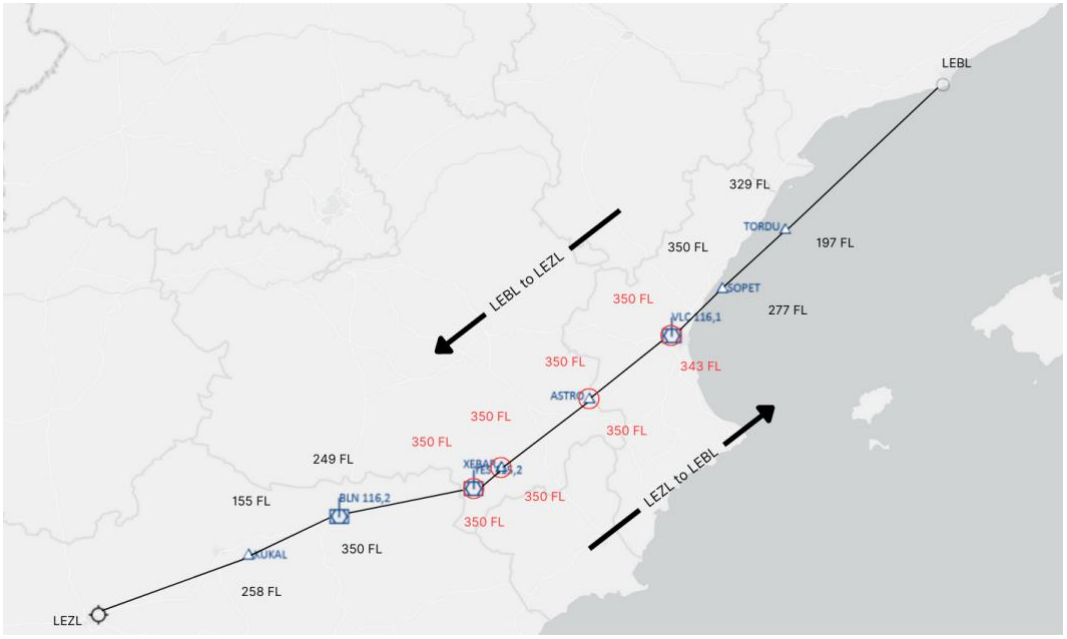


Fig. 5.8. Conflicto en YES/XEBAR/ASTRO/VLC. Fuente [20].

5.3. Aplicación del modelo a los conflictos imaginarios

Para la resolución de los conflictos imaginarios se aplica el modelo presentado en el capítulo anterior. Al tratarse de conflictos imaginarios la cronología de los conflictos está indefinida, por ello se tratará los conflictos en el orden que se los ha presentado.

5.3.1. Resolución del primer conflicto imaginario

Una vez hecha la elección del conflicto a resolver, es necesario escoger que STAM se debe aplicar para resolver el conflicto de la forma más eficiente y adecuada, en función del contexto que lo rodea.

5.3.1.1. Elección de la STAM del primer conflicto imaginario

El primer conflicto está formado por los vuelos LEZL to LEBL y LEBL to LEMG, porque pasan por los puntos XEBAR, ASTRO y VLC con una distancia vertical inferior a la mínima.

Los vuelos realizan rutas con direcciones opuestas, es por ello por lo que aplicar una STAM como Minimum Departure Interval o MIT es inviable, ya que no se tratan de vuelos secuenciales. Por lo tanto, las opciones disponibles son Rerouting y Level Capping.

Al tratarse de un conflicto imaginario el impacto que puede generar hacer un Rerouting es muy difícil de prever, es por ello por lo que se ha optado por la elección de la medida **Level Capping.**

5.3.1.2. Elección del vuelo del primer conflicto imaginario

Los dos vuelos implicados en el conflicto se encuentran en la fase de Crucero y Descenso de su trayecto, entonces se encuentran en un contexto muy similar. La principal diferencia es que la fase de Crucero a 350 FL del vuelo LEZL to LEBL está compuesta por 4 puntos de ruta (Figura 5.9.) y en cambio la del vuelo LEBL to LEMG está compuesta por 3 puntos de ruta (Figura 5.10), en consecuencia, aplicar la medida Level Capping condiciona menos el vuelo LEBL to LEMG.

	ID	TypeVia	Altitude (ft/m)	Position (lat/lon)	Dist (leg/tot)	Name
0	LEZL	APT –	0 / 0	37.41790 / -5.89309	- / 0 nm	Sevilla-San Pablo
•	KUKALFIX	–	25,800 / 7,864	37.86870 / -4.4808172	/ 72 nm	
•	BLN	VOR UN747 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	38.15250 / -3.6250043	/ 116 nm	BAILEN
•	YES	VOR UN747 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	38.36080 / -2.3527861	/ 177 nm	YESTE
•	XEBARFIX	UM985 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	38.52110 / -2.0927815	/ 193 nm	
•	ASTROFIX	UM985 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	39.02440 / -1.2630049	/ 242 nm	
•	VLC	VOR UM985 (AWY-HI)	34,300 / 10,455	39.48560 / -0.4830645	/ 288 nm	VALENCIA
•	SOPETFIX	UM985 (AWY-HI)	27,700 / 8,443	39.83380 / -0.0046930	/ 318 nm	
•	TORDUFIX	B28 (AWY-LO)	19,700 / 6,005	40.25790 / 0.58819	37 / 355 nm	
0	LEBL	APT –	0 / 0	41.29510 / 2.08803	92 / 448 nm	Josep Tarradellas Barcelona-El Prat

Fig. 5.9. Puntos de ruta durante fase Crucero (LEZL to LEBL). Fuente [39].

	ID	TypeVia	Altitude (ft/m)	Position (lat/lon)	Dist (leg/tot)	Name
0	LEBL	APT –	0 / 0	41.29510 / 2.08803	- / 0 nm	Josep Tarradellas Barcelona-El Prat
•	TORDUFIX	–	32,900 / 10,028	40.25790 / 0.58819	92 / 92 nm	
•	SOPETFIX	B28 (AWY-LO)	35,000 / 10,668	39.83380 / -0.0046937	/ 129 nm	
•	VLC	VOR UM985 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	39.48560 / -0.4830630	/ 160 nm	VALENCIA
•	ASTROFIX	UM985 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	39.02440 / -1.2630045	/ 205 nm	
•	XEBARFIX	UM985 (AWY-HI)	34,100 / 10,394	38.52110 / -2.0927849	/ 254 nm	
•	YES	VOR UM985 (AWY-HI)	30,700 / 9,357	38.36080 / -2.3527815	/ 270 nm	YESTE
•	BAZASFIX	B28 (AWY-LO)	19,000 / 5,791	37.73440 / -3.1852154	/ 324 nm	
0	LEMG	APT –	0 / 0	36.68020 / -4.4966589	/ 414 nm	Málaga-Costa del Sol

Fig. 5.10. Puntos de ruta durante fase Crucero (LEBL to LEMG). Fuente [40].

La situación meteorológica y la del vuelo se da por hecho que es la correcta para poder aplicar la medida, debido a la falta de información correspondiente a los vuelos.

Los dos vuelos sé realizan con dos aeronaves Heavy (normalmente A320[12]), según los datos observados en la web Flight Aware sobre cada vuelo [44] [45].

La compañía que ofrece principalmente estos vuelos es Vueling, por lo que no hay prioridad a la hora de escoger a que vuelo se le aplica el Level Capping. También ofrece estos vuelos Ryanair, pero con una frecuencia mucho menor [44] [45].

A partir de los factores planteados, se ha escogido el vuelo **LEBL to LEMG** para la aplicación del Level Capping, debido a que la afectación de esta medida al vuelo es menor respecto al otro vuelo implicado.

5.3.1.3. Modificación del vuelo del primer conflicto imaginario

A partir de las acciones realizadas anteriormente, se ha obtenido la medida a aplicar, Level Capping, y el vuelo al que realizarle la medida, LEBL to LEMG.

[12] A320: Serie de aviones birreactores de fuselaje estrecho y corto-medio alcance desarrollados y fabricados por Airbus.

El conflicto entre los dos vuelos de este primer conflicto se genera durante la fase de Crucero y la de Descenso, por lo que se ha decidido reducir el nivel de vuelo al que llegará la aeronave durante la fase de Ascenso. Para que no haya conflicto, el nivel de vuelo máximo al cual puede llegar el vuelo LEBL to LEMG es de **330 FL**, de este modo durante todo el trayecto mantendrá la distancia vertical mínima (1.000 pies [30]).

Fig. 5.11. Resolución del primer conflicto con Level Capping. Fuente [20].

5.3.1.4. Valoración de los resultados del primer conflicto imaginario

Al tratarse de un conflicto imaginario no se dispone de los datos para poder valorar el impacto de esta medida con otros vuelos. Es por ello por lo que no se ha considerado que la medida no genere conflictos y que solo solucione el que se había planteado.

Entonces se considera que el balance de conflictos es positivo y se puede proseguir tomando las acciones pertinentes con el resto de los conflictos.

5.3.2. Resolución del segundo conflicto imaginario

Al igual que el conflicto anterior, desconocemos la cronología de los conflictos por lo que se ha decidido tratarlos con el orden con en el que se los ha planteado. A continuación, se aplican las acciones planteadas en el modelo para resolver el segundo conflicto.

5.3.2.1. Elección de la STAM del segundo conflicto imaginario

El segundo conflicto está formado por los vuelos LEPA to LEMD y LEMH to LEMD, porque pasan por los puntos ARGOR, VLC, CLS, CATON y CENTA con una distancia vertical inferior a la mínima.

Como se puede observar dos vuelos tienen como destino LEMD, esto genera que tracen exactamente la misma ruta a partir de ARGOR (Figura 5.12 y Figura 5.13.). Entonces aplicar medidas como Level Capping o Rerouting serían muy poco efectivas o ineficaces, es por ello por lo que las STAM que se adecuan más a estas condiciones son Minimum Departure Interval y MIT.

	ID	Type	Via	Altitude (ft/m)	Position (lat/lon)	Dist (leg/tot)	Name
0	LEPA	APT	–	0 / 0	39.55170 / 2.73889	– / 0 nm	Palma de Mallorca
•	EPAMA	FIX	–	22,400 / 6,828	39.60310 / 1.38038	62 / 62 nm	
•	ARGOR	FIX	UN733 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	39.53860 / 0.29872	50 / 113 nm	
•	VLC	VOR	UN733 (AWY-HI)	33,000 / 10,058	39.48560 / -0.48306	36 / 149 nm	VALENCIA
•	CLS	VOR	UN733 (AWY-HI)	27,300 / 8,321	39.70720 / -0.98633	26 / 176 nm	CALLES (VALENCIA)
•	CATON	FIX	A33 (AWY-LO)	24,700 / 7,529	39.80530 / -1.21167	11 / 188 nm	
•	CENTA	FIX	A33 (AWY-LO)	22,200 / 6,767	39.90060 / -1.43200	11 / 199 nm	
0	LEMD	APT	–	0 / 0	40.49530 / -3.56020	103 / 303 nm	Adolfo Suárez Madrid-Barajas

Fig. 5.12. Puntos de ruta en común de LEPA to LEMD con LEMH to LEMD. Fuente [41].

	ID	Type	Via	Altitude (ft/m)	Position (lat/lon)	Dist (leg/tot)	Name
0	LEMH	APT	–	0 / 0	39.86260 / 4.21866	– / 0 nm	Menorca
•	AKAMU	FIX	–	29,100 / 8,870	39.65790 / 2.47139	81 / 81 nm	
•	EPAMA	FIX	UN733 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	39.60310 / 1.38038	50 / 132 nm	
•	ARGOR	FIX	UN733 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	39.53860 / 0.29872	50 / 182 nm	
•	VLC	VOR	UN733 (AWY-HI)	33,000 / 10,058	39.48560 / -0.48306	36 / 218 nm	VALENCIA
•	CLS	VOR	UN733 (AWY-HI)	27,300 / 8,321	39.70720 / -0.98633	26 / 245 nm	CALLES (VALENCIA)
•	CATON	FIX	A33 (AWY-LO)	24,700 / 7,529	39.80530 / -1.21167	11 / 257 nm	
•	CENTA	FIX	A33 (AWY-LO)	22,200 / 6,767	39.90060 / -1.43200	11 / 269 nm	
0	LEMD	APT	–	0 / 0	40.49530 / -3.56020	103 / 373 nm	Adolfo Suárez Madrid-Barajas

Fig. 5.13. Puntos de ruta en común de LEMH to LEMD con LEPA to LEMD. Fuente [42].

En este caso se ha escogido **Minimum Departure Interval**, porqué el hecho de hacer las salidas de los vuelos espaciadas por X minutos ya soluciona el conflicto, y es una medida bastante intuitiva.

5.3.2.2. Elección del vuelo del segundo conflicto imaginario

Como se puede observar en la Figura 5.12. y la Figura 13., los dos vuelos se encuentran en fase de Crucero durante el conflicto y trazan exactamente la misma ruta hasta el final de sus trayectos, entonces no hay diferencias entre los dos contextos en este aspecto.

La principal diferencia entre los dos vuelos es la distancia de su origen hasta la zona conflictiva, LEPA está a 113 NM de ARGOR [41] y en cambio LEMH está a 182 NM, esto implica que solo puedan coincidir si el vuelo LEMH to LEMD sale antes que LEPA to LEMD, entonces la distancia mínima la deberá respetar LEPA to LEMD.

La situación meteorológica y la del vuelo se da por hecho que es la correcta para poder aplicar la medida, debido a la falta de información correspondiente a los vuelos.

Los dos vuelos se realizan con aeronaves Heavy por lo que no se priorizaría a ninguno de los dos en este sentido. También sería necesario tener en cuenta que compañía es la afectada para ser lo máximo de justos cuando se está aplicando esta medida, en este caso

las compañías principales que ofrecen estos vuelos son Air Europa, Iberia Express y Ryanair [46] [47].

A partir de los factores planteados, se ha decidido escoger **LEPA to LEMD** para la aplicación del Minimum Departure Interval debido a la distancia hasta el conflicto.

5.3.2.3. Modificación del vuelo del segundo conflicto imaginario

A partir de las acciones realizadas anteriormente, se ha obtenido la medida a aplicar, Minimum Departure Interval, y el vuelo al que realizarle la medida, LEPA to LEMD.

El conflicto se genera porque los dos trazan la misma ruta a partir de un punto de la ruta, pero la distancia de LEMH hasta el primer punto conflictivo, ARGOR, es mucho mayor que desde LEPA.

Para calcular cuántos minutos tardan los vuelos hasta llegar al punto ARGOR se ha utilizado la formula siguiente:

(NM/kts[13])*60 = minutos de trayecto.

Mediante Flight Planner, se ha obtenido que el vuelo LEPA está a una distancia de 113 NM hasta ARGOR y asciende a 250 kts [41], dando un total de 27 minutos de trayecto hasta el punto.

El vuelo LEMH está a una distancia de 132 NM hasta EPAMA yendo en fase de Ascenso a 250 kts, y desde EPAMA está a una distancia de 50 NM hasta ARGOR yendo en fase de Crucero a 450 kts [42]. De LEMH hasta EPAMA tarda 32 minutos de trayecto, y de EPAMA hasta ARGOR tarda 6 minutos de trayecto, dando un total de 38 minutos de trayecto hasta el punto.

Entonces el vuelo LEPA to LEMD, como mínimo deberá despegar con una distancia de **12 minutos** respecto a la salida de LEMH to LEMD.

5.3.2.4. Valoración de los resultados del segundo conflicto imaginario

Al igual que el primer conflicto, se trata de un conflicto imaginario del cual no se dispone de los datos para poder valorar el impacto de la medida con otros vuelos. Es por ello por lo que no se ha considerado que la medida no genere conflictos y que solo solucione el que se había planteado.

Entonces se considera que el balance de conflictos es positivo y se puede proseguir tomando las acciones pertinentes con el último conflicto planteado.

[13] Kts: Unidad de velocidad igual a una milla marina por hora.

5.3.3. Resolución del tercer conflicto imaginario

Al igual que el conflicto anterior, desconocemos la cronología de los conflictos por lo que se ha decidido tratarlos con el orden con en el que se los ha planteado. A continuación, se aplican las acciones planteadas en el modelo para resolver el tercer conflicto.

5.3.3.1. Elección de la STAM del tercer conflicto imaginario

El tercer conflicto está formado por los vuelos LEBL to LEZL y LEZL to LEBL, porque pasan por los puntos YES, XEBAR, ASTRO y VLC con una distancia vertical inferior a la mínima.

En este caso los dos vuelos realizan rutas totalmente opuestas, pasan por los mismos puntos de ruta, pero en direcciones opuestas. Es por ello por lo que se ha descartado las medidas Minimum Departure Interval y MIT, ya que al tratarse de direcciones opuestas la distancias entre los dos vuelos serian excesivas y poco eficientes.

Ante el desconocimiento de las consecuencias de aplicar un Rerouting se ha optado por **Level Capping**.

5.3.3.2. Elección del vuelo del tercer conflicto imaginario

El conflicto se produce cuando LEZL to LEBL se encuentra en fase de Crucero y Descenso, y LEBL y LEZL se encuentra en fase Crucero, es por ello por lo que el contexto es bastante parecido para los dos vuelos.

La principal diferencia es que la fase de Crucero a 350 FL del vuelo LEZL to LEBL está compuesta por 4 puntos de ruta (Figura 5.9.) y en cambio la del vuelo LEBL to LEZL está compuesta por 5 puntos de ruta (Figura 5.14), en consecuencia, aplicar la medida Level Capping condiciona menos el vuelo LEZL to LEBL.

	ID	TypeVia	Altitude (ft/m)	Position (lat/lon)	Dist (leg/tot)	Name
0	LEBL	APT –	0 / 0	41.29510 / 2.08803	– / 0 nm	Josep Tarradellas Barcelona-El Prat
•	TORDUFIX	–	32,900 / 10,028	40.25790 / 0.58819	92 / 92 nm	
•	SOPETFIX	B28 (AWY-LO)	35,000 / 10,668	39.83380 / -0.0046937	129 nm	
•	VLC	VOR UM985 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	39.48560 / -0.4830630	160 nm	VALENCIA
•	ASTROFIX	UM985 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	39.02440 / -1.2630045	205 nm	
•	XEBARFIX	UM985 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	38.52110 / -2.0927849	254 nm	
•	YES	VOR UM985 (AWY-HI)	35,000 / 10,668	38.36080 / -2.3527815	270 nm	YESTE
•	BLN	VOR UN747 (AWY-HI)	24,900 / 7,590	38.15250 / -3.6250061	331 nm	BAILEN
•	KUKALFIX	UN747 (AWY-HI)	15,500 / 4,724	37.86870 / -4.4808143	375 nm	
0	LEZL	APT –	0 / 0	37.41790 / -5.8930972	448 nm	Sevilla-San Pablo

Fig. 5.14. Puntos de ruta durante fase Crucero (LEBL to LEZL). Fuente [43].

La situación meteorológica y la del vuelo se da por hecho que es la correcta para poder aplicar la medida, debido a la falta de información correspondiente a los vuelos.

Los dos vuelos sé realizan con dos aeronaves Heavy (normalmente A320) según los datos observados en Flight Aware sobre cada vuelo [44] [48].

La compañía que ofrece principalmente estos vuelos es Vueling, por lo que no hay prioridad a la hora de escoger a que vuelo se le aplica el Level Capping. También ofrece estos vuelos Ryanair, pero con una frecuencia mucho menor [44] [48].

A partir de los factores planteados, se ha escogido el vuelo **LEZL to LEBL** para la aplicación del Level Capping, debido a que la afectación de esta medida al vuelo es menor respecto al otro vuelo implicado.

5.3.3.3. Modificación del vuelo del tercer conflicto imaginario

A partir de las acciones realizadas anteriormente se ha obtenido la medida a aplicar, Level Capping, y el vuelo al que realizarle la medida, LEBL to LEMG.

El conflicto entre los dos vuelos de este tercer conflicto se genera durante la fase de Crucero, por lo que se ha decidido reducir el nivel de vuelo al que llegará la aeronave durante la fase de Ascenso. Para que no haya conflicto, el nivel de vuelo máximo al cual puede llegar el vuelo LEZL to LEBL es de **340 FL**, de este modo durante todo el trayecto mantendrá la distancia vertical mínima (1.000 pies [30]).

Fig. 5.15. Resolución del tercer conflicto con Level Capping. Fuente [20].

5.3.3.4. Valoración de los resultados del tercer conflicto imaginario

Al tratarse de un conflicto imaginario no se dispone de los datos para poder valorar el impacto de esta medida con otros vuelos. Es por ello por lo que no se ha considerado que la medida no genere conflictos y que solo solucione el que se había planteado.

Entonces se considera que el balance de conflictos es positivo y se da por finalizado el procedimiento de resolución de conflictos.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Una vez planteados y resueltos los escenarios, se han obtenido los resultados de la aplicación del modelo presentado. La resolución de los tres conflictos ha sido posible mediante la aplicación de dos Level Capping y un Minimum Interval Departure.

6.1. Resultados del primer conflicto

A partir de la aplicación del modelo con el primer conflicto, se ha realizado un Level Capping de 330 FL al vuelo LEBL to LEMG para evitar la vulneración de la distancia vertical mínima durante los puntos XEBAR, ASTRO y VLC. Esta medida ha generado que la fase de Crucero sea más extensa, y finalice en el punto XEBAR en vez de en ASTRO (Figura 6.1.).

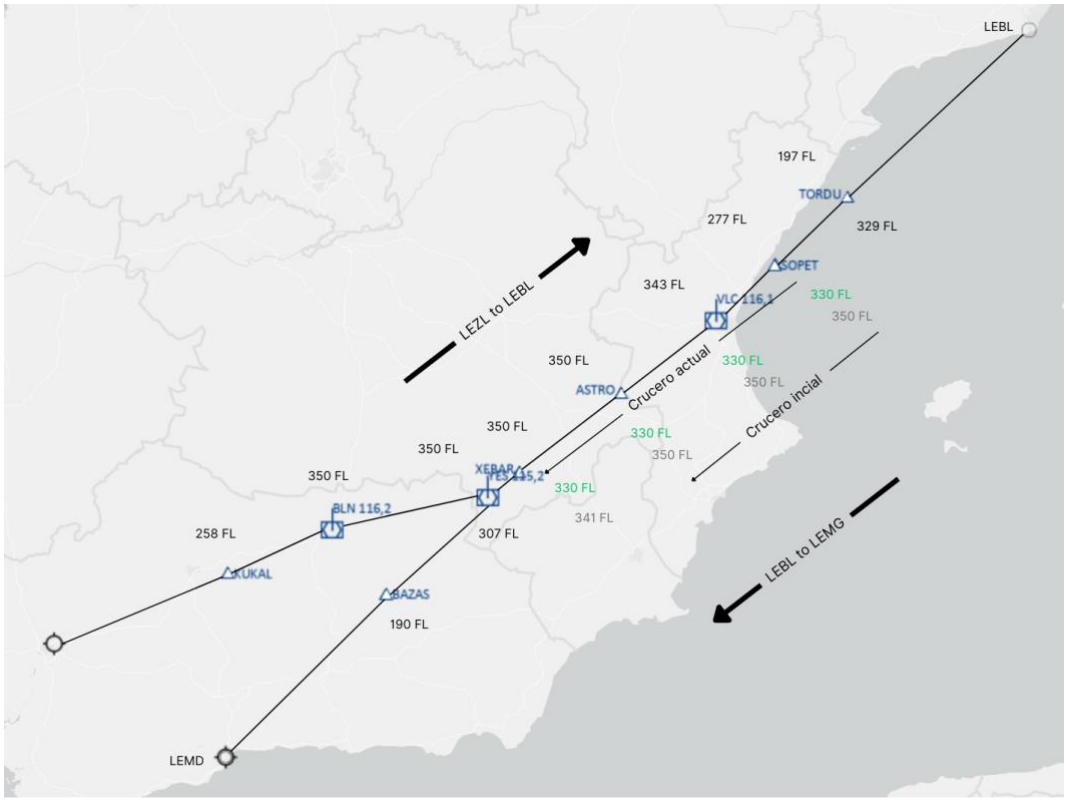


Fig. 6.1. Comparación de la fase Crucero de LEBL to LEMG después del Level Capping. Fuente [20]

Aunque el nivel de vuelo óptimo sea 350 FL, el hecho que la fase de Crucero se alargue también permite suavizar el impacto en el costo operativo de la medida que se ha aplicado. La aplicación del Level Capping ha permitido solucionar el conflicto inicial implementado la medida que se adaptaba más al contexto del vuelo.

6.2. Resultados del segundo conflicto

A partir de la aplicación del modelo con el segundo conflicto, se ha realizado un Minimum Departure Interval de 12 minutos al vuelo LEPA to LEMD para evitar la

vulneración de la distancia vertical mínima durante los puntos ARGOR, VLC, CLS, CATON y CENTA.

Mediante esta medida se asegura que los dos vuelos (LEPA to LEMD y LEMH to LEMD) no puedan coincidir en el punto ARGOR en el mismo momento, ya que a partir de él trazan exactamente la misma ruta.

En el caso que el vuelo LEPA to LEMD despegará antes que el vuelo LEMH to LEMD, desaparecería la posibilidad de generar un conflicto durante el vuelo.

6.3. Resultados del tercer conflicto

A partir de la aplicación de la modelo con el primer conflicto, se ha realizado un Level Capping de 340 FL al vuelo LEZL to LEBL para evitar la vulneración de la distancia vertical mínima durante los puntos YES, XEBAR, ASTRO y VLC. Esta medida ha generado que la fase de Crucero sea más extensa, y finalice en el punto ASTRO en vez de en VLC (Figura 6.2.).

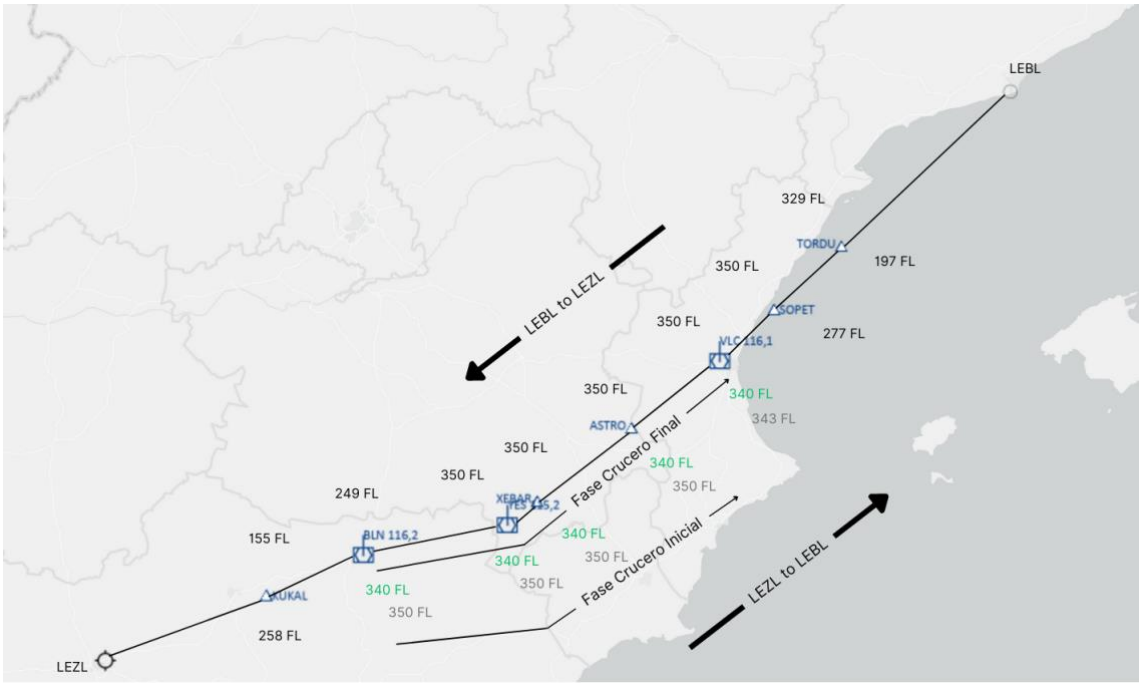


Fig. 6.2. Comparación de la fase Crucero de LEZL to LEBL después del Level Capping. Fuente [20]

Aunque el nivel de vuelo óptimo sea 350 FL, el hecho que la fase de Crucero se alargue también permite suavizar el impacto en el costo operativo de la medida que se ha aplicado. La aplicación del Level Capping ha permitido solucionar el conflicto inicial implementado la medida que se adaptaba más al contexto del vuelo.

6.4. Compatibilidad entre primer y tercer conflicto

El primer y tercer conflicto tienen en común uno de los dos vuelos, LEZL to LEBL, y aunque la resolución de los dos se ha tratado por separado, se ha intentado que las medidas sean compatibles.

De este modo, aunque la aplicación del Level Capping al vuelo LEZL to LEBL modifique las condiciones del primer conflicto, sigue siendo compatible con el Level Capping aplicado en el vuelo LEBL to LEMG. Como se puede observar en la Figura 6.3., durante la fase de crucero los tres vuelos mantienen la separación mínima vertical correspondiente.

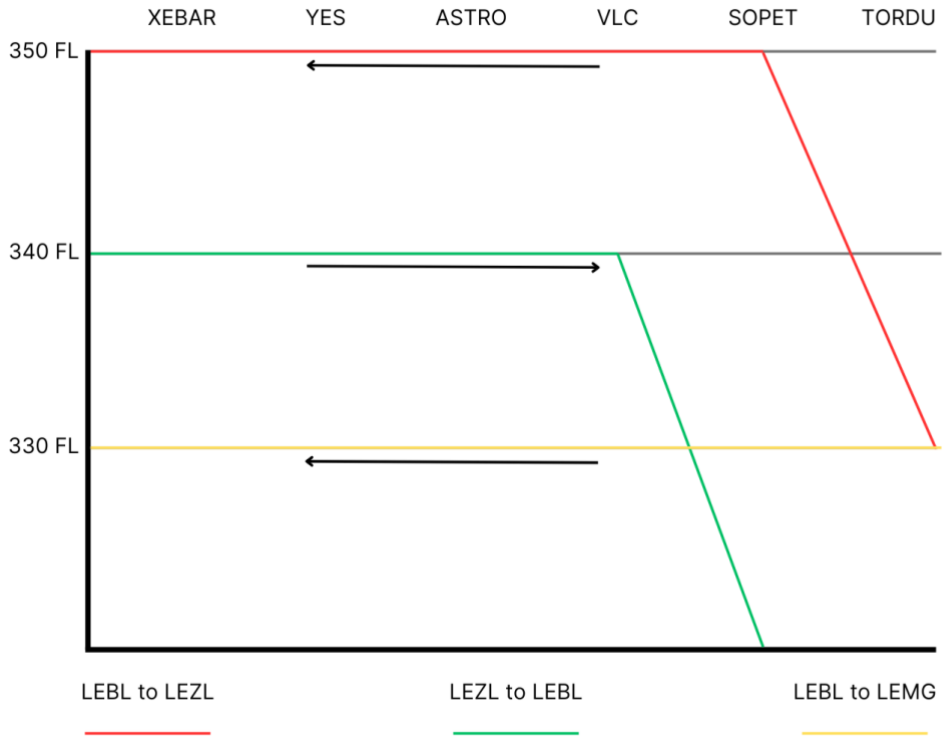


Fig. 6.3. Niveles de vuelo en fase de crucero de LEBL to LEZL, LEZL to LEBL y LEBL to LEMG.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

En este capítulo se expone extraídas durante el desarrollo del TFG, con la intención de exponer las reflexiones relacionadas con todos los aspectos que lo han rodeado y los conceptos adquiridos durante su transcurso.

7.1. Conclusiones por objetivos

Al inicio del trabajo se plantearon unos objetivos a partir de los cuales llegar al objetivo general del trabajo, Buscar alternativas STAM que permitan reducir la complejidad. A continuación, se expone las conclusiones extraídas de cada uno de ellos una vez finalizado el trabajo:

- O1: Análisis del estado del arte: El primer objetivo consistía en la comprensión del trabajo hecho por Nosedal et al. [2] y el RoadMap planteado por SESAR [1]. Una vez finalizado el trabajo se puede concluir que el objetivo se ha cumplido, ya que gran parte del trabajo se ha sustentado a partir de los conceptos aprendidos en Nosedal et al. [2] y el RoadMap de SESAR [1]. A partir del RoadMap de SESAR [1] se ha podido ver qué futuro depara la gestión del tráfico aéreo, y con el trabajo hecho por Nosedal et al. [2] se ha podido observar cómo detectar conflictos y resolverlos a partir de STAM.
- O2: Análisis y aplicación del método para identificar conflictos: El segundo objetivo consistía en la elaboración de un método para identificar conflictos a partir de lo previamente visto en Nosedal et al. [2]. El objetivo se puede dar por cumplido, pero con varios matices, debido a que se ha detectado conflictos imaginarios a través de Flight Planner [38], pero la idea inicial era hacerlo mediante el procedimiento empleado en Nosedal et al. [2] y a partir de conflictos generados con datos reales aún más preciso, para posteriormente poner a prueba el modelo con simulaciones. Por desgracia, esto no ha sido posible y se han tenido que buscar alternativas para poder emplear el procedimiento creado durante el desarrollo de este trabajo.
- O3: Identificar la medida para la resolución de conflictos: El tercer objetivo consistía en la elección de la medida más adecuada teniendo en cuenta la situación de los vuelos. Se considera que se ha llegado a la meta del objetivo, ya que el modelo ha permitido crear un procedimiento a partir del cual valorar el contexto del conflicto y los vuelos individualmente. Además, como se puede observar en la resolución de los conflictos la medida siempre ha tenido como prioridad

adaptar-se a partir de los condicionantes que se han considerado más trascendentes.

- O4: Formulación del algoritmo: El cuarto y último objetivo consistía en la creación de un algoritmo que permitiera resolver los conflictos mediante la aplicación de la STAM adecuada. El objetivo se considera cumplido parcialmente, ya que se ha podido crear un modelo con el que resolver conflictos con la medida STAM que se consideraba más adecuada, pero no se ha desarrollado un algoritmo en sí. A la vez, los resultados extraídos podrían a ver sido más enriquecedores, si los conflictos con los que se hubiera trabajado fueran reales y se hubiera podido acceder al contexto completo de los vuelos.

Para concluir, el trabajo ha cumplido con los objetivos planteados, pero con un camino diferente al que estaba previsto al inicio de este. Inicialmente se plantearon unos objetivos sin saber los imprevistos que podían aparecer durante el transcurso del trabajo, pero la adaptación ha sido constante y se han buscado alternativas para poder completar el trabajo con un resultado satisfactorio.

7.2. Trabajo a futuro

Una vez finalizado el trabajo, se observa que ha permitido crear un modelo a partir del cual resolver conflictos, pero abre puertas a nuevos enfoques del tema. Como se ha comentado anteriormente, no se ha podido trabajar con conflictos reales, pero de cara al futuro sería muy interesante hacerlo si es posible para poder tener resultados más fiables. Además, también se podría incorporar la simulación mediante Python[14], para poder hacer la detección de conflictos con el procedimiento de Nosedal et al. [2], la cual permitiría obtener conflictos más precisos y aplicar las STAM de una forma más precisa.

[14] Python: Lenguaje de programación de alto nivel y propósito general muy utilizado.

8. REFERENCIAS

[1] *SESAR joint undertaking*. Sesarju.Eu. Recuperado el 10 de marzo de 2023.

https://www.sesarju.eu/masterplan2020

[2] Nosedal, J., Piera, M. A., Ruiz, S., & Nosedal, A. (2014). An efficient algorithm for smoothing airspace congestion by fine-tuning take-off times. *Transportation Research. Part C, Emerging Technologies*, *44*, 171–184.

https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.03.017

[3] *ATM - Air Traffic Management*. Ansperformance.eu. Recuperado el 7 de abril de 2023.

https://ansperformance.eu/acronym/atm/

[4] Thomas, S. (2001). CIVILIAN AND MILITARY AIR TRAFFIC CONTROL IN THE EU.

https://www.europarl.europa.eu/meetdocs/committees/rett/20020121/297568EN.pdf

[5] *Air traffic management (ATM)*. Icao.int. Recuperado el 8 de abril de 2023.

https://www.icao.int/safety/Pages/atm.aspx

[6] *Air traffic management (ATM)*. Skybrary.Aero. Recuperado el 8 de abril de 2023.

https://skybrary.aero/articles/air-traffic-management-atm

[7] *Services and functions*. Gob.es. Recuperado el 15 de mayo de 2023.

https://www.seguridadaerea.gob.es/en/ambitos/navegacionaerea/proveedores-de-servicios-y-funciones-de-navegacion-aerea/servicios-y-funciones

[8] *Air traffic service (ATS)*. Skybrary.Aero. Recuperado el 16 de mayo de 2023.

https://www.skybrary.aero/articles/air-traffic-service-ats

[9] Servicios de tránsito aéreo (ATS). Enaire.es. Recuperado el 20 de mayo de 2023.

https://www.enaire.es/servicios/gestion_del_transito_aereo/servicios_de_transito_aereo

[10] Control de tráfico aéreo (ATC). Enaire.es. Recuperado 22 de mayo de 2023.

https://www.enaire.es/servicios/atm/servicios_de_transito_aereo_ats/control_de_trafico_aereo_atc

[11] Servicio de información de vuelo (FIS). Enaire.es. Recuperado 22 de mayo de 2023.

https://www.enaire.es/servicios/atm/servicios_de_transito_aereo_ats/servicio_de_informacion_de_vuelo_fis

[12] *Alerta*. Enaire.es. Recuperado 22 de mayo de 2023.

https://www.enaire.es/publico/servicios/atm/servicios_de_transito_aereo_ats/alerta

[13] *ATFCM - air traffic flow and capacity management*. Ansperformance.eu. Recuperado el 5 de mayo de 2023.

https://ansperformance.eu/acronym/atfcm/

[14] *Air traffic flow management (ATFM)*. Skybrary.Aero. Recuperado 5 de mayo de 2023.

https://skybrary.aero/articles/air-traffic-flow-management-atfm

[15] *Gestión de Afluencia (ATFM).* Enaire.es. Recuperado 7 de mayo de 2023.

https://www.enaire.es/servicios/atm/gestion_de_afluencia_atfm

[16] Hirst, M. (2008). Airspace management. En *The Air Transport System* (pp. 197-225). Elsevier.

[17] *EUROCONTROL*. Eurocontrol.int. Recuperado 15 de mayo de 2023.

https://www.eurocontrol.int

[18] *The network manager*. Mobility and Transport. Recuperado 1 de junio de 2023.

https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/single-european-sky/network-manager_en

[19] *Sectorisation*. Skybrary.Aero. Recuperado 25 de mayo de 2023.

https://www.skybrary.aero/articles/sectorisation

[20] *Insignia*. Enaire.es. Recuperado 25 de mayo de 2023.

https://insignia.enaire.es/

[21] *ATM sector management*. Skybrary.Aero. Recuperado 25 de mayo de 2023.

https://www.skybrary.aero/articles/atm-sector-management

[22] *SESAR*. Skybrary.Aero. Recuperado 27 de abril de 2023.

https://skybrary.aero/articles/sesar

[23] *Cielo Único Europeo.* Enaire.es. Recuperado 27 de abril de 2023. https://www.enaire.es/sobre_enaire/presencia_internacional/cielo_unico_europeo

[24] *Short term ATFCM measures*. Ansperformance.eu. Recuperado 15 de abril de 2023.

https://ansperformance.eu/definition/short-term-atfcm-measures/

[25] *SESAR joint undertaking*. Sesarju.Eu. Recuperado 15 de abril de 2023.

https://www.sesarju.eu/sesar-solutions/advanced-short-term-atfcm-measures-stams

[26] *Short term ATFCM measures (STAM)*. Skybrary.Aero. Recuperado 16 de abril de 2023.

https://skybrary.aero/articles/short-term-atfcm-measures-stam

[27] M. Sfyroeras & V.Vega. (2023). *ATFCM OPERATIONS MANUAL*. Eurocontrol.int. Recuperado el 25 de abril de 2023.

https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2023-03/eurocontrol-atfcm-operations-manual-27-0-wef-20230425.pdf

[28] *Flowchart maker & online diagram software*. Diagrams.net. Recuperado el 23 de abril de 2023.

https://app.diagrams.net

[29] *Separation standards*. Skybrary.Aero. Recuperado el 30 de mayo de 2023.

https://www.skybrary.aero/articles/separation-standards

[30] BOE-A-2021-10028 Real Decreto 426/2021, de 15 de junio, por el que se modifican el Reglamento de Circulación Aérea, aprobado por el Real Decreto 57/2002, de 18 de enero, y el Real Decreto 1180/2018, de 21 de septiembre, por el que se desarrolla el Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea; para actualizar la aproximación en pistas paralelas y las separaciones mínimas en las salidas y llegadas de los vuelos en los aeropuertos. Boe.es. Recuperado el 30 de mayo de 2023.

https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-10028

[31] Wikipedia contributors. *Fases del vuelo*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Recuperado el 1 de junio de 2023.

https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Fases_del_vuelo&oldid=149107815

[32] Wikipedia contributors. *Carreteo*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Recuperado el 1 de junio de 2023.

https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Carreteo&oldid=146854042

[33] Wikipedia contributors. *Despegue*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Recuperado el 1 de junio de 2023.

https://es.wikipedia.org/wiki/Despegue

[34] Wikipedia contributors. *Ascenso (Aeronáutica)*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Recuperado el 1 de junio de 2023.

https://es.wikipedia.org/wiki/Ascenso_(aeronáutica)

[35] Wikipedia contributors. *Vuelo recto y nivelado (Aeronáutica)*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Recuperado el 1 de junio de 2023.

https://es.wikipedia.org/wiki/Vuelo_recto_y_nivelado

[36] Wikipedia contributors. *Aterrizaje*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Recuperado el 1 de junio de 2023.

https://es.wikipedia.org/wiki/Aterrizaje

[37] *ICAO wake turbulence category*. Skybrary.Aero. Recuperado el 1 de junio de 2023.

https://www.skybrary.aero/articles/icao-wake-turbulence-category

[38] *Flight planner*. Flightplandatabase.com. Recuperado el 17 de mayo de 2023.

https://flightplandatabase.com/planner

[39] *LEZL to LEBL*. (Flightplandatabase.com. Recuperado el 2 de junio de 2023.

https://flightplandatabase.com/plan/6674332

[40] *LEBL to LEMG*. Flightplandatabase.com. Recuperado el 2 de junio de 2023.

https://flightplandatabase.com/plan/6674335

[41] *LEPA to LEMD*. Flightplandatabase.com. Recuperado el 2 de junio de 2023.

https://flightplandatabase.com/plan/6674435

[42] *LEMH to LEMD*. Flightplandatabase.com. Recuperado el 2 de junio de 2023.

https://flightplandatabase.com/plan/6674443

[43] *LEBL to LEZL*. Flightplandatabase.com. Recuperado el 2 de junio de 2023.

https://flightplandatabase.com/plan/6675759

[44] *LEZL to LEBL*. Flightaware.com. Recuperado el 10 de junio de 2023.

https://es.flightaware.com/live/findflight?origin=LEZL&destination=LEBL

[45*] LEBL to LEMG*. Flightaware.com. Recuperado el 10 de junio de 2023.

https://es.flightaware.com/live/findflight/LEBL/LEMG

[46] *LEPA to LEMD*. Flightaware.com. Recuperado el 10 de junio de 2023.

https://es.flightaware.com/live/findflight?origin=LEPA&destination=LEMD

[47] *LEMH to LEMD*. Flightaware.com. Recuperado el 12 de junio de 2023.

https://es.flightaware.com/live/findflight?origin=LEMH&destination=LEMD

[48] *LEBL to LEZL*. Flightaware.com. Recuperado el 16 de junio de 2023.

https://es.flightaware.com/live/findflight?origin=LEBL&destination=LEZL

[49] *Canva*. Canva.com. Recuperado el 10 de junio de 2023.

http://canva.com