



**Universitat Autònoma
de Barcelona**

**EVALUACIÓN DE COSTES DE MITIGACIÓN DE
CONTROL DE TRÁFICO AÉREO PARA
DIFERENTES ESCENARIOS DE LAS
HERRAMIENTAS DE DETECCIÓN Y RESOLUCIÓN
DE CONFLICTOS**

Memoria del Trabajo Fin de Grado en Gestión Aeronáutica

realizado por

Marwa Bentaleb Zinbi

y dirigido por

Romualdo Moreno Ortiz

Escuela de Ingeniería

Sabadell, junio de 2023

El abajo firmante, Romualdo Moreno Ortiz director 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 MARWA BENTALEB ZINBI

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

Firmado: Romualdo Moreno Ortiz

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

Título del Trabajo de Fin de Grado:

- **Castellano:** Evaluación de costes de mitigación de control de tráfico aéreo de las herramientas de detección y resolución de conflictos.
- **Català:** Avaluació de costes de mitigació de control de trànsit aeri de les eines de detecció i resolució de conflictes.
- **English:** Air traffic control mitigation cost assessment of conflict detection and resolution tools.

Autor: Marwa Bentaleb Zinbi

Fecha: Junio 2023

Tutor: Romualdo Moreno Ortiz

Titulación: Grado en Gestión Aeronáutica

Palabras clave

- **Castellano:** Conflicto, detección, falsos positivos, falsos negativos, costes, tráfico aéreo.
- **Català:** Conflicte, detecció, falsos positius, falsos negatius, costes, trànsit aeri.
- **English:** Conflict, detection, false positives, false negatives, costs, air traffic.

Resumen del Trabajo de Fin de Grado

- **Castellano:** El objetivo principal de este proyecto es analizar y evaluar los costes asociados con las falsas alarmas generadas por las herramientas de detección y resolución de conflictos en el control de tráfico aéreo en diversos escenarios. El propósito es minimizar el coste de los falsos positivos siempre y cuando no exista riesgo para la seguridad. Se busca proporcionar orientación para mejorar las herramientas de detección de conflictos y la toma de decisiones en la gestión del tráfico aéreo, con el fin de lograr una gestión más eficiente y segura del espacio aéreo.
- **Català:** L'objectiu principal d'aquest projecte és analitzar i avaluar els costes associats a les falses alarmes generades per les eines de detecció i resolució de conflictes de control de trànsit aeri en diversos escenaris. L'objectiu és minimitzar el cost dels falsos positius sempre que no hi hagi risc de seguretat. Pretén oferir orientacions per millorar les eines de detecció de conflictes i la presa de decisions en la gestió del trànsit aeri, per tal d'aconseguir una gestió més eficient i segura de l'espai aeri.
- **English:** The main objective of this project is to analyze and evaluate the costs associated with false alarms generated by air traffic control conflict detection and resolution tools in various scenarios. The purpose is to minimize the cost of false positives as long as there is no safety risk. It seeks to provide guidance to improve conflict detection tools and decision making in air traffic management, in order to achieve more efficient and safer airspace management.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	10
1.2 OBJETIVOS PRINCIPALES	10
1.3 IMPORTANCIA DEL CONTROL DE TRÁFICO Y DE LA DETECCIÓN Y RESOLUCIÓN DE CONFLICTOS	11
2. METODOLOGÍA	12
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA UTILIZADA EN LA EVALUACIÓN DE COSTES	12
3. DETECCION Y RESOLUCION DE CONFLICTOS	13
3.1. HERRAMIENTAS DE DETECCION Y RESOLUCION DE CONFLICTOS	14
3.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL RIESGO DE COLISIÓN ENTRE AERONAVES EN UN ESPACIO AÉREO SIN CONTROL NI ESTRUCTURA	16
3.3. MAC-ER (MID-AIR COLLISION RISK IN EN-ROUTE)	19
3.3.1. MTCD (MID TERM CONFLICT DETECTION)	23
3.3.1.1. FUNCIONAMIENTO	23
3.3.1.2. LIMITACIONES	25
3.4. ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE COLISIÓN ENTRE AERONAVES	26
3.4.1. COMPARACIÓN Y RESUMEN DE LOS VALORES OBTENIDOS	31
4.1. DETECCIÓN DE CONFLICTOS	33
4.2. CLASIFICACIÓN DE EVENTOS PRÓXIMOS	38
5. ANÁLISIS DE COSTES	40
5.1. COSTES OPERATIVOS DE AERONAVES	41
5.2. COSTE DEL COMBUSTIBLE	42
5.2.1. CONSUMO DE COMBUSTIBLE	TABLA 543

5.3.	COSTE DEL RETRASO	45
5.3.1.	<i>COSTES DE RETRASO DETALLADOS POR TIPO DE AERONAVE Y DURACIÓN</i>	47
5.4.	COSTE DE LAS EMISIONES CO2	48
6.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE DIFERENTES ESCENARIOS	50
6.1.	CALCULO DEL COSTE COMBUSTIBLE.....	50
6.2.	ESCENARIOS.....	51
6.2.1.	<i>ESCENARIO A</i>	53
6.2.2.	<i>ESCENARIOS CON XGB Y MLP</i>	54
6.2.2.2.	<i>ESCENARIOS CON XGB</i>	56
7.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTES	80
7.1.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE MAASTRICHT CON XGB Y MLP	81
7.2.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE MADRID CON XGB Y MLP	84
8.	COSTE DE UN FALSO NEGATIVO (FN)	88
8.1.	COSTES DIRECTOS	89
8.2.	COSTES INDIRECTOS.....	89
9.	CONCLUSIONES	91
9.1.	LÍNEA DE CONTINUACIÓN DEL PROYECTO	93
8.	BIBLIOGRAFÍA	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Procesos de detección y resolución de conflictos (K. Kuchar & C. Yang, 2000)	14
Figura 2: Componentes aéreos y terrestres de la detección y resolución de conflictos (K. Kuchar & C. Yang, 2000)	15
Figura 3: Esquema de clases de gravedad para la colisión en el aire ENR (EUROCONTROL, 2020)	20
Figura 4: Contexto del MTCD (EUROCONTROL, 2017)	25
Figura 5: representación del aérea de la aeronave (García Gonzales, 2013)	27
Figura 6: Proceso de detección de conflicto (Watkins., 2005)	32
Figura 7: conflicto de múltiples aeronaves (Sunil, 2018)	33
Figura 8: Esquema general de un sistema de alerta (Sáez Nieto, 2012)	33
Figura 9: Proceso típico de diseño y evaluación de sistemas de resolución y detección de conflictos (K. Kuchar & C. Yang, 2000)	35
Figura 10: Ejemplo de condiciones para detectar conflictos (Christian Verdonk, 2023)	36
Figura 11: Datos de muestra AoR de Maastricht. (García Gonzales, 2013)	38
Figura 12: Datos de Muestra UIR Madrid. (García Gonzales, 2013)	38
Figura 13: Datos de muestra AoR de Maastricht: clasificación de eventos próximos por tipo de tráfico . (García Gonzales, 2013)	39
Figura 14: Datos de Muestra: Clasificación de Eventos Próximos por Tipo de Tráfico. URI de Madrid. (García Gonzales, 2013)	40
Figura 15: estructura de costes de las aerolíneas 2015 (EUROCONTROL, 2018)	41
Figura 16: Código Python cálculo de combustible en base a los minutos de retraso ..	51

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1: Resumen de Resultados UIR de Madrid (García Gonzales, 2013)</i>	31
<i>Tabla 2: Resumen de Resultados AoR de Maastricht (García Gonzales, 2013)</i>	31
Tabla 3: Relaciones binarias posibles entre situaciones reales y salidas observadas por un sistema de alarma (Sáez Nieto, 2012).....	34
Tabla 4: Fuel Price Analysis (IATA, 2023).....	43
Tabla 5: Fuel burn rates (kg/minute) (EUROCONTROL, 2018)	44
Tabla 6: Coste de retraso táctico por minuto 2014 (Westminster, 2015).....	46
<i>Tabla 7: Coste estratégico de retraso por minuto 2014 (Westminster, 2015) .</i>	46
Tabla 8: Costes tácticos, importe total de todos los minutos de retraso en euros (Westminster, 2015).....	47
Tabla 9: Costes estratégicos, retraso por hora en euros (Westminster, 2015).	48
Tabla 10: Tabla de costes de las emisiones de CO2 por rangos (Jennifer, 2022)	49
Tabla 11: resumen de los costes de desvío	52
Tabla 12: muestra de datos de Maastricht (García Gonzales, 2013)	53
Tabla 13: Probabilidades de falsos negativos y falsos positivos según tiempo de detección (XGB) (Christian Verdonk, 2023)	56
Tabla 14: muestra de datos de Maastricht (García Gonzales, 2013)	57
Tabla 15: tabla resumen de costes escenario B con XGL en Maastricht	67
Tabla 16: muestra de datos de Madrid (García Gonzales, 2013).....	70
Tabla 17: tabla resumen de costes escenario B con XGB en Madrid	70
Tabla 18: Probabilidades de FN y FP según tiempo de detección (MLP) (Christian Verdonk, 2023)	73

Tabla 19: muestra de datos de Maastricht (García Gonzales, 2013)	74
Tabla 20: Tabla resumen de costes escenario D con MLP en Maastricht.....	74
Tabla 21: Muestra de datos de Madrid	77
Tabla 22: Tabla resumen de costes escenario E con MLP en Madrid	77
Tabla 23: Probabilidades de falsos negativos y falsos positivos según tiempo de detección (XGB) (Christian Verdonk, 2023)	82
Tabla 24: tabla resumen de costes escenario B con XGB en Maastricht.....	82
Tabla 25: Probabilidades de falsos negativos y falsos positivos según tiempo de detección (MLP) (Christian Verdonk, 2023)	82
Tabla 26: Tabla resumen de costes escenario D con MLP en Maastricht.....	83
Tabla 27: Probabilidades de falsos negativos y falsos positivos según tiempo de detección (XGB) (Christian Verdonk, 2023)	86
Tabla 28: tabla resumen de costes escenario B con XGB en Madrid	86
Tabla 29: Probabilidades de falsos negativos y falsos positivos según tiempo de detección (MLP) (Christian Verdonk, 2023)	86
Tabla 30: Tabla resumen de costes escenario E con MLP en Madrid	86
Tabla 31: Tabla resumen de los costes directos de un falso negativo (T Martin, 2018).....	89
Tabla 32: Tabla resumen de los costes indirectos de un falso negativo (T Martin, 2018).....	89

LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 1: Selección del PTHR óptimo para el punto de operación de la detección de conflictos con XGB (Christian Verdonk, 2023)	56
Gráfico 2: costes de Maastricht con XGB.....	69
Gráfico 3: costes de Madrid con XGB	72
Gráfico 4: Selección del PTHR óptimo para el punto de operación de la detección de conflictos con MLP (Christian Verdonk, 2023)	73
Gráfico 5: costes de Maastricht con MLP	76
Gráfico 6: costes de Madrid CON MLP	79
Gráfico 7: Analisis comparativo de costes de los 4 escenarios	80
Gráfico 8: costes de Maastricht con XGB y MLP.....	81
Gráfico 9: costes de Madrid con XGB y MPL	85

1. INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El objetivo principal del control de tráfico aéreo es garantizar la seguridad del tráfico manteniendo el flujo de aeronaves en el espacio aéreo. La función de control se lleva a cabo mediante la comunicación de voz entre los controladores y los pilotos de las aeronaves, utilizando la información de vigilancia proporcionada por los radares e instruyendo a los pilotos para realizar modificaciones de las trayectorias según lo demande la operación.

Este tipo de desviaciones de la ruta prevista conllevan diversos costes, tanto económicos como en términos de seguridad y eficiencia, por lo que es importante que el control de tráfico aéreo minimice este riesgo y garantice el seguimiento de la ruta prevista en la medida posible.

Las herramientas que utilizan los controladores de tráfico aéreo se basan en la predicción de trayectorias de vuelo que permiten calcular la posición actual de la aeronave y predecir su posición futura en función de su velocidad y dirección. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este sistema de predicción de trayectorias puede presentar cierto grado de error y es posible que sea necesario incluir márgenes de seguridad más amplios. Esta precaución puede dar lugar a modificaciones innecesarias en las trayectorias de las aeronaves, lo que puede resultar en un mayor consumo de combustible.

Por este motivo en este Trabajo Fin de Grado se pretende realizar un análisis y una evaluación de los costes de mitigación del Control de Tráfico Aéreo para diferentes escenarios que pueden suceder en el espacio aéreo con las herramientas de detección de situaciones de conflicto potencial y su resolución.

1.2 OBJETIVOS PRINCIPALES

El objetivo principal del Trabajo Fin de Grado es determinar el coste de las desviaciones en las trayectorias de una aeronave con respecto a la ruta programada debido a situaciones de tráfico, como conflictos entre aeronaves, y evaluar la efectividad de las herramientas de detección de conflictos.

Para poder cuantificar los costes y la frecuencia en la que suceden las desviaciones innecesarias, se pretende medir el coste de las desviaciones, evaluando la eficacia de las herramientas, dependiendo del tiempo de predicción, mediante la determinación de la probabilidad de un falso positivo, lo cual nos permitirá realizar análisis de los distintos escenarios de simulación.

Se definen los siguientes sub-objetivos:

- Identificar los principales factores que provocan las desviaciones de las aeronaves debido a circunstancias de tráfico (conflictos entre aeronaves).
- Calcular los costes que conlleva la desviación teniendo en cuenta factores como el coste de combustible, emisiones, carga de trabajo, retrasos, etc.
- Evaluación de las herramientas MTCD (Mid Term Conflict Detection) analizando la probabilidad de que surjan falsos positivos que pueden llevar a cabo desviaciones innecesarias, determinando el tiempo medio de predicción de estas herramientas.
- Realizar un análisis de los diferentes puntos de operación de la herramienta de detección de conflictos.
- Desarrollar las simulaciones de los puntos de operación seleccionados, para obtener estimaciones de los costes que conlleva cada uno.

1.3 IMPORTANCIA DEL CONTROL DE TRÁFICO Y DE LA DETECCIÓN Y RESOLUCIÓN DE CONFLICTOS

La seguridad es el principal objetivo del control del tráfico aéreo, y es responsabilidad de los controladores aéreos garantizar que las aeronaves mantengan una distancia segura entre ellas. Además, también ayuda a mejorar la eficiencia del transporte aéreo, reducir los retrasos y minimizar los costes operativos.

En este caso, los controladores aéreos desvían la trayectoria de una aeronave ante un posible conflicto. Las desviaciones de las aeronaves pueden ocurrir por diferentes razones, como condiciones meteorológicas, problemas técnicos o errores humanos. Cuando una aeronave se desvía de su trayectoria planificada,

puede provocar conflictos con otras aeronaves cercanas. Es crucial detectar estas desviaciones a tiempo y solucionar estos conflictos de manera efectiva para evitar colisiones en el aire. (Organización de Controladores Aéreos , 2019)

2. METODOLOGÍA

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA UTILIZADA EN LA EVALUACIÓN DE COSTES

La metodología propuesta tiene como objetivo analizar las causas que provocan las desviaciones y la probabilidad de que ocurra un conflicto. Además, se busca examinar la probabilidad de que las herramientas de detección puedan dar un falso positivo dando lugar a desviaciones innecesarias. Es fundamental comprender el coste real de este tipo de desviaciones y establecer métricas que permitan medir su impacto a lo largo del tiempo.

Algunas métricas útiles pueden ser el consumo de combustible por kilómetro recorrido, emisiones, retrasos, el tiempo de vuelo promedio, la frecuencia de conflictos y la probabilidad de que ocurran falsas alarmas. Para lograr esto, se realizará una predicción de los escenarios que podrían dar lugar a conflictos, lo cual nos permitirá calcular el coste asociado. Para llevar a cabo esta predicción, se utilizarán datos reales de escenarios aéreos europeos, específicamente el tráfico de Maastricht y Madrid.

Además, se identificarán distintos puntos de operación de la herramienta de detección de conflictos, analizando la relación entre los falsos positivos y los falsos negativos, y el coste que conlleva cada uno. El objetivo de estos escenarios es determinar el coste total en euros de los falsos positivos sin tener problemas de seguridad.

3. DETECCION Y RESOLUCION DE CONFLICTOS

El sector aéreo ha experimentado un crecimiento constante en las últimas décadas, lo que ha llevado a un aumento significativo de aeronaves que comparten el espacio aéreo. Este crecimiento ha creado nuevos desafíos en la gestión del tráfico aéreo, ya que los controladores deben garantizar que todas las aeronaves se muevan de manera segura y eficiente. Uno de los desafíos más importantes es la prevención de conflictos entre aviones. Se considera un conflicto cuando dos o más aeronaves pierden una separación mínima, lo que puede poner en riesgo la seguridad. Los controladores aéreos deben estar atentos y utilizar sistemas avanzados para detectar y resolver cualquier conflicto de manera rápida y efectiva, asegurando tanto la seguridad como la fluidez del tráfico aéreo.

La detección y resolución de conflictos son aspectos críticos en la aviación, y se utilizan diversas herramientas que tienen como objetivo predecir conflictos que ocurrirán en el futuro, comunicar el conflicto a los controladores aéreos y garantizar la seguridad en el espacio aéreo, por lo que cualquier falsa alarma pueden llevar a desviaciones innecesarias e incluso generar nuevas situaciones de riesgo.

La Figura 1 describe el proceso de vigilancia del entorno del tráfico aéreo y la recogida de información del estado actual. Se trata de utilizar sensores y equipos de comunicación para recoger datos sobre el tráfico, como la posición y la velocidad de las aeronaves. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los estados recogidos pueden no representar completamente la situación real del tráfico, ya que, puede haber errores en los datos debido a limitaciones en los sensores, por lo que suele haber cierto grado de incertidumbre en estos valores. (K. Kuchar & C. Yang, 2000)

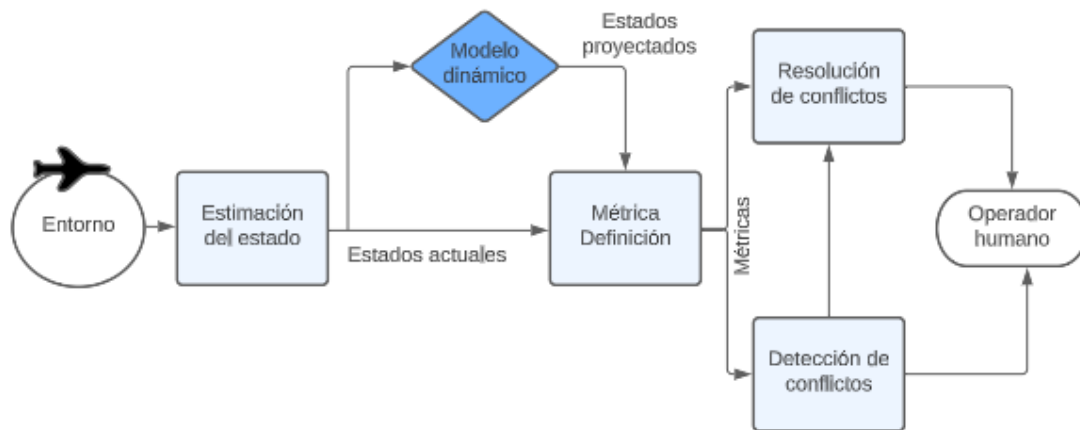


Figura 1: Procesos de detección y resolución de conflictos (K. Kuchar & C. Yang, 2000)

3.1. HERRAMIENTAS DE DETECCION Y RESOLUCION DE CONFLICTOS

El sistema actual de espacio aéreo se basa en métodos diseñados para mantener una separación segura entre las aeronaves. Estos métodos se apoyan en rutas estructuradas y procedimientos que han ido evolucionando a lo largo del tiempo.

Los humanos tienen un papel fundamental en este sistema, ya que tienen la capacidad de procesar información y tomar decisiones en tiempo real. Sin embargo, dado que los errores humanos y las fallas operativas pueden ocurrir en ocasiones, se han desarrollado sistemas automatizados para proporcionar apoyo adicional en la toma de decisiones y alertar sobre posibles conflictos de tráfico. Estos sistemas automatizados se implementan tanto en las aeronaves como en las instalaciones en tierra utilizadas por los controladores. (K. Kuchar & C. Yang, 2000)

Las herramientas de detección y resolución de conflictos se basan en el uso de sistemas de alerta y de seguimiento de las aeronaves en vuelo. Estos sistemas están diseñados para detectar la proximidad de dos o más aeronaves, y generar una alerta en caso de que exista un posible conflicto. El ATM (Air Traffic

Management¹⁾ utiliza a un proceso en dos etapas para evitar conflictos:
(Watkins., 2005)

1. **Primera etapa:** la detección de conflictos (se predicen las posiciones de las aeronaves en el futuro basándose en sus posiciones y planes de vuelo actuales, y se comparan para detectar posibles situaciones de conflicto).
2. **Segunda etapa:** planificación de trayectorias para resolver el conflicto (una vez detectado un posible conflicto, en la fase de resolución de conflictos se vuelven a planificar las trayectorias de las aeronaves implicadas en el conflicto).

La Figura 2 muestra cómo los componentes aéreos y terrestres se relacionan en la detección y resolución de conflictos.

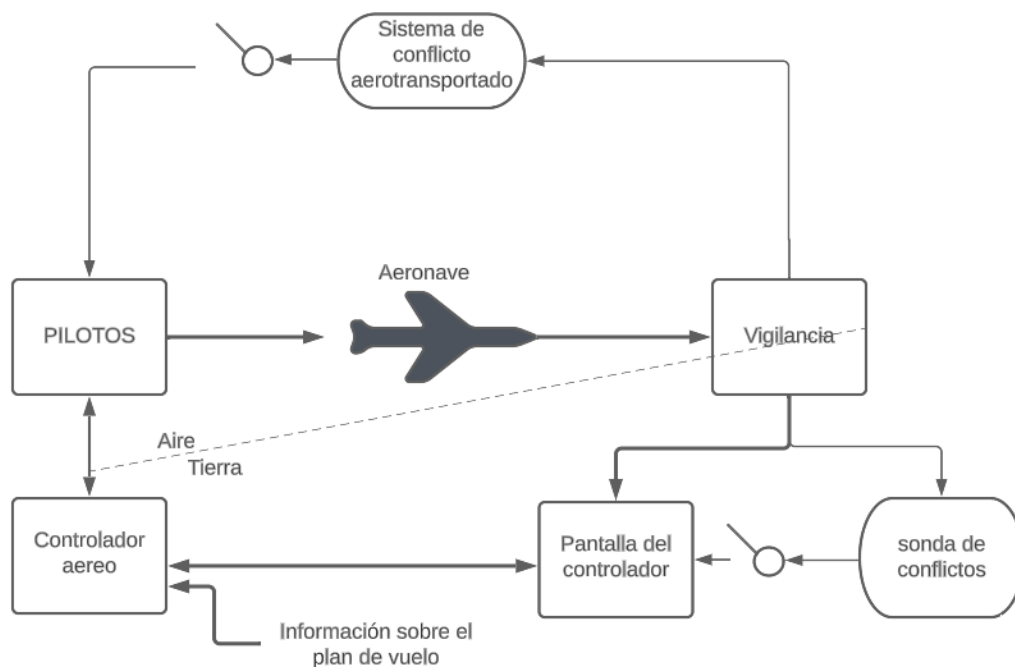


Figura 2: Componentes aéreos y terrestres de la detección y resolución de conflictos (K. Kuchar & C. Yang, 2000)

¹ Gestión del Tránsito Aéreo en su acepción en inglés

En la Figura 2 las líneas más oscuras representan las rutas planificadas para controlar las operaciones. Estas líneas indican la comunicación y las acciones entre los diferentes componentes del sistema.

Las líneas menos oscuras, representan el monitoreo automatizado. Estas líneas reflejan la capacidad del sistema para rastrear y supervisar de manera continua la situación y detectar posibles conflictos. Éstas pueden identificar desviaciones o eventos inesperados en el entorno y alertar al operador para tomar medidas correctivas.

3.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL RIESGO DE COLISIÓN ENTRE AERONAVES EN UN ESPACIO AÉREO SIN CONTROL NI ESTRUCTURA

Para conocer la frecuencia del riesgo de colisión en un espacio aéreo sin control y sin estructura, Francisco Javier Sáez Nieto en su libro “Navegación aérea” (Sáez Nieto, 2012) hace una suposición, la cual se basa en la necesidad de introducir medios de gestión del tráfico. En este caso se aplicará la hipótesis de distribución aleatoria uniforme, la cual se refiere a la suposición de que ocurra un evento en cualquier punto dentro de un espacio determinado es igualmente probable en todas las posibles ubicaciones.

El conflicto se da en la situación en la que dos aeronaves se encuentran o pueden llegar a encontrarse con unas separaciones verticales y horizontales mínimas, que pueden ser iguales o inferiores a las establecidas.

Para conocerla probabilidad de que dos aeronaves tengan un evento de proximidad se puede realizar un estudio estadístico relacionando el volumen de protección de la aeronave y el volumen del espacio considerado.

$$p = \frac{V_A}{V_C}$$

El volumen cilíndrico de protección de la aeronave se determina con la separación horizontal (D) y vertical (H), con base πD^2 y altura $2H$, obteniendo la siguiente fórmula, $V_A = (\pi D)^2 \cdot 2H$. En caso de la presencia de una aeronave dentro de este volumen, se considera un conflicto.

El volumen del espacio considerado se obtiene multiplicando la base por la altura, la altura se obtiene a partir de la diferencia que hay entre la separación vertical máxima y la mínima: $V_C = A \cdot (H_{max} - H_{min})$.

Hasta ahora se ha analizado el conflicto de dos aeronaves, pero se puede dar el caso de conflictos entre más de dos aeronaves para ello se podrá estimar con la siguiente función:

$$P(X) = \binom{n}{x} p^x \cdot (1 - p)^{n-x} \quad \left\{ \begin{array}{l} n = \text{casos posibles} \\ x = \text{nº de conflictos} \end{array} \right.$$

Entonces el valor esperado de conflictos de la aeronave con el resto de las aeronaves se podrá calcular con la siguiente función: $E(X) = (N_s - 1) \cdot p$

Una vez obtenido el número esperado total de conflictos en un instante dado, se representa de esta forma, teniendo en cuenta que un único conflicto representa el conflicto entre dos aeronaves:

$$C_{ins} = \sum_1^{N_s} \frac{E(X)}{2} = \frac{N_s \cdot (N_s - 1) \cdot p}{2}$$

Con el fin de obtener una respuesta más precisa, el autor plantea una suposición como punto de partida.

- El espacio aéreo está definido por:
 - Base de 120.000 millas cuadradas
 - Límites verticales entre FL250 y 460
- Probabilidad de conflicto = $6 \cdot 10^{-5}$
- Separación horizontal (D) = 5 millas

- Separación vertical (H) = 1.000 pies
- nº aeronaves = 150

$$C_{ins} = \frac{150 \cdot 149}{2} \cdot 6 \cdot 10^{-5} = 0.67$$

Con las suposiciones y circunstancias descritas, los conflictos esperados en cualquier instante son de 0,67 conflictos. Con esta estimación se podrán hacer estimaciones del número de conflictos en un determinado periodo de tiempo. Para ello se ha considerado que las aeronaves comerciales normalmente recorren distancias entre 3 y 8 millas por minuto (V_{hor}) y alturas entre 500 y 2000 pies por minuto (V_{ver}), para la estimación del tiempo de duración del conflicto se puede expresar de la siguiente forma:

$$T_c = \left\{ \begin{array}{l} \frac{D}{V_{hor}} \approx \frac{5NM}{5NM/min} \\ \frac{2H}{V_{ver}} \approx \frac{2000'}{2000'/min} \end{array} \right\} = 1 \text{ min}$$

Con el análisis realizado, se obtiene una estimación de **40 conflictos por hora** en el espacio aéreo.

$$C_{1H} = \frac{C_{ins} \cdot 1h}{T_c} \approx 40$$

Basándose en la hipótesis de distribución aleatoria y media espacial uniforme, se considera que los valores previamente mencionados proporcionan una idea razonable de la necesidad de implementar un sistema que reduzca el número de conflictos aéreos.

El objetivo principal del control de tráfico aéreo es reducir el número de conflictos a través del uso de barreras de seguridad agrupadas en diferentes niveles de básicos en los que unos pueden ser estratégicos y otros más tácticos.

La estructura del espacio aéreo tiene como objetivo conseguir disminuir sensiblemente la probabilidad de conflictos potenciales, una de las medidas que se utiliza para estructurar el espacio aéreo es la asignación de diferentes niveles de vuelo a las aeronaves. Por ejemplo, los aviones que vuelan hacia el Este tendrán niveles de vuelo impares, mientras que los que vuelan hacia el Oeste tendrán niveles de vuelo pares.

Para valorar el impacto de la estructura vertical en la cantidad de conflictos aéreos, se ha planteado un escenario hipotético en el que se colocan las aeronaves en los niveles que les han sido asignados, asumiendo que no existen conflictos entre las aeronaves en niveles contiguos. Además, se supone que los 150 aviones se distribuyen de manera uniforme en los 22 niveles de vuelo disponibles (FL460 hasta FL240). En estas condiciones, al repetir el desarrollo teórico anterior para cada nivel, se ha obtenido una estimación de unos **17 conflictos por hora** asumiendo un espacio aéreo sin estructura de niveles.

3.3. MAC-ER (MID-AIR COLLISION RISK IN EN-ROUTE)

El riesgo de colisión en ruta es un peligro que es más común que se produzca en zonas de alta densidad de tráfico aéreo, como, por ejemplo, cerca de aeropuertos importantes o en rutas de vuelo que son comunes. Este tipo de riesgo se puede mitigar mediante la aplicación de distintas tecnologías y procedimientos, y quienes se encargan de gestionar estos procesos son los de control de tráfico.

Existen distintos tipos de conflictos que se pueden distinguir según la situación de riesgo que pueden ocurrir en diferentes circunstancias del vuelo. En la Figura 3 se muestran los procesos relacionados con la gestión de tráfico aéreo que se utilizan en diferentes momentos y niveles para prevenir estos conflictos. (EUROCONTROL, 2020)

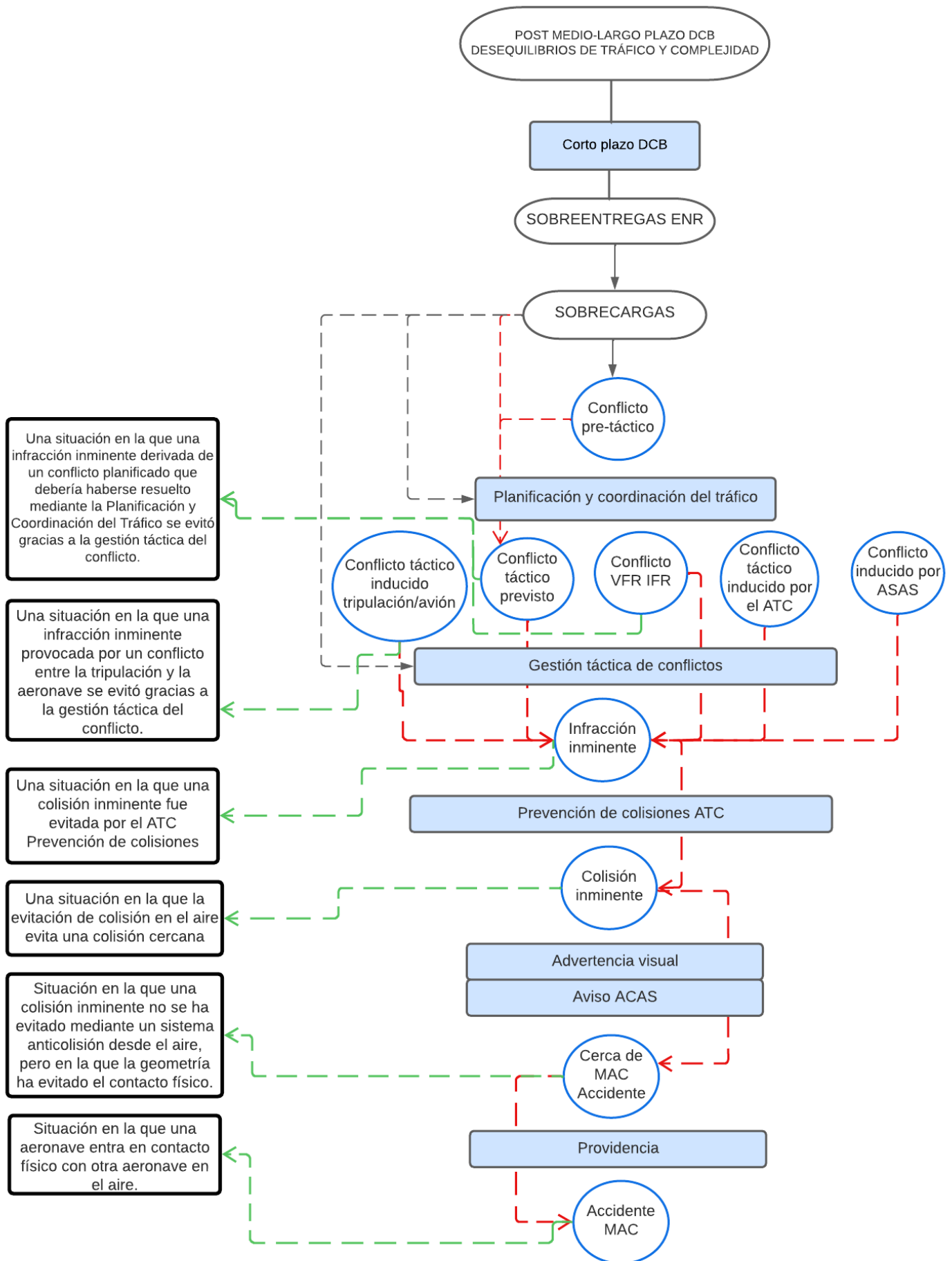


Figura 3: Esquema de clases de gravedad para la colisión en el aire ENR (EUROCONTROL, 2020)

A continuación, se describe brevemente cada proceso y su función en la prevención de conflictos:

- **Corto plazo DCB (Demand and Capacity Balancing):** Es un proceso que gestiona la red y tiene como objetivo eliminar las sobrecargas a corto plazo y las situaciones de alta complejidad, esto puede ayudar a reducir el potencial de conflictos que pueden suceder en un futuro.
- **Planificación y coordinación de tráfico:** Este proceso evita que los conflictos potenciales se conviertan en conflictos tácticos, a través de una planificación y coordinación efectiva del tráfico aéreo. Esto ayuda a reducir la necesidad de intervenciones tácticas para resolver conflictos.
- **Gestión táctica de conflictos:** Este proceso supervisa los conflictos potenciales, los detecta y los resuelve antes de que se produzcan pérdidas de separación entre aviones. Esto ayuda a poder tomar decisiones a tiempo.
- **Prevención de conflictos ATC:** Este proceso está relacionado con la detección de pérdidas de separación, y es necesaria la intervención inmediata para restablecer la separación segura entre aeronaves.
- **Providencia:** Este proceso se refiere a casos en los que no es necesario tomar medidas preventivas debido a que las trayectorias no se cruzan en ningún momento.
- **Aviso:** Este proceso implica la detección del conflicto ya sea de forma visual o mediante las herramientas de alerta de colisión, y es necesaria la intervención de los pilotos o de los controladores aéreos para evitar la colisión.

Los conflictos que se pueden encontrar son los siguientes:

- **Conflicto por desviación lateral:**

Este conflicto ocurre cuando una aeronave se desvía de su ruta lateralmente, es decir, se trata de una situación en la que dos aeronaves están volando con la

misma altitud y dirección produciendo una situación de riesgo. La probabilidad de conflictos por hora de vuelo es de $9 \cdot 10^{-6}$.

- **Conflicto por desviación de velocidad:**

Este conflicto ocurre cuando una aeronave se desvía de su velocidad asignada. La probabilidad de conflictos por hora de vuelo es de $1.26 \cdot 10^{-6}$.

- **Conflicto por desviación de la tasa vertical:**

Este conflicto ocurre cuando una aeronave se desvía de la tasa vertical de ascenso o descenso asignada. La probabilidad de conflictos por hora de vuelo es de $5.40 \cdot 10^{-6}$.

- **Conflicto debido a la caída de nivel:**

Este conflicto ocurre cuando una aeronave se desvía del nivel de vuelo asignado. La probabilidad de conflictos por hora de vuelo es de $1.17 \cdot 10^{-4}$.

- **Conflicto por Desviación Tripulación/ Aeronave:**

Este conflicto ocurre debido a una acción de la tripulación o un problema técnico a bordo. La probabilidad de conflictos por hora de vuelo es de $1.28 \cdot 10^{-4}$.

- **Conflicto por Infracción del Espacio Aéreo:**

Este conflicto ocurre cuando una aeronave ingresa a un espacio aéreo restringido, resultando una violación de la seguridad del espacio aéreo. La probabilidad de conflictos por hora de vuelo es de $5.22 \cdot 10^{-5}$.

- **Conflicto VFR IFR:**

Este conflicto pasa cuando una aeronave que vuela con las reglas de vuelo visual (VFR) entra en conflicto con otra aeronave que vuela con las reglas de vuelo instrumental (IFR), esto se debe a que las rutas y altitudes asignadas son completamente diferentes. La probabilidad de conflictos por hora de vuelo es de $9.20 \cdot 10^{-5}$.

- **Conflicto táctico inducido por AT:**

Este conflicto ocurre cuando un controlador aéreo causa un conflicto táctico para evitar la saturación del tráfico aéreo o alguna situación emergente. La probabilidad de conflictos por hora de vuelo es de $9.60 \cdot 10^{-6}$.

- **Conflicto Táctico Planificado:**

Este conflicto ocurre cuando existen un conflicto después de la fase de planificación, a pesar de la acción de la gestión de la demanda y la capacidad (afluencia). La probabilidad de conflictos por hora de vuelo es de $3.30 \cdot 10^{-2}$.

3.3.1. MTCD (MID TERM CONFLICT DETECTION)

Para evitar estas situaciones peligrosas, la Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea (Eurocontrol) ha especificado herramientas de detección de conflictos como MTCD (Mid Term Conflict Detection) que ayudan a los controladores aéreos en la detección y predicción de cualquier posible conflicto entre las trayectorias de las aeronaves en un horizonte táctico (hasta aproximadamente 15-20 minutos de anticipación) para que se puedan tomar medidas preventivas. Se espera que durante el tiempo en que se anticipan los conflictos más prolongados en el MTCD, exista una cierta incertidumbre en su trayectoria, lo que puede generar conflictos falsos (predicciones de conflicto que no se concretan) y conflictos perdidos (conflictos que ocurren, pero no fueron anticipados). (EUROCONTROL, 2017)

3.3.1.1. FUNCIONAMIENTO

El sistema MTCD realiza una vigilancia constante de todas las aeronaves que están en un espacio aéreo específico, (EUROCONTROL, 2017) realizando las siguientes funciones:

- El cálculo de las trayectorias de las aeronaves y el seguimiento del progreso de cada aeronave en relación con su trayectoria, detectando las trayectorias conflictivas.
- Detectar y notificar al controlador tanto la posible pérdida de separación entre las aeronaves como la entrada de aeronaves en espacios aéreos restringidos.
- Presenta la información a los controladores con una anticipación de entre 8 y 20 minutos.

MTCD utiliza datos de vigilancia (basados en la información radar) y sistemas de seguimiento automático de aviones para monitorear la trayectoria de vuelo de los aviones y prevenir posibles conflictos futuros. Su funcionamiento se basa en el uso de los datos de posiciones actuales de las aeronaves proporcionados por los sistemas de control del tráfico aéreo para predecir la posición futura en función de las trayectorias y velocidades actuales. Para ello, se utilizan un algoritmo que compara la posición futura de cada aeronave con las posiciones futuras de otras aeronaves dentro de su rango y calcula el tiempo y la distancia de separación entre ellas. (EUROCONTROL, 2017)

Evoluciones de estas herramientas se está implementando en el marco del SESAR (Single European Sky ATM Research), un programa de investigación y desarrollo con el objetivo de mejorar rendimiento de la gestión del tráfico aéreo (ATM) en Europa (EUROCONTROL, 2017). Como se ha mencionado anteriormente, para la detección de los conflictos el MTCD utiliza la siguiente información para su función:

- **Distribución de datos de vuelo:** se proporcionan los datos de vuelo al MTCD para todos los vuelos.
- **Predicción de trayectoria:** las trayectorias planeadas se entregan al MTCD y sirven como base para la detección de conflictos.

- **Distribución de datos del entorno:** se proporcionan datos del espacio aéreo al MTCD y forman la base de la detección de encuentros entre aeronaves y el espacio aéreo.
- **Planificador y controladores tácticos:** se muestra a los controladores las interacciones para que sean coordinadas y gestionadas.

En la Figura 4 se muestra la forma en que el MTCD se integra en el sistema global de SESAR para mejorar la seguridad y eficiencia en la gestión del tráfico aéreo.

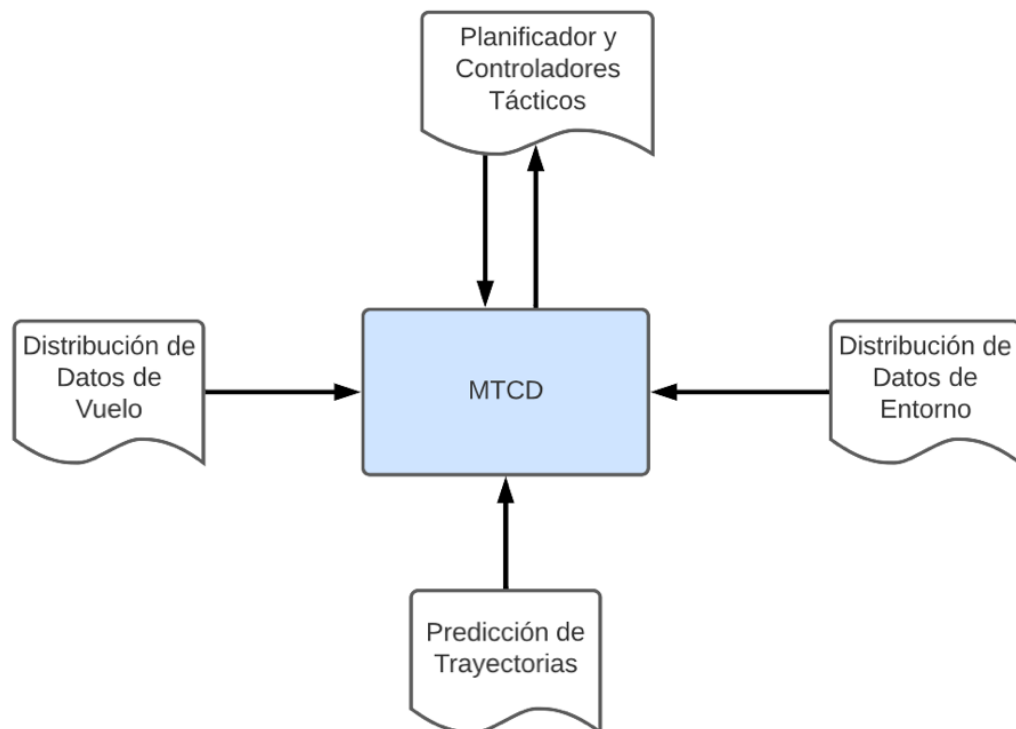


Figura 4: Contexto del MTCD (EUROCONTROL, 2017)

3.3.1.2. LIMITACIONES

Es importante evaluar las limitaciones de la herramienta MTCD para tenerlas en cuenta a la hora de realizar experimentos y conocer la frecuencia de los falsos positivos que pueden surgir y sus motivos. Algunas de las limitaciones son las siguientes: (EUROCONTROL, 2017)

- **Dependencia de la precisión del radar:** se basa en información proporcionada por los radares para detectar la posición y la velocidad de las aeronaves, lo que significa que, si hay errores en la medición de los datos del radar, esto puede afectar la precisión del MTCD.
- **Sensibilidad a errores de predicción:** Las predicciones no son del todo exactas, por lo tanto, el sistema puede fallar en la detección de un conflicto real o generar una alerta innecesaria.
- **Limitación en el tiempo:** la herramienta es menos eficaz para detectar conflictos que se desarrollan de forma rápida.
- **Limitación en la resolución de conflictos:** la herramienta no está capacitada para resolver los conflictos que se detectan. En caso de que se detecte un conflicto, los controladores aéreos primero, y después los pilotos si fallan las redes de seguridad previas, son los que toman las medidas para poder evitar el conflicto.

3.4. ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE COLISIÓN ENTRE AERONAVES

En la tesis doctoral de Eduardo José García (García Gonzales, 2013) se presenta el cálculo de la zona en la que se produce el conflicto, se trata de un aérea que rodea la aeronave y que se representa como un cilindro de radio R y altura $2H$. Las medidas de R y H corresponden a las mínimas separaciones horizontales y verticales necesarias para evitar el conflicto, y están definidas como 5 millas náuticas y 1000 pies que se aplican en el espacio europeo.

La colisión de dos aeronaves se representa como cilindros circulares con un diámetro base de λ_{xy} y una altura de λ_z . Por lo tanto, se produciría una colisión cuando una aeronave se encuentra dentro de un cilindro centrado en la otra aeronave con un radio de λ_{xy} y una altura de λ_z .

- R = radio del volumen del conflicto
- H = altura del volumen del conflicto
- λ_{xy} = Longitud de la aeronave
- λ_z = Altura de la aeronave

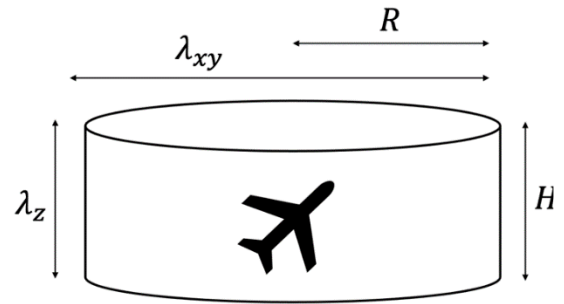


Figura 5: representación del aérea de la aeronave (García Gonzales, 2013)

→ Probabilidad Condicional de colisión (Pb)

Mediante el análisis de diferentes barreras de seguridad se puede derivarse una expresión de probabilidad Pb. Se trata de la posibilidad en la que las barreras no cumplan su función de proteger contra posibles riesgos, es decir, que dos aeronaves en conflicto potencial mantengan su rumbo y sigan volando en línea recta a velocidad constante hasta que se crucen.

La probabilidad de fallo de la barrera de seguridad (Pb) viene determinada por la relación entre los conflictos potenciales y reales, tal y como se expresa en la siguiente ecuación.

$$P_b = \frac{\text{numero de conflictos reales}}{n^{\circ} \text{ de conflictos potenciales}}$$

$$= \alpha \times \frac{N^{\circ} (r_{ij} < 0,5 \times R, [h_{ij}]_{CPA} < 0,5 \times H)}{N^{\circ} ([r_{ij}]_{CPA} < 0,5 \times R, [h_{ij}]_{CPA} < 0,5 \times H)}$$

Donde:

- $N^{\circ} (r_{ij} < 0,5 \times R, [h_{ij}]_{CPA} < 0,5 \times H)$ se refiere al número de conflictos reales que corresponde a una separación horizontal mínima (r_{ij}) y una separación vertical mínima (h_{ij}) que es inferior a la mitad de la separación horizontal mínima (R) y la mitad de la separación vertical mínima (H) entre el cilindro que envuelve al avión.
- $N^{\circ} ([r_{ij}]_{CPA} < 0,5 \times R, [h_{ij}]_{CPA} < 0,5 \times H)$ se refiere al número de conflictos potenciales en las que se predice que la separación horizontal mínima en

el punto de mayor aproximación CPA $([r_{ij}]_{CPA})$ será inferior a la mitad de un valor determinado R en millas náuticas, y la predicción de la separación vertical mínima $([h_{ij}]_{CPA})$ será inferior a la mitad a un valor determinado H en pies (ft).

- α representa la reducción del riesgo de colisión en el aire.

A continuación, se ejemplifica el proceso de análisis de datos de tráfico de un periodo de 31 días de dos áreas de control de tráfico aéreo en Europa: Madrid UIR y Maastricht realizado por el autor.

➔ Ejemplo de Probabilidad Condicional de colisión (Pa) de UIR de Madrid

Para estimar la probabilidad de colisión Pa de UIR de Madrid se ha tomado la muestra de datos de tráfico de un periodo de 31 días que se calcula a partir de las frecuencias de conflictos potenciales, mencionadas en el apartado “clasificación de eventos próximos”. Para ello se han seleccionado los conflictos potenciales entre el tráfico civil y se ha calculado Pa en base a la frecuencia de estos conflictos:

$$P_a = \frac{1}{60} \frac{N^o([r_{ij}]_{CPA} < \lambda_{xy}, [h_{ij}]_{CPA} < \lambda_z)}{N^o([r_{ij}]_{CPA} < R, [h_{ij}]_{CPA} < H)} = \frac{1}{60} \times \frac{6}{3496} = 1,7070e^{-3}$$

$\left\{ \begin{array}{l} - R = 8\text{NM} \\ - H = 850 \text{ ft} \\ - \lambda_{xy} \cong 134 \text{ ft} \end{array} \right.$

Por lo tanto, la estimación de la probabilidad de Condicional colisión (Pa) es:

$$E(P_a) = \frac{\lambda_{xy}\lambda_z}{N} \sum \left[1 + \frac{\pi}{4} \times \frac{\lambda_{xy}}{\lambda_z} \times r_{ij} \right] f_{2y}(y_{ji}) \times f_{2z}(z_{ji}) = 9,0398 \cdot 10^{-4}$$

La estimación de la probabilidad de fallo de las barreras tácticas de seguridad (Pb) obtenida de los datos de radar de la muestra de 31 días es de:

$$P_b = \frac{N^o(r_{ij} < 0,5 \times R, [h_{ij}]_{CPA} < 0,5 \times H)}{N^o([r_{ij}]_{CPA} < 0,5 \times R, [h_{ij}]_{CPA} < 0,5 \times H)} = \frac{2}{925} = 3,6036 \times 10^{-5}$$

- Estimación del riesgo

La estimación global del riesgo de un escenario se calcula como el producto de la frecuencia de conflictos potenciales (nº conflictos potenciales por hora de vuelo), P_b (probabilidad de un conflicto real dado un conflicto potencial) y P_a (probabilidad de colisión dado un conflicto real).

$$\text{Riesgo de colision} = \text{Frecuencia} \times P_a \times P_b$$

Por lo tanto, la probabilidad de riesgo de colisión en Madrid UIR es de $3,8746 \times 10^{-9}$ por hora de vuelo, lo que equivaldría a que la probabilidad de colisión en el espacio aéreo europeo es de una cada 22 años.

$$\begin{aligned} &\text{Riesgo de colision por movimiento AC} \\ &= 0,04731 \times (9,0398 \times 10^{-4}) \times (3,6036 \times 10^{-5}) = \mathbf{1,5414 \times 10^{-9}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Riesgo de colision por hora de vuelo} \\ &= 0,1189 \times (9,0398 \times 10^{-4}) \times (3,6036 \times 10^{-5}) = \mathbf{3,8746 \times 10^{-9}} \end{aligned}$$

El valor 0,04731 representa la frecuencia de eventos próximos por movimiento de aeronave y el 0,1189 representa la frecuencia de eventos próximos por hora de vuelo, estos valores son proporcionados por los centros de control, en este caso el de Madrid.

→ Ejemplo de Probabilidad Condicional de colisión (P_a) de AoR de Maastricht

Para estimar la probabilidad de colisión P_a de AoR de Maastricht, el autor tomó la muestra de datos de tráfico de un periodo de 31 días, que se calcula a partir de las frecuencias de conflictos potenciales ya mencionadas en el apartado clasificación de eventos próximos.

$$P_a = \frac{N^o \left([r_{ij}]_{CPA} < \lambda_{xy}, [h_{ij}]_{CPA} < \lambda_z \right)}{N^o \left([r_{ij}]_{CPA} < R, [h_{ij}]_{CPA} < H \right)} = \frac{19}{35166} = 5,4029e^{-4}$$

$\left[\begin{array}{l} - R = 5\text{NM} \\ - H = 850 \text{ ft} \\ - \lambda_{xv} \cong 134 \text{ ft} \end{array} \right.$

Por lo tanto, la estimación de la probabilidad de Condicional colisión (P_a) es:

$$E(P_a) = \frac{\lambda_{xy}\lambda_z}{N} \sum \left[1 + \frac{\pi}{4} x \frac{\lambda_{xy}}{\lambda_z} x r_{ij} \right] f_{2y}(y_{ji}) x f_{2z}(z_{ji}) = 8,2021 \cdot 10^{-4}$$

La estimación de la probabilidad de fallo de las barreras tácticas de seguridad (P_b) obtenida de los datos de radar de la muestra de 31 días es de:

$$P_b = \frac{1}{60} \frac{N^o \left(r_{ij} < 0,5 x R, [h_{ij}]_{CPA} < 0,5 x H \right)}{N^o \left([r_{ij}]_{CPA} < 0,5 x R, [h_{ij}]_{CPA} < 0,5 x H \right)} = \frac{1}{60} \frac{4}{9856} = 6,7641 x 10^{-6}$$

- Estimación del riesgo

La estimación global del riesgo de un escenario se calcula como el producto de la frecuencia de conflictos potenciales (nº conflictos potenciales por hora de vuelo), P_b (probabilidad de un conflicto real dado un conflicto potencial) y P_a (probabilidad de colisión dado un conflicto real).

$$Riesgo \text{ de colision} = Frecuencia x P_a x P_b$$

Por lo tanto, la probabilidad de riesgo de colisión para Maastricht AoR es de **$4,1445 x 10^{-9}$** por hora de vuelo, lo que equivale a que la probabilidad de colisión en el espacio aéreo europeo es de una cada 20 años.

$$\begin{aligned} &\text{Riesgo de colision por movimiento AC} \\ &= 0,2681 x (8,2021 x 10^{-4}) x (6,7641 x 10^{-6}) = \mathbf{1,4877 x 10^{-9}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Riesgo de colision por hora de vuelo} \\ &= 0,747 x (8,2021 x 10^{-4}) x (6,7641 x 10^{-6}) = \mathbf{4,1445 x 10^{-9}} \end{aligned}$$

El valor 0,2681 representa la frecuencia de eventos próximos por movimiento de aeronave y el 0,747 representa la frecuencia de eventos próximos por hora de vuelo, estos valores son proporcionados por los centros de control, en este caso el de Maastricht.

3.4.1. COMPARACIÓN Y RESUMEN DE LOS VALORES OBTENIDOS

La Tabla 1 y la Tabla 2 resumen los datos que se han obtenido en el apartado anterior.

Tiempo total de vuelo (horas)	29.392
Número total de conflictos potenciales	3.496
Frecuencia de eventos próximos por hora de vuelo	0,11894
Frecuencia de eventos próximos por movimiento de aeronave	0,047316
Probabilidad de Condicional colisión (Pa)	$9,0398 \cdot 10^{-4}$
Probabilidad de fallo de las barreras tácticas de seguridad (Pb)	$3,6036 \cdot 10^{-5}$

Tabla 1: Resumen de Resultados UIR de Madrid (García Gonzales, 2013)

Tiempo total de vuelo (horas)	47.078
Número total de conflictos potenciales	35.169
Frecuencia de eventos próximos por hora de vuelo	0,7470
Frecuencia de eventos próximos por movimiento de aeronave	0,2681
Probabilidad de Condicional colisión (Pa)	$8,2021 \cdot 10^{-4}$
Probabilidad de fallo de las barreras tácticas de seguridad (Pb)	$6,7641 \cdot 10^{-6}$

Tabla 2: Resumen de Resultados AoR de Maastricht (García Gonzales, 2013)

La frecuencia de conflictos potenciales por hora de vuelo es menor en Madrid UIR que en Maastricht. Sin embargo, se indica que las probabilidades de colisión potencial (Pa) son similares en las dos áreas, lo que implica que el diseño del espacio aéreo en Madrid UIR es más complicado. La probabilidad de falla de las barreras tácticas de seguridad (Pb) es mayor en Madrid UIR, lo que significa que las barreras de seguridad son más eficientes en Maastricht AoR, para la muestra estudiada.

4. IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE CONFLICTOS

Los conflictos se definen como situaciones que se predicen cuando se espera que las distancias horizontales y verticales entre aeronaves serán menores que los estándares de separación prescritos dentro de un tiempo anticipado. Por lo tanto, cuando ocurre un conflicto, es importante que los controladores tomen medidas para evitar que ese conflicto se convierta en una intrusión en el futuro.

En la Figura 6 se describe el procedimiento de detección de conflictos, donde el componente de predicción se encarga de proyectar las posiciones futuras de las aeronaves en el espacio aéreo para un horizonte de tiempo determinado. Esto implica el uso de modelos matemáticos y algoritmos para estimar la trayectoria de las aeronaves y predecir posibles puntos de conflicto.

Por otro lado, el componente de detección de conflictos utiliza la información generada por el componente de predicción para determinar si existe riesgo de que las aeronaves entren en conflicto. Para ello, se utilizan diferentes métodos y métricas para evaluar la proximidad entre las aeronaves. Una vez que se detecta un posible conflicto, el sistema puede emitir un aviso o alerta a los controladores de tráfico para que tomen medidas y eviten el conflicto. (Watkins., 2005)

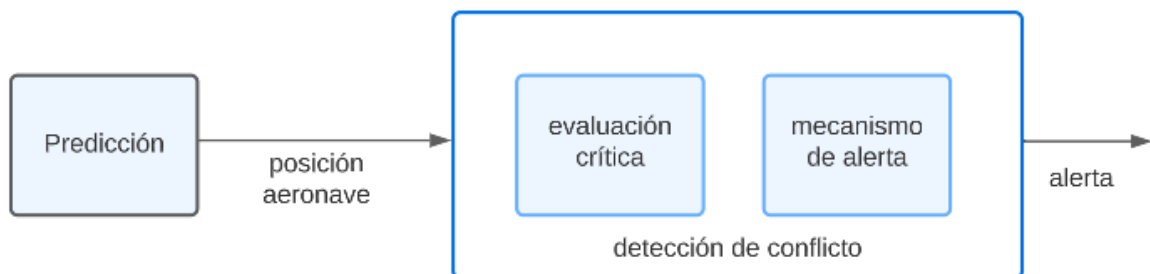


Figura 6: Proceso de detección de conflicto (Watkins., 2005)

No solamente existen los conflictos entre dos aeronaves, también es posible que se produzcan conflictos que involucren a varias aeronaves al mismo tiempo. Este tipo de conflictos pueden tratarse como múltiples conflictos de dos aeronaves y se incluyen en el número de combinaciones basadas únicamente en pares de aeronaves. Por ejemplo, un conflicto que involucre a cuatro aeronaves puede

generar hasta seis conflictos únicos de dos aeronaves, como se muestra en la Figura 7. (Sunil, 2018)

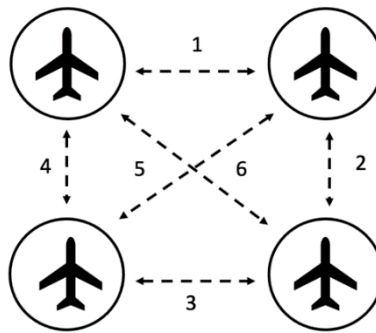


Figura 7: conflicto de múltiples aeronaves (Sunil, 2018)

4.1. DETECCIÓN DE CONFLICTOS

Existe la posibilidad de que la herramienta MTCD genere falsas alarmas, es decir, que generen alertas innecesarias. Las falsas alarmas pueden llevar a los controladores a instruir a pilotos a tomar desviaciones innecesarias, lo que puede generar retrasos, costes adicionales y riesgos de seguridad.

La efectividad de un sistema de alerta depende de la calidad de la información que se obtiene de los sensores y de la exactitud del modelo cinemático de las aeronaves (predicción de la trayectoria). Dado que puede haber errores, es importante establecer un umbral de detección adecuado que minimice la probabilidad de error de detección y de falsa alarma. En la Tabla 8 se muestra un esquema básico del funcionamiento de los sistemas de alerta, referido a las acciones de identificación de conflictos del agente. (Sáez Nieto, 2012)



Figura 8: Esquema general de un sistema de alerta (Sáez Nieto, 2012)

Por otra parte, el tiempo necesario para generar la alerta debe ser mínimo frente a los tiempos de evolución del conflicto. A consecuencia de utilizar el modelo de

identificación de situaciones de alerta basado en señales que contienen errores y modelos dinámicos del proceso que también contienen errores, como resultado el sistema de detección puede proporcionar dos posibles resultados que puede ser alarma o no alarma, mientras en la situación real puede ser de conflicto o no conflicto. En conclusión, se obtienen cuatro casos posibles, de los cuales dos son detección correcta y los otros dos proporcionan información errónea. En la Tabla 3 se pueden visualizar de forma más clara los cuatro posibles resultados y cómo éstos se relacionan con la situación real.

Situación real	Salida del sistema de alerta	
	ALARMA	NO ALARMA
CONFLICTO	Detección correcta de conflicto	Detección fallida
NO CONFLICTO	Falsa alarma	Detección correcta de no conflicto

Tabla 3: Relaciones binarias posibles entre situaciones reales y salidas observadas por un sistema de alarma (Sáez Nieto, 2012)

La Figura 9 muestra cómo se desarrolla y evalúa el sistema de resolución y advertencia de conflictos mediante el uso de modelos y simulaciones para explorar su desempeño en diversas situaciones y ajustar los umbrales de advertencia en función de los resultados obtenidos.

Este enfoque permite modelar las incertidumbres y evaluar su desempeño y robustez frente a ellas. Se busca encontrar un equilibrio aceptable entre la detección de situaciones de peligro (evitando falsas alarmas) y la prevención de eventos de pérdida de separación. (K. Kuchar & C. Yang, 2000)

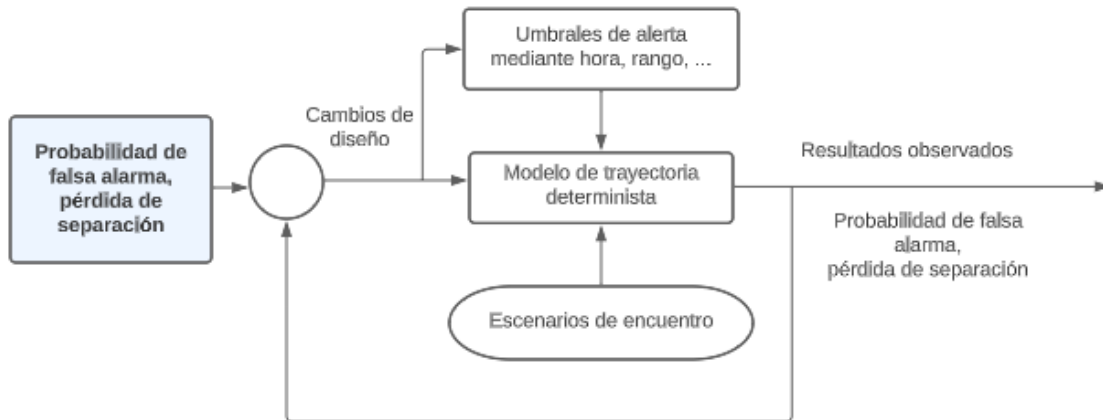


Figura 9: Proceso típico de diseño y evaluación de sistemas de resolución y detección de conflictos (K. Kuchar & C. Yang, 2000)

En la detección de conflictos se pueden dar las siguientes condiciones:

- **Falsos positivos (FP):** se produce cuando la herramienta MTCD genera una alerta de un posible conflicto, pero esta acaba siendo una falsa alarma. Este tipo de conflictos generan costes adicionales innecesarios y además una carga de trabajo innecesaria a los controladores de tráfico aéreo.
- **Positivo real (PR):** se produce cuando la herramienta MTCD genera una alerta de un posible conflicto y este conflicto acaba siendo un conflicto real.
- **Falso negativo (FN):** este tipo de conflictos suponen un riesgo potencial de colisión, ya que se trata de una situación en la que la herramienta MTCD no alerta al controlador aéreo de la existencia de un conflicto real.

La probabilidad de que surjan falsas alarmas en la detección depende de varios factores, como la precisión de los predictores de trayectorias de la propia herramienta MTCD, la configuración del espacio aéreo, el número total de aeronaves en el espacio, entre otros.

Para estimar la probabilidad de colisión, se puede calcular mediante la separación mínima que existe entre dos aeronaves, en función de la velocidad, la altitud y la dirección de las aeronaves. Esta separación se puede medir

mediante el tiempo, se trata de la mínima cantidad de tiempo que debe pasar antes de que dos aeronaves se crucen.

Para determinar la existencia de conflicto se utiliza un valor absoluto que se consigue mediante la diferencia que hay entre el tiempo de separación mínimo real y el valor umbral; si esta diferencia es inferior al valor umbral, esto quiere decir que el tiempo mínimo de separación es demasiado bajo y existe un conflicto. El valor umbral se utiliza como referencia para determinar si la separación mínima entre dos aviones es lo suficientemente mayor como para evitar un positivo real. (Christian Verdonk, 2023)

Por lo tanto, si la herramienta MTCD genera un aviso de conflicto de dos aviones con una separación mínima superior al umbral, pero la estimación de la probabilidad de conflicto está por encima del umbral de decisión, entonces se considera un Falso Positivo (FP).

Si se establecen valores bajos para el umbral de detección, aumenta la probabilidad de falsa alarma debido a los errores y ruido presentes en la señal y el modelo dinámico del proceso. Por lo tanto, se debe de fijar un valor alto para el umbral de detección para minimizar las posibles falsas alarmas. (Christian Verdonk, 2023)

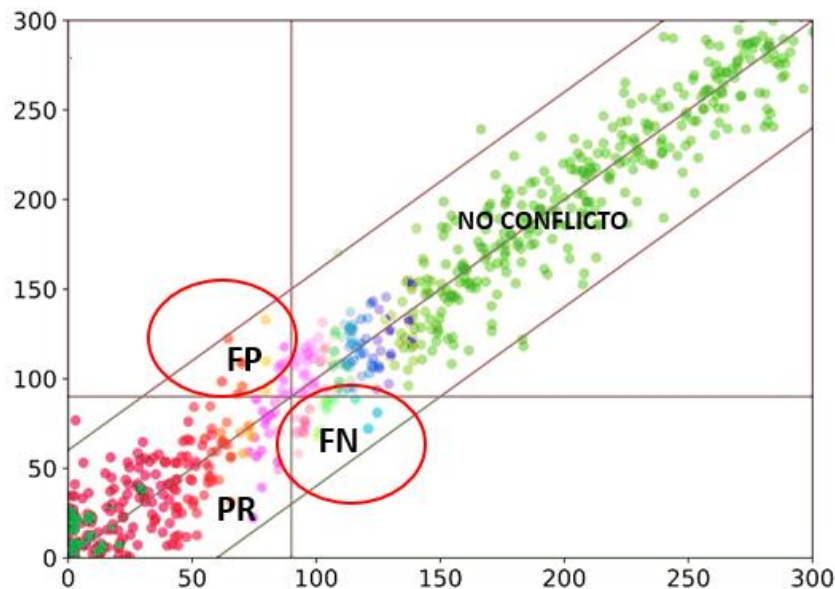


Figura 10: Ejemplo de condiciones para detectar conflictos (Christian Verdonk, 2023)

La Figura 10 es un ejemplo que se encuentra en el artículo titulado "*Trajectory Predictor and Conflict Detection Figures of Merit for a Performance-based Adaptive Air Traffic Monitoring*" (Christian Verdonk, 2023), que nos indica cómo se pueden detectar los tipos de conflictos anteriormente mencionados utilizando la separación real en tiempo de las aeronaves con la separación predicha en tiempo. El eje vertical representa la separación real en tiempo, mientras que el eje horizontal representa la separación predicha en tiempo. Las líneas verticales y horizontales grises representan la diferencia de tiempo umbral, que en este caso el valor es de 90 segundos.

En la zona verde del gráfico representa conflictos reales entre las aeronaves, lo que significa que hay una alta probabilidad de que ocurra un conflicto; en esta zona podemos encontrar los llamados positivo real (PR) y los falsos negativos (FN). Por otro lado, la zona roja no representa un conflicto real, en esta zona podemos encontrar los que ya de un principio se sabe que no son conflictos y los falsos positivos (FP).

En conclusión y para este ejemplo, si la separación mínima real entre dos aeronaves y la diferencia de tiempo entre ellas es menor o igual a 90 segundos, se considera que es un positivo real (PR).

En los casos referentes a Maastricht y UIR de Madrid, que se encuentran detallados en el apartado 4.1 "Clasificación de Eventos Próximos", también se podrían analizar las condiciones del conflicto. (García Gonzales, 2013)

En el caso de Maastricht se ha detectado un total de 41.397 eventos próximos, de los cuales, el 84,86% son conflictos potenciales, estos conflictos son situaciones en las que las aeronaves están en riesgo de colisión en un futuro cercano. El 0,08% detectado corresponde a los positivos reales y el **14,59%** restante corresponde a los **falsos positivos**.

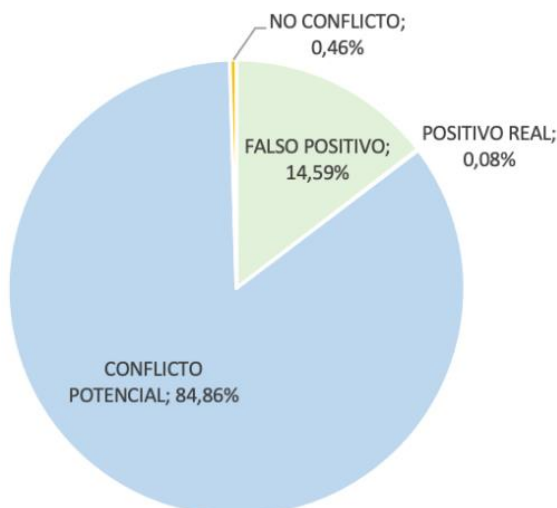
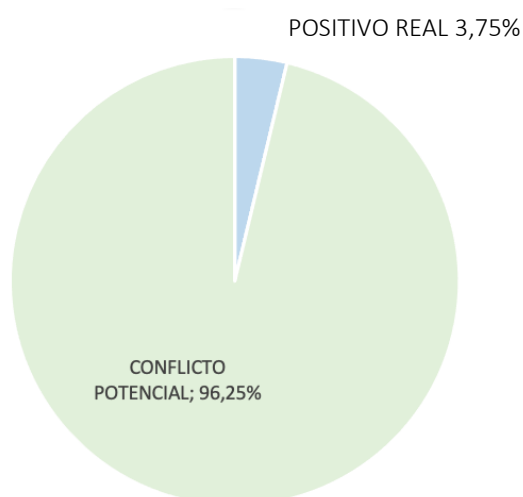


Figura 11: Datos de muestra AoR de Maastricht.
(García Gonzales, 2013)

Y en el caso de UIR de Madrid se ha detectado un total de 3.498 eventos próximos, de los cuales, solamente el 3,75 % son positivos reales, mientras que el restante son conflictos potenciales.

Figura 12: Datos de Muestra UIR Madrid.
(García Gonzales, 2013)



4.2. CLASIFICACIÓN DE EVENTOS PRÓXIMOS

Este apartado trata de la categorización de los eventos próximos que se producen entre dos o más aeronaves en un mismo espacio aéreo, clasificándolo según el tipo de tráfico.

Este estudio se ha tomado como referencia a la tesis doctoral de Eduardo José García (García Gonzales, 2013). Para realizar el análisis de los eventos de aproximación por tipo de tráfico el autor analiza un área geográfica del espacio

aéreo determinada donde se lleva a cabo el control de tráfico, para ello toma dos tipos de muestra de datos recopilados durante 31 días, del 1 al 31 de enero del 2008, una en el aérea de responsabilidad del Centro de Control de Área de Maastricht y otra del tráfico aéreo en España.

Maastricht es responsable del control de tráfico en el espacio aéreo superior en gran parte de Europa Occidental, incluyendo los Países Bajos, Bélgica, Luxemburgo, gran parte de Alemania y algunas partes de Francia.

En el análisis de Maastricht se identificaron un total de 45.389 eventos próximos, los cuales la mayoría son conflictos entre aeronaves civiles que constituyen el 91,2% del total, el 5,6% son conflictos entre aeronaves civiles y militares y solo en el 3,2% son conflictos entre el tráfico militar.

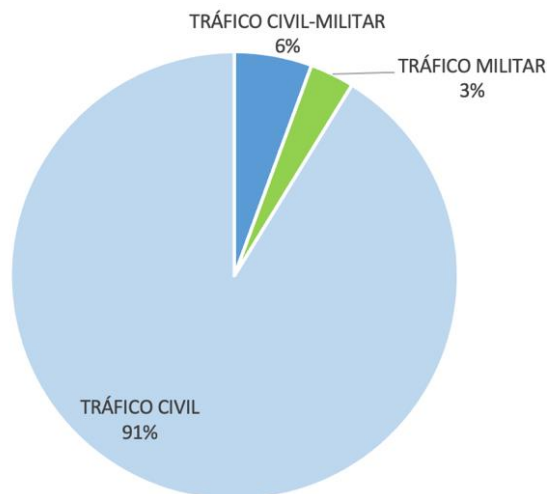


Figura 13: Datos de muestra AoR de Maastricht: clasificación de eventos próximos por tipo de tráfico. (García Gonzales, 2013)

En el análisis de Madrid, el autor lo realizó en base a la información proporcionada por el sistema automatizado de control de tráfico aéreo de España, la región de información superior (UIR) de Madrid que incluye varias comunidades autónomas como Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco, Navarra, Castilla y León, La Rioja y Madrid. También incluye partes de Castilla La Mancha, Extremadura y Aragón, así como la zona marítima del Golfo de Vizcaya y la costa de Galicia. Hay que tener en cuenta que este centro de control solo controla generalmente los vuelos a partir del nivel de vuelo FL245, por lo

tanto, los valores que se muestran son aplicados solo para aeronaves que vuelan a partir de ese nivel.

En el análisis del centro de control de Madrid (ACC) se identificaron un total de 3.515 eventos próximos, la mayoría de estos eventos son aviones civiles, mientras que solo el 0,5% ha sido del tráfico militar.

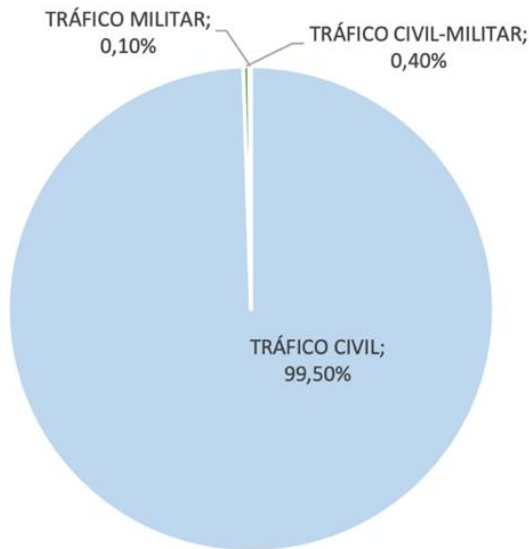


Figura 14: Datos de Muestra: Clasificación de Eventos Próximos por Tipo de Tráfico. UIR de Madrid. (García Gonzales, 2013)

En comparación al anterior caso, el número total de conflictos en UIR de Madrid fue significativamente menor al número total de conflictos del Área de Maastricht. Esto se debe a que en el espacio de Maastricht hay más tráfico aéreo y más complejo en comparación al de Madrid. Además, otra de las razones la densidad del tráfico militar, ya que en el tráfico militar no se aplica la misma separación entre aeronaves, las cuales son 5 millas y 1000 pies, por este motivo causan más conflictos.

5. ANÁLISIS DE COSTES

En el momento en que una aeronave se desvía de su ruta planificada, se generan una serie de costes adicionales. Por lo tanto, en este apartado se realizará un análisis de estos costes, ya que representan un factor muy importante en la toma de decisiones, dado que afectan significativamente en la rentabilidad y eficiencia de las operaciones de las compañías aéreas.

5.1. COSTES OPERATIVOS DE AERONAVES

En la Figura 15 se muestran todos los costes que están relacionados con el funcionamiento de las aeronaves, tanto en aire como en tierra, tales como combustible, tripulación, tasas de aterrizaje, asistencia en tierra, estacionamiento de aeronaves, puentes aéreos y mantenimiento. Los datos utilizados para el análisis provienen de la presentación de los costes de distribución de 61 aerolíneas de todo el mundo, con las aerolíneas europeas representando el 46% de la cuota y el 42% de los pasajeros transportados en la estructura de costes de las aerolíneas. En este trabajo solo se analizarán los costes de vuelo. (EUROCONTROL, 2018)

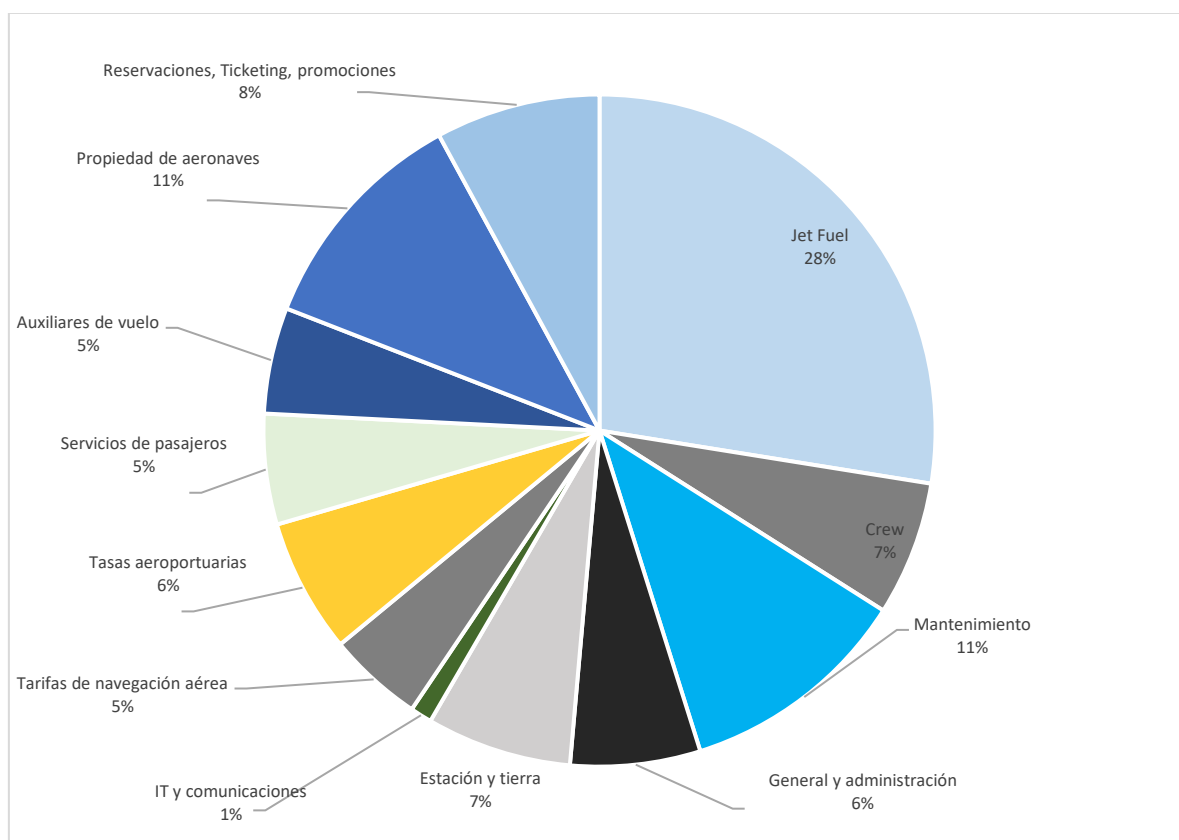


Figura 15: estructura de costes de las aerolíneas 2015 (EUROCONTROL, 2018)

5.2. COSTE DEL COMBUSTIBLE

El combustible es uno de los factores más importantes en la operación de las aeronaves, ya que representa una parte significativa de los costes operativos de las aerolíneas. En este apartado, se examinará el coste actual del combustible Jet Fuel y el consumo promedio de combustible por minuto de vuelo. En este caso el tipo de combustible que se analizará es el Jet Fuel, ya que es el más utilizado, se trata de un combustible derivado del queroseno que proporciona una fuente de energía, que es ideal para los motores de turbina. También proporciona más energía por unidad de peso que otros tipos de combustibles, por lo que significa que los aviones pueden transportar más carga útil con una cantidad limitada de combustible. Se utiliza en aviones comerciales, militares, privados, helicópteros y aviones de carga.

El coste del Jet Fuel puede variar en función de la ubicación geográfica y las condiciones del mercado. Hay varias razones por las que los precios de los combustibles pueden fluctuar mucho, como la oferta y la demanda mundiales de petróleo, las tensiones geopolíticas, las catástrofes naturales y otros factores.

Para determinar el coste del Jet Fuel, se ha utilizado como fuente de referencia la compañía Platts (SPGLOBAL, 2022), la cual emplea un conjunto de metodologías y fuentes de información para calcular los precios del jet fuel en diversos mercados y regiones, teniendo en cuenta la oferta y la demanda global.

En la Tabla 4 se muestra el índice mundial del combustible donde representa la demanda global y se compone de las siguientes regiones: Asia y Oceanía, Europa y la Comunidad de Estados Independientes, Medio Oriente y África, Norteamérica, Latinoamérica y Centro América. Las ponderaciones se revisan periódicamente para que el índice refleje las tendencias mundiales de la oferta y la demanda, los precios que se muestran son de febrero del 2023.

Para facilitar la comparación, se muestran tres unidades de medida de referencia que son comunes en los mercados mundiales: céntimos estadounidenses por

galón, dólares estadounidenses por barril y dólares estadounidenses por tonelada métrica.

	índex	cts/gal	\$/bbl	\$/mt
Jet Fuel Price	100%	276,05	115,95	915,57
ASIA & OCEANIA	22%	252,85	106,2	838,97
EUROPE & CIS	28%	271,4	113,99	899,38
MIDDLE EAST & AFRICA	7%	256,06	107,55	849,16
NORTH AMERICA	39%	294,41	123,65	976,85
LATIN & CENTRAL AMERICA	4%	293,05	123,08	972,33

Tabla 4: Fuel Price Analysis (IATA, 2023)

Según la equivalencia establecida de un barril (bbl) a 158,987 litros y considerando el tipo de cambio actual de 0,95 euros por dólar, se puede calcular que **el precio del Jet Fuel es de 0,693 euros por litro.**

5.2.1. CONSUMO DE COMBUSTIBLE

El consumo de combustible de una aeronave depende de factores como el tipo de aeronave, el peso de la carga, la altitud de vuelo, la velocidad, la distancia del vuelo, las condiciones meteorológicas, entre otros.

En la Tabla 5 se muestran las tasas de consumo de combustible de diversas categorías de aeronaves clasificadas en tres clases: scheduled, business, y rotorcraft. Asimismo, se presenta información sobre su respectiva carga, una aeronave cargada a un 65% y otra aeronave cargada a un 80%. (EUROCONTROL, 2018)

Peso: (% de carga útil máxima)	65%	80%
SCHEDULED AC TYPE		
B738	37,7	40,7
A320	38,5	41,7
A319	34,8	37,4
A321	41,7	45,1
E190	28,8	31,2
DH8D	17,1	17,7
B737	33,3	35,9
CRJ9	25,2	27,2
A332	94,4	102,5
B77W	144,4	159,4
BUSINESS AC TYPE		
C56X	7,7	8,2
BE20	3,9	4,2
PC12	2,4	2,6
C510	4,7	4,9
F2TH	11,5	12,6
ROTORCRAFT AC TYPE		
S92	8,8	9,5
A139	5,8	6,1
EC25	9	9,6
EC55	4,7	4,9

Tabla 5: Fuel burn rates (kg/minute) (EUROCONTROL, 2018)

Para llevar a cabo los experimentos, se tomará en consideración una carga del 80%. Por lo tanto, se obtiene un promedio de **53,88 kg por minuto de combustible consumido** por una aeronave durante la fase de vuelo en ruta.

5.3. COSTE DEL RETRASO

Por cada minuto de retraso en un vuelo implica un coste adicional para la compañía aérea. Por lo tanto, se realizará un cálculo del coste promedio que la compañía aérea debe asumir por cada minuto que un vuelo se retrase. Este coste puede incluir los gastos asociados con la tripulación, el combustible, el mantenimiento y otros costes operativos.

Para poder analizar este coste de retraso, el informe del estudio de la Universidad de Westminster (Westminster, 2015) es imprescindible para entender los costes de los retrasos en el sistema de gestión del tráfico aéreo en Europa, ya que se trata de la evaluación más completa y actualizada. Se evalúa los costes de 15 tipos de aeronaves, teniendo en cuenta la tripulación, el combustible, el mantenimiento, la flota y los pasajeros. Se utilizarán los escenarios de costes base, ya que estos son el caso más común de los operadores europeos e indica el coste que tendrían que pagar.

Existen dos tipos de costes de retraso que se pueden considerar al analizar la eficiencia de una operación:

1. **Costes de retraso tácticos:** estos se producen el día de la operación y se originan en los retrasos que se producen durante el proceso. Estos costes tienen en cuenta los costes de reacción que los retrasos pueden provocar en otras partes de la red. Por ejemplo, en caso de que un vuelo no llegue a su hora prevista, los pasajeros que tienen otros vuelos también tendrán retrasos, lo que conlleva a pérdidas de ingresos para las compañías aéreas y generar costes adicionales en la gestión de la operación.
2. **Costes estratégicos de los retrasos:** estos se calculan antes de la operación. Se utilizan para evaluar el coste de añadir amortiguadores a los horarios de las operaciones, que permiten una flexibilidad para

adaptarse los retrasos sin afectar a la programación general. Estos costes pueden ser una decisión por parte de las aerolíneas con el objetivo de mejorar la eficiencia de la operación, o pueden ser forzados por las limitaciones de programación del aeropuerto, como la congestión del espacio aéreo, que puede afectar negativamente la puntualidad de los vuelos.

La diferencia de los costes tácticos y estratégicos es que los costes tácticos se producen durante la operación y se calculan en función de los efectos que provocan en la red, mientras que los estratégicos se calculan con antelación y se utilizan para mejorar la eficiencia de la operación y reducir los costes asociados a los retrasos. En este proyecto se tendrán en cuenta solo los costes tácticos.

Coste de retraso táctico por minuto

Para calcular estos costes, se utilizaron datos de la Oficina Central de Análisis de Retrasos (CODA) sobre los intervalos de retrasos de salida por tipo de aeronave en el año 2014. (EUROCONTROL, 2018)

Para ello se han calculado dos tipos de valores, uno tiene en cuenta los largos retrasos de hasta 300 minutos, y otro que tiene en cuenta los cortos retrasos de hasta 30 minutos, que representan la gran parte de los retrasos.

Fase de Vuelo	Largos retrasos (hasta 300 min)	Cortos retrasos (hasta 30 min)
EN RUTA	179 €	75 €

Tabla 6: Coste de retraso táctico por minuto 2014 (Westminster, 2015)

Coste estratégico del retraso por minuto

Fase de Vuelo	Coste del retraso por minuto
EN RUTA	70 €

Tabla 7: Coste estratégico de retraso por minuto 2014 (Westminster, 2015)

Estos costes se asocian con los costes medios del número de vuelos, y no incluye los costes estratégicos adicionales que puedan estar presentes.

5.3.1. COSTES DE RETRASO DETALLADOS POR TIPO DE AERONAVE Y DURACIÓN

En la Tabla 8 y la Tabla 9 se detallan costes asociados con los retrasos en la gestión del tráfico aéreo en Europa en el año 2014, detallados por 15 tipos de aeronaves y la duración del retraso. (EUROCONTROL, 2018)

→ Costes tácticos de los retrasos

DELAY RANGES (Minutos)			
AERONAVE	EN RUTA		
	5'	15'	30'
A319	241 €	952 €	2.626 €
A320	251 €	1.012 €	2.857 €
A321	301 €	1.193 €	3.388 €
A332	571 €	2.145 €	5.874 €
AT43	70 €	291 €	832 €
AT72	90 €	391 €	1.133 €
B733	251 €	962 €	2.626 €
B734	261 €	1.012 €	2.807 €
B735	231 €	882 €	2.376 €
B738	271 €	1.083 €	3.037 €
B744	932 €	3.448 €	9.162 €
B752	341 €	1.343 €	3.739 €
B763	511 €	1.925 €	5.253 €
DH8D	110 €	451 €	1.283 €
E190	180 €	702 €	1.915 €

Tabla 8: Costes tácticos, importe total de todos los minutos de retraso en euros (Westminster, 2015)

→ Costes estratégicos de los retrasos

RETRASO (Hora)	
AERONAVE	EN RUTA
A319	3.428 €
A320	3.498 €
A321	4.140 €
A332	7.237 €
AT43	902 €
AT72	1.273 €
B733	3.208 €
B734	3.298 €
B735	2.957 €
B738	3.659 €
B744	10.976 €
B752	4.220 €
B763	6.245 €
DH8D	1.634 €
E190	2.757 €

Tabla 9: Costes estratégicos, retraso por hora en euros (Westminster, 2015)

5.4. COSTE DE LAS EMISIONES CO₂

Las emisiones en la aviación son una de las principales fuentes de emisiones del dióxido de carbono (CO₂) contribuyen significativamente al cambio climático. Estas emisiones son producidas por el consumo de combustible Jet Fuel en las aeronaves. Las emisiones de CO₂ son una preocupación importante para las aerolíneas debido a su impacto ambiental y los costes adicionales que pueden generar, tanto en términos de regulaciones ambientales como de operaciones aéreas.

Para las aeronaves que operan vuelos dentro de la UE deben adquirir permisos de emisiones de CO₂, cuyo coste puede ser significativo. Además, cuando una aeronave se desvía de su ruta prevista, se produce el consumo de combustible y las emisiones de CO₂, lo que significa que el tiempo adicional que pasa en el

aire aumentará sus emisiones de CO₂, lo que a su vez aumentará el coste de los permisos de emisiones.

La OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) establece CORSIA (Sistema de compensación y reducción de carbono para la aviación internacional) establece un límite a las emisiones de CO₂ de la aviación y las aerolíneas deben compensar cualquier exceso de emisiones comprando créditos de compensación de carbono. (Jennifer, 2022)

El coste de compensación varía según el precio del carbono, que oscila entre 6\$-12\$ por tonelada en el rango más bajo, y entre 20\$-40\$ por tonelada en el rango más alto. Para realizar los cálculos de los escenarios, se utilizará la media del rango más alto. (Jennifer, 2022)

Rango	Coste	Media
rango más bajo	6\$-12\$	9\$/tonelada
rango más alto	6\$-12\$	30\$/tonelada

Tabla 10: Tabla de costes de las emisiones de CO₂ por rangos (Jennifer, 2022)

Los precios por kilogramo de CO₂ estimados por CORSIA serían de aproximadamente de **0,027€ por kilogramo** en el rango más alto.

Teniendo en cuenta que cada kilogramo de jet fuel que la aeronave consume, emite 3,15 kg de CO₂, y que la aeronave consume una media de 53,88 kg de combustible por minuto. Multiplicando esta cantidad por la emisión de CO₂ por kilogramo de combustible, se puede calcular que la aeronave emite una media de 169,72 kg de CO₂ por minuto, lo que conlleva un coste de **4,56 € por minuto**.

Estos costes son estimaciones y pueden depender de varios factores, como las políticas gubernamentales, la oferta y la demanda, y la evolución del mercado. Además, las aerolíneas pueden adoptar medidas para reducir sus emisiones, como mejorar la eficiencia energética de sus aeronaves o utilizar biocombustibles, lo que reduciría sus costes.

6. DESCRIPCIÓN GENERAL DE DIFERENTES ESCENARIOS

En este apartado se pretende analizar diferentes escenarios para dos tipos de regiones de control de tráfico aéreo diferentes en Europa, ya mencionados a lo largo del trabajo, los cuales son el tráfico de Madrid UIR y el tráfico de Maastricht.

La diferencia principal entre estos dos tipos de regiones es que Maastricht controla un volumen de tráfico aéreo mucho mayor que Madrid UIR debido a su ubicación geográfica en el centro de Europa y controla una región más amplia. Maastricht controla alrededor de más de 5 millones de vuelos al año, mientras que Madrid UIR controla alrededor de 1,2 millones de vuelos al año.

El objetivo es analizar los resultados de estas regiones, que ya han sido previamente analizadas, utilizando los datos de tráfico correspondientes a un periodo de 31 días. El primer tipo de tráfico es el de Madrid, que representa un tráfico aéreo regular, mientras que el segundo tipo es el de Maastricht, que se caracteriza por tener una mayor complejidad y densidad de tráfico.

Esta comparación será útil para determinar las diferencias entre los dos tipos de tráfico y para evaluar el impacto que tienen en los costes y la seguridad del tráfico aéreo. Además, esta información puede ser utilizada para crear escenarios realistas en simulaciones futuras y para mejorar los sistemas de control de tráfico aéreo.

6.1. CALCULO DEL COSTE COMBUSTIBLE

El coste del combustible es el factor más importante en la operación de las aeronaves, ya que representa una parte significativa del presupuesto total de una aerolínea. Por este motivo se ha desarrollado un programa de lenguaje Python que se muestra en la Figura 16 que permita calcular el coste de combustible de Jet fuel en función de los minutos de retaso que se producen a causa de las desviaciones en caso de conflictos.

El código solicita al usuario que introduzca los minutos de retraso de la aeronave, a partir de esa información calcula la cantidad de combustible consumida en kg,

convirtiendo la cantidad a litros utilizando la proporción de 1 kg que equivale a 0.81 litros de jet fuel. Con el precio del jet fuel proporcionado, se calcula el coste total de combustible y se muestra al usuario por pantalla, se obtiene un coste de **45,9 euros por minuto** de retraso en las operaciones en ruta.

Esta herramienta resulta útil no solamente para poder calcular el coste del combustible, sino que también para mejorar la gestión de recursos en general y la planificación de los vuelos, ya que puede ayudar a las aerolíneas a estimar el impacto financiero que puede provocar una desviación y también podrá tomar medidas adecuadas para minimizar su impacto.

```
# Pedir al usuario el retraso en minutos de la aeronave
retraso_min = int(input("Introduce el retraso en minutos de la aeronave: "))

# Calcular la cantidad de combustible consumida en kg
combustible_kg = 53.88 * retraso_min

# kg a litros (asumiendo densidad de jet fuel de 0.81 kg/L)
combustible_litros = combustible_kg / 0.81

# Calcular el costo del combustible
precio_jet_fuel_eur_litro = 0.69
costo_combustible_euros = combustible_litros * precio_jet_fuel_eur_litro

# Mostrar el costo del combustible por pantalla
print("El costo del combustible para el retraso de", retraso_min,
      "minutos es de", round(costo_combustible_euros, 2), "euros.")
```

Figura 16: Código Python cálculo de combustible en base a los minutos de retraso

6.2. ESCENARIOS

Para evaluar los riesgos y costes asociados a los conflictos, tomando en cuenta la posibilidad de errores en la detección como los falsos positivos y el impacto económico que tienen, se presentan distintos tipos de escenarios con distintas probabilidades. Para calcular el coste que implica cada uno de estos escenarios, se utiliza la siguiente ecuación que considera las horas de vuelo, la frecuencia de conflicto, la probabilidad de falsos positivos y el coste de desviar la situación.

$$C_E = (\text{horas de vuelo} * \text{conflicto por hora vuelo}) * FP \text{ por conflicto} * (\text{coste}/FP)$$

El coste de desvío que se implementará en los escenarios es el siguiente:

COSTE DE DESVIO	
COMBUSTIBLE	45,90 €/min
COSTE DE RETRASO	70 €/min
EMISIONES DE CO2	4,56 €/min
TOTAL	120,46 €/min

Tabla 11: resumen de los costes de desvío

Para calcular el coste total, se tienen en cuenta costes como el combustible, retraso y Emisiones de CO2, y sus costes son 45,90 €/min, 70 €/min y 4,56 €/min, respectivamente.

Cada vez que una aeronave se desvía de su ruta prevista debido a un falso positivo, implica un coste adicional para las empresas de un total de **120,46 euros por minuto**. Esto representa un gasto innecesario para las aerolíneas.

La eficiencia de las herramientas de detección es importante para lograr una detección efectiva de los conflictos. Cuanto más eficientes sean estas herramientas, menor será la probabilidad de falsas alarmas. A continuación, se presentarán varios escenarios con diferentes probabilidades con el coste que conllevan.

6.2.1. ESCENARIO A

FRECUENCIA DE CONFLICTO POR HORA	0,747
PROBABILIDAD DE FP	0,1459
HORAS DE VUELO	47.078

Tabla 12: muestra de datos de Maastricht (García Gonzales, 2013)

El objetivo de este escenario es conocer el coste total en euros de los falsos positivos durante los 31 días de muestra de Maastricht. Para ello se han empelado las siguientes variables para realizar los cálculos:

- **Coste:** el coste total del desvío por minuto, que es de 120,46 € por minuto.
- **Frecuencia de conflicto por hora:** la frecuencia en la que ocurre un conflicto por hora, que es de 0.747 por hora de vuelo.
- **Probabilidad de FP:** la probabilidad de que ocurra un falso positivo, dado un conflicto, que, en la muestra de 31 días, se cuantificó como el 14,59%.
- **Horas de vuelo:** las horas de vuelo totales en 31 días, que son 47.078 horas.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 618.058,709 €.

$$C_E = (\text{horas de vuelo} * \text{conflicto por hora vuelo}) * FP \text{ por conflicto} * (\text{coste}/FP)$$

Numero de conflictos

$$C_F = (47.078 * 0,747) * 0,1459 * (120,46 \text{ €/FP}) = \mathbf{618.058,709 \text{ €}}$$

6.2.2. ESCENARIOS CON XGB Y MLP

Para llevar a cabo los siguientes escenarios, se utilizarán los datos de la muestra que ha analizado el artículo titulado *"Trajectory Predictor and Conflict Detection Figures of Merit for a Performance-based Adaptive Air Traffic Monitoring"* (Christian Verdonk, 2023). En este artículo se describe el proceso de evaluación de rendimiento comparativo, el cual implica la comparación del desempeño de dos técnicas diferentes de predicción de valores futuros en series de tiempo de múltiples horizontes, con el fin de determinar cuál es más precisa y confiable.

Se analizan dos tipos de modelos:

- **XGB** (Extreme Gradient Boosting): se enfoca en la creación de un modelo predictivo altamente preciso y rápido utilizando árboles de decisión. Funciona mediante el entrenamiento iterativo de árboles de decisión sobre los errores cometidos por el árbol anterior, aumentando así el rendimiento global del modelo y obteniendo un rendimiento razonable con una muestra de entrenamiento pequeña.
- **MLP** (Multi-layer Perceptron): es un tipo de red neuronal artificial, consta de varias capas de neuronas artificiales interconectadas que procesan la información de forma secuencial; cada capa recibe la entrada de la capa anterior y produce la salida para la capa siguiente. La primera capa es la capa de entrada, que recibe los datos o características iniciales. La capa de salida produce la predicción final. Los datos se escalan entre los valores mínimo y máximo de cada variable de entrada utilizando la técnica de MinMaxScaler.

La herramienta de detección de conflictos permite el uso de diferentes puntos de operación según el tiempo de previsión correspondiente, es decir, permite ajustar el umbral de probabilidad de encuentro (PTHR) en función del tiempo de previsión para mejorar la precisión de la prevención de conflictos en el espacio aéreo. Para ello se han utilizado los gráficos de los modelos XGB y MLP donde se van a analizar 6 puntos de operación.

Si el PTHR es bajo, habrá más falsos positivos (FP) pero menos falsos negativos (FN), mientras que si es alto habrá menos falsos positivos (FP) pero más falsos negativos (FN). El umbral se ajusta en función del papel y las tareas específicas de los controladores, así como del tiempo de previsión.

Un tiempo de previsión amplio permite considerar una tasa baja de falsos negativos y reducir el número de conflictos perdidos. Esto implica seleccionar un PTHR bajo. Sin embargo, a medida que los vuelos se acercan al punto crítico, es más apropiado utilizar un punto de operación más alto que priorice los encuentros altamente probables. En un tiempo de previsión corto, el objetivo es reducir las alertas falsas y detectar interacciones que requieran acciones inmediatas.

El objetivo es lograr un equilibrio entre el número de falsas positivos y falsos negativos, en función del contexto específico. Las proporciones de falsos positivos y falsos negativos que se muestran en el Gráfico 1 y el Gráfico 4 se calculan con las siguientes ecuaciones (Christian Verdonk, 2023).

$$FALSOS POSITIVOS \% = \frac{FALSOS POSITIVOS}{VERDADEROS NEGATIVOS + FALSOS POSITIVOS} \times 100$$

$$FALSOS NEGATIVOS \% = \frac{FALSOS NEGATIVOS}{VERDADEROS NEGATIVOS + FALSOS NEGATIVOS} \times 100$$

Estas proporciones son importantes para evaluar la precisión del modelo. Un alto porcentaje de falsos positivos indica que el modelo está clasificando incorrectamente un gran número de casos como positivos, mientras que un alto porcentaje de falsos negativos indica que el modelo está clasificando incorrectamente un gran número de casos como negativos.

6.2.2.2. ESCENARIOS CON XGB

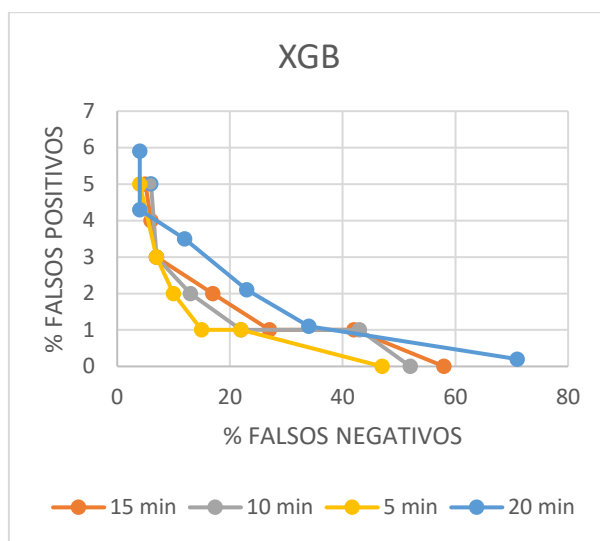


Gráfico 1: Selección del PTHR óptimo para el punto de operación de la detección de conflictos con XGB (Christian Verdonk, 2023)

MINUTOS	FP muy alto	FP alto	FP medio 1	FP medio 2	FP bajo	FP muy bajo
20 min	(4%,5'9%)	(4%,4'4%)	(15%,3'5%)	(23%,2'1%)	(34%,1'5%)	(71%,0'2%)
15 min	(5%,5'9%)	(6%,4'3%)	(7%,3'2%)	(17%,2'1%)	(37%,1'1%)	(42%,0'5%)
10 min	(6%,5'5%)	(7%,3'5%)	(13%,2'1%)	(23%,1%)	(43%,0'5%)	(52%,0'3%)
5 min	(4'5%,5'3%)	(7%,2'9%)	(10%,2'3%)	(15%,1'3%)	(22%,0'6%)	(47%,0'1%)

Tabla 13: Probabilidades de falsos negativos y falsos positivos según tiempo de detección (XGB)
(Christian Verdonk, 2023)

Se utilizará el análisis de la herramienta XGB para evaluar la probabilidad de falsos positivos. Este análisis se basará en el artículo ya mencionado que examina la relación entre los falsos positivos y los falsos negativos de la herramienta XGB. Con este análisis, se podrá determinar la probabilidad de falsos positivos en comparación con los falsos negativos.

Se llevarán a cabo varios escenarios con diferentes puntos de operación, que se determinarán según el tiempo de detección que puede ser de 20 min, 15 min, 10 min o 5 min, y la probabilidad de falsos positivos (FP), que puede ser muy alto, alto, medio 1, medio 2, bajo o muy bajo. Se realizará un análisis detallado de cada escenario para evaluar la probabilidad de falsos positivos, su impacto en la precisión de la herramienta XGB y el coste que conlleva.

6.2.2.2.1. ESCENARIO B (XGL CON MAASTRICHT)

El objetivo del escenario B es conocer el coste total en euros de los falsos positivos durante los 31 días de muestra de Maastricht. Para ello se han empleado las siguientes variables para realizar los cálculos:

- **Coste:** el coste total del desvío por minuto, que es de 120,46 € por minuto.
- **Frecuencia de conflicto por hora:** la frecuencia en la que ocurre un conflicto por hora, que es de 0.747 por hora de vuelo.
- **Horas de vuelo:** las horas de vuelo totales en 31 días, que son 47.078 horas.

FRECUENCIA DE CONFLICTO POR HORA	0,747
PROBABILIDAD DE FP	x
HORAS DE VUELO	47.078

Tabla 14: muestra de datos de Maastricht (García Gonzales, 2013)

ESCENARIO CON FP MUY ALTO CON 20 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,059
PROBABILIDAD DE FN	0,04

En este caso, se está considerando una probabilidad muy alta de falsos positivos del 5,9%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 5,9% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 4%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 248.984,24 €.

$$C_E = (\text{horas de vuelo} * \text{conflicto por hora vuelo}) * \text{FP por conflicto} * (\text{coste}/\text{FP})$$

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,059 * (120,46) = \mathbf{248.984,24 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP ALTO CON 20 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,044
--------------------	-------

PROBABILIDAD DE FN	0,04
--------------------	------

En este caso, se está considerando una probabilidad alta de falsos positivos del 4,4%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 4,4% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 4%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 185.683,16 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,044 * (120,46) = \mathbf{185.683,16 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP MEDIO 1 CON 20 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,035
PROBABILIDAD DE FN	0,15

En este caso, se está considerando una probabilidad media de falsos positivos del 3,5%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 3,5% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 15%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 147.702,52 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,035 * (120,46) = \mathbf{147.702,52 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP MEDIO 2 CON 20 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,021
PROBABILIDAD DE FN	0,23

En este caso, se está considerando una probabilidad media de falsos positivos del 2,1%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 2,1% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 23%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 88.621,51 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,021 * (120,46) = \mathbf{88.621,51 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP BAJO CON 20 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,015
PROBABILIDAD DE FN	0,34

En este caso, se está considerando una probabilidad baja de falsos positivos del 1,5%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 1,5% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 34%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 63.301,08 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,015 * (120,46) = \mathbf{63.301,08 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP MUY BAJO CON 20 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,002
PROBABILIDAD DE FN	0,71

En este caso, se está considerando una probabilidad muy baja de falsos positivos 0,2%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 0,2% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 71%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 8.440,14€.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,002 * (120,46) = \mathbf{8.440,14 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP MUY ALTO CON 15 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,059
PROBABILIDAD DE FN	0,05

En este caso, se está considerando una probabilidad muy alta de falsos positivos del 5,9%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 5,9% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 5%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 248.984,24 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,059 * (120,46) = \mathbf{248.984,24 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP ALTO CON 15 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,043
PROBABILIDAD DE FN	0,06

En este caso, se está considerando una probabilidad alta de falsos positivos del 4,3%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 4,3% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 6%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 181.463,09 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,043 * (120,46) = \mathbf{181.463,09 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP MEDIO 1 CON 15 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,032
PROBABILIDAD DE FN	0,07

En este caso, se está considerando una probabilidad media de falsos positivos del 3,2%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo,

dado un conflicto, es del 3,2% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 7%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 42.200,72 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,032 * (120,46) = \mathbf{42.200,72 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP MEDIO 2 CON 15 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,021
PROBABILIDAD DE FN	0,17

En este caso, se está considerando una probabilidad media de falsos positivos del 2,1%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 2,1% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 17%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 88.621,51 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,021 * (120,46) = \mathbf{88.621,51 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP BAJO CON 15 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,011
PROBABILIDAD DE FN	0,37

En este caso, se está considerando una probabilidad baja de falsos positivos del 1,1%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 1,1% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 37%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 46.420,79 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,011 * (120,46) = \mathbf{46.420,79 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP MUY BAJO CON 15 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,005
PROBABILIDAD DE FN	0,42

En este caso, se está considerando una probabilidad muy baja de falsos positivos 0,5%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 0,5% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 42%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 21.100,36 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,005 * (120,46) = \mathbf{21.100,36 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP MUY ALTO CON 10 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,055
PROBABILIDAD DE FN	0,06

En este caso, se está considerando una probabilidad muy alta de falsos positivos del 5,5%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 5,5% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 6%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 232.103,96 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,055 * (120,46) = \mathbf{232.993,68 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP ALTO CON 10 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,035
PROBABILIDAD DE FN	0,07

En este caso, se está considerando una probabilidad alta de falsos positivos del 3,5%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 3,5% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 7%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 147.702,52 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,035 * (120,46) = \mathbf{147.702,52 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP MEDIO 1 CON 10 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,01
PROBABILIDAD DE FN	0,23

En este caso, se está considerando una probabilidad media de falsos positivos del 1%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 1% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 23%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 42.200,72 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,01 * (120,46) = \mathbf{42.200,72 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP MEDIO 2 CON 10 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,021
PROBABILIDAD DE FN	0,23

En este caso, se está considerando una probabilidad media de falsos positivos del 2,1%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 2,1% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 23%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 88.621,51€.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,021 * (120,46) = \mathbf{88.621,51€}$$

ESCENARIO CON FP BAJO CON 10 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,005
PROBABILIDAD DE FN	0,43

En este caso, se está considerando una probabilidad baja de falsos positivos del 0,5%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 0,5% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 43%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 21.000.36 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,005 * (120,46) = \mathbf{21.000.36 €}$$

ESCENARIO CON FP MUY BAJO CON 10 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,003
PROBABILIDAD DE FN	0,52

En este caso, se está considerando una probabilidad muy baja de falsos positivos 0,3%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 0,3% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 52%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 12.660,22 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,003 * (120,46) = \mathbf{12.660,22€}$$

ESCENARIO CON FP MUY ALTO CON 5 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,053
PROBABILIDAD DE FN	0,045

En este caso, se está considerando una probabilidad muy alta de falsos positivos del 5,3%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 5,3% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 4,5%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 223.663,81 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,053 * (120,46) = \mathbf{223.663,81€}$$

ESCENARIO CON FP ALTO CON 5 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,029
PROBABILIDAD DE FN	0,07

En este caso, se está considerando una probabilidad alta de falsos positivos del 2,9%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 2,9% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 7%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 122.382,09€.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,029 * (120,46) = \mathbf{122.382,09€}$$

ESCENARIO CON FP MEDIO 1 CON 5 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,023
PROBABILIDAD DE FN	0,10

En este caso, se está considerando una probabilidad media de falsos positivos del 2,3%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo,

dado un conflicto, es del 2,3% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 10%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 97.061,65 €

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,023 * (120,46) = \mathbf{97.061,65 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP MEDIO 2 CON 5 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,013
PROBABILIDAD DE FN	0,15

En este caso, se está considerando una probabilidad media de falsos positivos del 1,3%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 1,3% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 15%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 54.860,93€.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,013 * (120,46) = \mathbf{54.860,93 \text{ €}}$$

ESCENARIO CON FP BAJO CON 5 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,006
PROBABILIDAD DE FN	0,22

En este caso, se está considerando una probabilidad baja de falsos positivos del 0,6%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 0,6% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 22%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 25.320,43€.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,006 * (120,46) = \mathbf{25.320,43€}$$

ESCENARIO CON FP MUY BAJO CON 5 MINUTOS DE ANTELACIÓN

PROBABILIDAD DE FP	0,001
PROBABILIDAD DE FN	0,47

En este caso, se está considerando una probabilidad muy baja de falsos positivos 0,1%. Es decir, la probabilidad de que ocurra un resultado positivo erróneo, dado un conflicto, es del 0,1% en la muestra de 31 días en Maastricht. Teniendo en cuenta que la probabilidad de falsos negativos es de 47%.

Por lo tanto, asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de 4.220,07 €.

$$C_E = (47.078 * 0,747) * 0,001 * (120,46) = \mathbf{4.220,07 €}$$

6.2.2.2.1.1. RESUMEN DE COSTES ESCENARIO B

Los resultados se presentan en la siguiente tabla de costes:

MINUTOS	FP muy alto	FP alto	FP medio 1	FP medio 2	FP bajo	FP muy bajo
20 min	248.984,24€	185.683,16€	147.702,52€	88.621,51€	63.301,08€	8.440,14€
15 min	248.984,24€	181.463,09€	135.042,30€	88.621,51€	46.420,79€	21.100,36€
10 min	232.103,96€	147.702,52€	<u>42.200,72 €</u>	88.621,51€	21.100,36€	12.660,22€
5 min	223.663,81€	122.382,09€	97.061,65 €	54.860,93€	25.320,43€	4.220,07 €

Tabla 15: tabla resumen de costes escenario B con XGL en Maastricht

- **Coste más bajo** (*Falsos Negativos 47%, Falsos Positivos 0,1%*)

A simple vista, podemos identificar que el coste más bajo es de 4.220'07 €, el cual está asociado a un bajo porcentaje de falsos positivos y una antelación de 5 minutos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta opción presenta un 0,1% de falsos positivos y un 47% de falsos negativos. Esto implica un alto nivel de incertidumbre, lo que significa que puede haber conflictos no detectados

o que podrían ser identificados en el último momento, lo cual podría generar problemas de seguridad.

Es importante destacar que los problemas de seguridad son muy costosos, ya que pueden dar lugar a accidentes con un alto coste asociado. Por lo tanto, aunque el coste económico de los falsos positivos sea bajo, es necesario considerar y evaluar el impacto de la incertidumbre y los problemas de seguridad asociados. Estos problemas pueden tener consecuencias graves y costosas, como accidentes.

- **Coste más alto** (*Falsos Negativos 4%-5%, Falsos Positivos 5.9%*)

En cuanto al coste más alto de la tabla, este asciende a 248.984,24€ y está asociado a dos tiempos de antelación, con 20 minutos de antelación y 15 minutos de antelación, los dos tiempos tienen un 5,9% de falsos positivos, lo cual genera un coste adicional debido a la detección de un gran número de falsos positivos. Además, se registra un entre 4% y 5% de falsos negativos, lo que indica que hay un 4% o un 5% de conflictos que aún no han sido identificados con 20 minutos o 15 minutos de antelación respectivamente. En este escenario, se alcanza un mayor nivel de seguridad, pero a costa de un mayor número de falsos positivos y, por ende, de un coste adicional muy grande.

- **Coste ideal** (*Falsos Negativos 13%, Falsos Positivos 2,1%*)

Por lo tanto, el coste ideal de este escenario debe ser un equilibrio entre el coste económico y el nivel de seguridad que se desea alcanzar. En el caso es de 42.200,72 €, está asociado a un 2,1% de falsos positivos y un 13% de falsos negativos, con 10 minutos de antelación, la cual se puede considerar óptima, ya que permite detectar la mayoría de los conflictos con suficiente tiempo de anticipación.

Para conocer si realmente este 13 % de falsos negativos no causa un problema de seguridad y se puede realizar este escenario de forma rentable, se calculará el número de conflictos que existen en 10 minutos para ver si se pueden solucionar teniendo un 13% de conflictos que aún no se conoce.

Numero de conflictos mensuales	35167,26
Numero de conflictos al día	1134,42
Numero de conflictos a la hora	47,26
Numero de conflictos por minuto	0,78

Considerando que el número de conflictos por minuto es de 0,78, podemos determinar que en 10 minutos habrán aproximadamente 7.79 conflictos. Si existe un 13% de falsos negativos, lo cual equivale a un 1.02 de conflictos que aún no han sido detectados, al sumar esta cantidad al número total de conflictos a resolver en 10 minutos, obtendríamos un total de 8.9021 conflictos, sumándole también un 2,1% que representan los falsos positivos tendríamos un total de 9,06 conflictos. Esto significa que los controladores tendrían que resolver aproximadamente 0.91 conflictos por minuto. Es importante tener en cuenta que se supone la presencia de múltiples controladores aéreos para abordar estos conflictos, lo que significa que sería factible resolver el 13% restante de falsos negativos sin dificultad alguna, por lo cual, no habría problemas de seguridad.

En el Gráfico 3 se muestra de forma gráfica un resumen del escenario con los costes que suponen los falsos positivos:

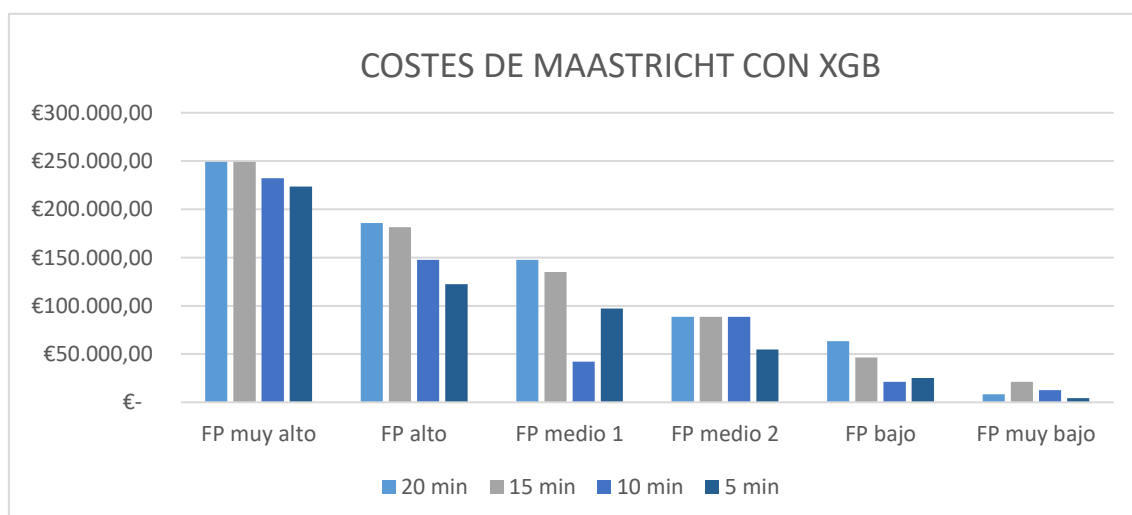


Gráfico 2: costes de Maastricht con XGB

Asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de **42.200,72 €**, con un 2,1% de falsos positivos y un 13% de falsos negativos, detectando la mayoría de los conflictos con 10 minutos de anticipación.

6.2.2.2.2. ESCENARIO C (XGB CON MADRID UIR)

El objetivo del escenario C es realizar el mismo proceso anterior, pero en este caso con los datos en la muestra de 31 días del tráfico de Madrid UIR.

Las variables para realizar los cálculos son las siguientes:

FRECUENCIA DE CONFLICTO POR HORA	0,1189
PROBABILIDAD DE FP	x
HORAS DE VUELO	29.392

Tabla 16: muestra de datos de Madrid (García Gonzales, 2013)

6.2.2.2.2.1. RESUMEN DE COSTES ESCENARIO C

Siguiendo los mismos procedimientos del escenario B, se ha tenido en cuenta las horas de vuelo y la frecuencia de conflicto por hora para calcular los costes con la siguiente formula:

$$C_E = (29.392 * 0,1189) * FP \text{ por conflicto} * (120\text{€})$$

Los resultados se presentan en la siguiente tabla de costes, la cual muestra los costes asociados a diferentes niveles de falsos positivos (FP) en función de la antelación en la detección de conflictos representada en minutos:

MINUTOS	FP muy alto	FP alto	FP medio 1	FP medio 2	FP bajo	FP muy bajo
20 min	24.742,54 €	18.452,06 €	14.677,78€	8.806,67 €	6.290,48 €	838,73 €
15 min	24.742,54 €	18.032,70 €	13.419,68€	8.806,67 €	4.613,02 €	2.096,83€
10 min	23.065,08 €	14.677,78 €	4.193,65 €	8.806,67 €	2.096,83 €	1.258,10€
5 min	22.226,35 €	12.161,59 €	9.645,40 €	5.451,75 €	2.516,19 €	419,37 €

Tabla 17: tabla resumen de costes escenario B con XGB en Madrid

- **Coste más bajo** (*Falsos Negativos 47%, Falsos Positivos 0,1%*)

A simple vista, podemos identificar que el coste más bajo es de 419,37 €, el cual está asociado a un bajo porcentaje de falsos positivos y una antelación de 5 minutos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta opción presenta un 0,1% de falsos positivos y un 47% de falsos negativos. Esto implica un alto nivel de incertidumbre, lo que significa que puede haber conflictos no detectados o que podrían ser identificados en el último momento, lo cual podría generar problemas de seguridad.

Es importante destacar que los problemas de seguridad son muy costosos, ya que pueden dar lugar a accidentes con un alto coste asociado. Por lo tanto, aunque el coste económico de los falsos positivos sea bajo, es necesario considerar y evaluar el impacto de la incertidumbre y los problemas de seguridad asociados. Estos problemas pueden tener consecuencias graves y costosas, como accidentes.

- **Coste más alto** (*Falsos Negativos 4%, Falsos Positivos 5,9%*)

En cuanto al coste más alto de la tabla, este asciende a 24.742,54 € y está asociado a un 5,9% de falsos positivos, lo cual genera un coste adicional debido a la detección de un gran número de falsos positivos. Además, se registra un 4% de falsos negativos, lo que indica que hay un 4% de conflictos que aún no han sido identificados con 20 minutos de antelación. En este escenario, se alcanza un mayor nivel de seguridad, pero a costa de un mayor número de falsos positivos y, por ende, de un coste adicional muy grande.

- **Coste ideal** (*Falsos Negativos 7%, Falsos Positivos 3,2%*)

Por lo tanto, el coste ideal de este escenario debe ser un equilibrio entre el coste económico y el nivel de seguridad que se desea alcanzar. En el caso es de 13.419,68 €, está asociado a un 3,2% de falsos positivos y un 7% de falsos negativos, con 15 minutos de antelación, la cual se considera óptima, ya que permite detectar la mayoría de los conflictos con suficiente tiempo de anticipación.

En el Gráfico 3 se muestra de forma gráfica un resumen del escenario con los costes que suponen los falsos positivos:



Gráfico 3: costes de Madrid con XGB

Asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de **13.419'68 €**, con un 3,2% de falsos positivos y un 7% de falsos negativos, detectando la mayoría de los conflictos con 15 minutos de anticipación.

6.2.2.3. ESCENARIOS CON MLP

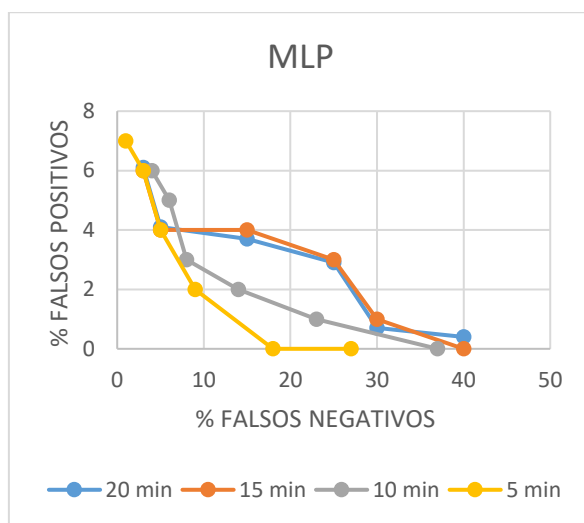


Gráfico 4: Selección del PTHR óptimo para el punto de operación de la detección de conflictos con MLP
(Christian Verdonk, 2023)

MINUTOS	FP muy alto	FP alto	FP medio 1	FP medio 2	FP bajo	FP muy bajo
20 min	(3%,6'1%)	(5%,4'1%)	(15%,3'7%)	(25%,2'9%)	(30%,2'9%)	(40%,0'4%)
15 min	(3%,7%)	(4%,5'8%)	(5%,4'5%)	(12%,1'7%)	(25%,0'5%)	(42%,0'2%)
10 min	(4%,6'2%)	(6%,5%)	(8%,3%)	(14%,2'1%)	(23%,1'3%)	(37%,0'5%)
5 min	(1%,7'5%)	(3%,6'2)	(5%,4'2%)	(9%,2'3%)	(18%,0'5%)	(27%,0'3%)

Tabla 18: Probabilidades de FN y FP según tiempo de detección (MLP) (Christian Verdonk, 2023)

Se utilizará el análisis de la herramienta MLP para evaluar la probabilidad de falsos positivos. Este análisis se basará en el artículo ya mencionado que examina la relación entre los falsos positivos y los falsos negativos de la herramienta MLP. Con este análisis, se podrá determinar la probabilidad de falsos positivos en comparación con los falsos negativos.

Se llevarán a cabo varios escenarios con diferentes puntos de operación, que se determinarán según el tiempo de detección que puede ser de 20 min, 15 min, 10 min o 5 min, y la probabilidad de falsos positivos (FP), que puede ser muy alto, alto, medio 1, medio 2, bajo o muy bajo. Se realizará un análisis detallado de cada escenario para evaluar la probabilidad de falsos positivos, su impacto en la precisión de la herramienta MLP y el coste que conlleva.

6.2.2.3.1. ESCENARIO D (MLP CON MAASTRICHT)

El objetivo del escenario D es conocer el coste total en euros de los falsos positivos durante los 31 días de muestra de Maastricht. Para ello se han empleado las siguientes variables para realizar los cálculos:

- **Coste:** el coste total del desvío por minuto, que es de 120,46 € por minuto.
- **Frecuencia de conflicto por hora:** la frecuencia en la que ocurre un conflicto por hora, que es de 0.747 por hora de vuelo.
- **Horas de vuelo:** las horas de vuelo totales en 31 días, que son 47.078 horas.

FRECUENCIA DE CONFLICTO POR HORA	0,747
PROBABILIDAD DE FP	x
HORAS DE VUELO	47.078

Tabla 19: muestra de datos de Maastricht (García Gonzales, 2013)

6.2.2.3.1.1. RESUMEN DE COSTES ESCENARIO D

Siguiendo los mismos procedimientos, se ha tenido en cuenta las horas de vuelo y la frecuencia de conflicto por hora para calcular los costes con la siguiente fórmula:

$$C_E = (47.078 * 0,747) * FP \text{ por conflicto} * (120€)$$

Los resultados se presentan en la siguiente tabla de costes, la cual muestra los costes asociados a diferentes niveles de falsos positivos (FP) en función de la antelación en la detección de conflictos representada en minutos:

MINUTOS	FP muy alto	FP alto	FP medio 1	FP medio 2	FP bajo	FP muy bajo
20 min	257.424,39 €	173.022,95 €	156.142,66€	122.382,09€	122.382,09€	16.880,29€
15 min	295.405,03 €	244.764,17 €	189.903,24€	71.741,22 €	21.100,36 €	8.440,14 €
10 min	261.644,46 €	211.003,60 €	126.602,16€	88.621,51 €	54.860,93 €	21.100,36€
5 min	316.505,39 €	261.644,46 €	177.243,02€	97.061,65 €	21.100,36 €	12.660,22€

Tabla 20: Tabla resumen de costes escenario D con MLP en Maastricht

- **Coste más bajo** (*Falsos Negativos 42%, Falsos Positivos 0'2%*)

A simple vista, podemos identificar que el coste más bajo es de 8.440,14 €, el cual está asociado a un bajo porcentaje de falsos positivos y una antelación de 15 minutos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta opción presenta un 0,2% de falsos positivos y un 42% de falsos negativos. Esto implica un alto nivel de incertidumbre, lo que significa que puede haber conflictos no detectados o que podrían ser identificados en el último momento, lo cual podría generar problemas de seguridad.

- **Coste más alto** (*Falsos Negativos 1%, Falsos Positivos 7'5%*)

En cuanto al coste más alto de la tabla, este asciende a 316.505,39 € y está asociado a un 7,5% de falsos positivos, lo cual genera un coste adicional debido a la detección de un gran número de falsos positivos. Además, se registra un 1% de falsos negativos, lo que indica que hay un 1% de conflictos que aún no han sido identificados con 5 minutos de antelación. En este escenario, se alcanza un mayor nivel de seguridad, pero a costa de un mayor número de falsos positivos y, por ende, de un coste adicional muy grande.

- **Coste ideal** (*Falsos Negativos 8%, Falsos Positivos 3%*)

Por lo tanto, el coste ideal de este escenario debe ser un equilibrio entre el coste económico y el nivel de seguridad que se desea alcanzar. En el caso es de 126.602,16 €, está asociado a un 3% de falsos positivos y un 8% de falsos negativos, con 10 minutos de antelación, la cual se considera óptima, ya que permite detectar la mayoría de los conflictos con suficiente tiempo de anticipación.

Considerando que el número de conflictos por minuto es de 0,78, podemos determinar que en 10 minutos habrá aproximadamente 7,87 conflictos. Si existe un 8% de falsos negativos, lo cual equivale a un 0.63 de conflictos que aún no han sido detectados, al sumar esta cantidad y 0,23 de FP al número total de

conflictos a resolver en 10 minutos, obtendríamos un total de 8,74 conflictos. Esto significa que los controladores tendrían que resolver aproximadamente 0.87 conflictos por minuto. Es importante tener en cuenta que se supone la presencia de múltiples controladores aéreos para abordar estos conflictos, lo que significa que sería factible resolver el 8% restante de falsos negativos sin dificultad alguna, por lo cual, no habría problemas de seguridad.

En el Gráfico 5 se muestra de forma gráfica un resumen del escenario con los costes que conllevan los falsos positivos:

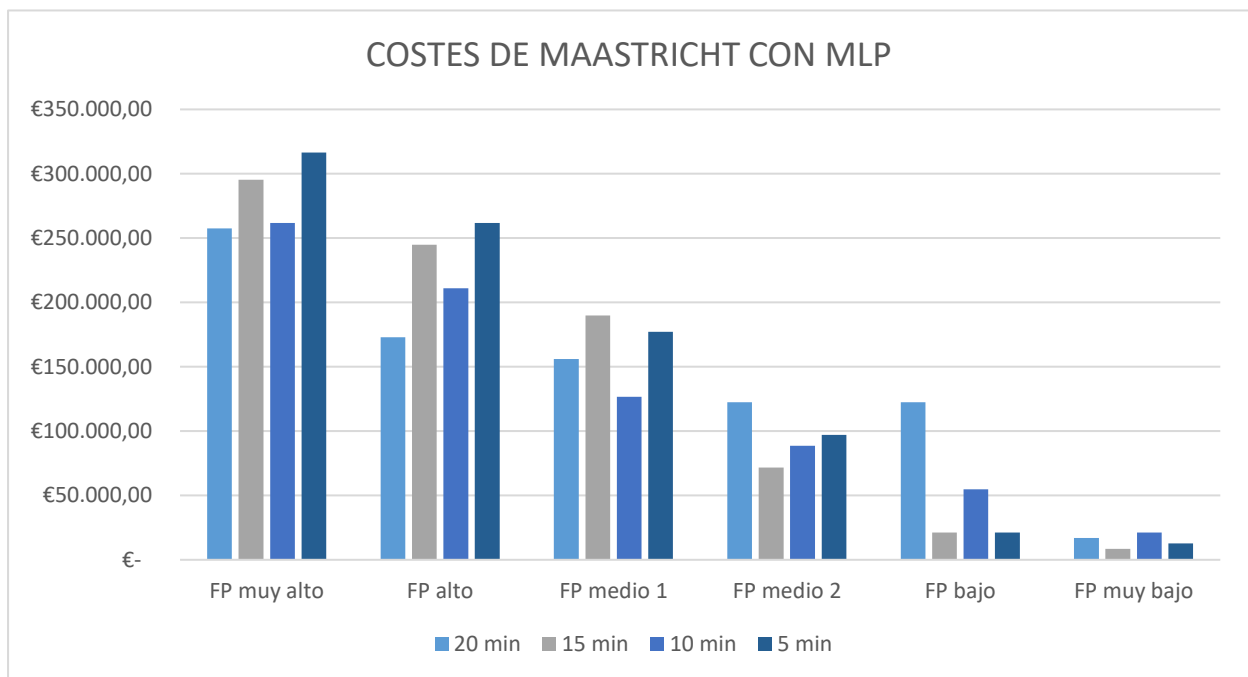


Gráfico 5: costes de Maastricht con MLP

Asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de **126.602,16 €**, con un 3% de falsos positivos y un 8% de falsos negativos, detectando la mayoría de los conflictos con 10 minutos de anticipación.

6.2.2.3.2. ESCENARIO E (MLP CON MADRID)

El objetivo del escenario E es realizar el mismo proceso anterior, pero en este caso con los datos en la muestra de 31 días del tráfico de Madrid UIR.

Las variables para realizar los cálculos son las siguientes:

- **Coste:** el coste total del desvío por minuto, que es de 120,46 € por minuto.
- **Frecuencia de conflicto por hora:** la frecuencia en la que ocurre un conflicto por hora, que es de 0,1189 por hora de vuelo.
- **Horas de vuelo:** las horas de vuelo son 29.392 horas.

PROBABILIDAD DE CONFLICTO POR HORA	0,1189
PROBABILIDAD DE FP	x
HORAS DE VUELO	29.392

Tabla 21: Muestra de datos de Madrid

6.2.2.3.2.1. RESUMEN DE COSTES ESCENARIO E

Siguiendo los mismos procedimientos, se ha tenido en cuenta las horas de vuelo y la frecuencia de conflicto por hora para calcular los costes con la siguiente formula:

$$C_E = (29.392 * 0,1189) * FP \text{ por conflicto} * (120\text{€})$$

Los resultados se presentan en la siguiente tabla de costes, la cual muestra los costes asociados a diferentes niveles de falsos positivos (FP) en función de la antelación en la detección de conflictos representada en minutos:

MINUTOS	FP muy alto	FP alto	FP medio 1	FP medio 2	FP bajo	FP muy bajo
20 min	25.581,27 €	17.193,97 €	15.516,51€	12.161,59 €	12.161,59 €	1.677,46 €
15 min	29.355,55 €	24.323,17 €	18.871,43€	7.129,21 €	2.096,83 €	838,73 €
10 min	26.000,63 €	20.968,25 €	12.580,95€	8.806,67 €	5.451,75 €	2.096,83 €
5 min	31.452,38 €	26.000,63 €	17.613,33€	9.645,40 €	2.096,83 €	1.258,10 €

Tabla 22: Tabla resumen de costes escenario E con MLP en Madrid

- **Coste más bajo** (*Falsos Negativos 42%, Falsos Positivos 0'2%*)

A simple vista, podemos identificar que el coste más bajo es de 838,73 €, el cual está asociado a un bajo porcentaje de falsos positivos y una antelación de 15 minutos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta opción presenta un 0,2% de falsos positivos y un 42% de falsos negativos. Esto implica un alto nivel de incertidumbre, lo que significa que puede haber conflictos no detectados o que podrían ser identificados en el último momento, lo cual podría generar problemas de seguridad.

- **Coste más alto** (*Falsos Negativos 1%, Falsos Positivos 7'5%*)

En cuanto al coste más alto de la tabla, este asciende a 31.452,38 € y está asociado a un 7,5% de falsos positivos, lo cual genera un coste adicional debido a la detección de un gran número de falsos positivos. Además, se registra un 1% de falsos negativos, lo que indica que hay un 1% de conflictos que aún no han sido identificados con 5 minutos de antelación. En este escenario, se alcanza un mayor nivel de seguridad, pero a costa de un mayor número de falsos positivos y, por ende, de un coste adicional muy grande.

- **Coste ideal** (*Falsos Negativos 8%, Falsos Positivos 3%*)

Por lo tanto, el coste ideal de este escenario debe ser un equilibrio entre el coste económico y el nivel de seguridad que se desea alcanzar. En el caso es de 12.580,95€, y está asociado a un 3% de falsos positivos y un 8% de falsos negativos, con 10 minutos de antelación, la cual se considera óptima, ya que permite detectar la mayoría de los conflictos con suficiente tiempo de anticipación.

Numero de conflictos mensuales	3494,71
Numero de conflictos al día	112,73
Numero de conflictos a la hora	4,69
Numero de conflictos por minuto	0,078

Considerando que el número de conflictos por minuto es de 0,078, podemos determinar que en 10 minutos habrá aproximadamente 0,78 conflictos. Si existe un 8% de falsos negativos, lo cual equivale a un 0,062 de conflictos que aún no han sido detectados, al sumar esta cantidad y 0,023 de FP al número total de conflictos a resolver en 10 minutos, obtendríamos un total 0,85 conflictos. Esto significa que los controladores tendrían que resolver aproximadamente 0.087 conflictos por minuto. Es importante tener en cuenta que se supone la presencia de múltiples controladores aéreos para abordar estos conflictos, lo que significa que sería factible resolver el 8% restante de falsos negativos sin dificultad alguna, por lo cual, no habría problemas de seguridad.

En el Gráfico 6 se muestra de forma gráfica un resumen del escenario con los costes que suponen los falsos positivos:

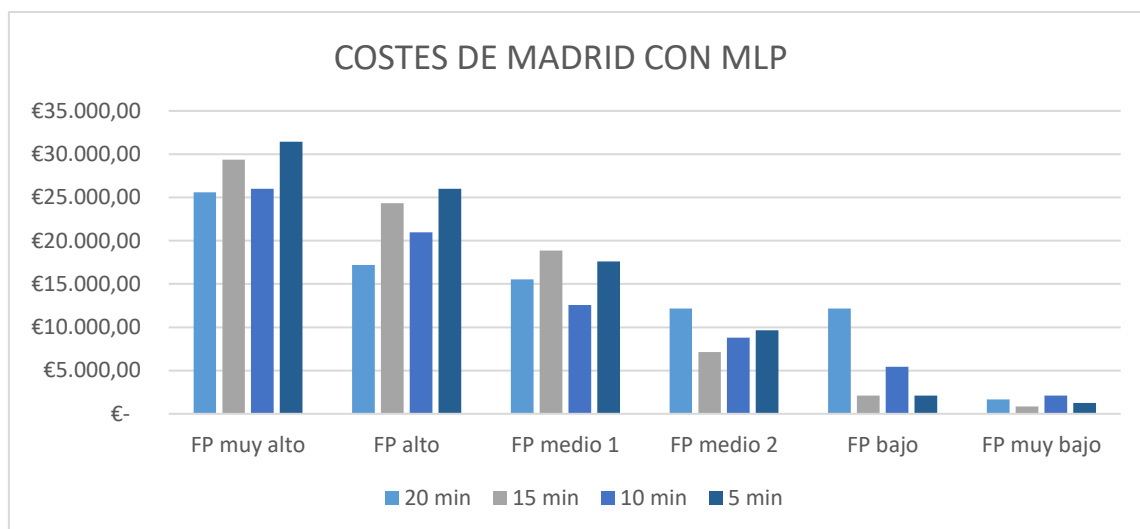


Gráfico 6: costes de Madrid CON MLP

Asumiendo que un falso positivo supone adicionalmente un minuto de vuelo, en este escenario el coste total de los falsos positivos durante los 31 días es de **12.580,95€**, con un 3% de falsos positivos y un 8% de falsos negativos, detectando la mayoría de los conflictos con 10 minutos de anticipación.

7. ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTES

En el Gráfico 7 se muestra de forma gráfica un resumen de todos escenarios analizados con los costes que conllevan los falsos positivos:

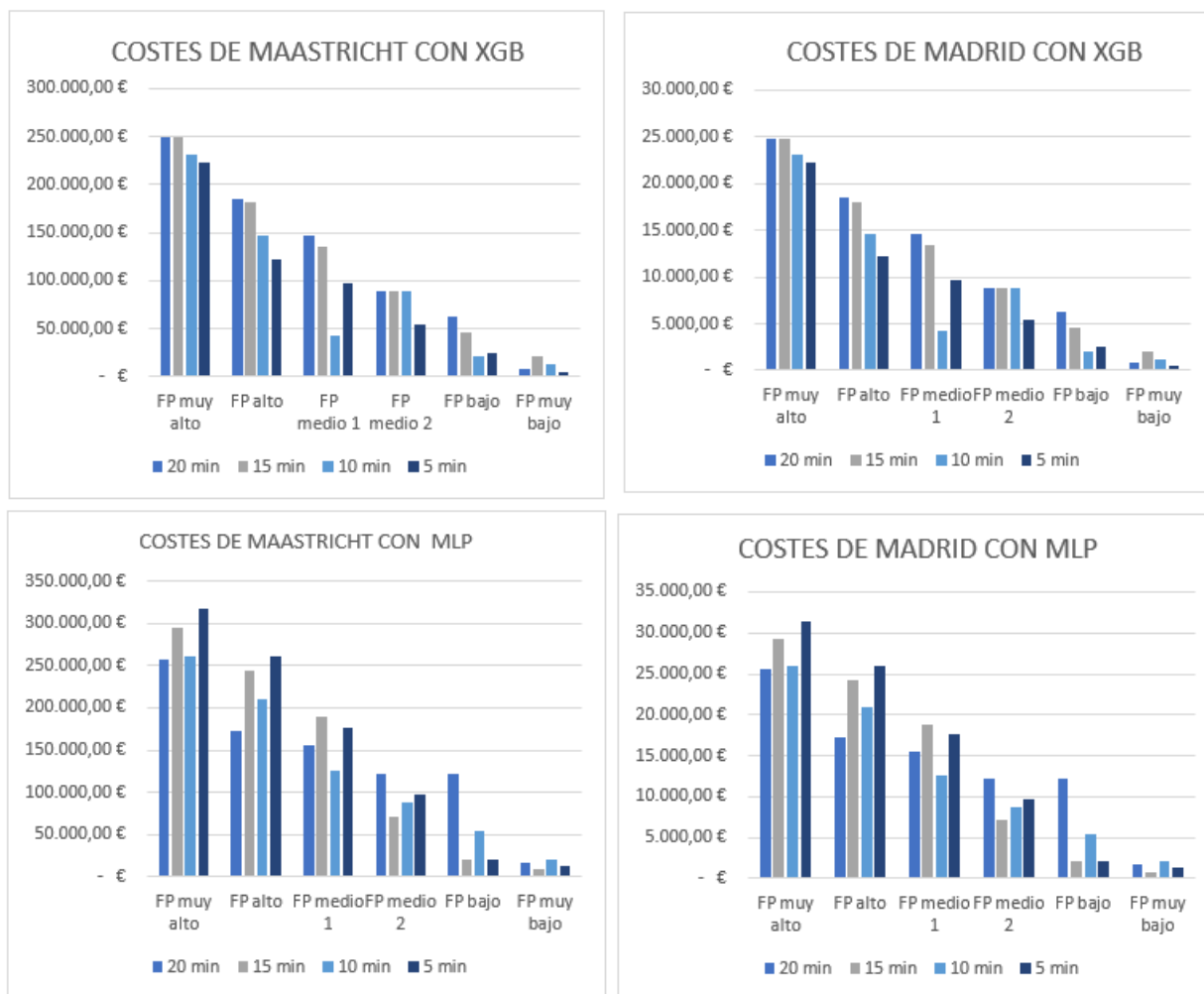


Gráfico 7: Análisis comparativo de costes de los 4 escenarios

A la hora de seleccionar el coste más conveniente es crucial evaluar la probabilidad tanto de los falsos positivos como la de los falsos negativos. Un alto porcentaje de falsos negativos significa mayor incertidumbre y la posibilidad de que algunos conflictos no se detecten a tiempo, lo que podría dar lugar a problemas de seguridad muy costosos. Por lo tanto, es fundamental encontrar un equilibrio entre el coste y la efectividad de detección al determinar el momento óptimo para detectar conflictos.

El coste ideal puede variar según las necesidades y prioridades de cada situación. Por un lado, se busca minimizar el coste asegurando que el sistema sea rentable y no genere gastos excesivos debido a la detección de falsos positivos. Por otro lado, se busca maximizar el nivel de seguridad evitando en la medida de lo posible los falsos negativos.

En el gráfico 7 se observa claramente que los costes en Maastricht son considerablemente más altos que los de Madrid. Esto se debe a que el tráfico aéreo de Maastricht, debido a su ubicación geográfica estratégica en Europa, siendo una de las zonas más transitadas de Europa en términos de tráfico aéreo, experimenta una mayor densidad de tráfico aéreo en comparación con el tráfico aéreo de Madrid, es decir, se detectan más conflictos debido al gran número de horas de vuelo que realizan las aeronaves.

7.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE MAASTRICHT CON XGB Y MLP

En el Gráfico 8 se muestra de forma gráfica un resumen de todos escenarios analizados de Maastricht de los sistemas de XGB y MLP con los costes que conllevan los falsos positivos:

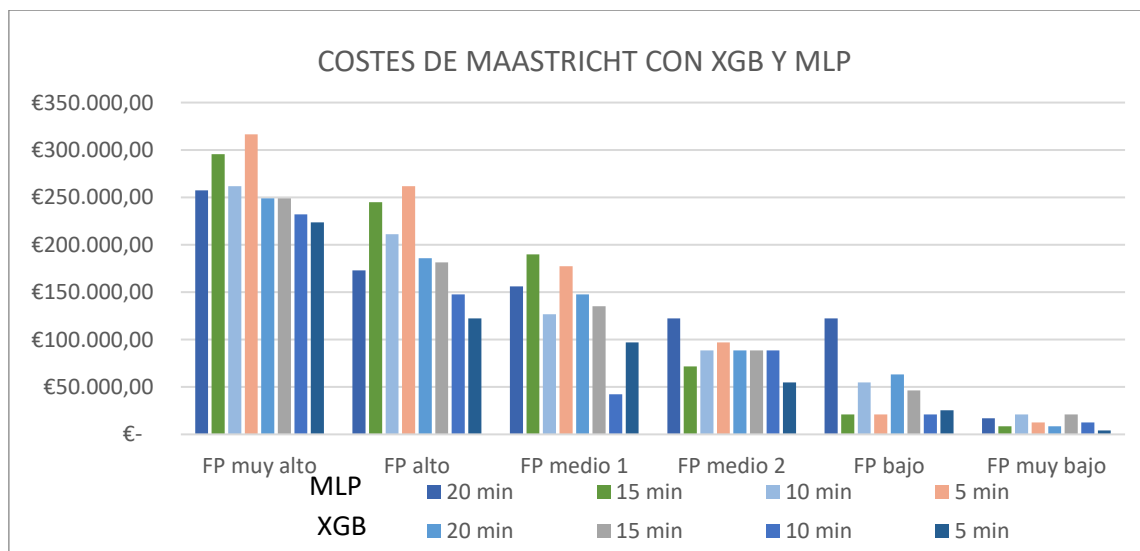


Gráfico 8: costes de Maastricht con XGB y MLP

El Gráfico 8 se observan los costes totales de los falsos positivos durante un período de 31 días en Maastricht de los diferentes escenarios realizados por los

sistemas MLP y XGB. Se consideran diferentes niveles de porcentaje para clasificar los falsos positivos. Cada barra muestra el coste asociado, que depende del tiempo de detección (20 min, 15 min, 10 min o 5 min) y la probabilidad de FP. Por lo tanto, se observa cómo varían los costes en función de estos factores.

Para poder comparar detalladamente los costes y conocer es el coste ideal se utilizarán las tablas analizadas previamente:

MINUTOS	FP muy alto	FP alto	FP medio 1	FP medio 2	FP bajo	FP muy bajo
20 min	(4%,5'9%)	(4%,4'4%)	(15%,3'5%)	(23%,2'1%)	(34%,1'5%)	(71%,0'2%)
15 min	(5%,5'9%)	(6%,4'3%)	(7%,3'2%)	(17%,2'1%)	(37%,1'1%)	(42%,0'5%)
10 min	(6%,5'5%)	(7%,3'5%)	(13%,2'1%)	(23%,1%)	(43%,0'5%)	(52%,0'3%)
5 min	(4'5%,5'3%)	(7%,2'9%)	(10%,2'3%)	(15%,1'3%)	(22%,0'6%)	(47%,0'1%)

Tabla 23: Probabilidades de falsos negativos y falsos positivos según tiempo de detección (XGB)
(Christian Verdonk, 2023)

MINUTOS	FP muy alto	FP alto	FP medio 1	FP medio 2	FP bajo	FP muy bajo
20 min	248.984,24€	185.683,16€	147.702,52€	88.621,51€	63.301,08€	8.440,14€
15 min	248.984,24€	181.463,09€	135.042,30€	88.621,51€	46.420,79€	21.100,36€
10 min	232.103,96€	147.702,52€	42.200,72 €	88.621,51€	21.100,36€	12.660,22€
5 min	223.663,81€	122.382,09€	97.061,65 €	54.860,93€	25.320,43€	4.220,07 €

Tabla 24: tabla resumen de costes escenario B con XGB en Maastricht

MINUTOS	FP muy alto	FP alto	FP medio 1	FP medio 2	FP bajo	FP muy bajo
20 min	(3%,6'1%)	(5%,4'1%)	(15%,3'7%)	(25%,2'9%)	(30%,2'9%)	(40%,0'4%)
15 min	(3%,7%)	(4%,5'8%)	(5%,4'5%)	(12%,1'7%)	(25%,0'5%)	(42%,0'2%)
10 min	(4%,6'2%)	(6%,5%)	(8%,3%)	(14%,2'1%)	(23%,1'3%)	(37%,0'5%)
5 min	(1%,7'5%)	(3%,6'2)	(5%,4'2%)	(9%,2'3%)	(18%,0'5%)	(27%,0'3%)

Tabla 25: Probabilidades de falsos negativos y falsos positivos según tiempo de detección (MLP)
(Christian Verdonk, 2023)

MINUTOS	FP muy alto	FP alto	FP medio 1	FP medio 2	FP bajo	FP muy bajo
20 min	257.424,39 €	173.022,95 €	156.142,66€	122.382,09€	122.382,09€	16.880,29€
15 min	295.405,03 €	244.764,17 €	189.903,24€	71.741,22 €	21.100,36 €	8.440,14 €
10 min	261.644,46 €	211.003,60 €	126.602,16€	88.621,51 €	54.860,93 €	21.100,36€
5 min	316.505,39 €	261.644,46 €	177.243,02€	97.061,65 €	21.100,36 €	12.660,22€

Tabla 26: Tabla resumen de costes escenario D con MLP en Maastricht

- **Coste más bajo** (*Falsos Negativos 47%, Falsos Positivos 0,1%*)

A simple vista, podemos identificar que el coste más bajo es de 4.220'07 €, el cual está asociado a un bajo porcentaje de falsos positivos y una antelación de 5 minutos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta opción presenta un 0,1% de falsos positivos y un 47% de falsos negativos. Esto implica un alto nivel de incertidumbre, lo que significa que puede haber conflictos no detectados o que podrían ser identificados en el último momento, lo cual podría generar problemas de seguridad.

- **Coste más alto** (*Falsos Negativos 1%, Falsos Positivos 7'5%*)

En cuanto al coste más alto de la tabla, este asciende a 316.505,39 € y está asociado a un 7,5% de falsos positivos, lo cual genera un coste adicional debido a la detección de un gran número de falsos positivos. Además, se registra un 1% de falsos negativos, lo que indica que hay un 1% de conflictos que aún no han sido identificados con 5 minutos de antelación. En este escenario, se alcanza un mayor nivel de seguridad, pero a costa de un mayor número de falsos positivos y, por ende, de un coste adicional muy grande.

- **Coste ideal** (*Falsos Negativos 13%, Falsos Positivos 2,1%*)

Por lo tanto, el coste ideal de este escenario debe ser un equilibrio entre el coste económico y el nivel de seguridad que se desea alcanzar. En el caso es de 42.200,72 € con el sistema de XGB, está asociado a un 2,1% de falsos positivos

y un 13% de falsos negativos, con 10 minutos de antelación, la cual se puede considerar óptima, ya que permite detectar la mayoría de los conflictos con suficiente tiempo de anticipación.

Numero de conflictos mensuales	35167,26
Numero de conflictos al día	1134,42
Numero de conflictos a la hora	47,26
Numero de conflictos por minuto	0,78

Considerando que el número de conflictos por minuto es de 0,78, podemos determinar que en 10 minutos habrán aproximadamente 7.79 conflictos. Si existe un 13% de falsos negativos, lo cual equivale a un 1.02 de conflictos que aún no han sido detectados, al sumar esta cantidad al número total de conflictos a resolver en 10 minutos, obtendríamos un total de 8.9021 conflictos, sumándole también un 2,1% que representan los falsos positivos tendríamos un total de 9,06 conflictos. Esto significa que los controladores tendrían que resolver aproximadamente 0.91 conflictos por minuto. Es importante tener en cuenta que se supone la presencia de múltiples controladores aéreos para abordar estos conflictos, lo que significa que sería factible resolver el 13% restante de falsos negativos sin dificultad alguna, por lo cual, no habría problemas de seguridad.

7.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE MADRID CON XGB Y MLP

En el Gráfico 9 se muestra de forma gráfica un resumen de todos escenarios analizados de Madrid de los sistemas de XGB y MLP con los costes que conllevan los falsos positivos:

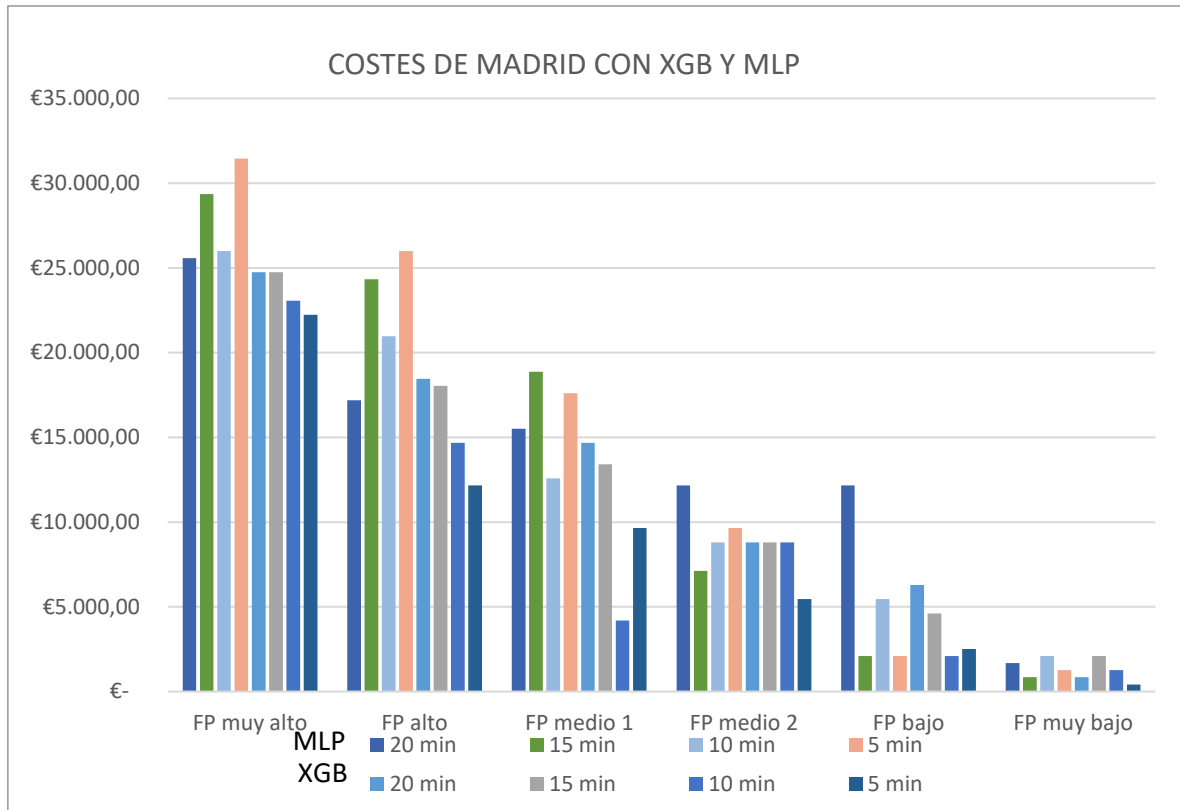


Gráfico 9: costes de Madrid con XGB y MLP

En el Gráfico 9 se observan los costes totales de los falsos positivos durante un período de 31 días en Maastricht de los diferentes escenarios realizados por los sistemas MLP y XGB. Se consideran diferentes niveles de porcentaje para clasificar los falsos positivos. Cada barra muestra el coste asociado, que depende del tiempo de detección (20 min, 15 min, 10 min o 5 min) y la probabilidad de FP. Por lo tanto, se observa cómo varían los costes en función de estos factores.

Para poder comparar detalladamente los costes y saber cuál es el coste ideal se utilizarán las tablas analizadas previamente:

MINUTOS	FP muy alto	FP alto	FP medio 1	FP medio 2	FP bajo	FP muy bajo
20 min	(4%,5'9%)	(4%,4'4%)	(15%,3'5%)	(23%,2'1%)	(34%,1'5%)	(71%,0'2%)
15 min	(5%,5'9%)	(6%,4'3%)	(7%,3'2%)	(17%,2'1%)	(37%,1'1%)	(42%,0'5%)
10 min	(6%,5'5%)	(7%,3'5%)	(13%,2'1%)	(23%,1%)	(43%,0'5%)	(52%,0'3%)
5 min	(4'5%,5'3%)	(7%,2'9%)	(10%,2'3%)	(15%,1'3%)	(22%,0'6%)	(47%,0'1%)

Tabla 27: Probabilidades de falsos negativos y falsos positivos según tiempo de detección (XGB)
(Christian Verdonk, 2023)

MINUTOS	FP muy alto	FP alto	FP medio 1	FP medio 2	FP bajo	FP muy bajo
20 min	24.742,54 €	18.452,06 €	14.677,78€	8.806,67 €	6.290,48 €	838,73 €
15 min	24.742,54 €	18.032,70 €	13.419,68€	8.806,67 €	4.613,02 €	2.096,83€
10 min	23.065,08 €	14.677,78 €	<u>4.193,65 €</u>	8.806,67 €	2.096,83 €	1.258,10€
5 min	22.226,35 €	12.161,59 €	9.645,40 €	5.451,75 €	2.516,19 €	419,37 €

Tabla 28: tabla resumen de costes escenario B con XGB en Madrid

MINUTOS	FP muy alto	FP alto	FP medio 1	FP medio 2	FP bajo	FP muy bajo
20 min	(3%,6'1%)	(5%,4'1%)	(15%,3'7%)	(25%,2'9%)	(30%,2'9%)	(40%,0'4%)
15 min	(3%,7%)	(4%,5'8%)	(5%,4'5%)	(12%,1'7%)	(25%,0'5%)	(42%,0'2%)
10 min	(4%,6'2%)	(6%,5%)	(8%,3%)	(14%,2'1%)	(23%,1'3%)	(37%,0'5%)
5 min	(1%,7'5%)	(3%,6'2)	(5%,4'2%)	(9%,2'3%)	(18%,0'5%)	(27%,0'3%)

Tabla 29: Probabilidades de falsos negativos y falsos positivos según tiempo de detección (MLP)
(Christian Verdonk, 2023)

MINUTOS	FP muy alto	FP alto	FP medio 1	FP medio 2	FP bajo	FP muy bajo
20 min	25.581,27 €	17.193,97 €	15.516,51€	12.161,59 €	12.161,59 €	1.677,46 €
15 min	29.355,55 €	24.323,17 €	18.871,43€	7.129,21 €	2.096,83 €	838,73 €
10 min	26.000,63 €	20.968,25 €	12.580,95€	8.806,67 €	5.451,75 €	2.096,83 €
5 min	31.452,38 €	26.000,63 €	17.613,33€	9.645,40 €	2.096,83 €	1.258,10 €

Tabla 30: Tabla resumen de costes escenario E con MLP en Madrid

- **Coste más bajo** (*Falsos Negativos 47%, Falsos Positivos 0,1%*)

A simple vista, podemos identificar que el coste más bajo es de 419,37 €, el cual está asociado a un bajo porcentaje de falsos positivos y una antelación de 5 minutos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta opción presenta un 0,1% de falsos positivos y un 47% de falsos negativos. Esto implica un alto nivel de incertidumbre, lo que significa que puede haber conflictos no detectados o que podrían ser identificados en el último momento, lo cual podría generar problemas de seguridad.

- **Coste más alto** (*Falsos Negativos 1%, Falsos Positivos 7'5%*)

En cuanto al coste más alto de la tabla, este asciende a 31.452,38 € y está asociado a un 7,5% de falsos positivos, lo cual genera un coste adicional debido a la detección de un gran número de falsos positivos. Además, se registra un 1% de falsos negativos, lo que indica que hay un 1% de conflictos que aún no han sido identificados con 5 minutos de antelación. En este escenario, se alcanza un mayor nivel de seguridad, pero a costa de un mayor número de falsos positivos y, por ende, de un coste adicional muy grande.

- **Coste ideal** (*Falsos Negativos 13%, Falsos Positivos 2,1%*)

Por lo tanto, el coste ideal de este escenario debe ser un equilibrio entre el coste económico y el nivel de seguridad que se desea alcanzar. En el caso es de 4.193,65 € con el sistema de XGB, está asociado a un 2,1% de falsos positivos y un 13% de falsos negativos, con 10 minutos de antelación, la cual se puede considerar óptima, ya que permite detectar la mayoría de los conflictos con suficiente tiempo de anticipación.

Numero de conflictos mensuales	3494,71
Numero de conflictos al día	112,73
Numero de conflictos a la hora	4,69
Numero de conflictos por minuto	0,078

Considerando que el número de conflictos por minuto es de 0,078, podemos determinar que en 10 minutos habrá aproximadamente 0,78 conflictos. Si existe un 13% de falsos negativos, lo cual equivale a un 0,101 de conflictos que aún no han sido detectados, al sumar esta cantidad al número total de conflictos a resolver en 10 minutos, obtendríamos un total de 0,885 conflictos, sumándole también un 2,1% que representan los falsos positivos tendríamos un total de 0,90 conflictos. Esto significa que los controladores tendrían que resolver aproximadamente 0.090 conflictos por minuto. Es importante tener en cuenta que se supone la presencia de múltiples controladores aéreos para abordar estos conflictos, lo que significa que sería factible resolver el 13% restante de falsos negativos sin dificultad alguna, por lo cual, no habría problemas de seguridad.

8. COSTE DE UN FALSO NEGATIVO (FN)

Los falsos negativos pueden generar graves consecuencias, especialmente en situaciones en las que existe un riesgo real de colisión entre aeronaves. Si una herramienta de detección de conflictos no detecta una situación de peligro, los controladores de tráfico aéreo podrían no estar al tanto del conflicto y no tomar medidas para evitar la colisión. Esto puede resultar en un accidente aéreo, con sus correspondientes costes económicos y humanos. Por lo que, es fundamental minimizar los falsos positivos en los sistemas de control y predicción de conflictos, para comprenderlo mejor, en este apartado se muestra la magnitud de los costes asociados de una colisión aérea. Al reducir la cantidad de falsos negativos, se pueden prevenir colisiones y, en consecuencia, reducir los costes asociados a estos.

El coste de un falso negativo puede ser significativo. Para ilustrar esto, se ha tomado de ejemplo el caso del accidente aéreo del A320 que ocurrió en el año 2012, este incidente generó una serie de costes, tanto directos como indirectos. (T Martin, 2018)

8.1. COSTES DIRECTOS

El coste directo de este accidente se estimó en 213 millones de dólares, lo que incluye la pérdida de la aeronave, la interrupción del uso de las aeronaves, los costes asociados con las muertes y lesiones, la limpieza del sitio de contaminación, los daños a terceros, el cierre del aeropuerto, la pérdida de inversión en personal y la pérdida de equipaje. (T Martin, 2018)

COSTES DIRECTOS	
\$213 M	• Pérdida del avión • Pérdida de uso • Muerte y lesiones • Limpieza de la contaminación del lugar • Limpieza de la contaminación del lugar • Daños a terceros • Cierre del aeropuerto • Pérdida de inversiones en personal • Pérdida de equipaje

Tabla 31: Tabla resumen de los costes directos de un falso negativo (T Martin, 2018)

8.2. COSTES INDIRECTOS

Por otro lado, se estima que los costes indirectos ascendieron a 266 millones de dólares. Estos costes incluyen la búsqueda y rescate, la investigación del accidente, los costes de respuesta inmediata, la pérdida de ingresos por inversiones, el aumento de los costes de seguros y los costes asociados con la pérdida de reputación. (T Martin, 2018)

COSTES INDIRECTOS	
\$266M	• Búsqueda y salvamento • Investigación de accidentes • Gastos de respuesta inmediata • Pérdida de ingresos por inversiones • Aumento de los seguros • Coste de la pérdida de reputación

Tabla 32: Tabla resumen de los costes indirectos de un falso negativo (T Martin,

Es importante tener en cuenta que calcular el coste total de una colisión aérea depende de las circunstancias específicas y los costes asociados. Por lo que, en este caso se ha determinado que el coste total de una colisión aérea de una sola aeronave es de 479 millones de dólares, asumiendo que los costes son proporcionales al número de aeronaves involucradas, podría argumentarse que el coste total en caso de una colisión de dos aeronaves A320 sería el doble, es decir, 958 millones de dólares.

Conocer los costes asociados con las colisiones aéreas proporciona una base sólida para tomar decisiones más informadas en el futuro. Las aerolíneas, las aseguradoras y las autoridades de aviación pueden utilizar esta información para implementar medidas de seguridad adicionales, mejorar los procedimientos de emergencia y prevenir incidentes similares en el futuro. Además, esta comprensión ayuda en la planificación y gestión de riesgos en la industria de la aviación.

9. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado consistió en realizar un análisis y evaluación del coste de mitigación asociado a las falsas alarmas generadas por las herramientas de detección y resolución de conflictos. Los objetivos propuestos fueron cumplidos satisfactoriamente mediante un análisis exhaustivo y una evaluación completa en diversos escenarios.

La hipótesis planteada asume que una falsa alarma supone un minuto adicional de vuelo, es decir, cuando se detecta una falsa alarma, las aeronaves se desvían de su ruta durante el periodo de un minuto antes de poder retomar su trayectoria. Por lo que, a la hora de determinar los costes, sólo se han considerado aquellos costes tácticos relacionados con la operación de la aeronave, como el consumo adicional de combustible, las emisiones de CO₂ y el coste del retraso que implica desviarse de la ruta.

Una vez calculado el coste de la desviación, se analizan diferentes puntos de operación de la herramienta de detección de conflictos con el objetivo de comprender mejor su rendimiento en distintas condiciones. Esto permite la realización de escenarios basados en los puntos de operación seleccionados para obtener estimaciones precisas de los costes asociados a cada uno de ellos. Durante la fase de escenarios, se utilizaron principalmente datos de los espacios aéreos europeos de Maastricht y Madrid, con el propósito de determinar el coste total de los falsos positivos durante un período de 31 días, teniendo en cuenta variables como el coste del desvío, la frecuencia de conflictos por hora, la probabilidad de falsos positivos y las horas de vuelo.

Al analizar todos los costes obtenidos de los escenarios, se identificaron tanto costes muy elevados como muy bajos. Es evidente que a la aerolínea le interesa minimizar los costes. Sin embargo, seleccionar el coste más bajo sin considerar otros factores, podría causar problemas de seguridad, dado que existe un alto porcentaje de conflictos que aún no han sido detectados y el tiempo disponible

para su detección es limitado. Así, optar por el coste más bajo como el ideal para la aerolínea resultaría en costes mayores, como el coste de un accidente, lo cual podría llevar al cierre de la empresa. Por lo tanto, para determinar el coste ideal, es necesario considerar las necesidades y prioridades específicas de cada situación, buscando un equilibrio entre los falsos positivos y los falsos negativos. Se considera que el coste ideal es aquel que minimiza el número de falsos positivos, siempre y cuando todos los conflictos puedan ser detectados a tiempo por los controladores aéreos.

Las diferencias en los resultados y costes entre Maastricht y Madrid se deben a la ubicación estratégica de Maastricht, ya que, al encontrarse en una posición geográfica central en Europa, existe un mayor volumen de tráfico aéreo, por lo que conlleva mayores costes. Esto implica que se requiere una mayor inversión en tecnología, personal y recursos para mantener un alto nivel de seguridad y eficiencia en el espacio aéreo de Maastricht.

Además, es importante tener en cuenta que estos falsos positivos generan una carga adicional para los controladores de tráfico aéreo, ya que deben dedicar tiempo y recursos para investigar la situación, la cual acaba siendo una falsa alarma.

En conclusión, se busca ofrecer una orientación en la mejora de las herramientas de detección de conflictos, la toma de decisiones en la gestión del tráfico aéreo, para lograr una gestión más eficiente y segura del espacio aéreo. Además, se destaca la importancia de abordar los falsos positivos en las herramientas de detección del espacio aéreo y se proporciona una visión integral de los costes generados por las desviaciones innecesarias en las trayectorias de vuelo de las aeronaves. Al comprender mejor los costes de las falsas alarmas, se podrán identificar áreas de mejora específicas, como la implementación de algoritmos más precisos o la integración de tecnologías avanzadas de detección. Estas mejoras contribuirán a una operación aérea más segura y eficiente, promoviendo

la excelencia en el sector aéreo mediante una toma de decisiones más informada.

9.1. LÍNEA DE CONTINUACIÓN DEL PROYECTO

Como línea de continuación para este proyecto, se podría realizar un análisis detallado de las nuevas tecnologías que podrían mejorar la precisión de las herramientas de detección y resolución de conflictos. En particular, se podría investigar la aplicabilidad de la inteligencia artificial para desarrollar algoritmos que podrían considerar una amplia gama de variables, como la velocidad y altitud de las aeronaves, así como las condiciones meteorológicas, lo que reduciría las falsas alarmas, además de una mejora en el sistema de gestión del tráfico aéreo. Esta línea de investigación proporcionaría una visión más completa sobre cómo avanzar en la detección y resolución de conflictos.

En cuanto al análisis de costes, se podría ampliar el enfoque considerando los impactos que conllevan estas falsas alarmas y las desviaciones innecesarias. Esta evaluación debe contener aspectos como el desgaste y mantenimiento adicional de las aeronaves, así como la percepción de los pasajeros en relación con la seguridad. Al examinar estos elementos a largo plazo, se podrá obtener una visión más completa y precisa de los costes reales asociados con las falsas alarmas, lo cual permitirá tomar decisiones mucho más informadas para poder minimizar estos costes y mejorar tanto la eficiencia como la seguridad del espacio aéreo.

8. BIBLIOGRAFÍA

- K. Kuchar, J., & C. Yang, L. (2000). A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 179-189. Obtenido de <http://web.mit.edu/jkkuchar/www/ATC-102.pdf>
- Aranguren, J. C. (2015). *Cálculo estadístico de desviaciones horizontales y verticales en procedimiento de vuelo instrumental*. Obtenido de https://www.academia.edu/11022422/Cálculo_estad%C3%ADstico_de_deseviaciones_horizontales_y_verticales_en_procedimiento_de_vuelo_instrumental
- Christian Verdonk, C. X. (2023). Trajectory Predictor and Conflict Detection Figures of Merit for a performance-based Adaptive Air Traffic Monitoring.
- Erzberger., R. A. (1996). *Conflict Probability Estimation for Free Flights*. Obtenido de <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19970001686/downloads/19970001686.pdf>
- EUROCONTROL. (2017). EUROCONTROL Specification for Medium-Term Conflict Detection.
- EUROCONTROL. (2018). *Standard Inputs for EUROCONTROL Cost-Benefit Analyse*. Obtenido de <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/standard-input-for-eurocontrol-cost-benefit-analyses-2018-edition-8-version-2.6.pdf>
- EUROCONTROL. (2020). *Mid-Air Collision risk in En-Route [MAC-ER v1.2]*.
- García Gonzales, E. J. (2013). *Development of a 3- dimensional mathematical collision risk model based on recorded aircraft trajectories to estimate the safety level in high density en-route airspaces*.
- Hidalgo, F. (2021). *TCAS: La importancia del sistema de alerta de tráfico y anticolisión*. Aero-Naves. Obtenido de <https://aero->

naves.com/2021/07/10/tcas-la-importancia-del-sistema-de-alerta-de-
trafico-y-anticolision/

IATA. (2023). *Jet Fuel Price Monitor*. Obtenido de
<https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/>

Jennifer, L. (27 de October de 2022). *What is CORSIA? All the Important Things
You Must Know*. Obtenido de [https://carboncredits.com/what-is-corsia-all-
the-important-things-you-must-
know/#:~:text=The%20ICAO%20estimated%20the%20costs,will%20cost
%20the%20airline%20operators.](https://carboncredits.com/what-is-corsia-all-the-important-things-you-must-know/#:~:text=The%20ICAO%20estimated%20the%20costs,will%20cost%20the%20airline%20operators.)

K. Seymour, M. H. (2020). *Fuel Estimation in Air Transportation: Modeling global
fuel consumption for commercial aviation*. . Obtenido de
[https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S136192092030715X?token=B5
6AF0FFBB6F945EE85CFBB55](https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S136192092030715X?token=B56AF0FFBB6F945EE85CFBB55)

Martin, Terry, Huang, Zi, & Mcfadyen, Aaron. (2018). *Airspace risk management
for UAVs a framework for optimising detector performance standards and
airspace traffic using JARUS SORA*. Obtenido de
[https://eprints.qut.edu.au/124769/1/DASC-Paper-2018-
Terrence%20Martin.pdf](https://eprints.qut.edu.au/124769/1/DASC-Paper-2018-Terrence%20Martin.pdf)

Organización de Controladores Aéreos . (2019). *¿Qué es el Control de Tráfico
Aéreo? Controladores Aéreos org*. Obtenido de
<http://www.controladoresaereos.org/que-es-el-control-de-trafico-aereo/>

Rodrigo, G. A. (s.f.). *El impacto ambiental del transporte aéreo y las medidas
para mitigarlo*. Obtenido de
https://oa.upm.es/20345/1/INVE_MEM_2012_133532.pdf

Sáez Nieto, F. J. (2012). *Navegacion Aérea, posicionamiento, guiado y gestión
del Tráfico Aéreo*. Madrid: Garceta grupo editorial.

SPGLOBAL. (2022). *Specifications Guide Global Jet Indexes*. Obtenido de
[https://www.spglobal.com/commodityinsights/PlattsContent/_assets/_file
s/en/our-methodology/methodology-specifications/world_jet_indexes.pdf](https://www.spglobal.com/commodityinsights/PlattsContent/_assets/_files/en/our-methodology/methodology-specifications/world_jet_indexes.pdf)

Sunil, E. E. (2018). Three-dimensional conflict count models for unstructured and layered airspace designs. . *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95, , 295-319.

T Martin, Z. H. (2018). Airspace Risk Management for UAVs A Framework for Optimising Detector Performance Standards and Airspace Traffic using JARUS SORA. London.

Watkins., M. P. (2005). Probabilistic Aircraft Conflict Detection.

Westminster, U. o. (2015). *European airline delay cost reference values*.
Obtenido de
<https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/european-airline-delay-cost-reference-values-final-report-4-1.pdf>

MARWA BENTALEB ZINBI

BARCELONA, 23 JUNIO 2023