

Análisis de parámetros de influencia en la definición de trayectorias 4D: Resumen ejecutivo

Hoja de Identificación del documento

Título:	Análisis de parámetros de influencia en la definición de trayectoria 4D: Resumen ejecutivo
Código:	N/A
Fecha:	Marzo 2018
Fichero:	N/A

Autor:	P. González García, M. Pérez Maroto, D. Álvarez Álvarez y A. Rodríguez Sanz
Revisor:	F. Gómez Comendador
Aprobado:	N/A

Versiones:			
Numero	Fecha	Autor	Comentarios
01	23/03/2018	David Álvarez Álvarez Álvaro Rodríguez Sanz	

Resumen Ejecutivo

Este documento tiene como objetivo resumir el trabajado realizado durante el año 2017 en el proyecto "Análisis de parámetros de influencia en la definición de trayectoria 4D" realizado bajo el **OIDATM** (Observatorio para el fomento del I+D en ATM) promovido por **ISDEFE**.

La finalidad de este Resumen Ejecutivo es presentar un documento que resuma el trabajo realizado a lo largo del año 2017, destacando las principales actividades y logros alcanzados durante el mismo. Este documento se incluye una descripción general de:

1. Introducción al concepto operacional de las trayectorias 4D y un repaso al estado actual del sistema actual ATM. Se describen los objetivos y el alcance del proyecto.
2. La modelización de la trayectoria 4D: identificando los parámetros de influencia y caracterizando el escenario del modelo para finalmente modelar la trayectoria en MATLAB. Validación del modelo de trayectoria para la fase en ruta
3. Simulación de Monte Carlo de las trayectorias 4D para la explotación del modelo obtenido. Definición de las ventanas de paso
4. Análisis de las relaciones causales y de la sensibilidad: modelización de una red bayesiana para obtener estas relaciones. Globalización de la red para toda la trayectoria.
5. Generalización de los resultados con el fin de reducir la incertidumbre.
6. Conclusiones y trabajos futuros.

Índice

1	Introducción	1
2	Objetivo y alcance.....	2
3	Análisis del actual concepto ATM	4
4	Modelización de la trayectoria 4D	6
4.1	Caracterización del escenario	6
4.2	Identificación de parámetros de influencia	7
4.3	Modelización de la trayectoria ideal	8
4.4	Validación del modelo	10
5	Simulación de Monte Carlo de las trayectorias 4D	12
5.1	Definición de la ventana de paso	14
6	Análisis de las relaciones causales y de la sensibilidad	17
6.1	Globalización de la red	20
7	Generalización de los resultados	21
8	Conclusiones y futuros trabajos	22
9	Publicaciones.....	25
10	Referencias.....	26

Índice de figuras

<i>Ilustración 1. Desarrollo del proyecto.....</i>	<i>3</i>
<i>Ilustración 2 Fases del concepto TBO.....</i>	<i>5</i>
<i>Ilustración 3: Perfil de vuelo trayectoria 4D. Concepto SESAR.....</i>	<i>6</i>
<i>Ilustración 4. Esquema de la modelización con BADA 4.....</i>	<i>8</i>
<i>Ilustración 5. Esquema simplificado de modelización de la trayectoria.....</i>	<i>9</i>
<i>Ilustración 6. Representación 3D de la trayectoria modelizada.....</i>	<i>10</i>
<i>Ilustración 7. Representación en NEST del vuelo Madrid-Colonia.....</i>	<i>10</i>
<i>Ilustración 8. Representación del plano vertical de la trayectoria del vuelo Madrid – Colonia y limitación de la fase a estudiar.....</i>	<i>11</i>
<i>Ilustración 9.Procedimiento de la simulación.....</i>	<i>12</i>
<i>Ilustración 10. Resultados simulación MC – Trayectorias en 3D.....</i>	<i>13</i>
<i>Ilustración 11.Representación de la variación de la velocidad de la aeronave en función del tiempo de vuelo.....</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 12. Parámetros que se fijarán en cada caso de análisis.....</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 13. Distribuciones estadísticas para los puntos de control.....</i>	<i>16</i>
<i>Ilustración 14. Relaciones de causalidad entre los parámetros de influencia en la trayectoria 4D en el punto de control 1.....</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 15. Intensidad de las relaciones de causalidad entre los parámetros de influencia en la trayectoria 4D en el punto de control 1.....</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 16. Ampliación de la red – Red Global.....</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 17. Ábacos de relaciones entre la ventana de posición en función del tiempo de vuelo y la masa de la aeronave.....</i>	<i>21</i>

Índice de tablas

Tabla 1. Puntos definidos para analizar las ventanas de paso..... 15

HOJA DEJADA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

1 INTRODUCCIÓN

El OIATM (Observatorio para el fomento de I+D en ATM), promovido por ISDEFE, se plantea como Foro de referencia para fomentar las ideas y proyectos encaminadas a la mejora y optimización en el uso y explotación del espacio aéreo aprovechando el desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías. La Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y en particular el departamento de Sistemas Aeroespaciales, Transporte Aéreo y Aeropuertos (SATAA) colabora con el OIATM con el objetivo de trabajar en proyectos de investigación que pretenden dar respuesta a problemas actuales y futuros sobre la gestión del tráfico y del espacio aéreo.

Dentro de esta colaboración, uno de los proyectos que se están desarrollando es la "Análisis de parámetros de influencia en la definición de trayectorias 4D". La operación de trayectorias 4D es la base del futuro concepto operacional de SESAR[1]. Este tipo de trayectorias se basan en la integración del tiempo en la trayectoria 3D de la aeronave. El principal objetivo de este nuevo enfoque es garantizar el vuelo a través de una trayectoria óptima, prácticamente sin restricciones siempre que sea posible, a cambio de "obligar" a la aeronave a cumplir de forma muy precisa el tiempo de llegada a un punto designado.

En el contexto de SESAR, los usuarios del espacio aéreo negociarán una trayectoria deseada con los Proveedores de Servicios de Navegación Aérea (ANSPs) y operadores aeroportuarios (AP). La aeronave y los sistemas en tierra intercambiarán información sobre la trayectoria, así como la capacidad prevista para cumplir los Tiempos Controlados de Llegada (CTAs) que han sido asignados.

En este sentido, la mejora de la predictibilidad (que representa una de las 11 KPAs objetivo fijadas en el Doc 9854[2] de OACI para el concepto global ATM) es uno de los requisitos marcados por SESAR para optimizar la sincronización de trayectorias 4D y la reducción de conflictos (según se detalla en el Plan Maestro ATM de SESAR).

El análisis de predictibilidad se debe completar con un estudio de fiabilidad asociado al desarrollo de las trayectorias 4D. Este estudio permitirá conocer el grado de degradación de las trayectorias 4D en cada punto característico, la probabilidad de que se alcance un estado degradado (tiempo entre fallos) y las medidas oportunas para corregirlo. El enfoque adoptado está en línea con la aplicación del mantenimiento predictivo (Safety II), como una evolución de los conceptos de mantenimiento correctivo y preventivo.

Por último, de cara a la implementación del concepto operacional de trayectorias 4D, es fundamental conocer su impacto en el marco de la gestión del transporte aéreo, revisando los objetivos vinculantes analizados por la Performance Review Unit (PRU) de EUROCONTROL. Estos objetivos están orientados a la reducción de retrasos, contaminación innecesaria y costes económicos para las compañías aéreas y los pasajeros.

2 OBJETIVO Y ALCANCE

Dentro de las diferentes líneas de investigación en Navegación Aérea – ATM se encuadra el proyecto de “Análisis de parámetros de influencia en la definición de trayectoria 4D”. Los objetivos que persigue este proyecto son:

- Análisis del **estado del arte** en cuanto al concepto operacional de las trayectorias 4D en el ámbito de SESAR (Single European Sky ATM Research) y se analizan los diferentes requisitos, implicaciones y beneficios de estas trayectorias. Además, se estudian los proyectos e investigaciones que se han llevado a cabo en temas relativos a las trayectorias 4D Revisión de la bibliografía existente en relación con los futuros conceptos ATM:
- Contextualizar el escenario base de operación de la aeronave e identificar las características del mismo que tienen especial influencia en la definición de las trayectorias 4D. De esta forma se pretende conseguir acotar los **parámetros de influencia** en el seguimiento de una trayectoria 4D
- Definir una **ventana de tiempo** en la que se va a encontrar la aeronave a su paso por cada waypoint. Se trata de establecer una serie de indicadores que reflejen el nivel de cumplimiento de la trayectoria que sigue la aeronave con respecto a la trayectoria ideal definida
- Aplicar un **modelo causal** que permita conocer cómo variará la trayectoria al modificar estos parámetros. Se analizan las relaciones inter-funcionales entre los parámetros que han sido definidas en el modelo de predicción
- Analizar la **fiabilidad** y la potencial degradación de la trayectoria, tiempos y medidas correctoras.

Conocer los parámetros de influencia en una trayectoria y su variación con respecto a las variaciones de los mismos ayudará a la sincronización del tráfico y permitirá una predictibilidad de las trayectorias que podrá emplearse en la gestión de conflictos.

El desarrollo del proyecto durante el 2017 se resume en la siguiente figura:

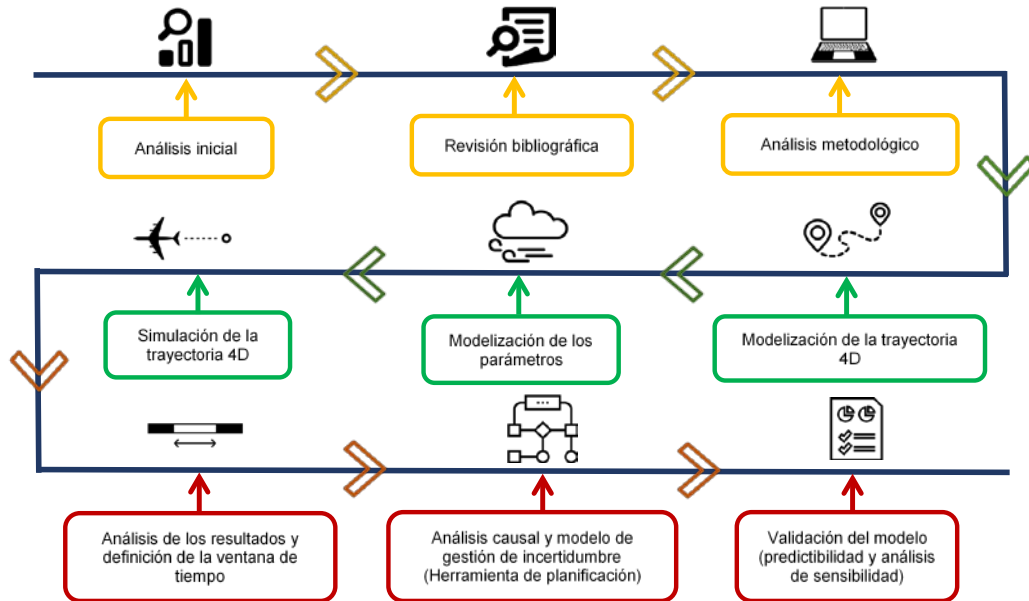


Ilustración 1. Desarrollo del proyecto.

3 ANÁLISIS DEL ACTUAL CONCEPTO ATM

El actual enfoque funcional de la gestión del tráfico aéreo (ATM) está cambiando. SESAR y NextGen[1], [3], [4] apoyan el concepto operativo de la trayectoria 4D, con el fin de mejorar la eficiencia, fiabilidad, sostenibilidad y rentabilidad de las operaciones de las aeronaves. Aparte de las tres dimensiones espaciales clásicas, el "tiempo" se integra ahora como una cuarta dimensión adicional, que restringirá los vuelos de los aviones sobre los puntos indicados a lo largo de la trayectoria. Estas restricciones se denominan ventanas de tiempo (TWs) y requieren la capacidad de realizar predicciones de trayectoria precisas y robustas. Estas predicciones deben tener en cuenta las perturbaciones externas de la aeronave y las fuentes de incertidumbre[5]. Por lo tanto, la predicción de la trayectoria y la gestión de la incertidumbre son elementos clave en el nuevo concepto operativo del tráfico aéreo.

Múltiples estudios han abordado la estimación de trayectorias en diferentes fases del vuelo, ya que la predicción de trayectorias es una herramienta fundamental para la detección y resolución de conflictos, la predicción de la carga de tráfico y la evaluación del impacto meteorológico. Además, algunas investigaciones se han centrado en el análisis de la sensibilidad de la predicción de trayectorias en ATM, campo en el que se propone un modelo causal para entender las relaciones entre parámetros de influencia. La mayoría de los métodos propuestos para resolver el problema de predicción de la trayectoria de la aeronave pueden clasificarse en dos enfoques, es decir, determinista y probabilístico. El enfoque tradicional se basa en una formulación determinista: un problema matemático que describe el movimiento de la aeronave. Este enfoque está fuertemente e inherentemente limitado por la precisión de los modelos que representan el comportamiento real de la aeronave y también por la calidad de las entradas. Además, los supuestos de la modelización pueden introducir errores potenciales de predicción, es decir, fuentes de incertidumbre que normalmente no son consideradas explícitamente por tales enfoques deterministas. Si algunas fuerzas o parámetros externos (por ejemplo, el rendimiento de la aeronave, las condiciones meteorológicas, la precisión de los sistemas de navegación, las normas de tráfico) son desconocidos o no pueden evaluarse con precisión, el enfoque probabilístico transforma el problema en un problema estocástico.

La gestión de la incertidumbre es un componente esencial de muchos conceptos operativos ATM avanzados, por ejemplo, en los algoritmos de detección y resolución de conflictos, los requisitos de sincronización del tráfico aéreo y las funcionalidades de automatización para la planificación de trayectorias. La presencia de grandes incertidumbres en la predicción de la trayectoria puede dar lugar a reducciones de capacidad, menor eficiencia de combustible y retrasos. Por lo tanto, se requiere un estudio detallado de las variaciones en los parámetros de influencia asociados que conforman las operaciones de vuelo. Los parámetros más influyentes en la evolución de la trayectoria son las condiciones meteorológicas (viento, temperatura), el rendimiento de la aeronave (fase de vuelo, peso, velocidad), las limitaciones de navegación (existencias) o las condiciones iniciales. Sin embargo, el efecto del viento de cizallamiento sobre el rendimiento óptimo ha sido reconocido como una de las incertidumbres más relevantes en la desviación del trayecto. Estos parámetros de influencia podrían añadirse al modelo de predicción como

variaciones en los procedimientos, inexactitud de los sistemas de navegación o intervenciones de la ATM para reflejar su influencia.

Atendiendo a esta necesidad, según lo descrito por SESAR y NEXTGEN, se espera que el futuro de la Gestión del Tránsito Aéreo se centre en el concepto de Operaciones Basadas en Trayectorias (TBO)[6][2]. La gestión de las Operaciones Basadas en Trayectorias deberá seguir un proceso de coordinación conjunta y colaboración, que se describirá en las siguientes líneas. La trayectoria planificada de los aviones se denomina Business Trajectory (BT) ya que se establece un "contrato" entre el usuario del espacio aéreo y el proveedor de servicios.

El proceso de planificación de la trayectoria comercial comienza cuando el usuario del espacio aéreo genera el plan de vuelo deseado y termina cuando el vuelo ha llegado con éxito al aeropuerto de destino. Suponiendo que el usuario del espacio aéreo sea la única fuente de la intención de vuelo y que este utiliza la trayectoria más eficiente, esto garantiza las operaciones de vuelo más eficaces a nivel global.



Ilustración 2 Fases del concepto TBO

Una vez que se recogen todas las trayectorias para un día determinado, la unidad central de gestión del tránsito aéreo hará ajustes en esas trayectorias con el objetivo de resolver todos los conflictos y considerar las posibles condiciones meteorológicas adversas u otras incidencias que puedan surgir. Para que este procedimiento funcione, las trayectorias tendrán que ser definidas de forma muy precisa en las cuatro dimensiones y ejecutadas con precisión. El propósito del futuro sistema ATM es permitir este proceso con un mínimo de restricciones. La herramienta principal para el desarrollo de las BT será el proceso de Toma de Decisiones Colaborativa (CDM).

En cuanto al concepto de trayectorias 4D en las que se basan las TBO, un experimento realizado por EUROCONTROL en 2012, con un avión de pruebas Airbus A320 que voló de Toulouse a Estocolmo, estableció un margen de tolerancia entre -2 minutos y +3 minutos sobre la ruta y ± 30 segundos para el CTA. Además, los pilotos se vieron expuestos a situaciones en las que la aeronave se desvió de la ruta planificada. Los resultados mostraron que la adherencia a las trayectorias 4D era factible en la fase de crucero, mientras que la ventana de tiempo de ± 30 segundos para la CTA era más difícil de lograr y requería una mayor coordinación entre pilotos y controladores.

El enfoque que se propone para gestionar la incertidumbre temporal se centra en el establecimiento de varias ubicaciones intermedias (puntos de comprobación) a lo largo de una trayectoria, donde la incertidumbre temporal puede limitarse con los TWS.

4 MODELIZACIÓN DE LA TRAYECTORIA 4D

4.1 Caracterización del escenario

En esta primera fase del proyecto el problema se centra en la gestión del vuelo en ruta, demostrando, cómo se espera, que la definición de especificar TWs a lo largo de las trayectorias de vuelo reduzca la incertidumbre. Se selecciona la fase de vuelo en ruta (nivel de vuelo estabilizado con ajustes de nivel adicionales - ascenso y descenso) por ser la de mayor duración del vuelo y, por lo tanto, es más sensible a las posibles limitaciones de tiempo para mejorar el rendimiento. Además, esta fase de vuelo permite considerar una configuración básica de la aeronave. La hipótesis inicial del análisis es que la aeronave está siguiendo una trayectoria 4D, dentro del nuevo concepto TBO: el usuario del espacio aéreo se compromete a volar una trayectoria que garantice el mejor resultado para el vuelo, sujeto a restricciones de tiempo específicas.

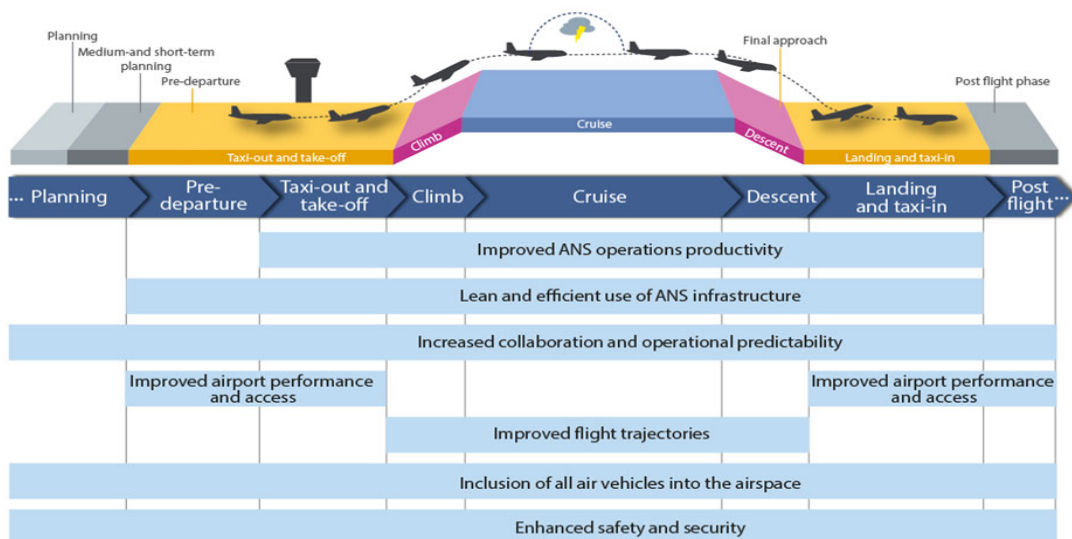


Ilustración 3: Perfil de vuelo trayectoria 4D. Concepto SESAR.

El primer escenario para modelizar la trayectoria, en fase crucero, se aproxima a un vuelo en dos dimensiones, siendo sus características principales las siguientes:

- Trayectoria rectilínea.
- Se producen cambios de nivel.
- Sin virajes.

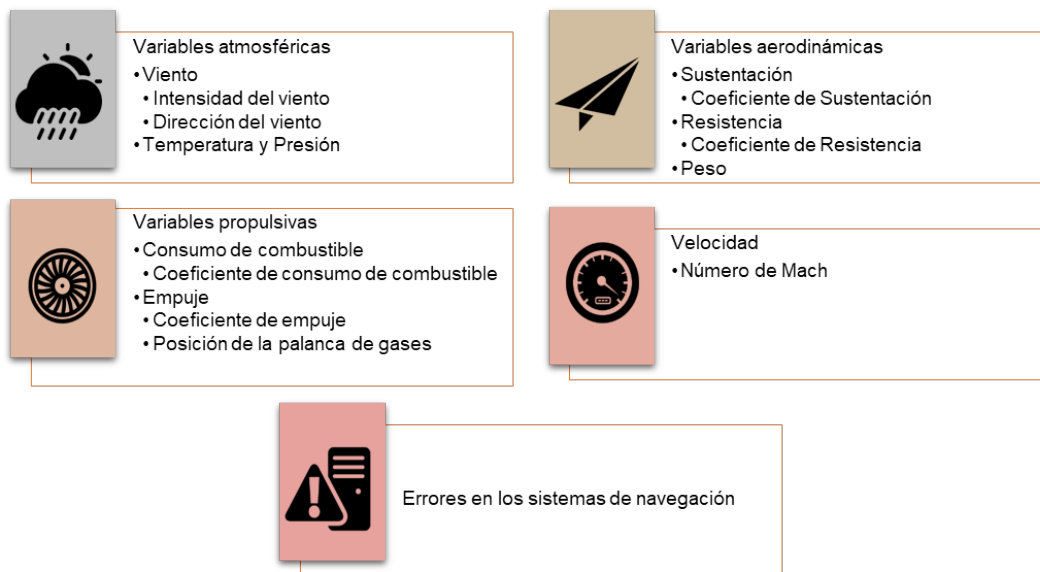
Para la elección del modelo de la aeronave, se debe valorar tanto la operatividad de esta como la posibilidad de actualización de sus sistemas. Por estas razones, se ha tomado como aeronaves tipo el Boeing 737-900ER y A320 de Airbus. Son aeronaves muy utilizadas, de corto-medio alcance

y que alberga los sistemas y las performances más actuales. Además, los datos característicos de su performance se encuentran en BADA.

4.2 Identificación de parámetros de influencia

Se ha observado que una trayectoria se ve afectada por una serie de parámetros que pueden hacer que varíe el seguimiento de la trayectoria ideal planificada. Entre estos parámetros se encuentran las variables atmosféricas (viento, temperatura, presión y densidad), propulsivas, aerodinámicas y los errores en los sistemas de navegación.

Tomando como referencia la metodología que ofrece EUROCONTROL para la modelización de trayectorias (metodología BADA) se estudia la evolución de los distintos parámetros a lo largo del tiempo.



Se considera que los parámetros elegidos ayudan a evaluar la situación de la aeronave, ya que aportan información sobre sus actuaciones y el consiguiente cumplimiento de la trayectoria establecida. Es importante, por tanto, conocer la evolución de los diferentes parámetros con el objetivo de establecer relaciones entre sus propias variaciones y las variaciones en la trayectoria seguida. Es decir, la variabilidad de los parámetros serán indicadores del nivel de cumplimiento de la trayectoria. De esta manera, será posible detectar cuáles de ellos contribuirán de una manera más significativa en el modelo.

4.3 Modelización de la trayectoria ideal

La metodología utilizada para definir la trayectoria implica un modelo de rendimiento de la aeronave basado en la familia 4.0 de la *Base of Aircraft Data* (BADA) de EUROCONTROL[7] y enfoques probabilísticos que reflejen la naturaleza estocástica inherente a los procedimientos de la aeronave tráfico. El modelo de aeronave BADA se basa en un enfoque cinético y variable en masa para la modelización del rendimiento de la aeronave. Está estructurado en tres partes: el Modelo de Rendimiento de la Aeronave (APM), el Modelo de Procedimiento de la Aerolínea (ARPM) y el Modelo de Características de la Aeronave (ACM). Estos tres elementos representan el Modelo Dinámico de Aeronaves (ADM), que se combina con el Modelo de Atmósfera (AM) para obtener las variables de estado dadas las de control

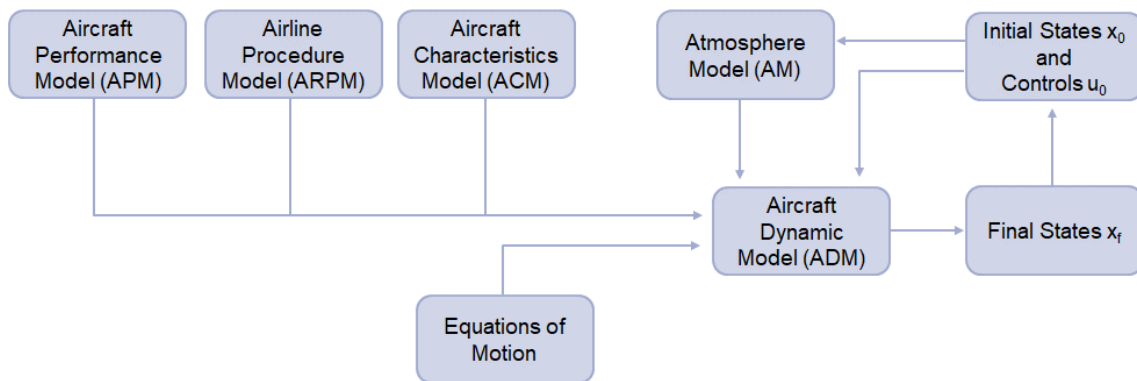


Ilustración 4. Esquema de la modelización con BADA 4

Para la modelización se ha elegido el programa MATLAB, muy utilizado para analizar y diseñar sistemas en el mundo de la ingeniería, para modelizar la trayectoria que se va a estudiar. La utilización del programa permite generar diferentes trayectorias a partir de una trayectoria base, es decir, es posible contar con varias trayectorias en las que tanto la distancia, el tiempo de vuelo o los tramos de ascenso y descenso sean los exigidos en cada momento.

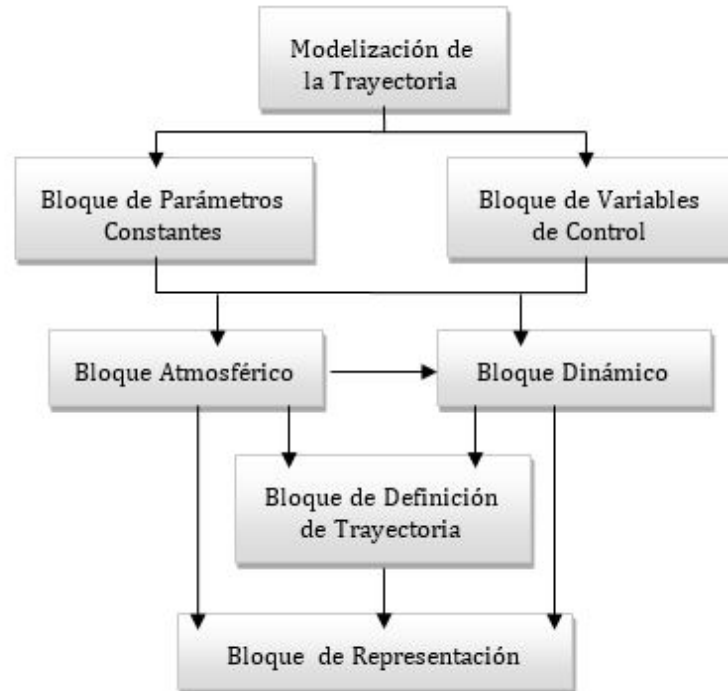


Ilustración 5. Esquema simplificado de modelización de la trayectoria

A la hora de modelizar la trayectoria que va a seguir la aeronave se implementan las ecuaciones que definen el movimiento de la aeronave. Estas son las ecuaciones relativas a la sustentación, el peso, la resistencia y el empuje de la aeronave. Se obtienen de la base de datos de EUROCONTROL BADA y se implementan en el código de MATLAB haciendo uso de todos los valores correspondientes a las características de la aeronave.

La trayectoria modelizada consiste en un tramo en vuelo de crucero establecido de 60km, alrededor de 40km recorridos durante la fase de ascenso, de nuevo 350km en fase de vuelo establecido, aproximadamente 50km durante la fase de descenso y 70km en el nuevo nivel de vuelo.

En relación al tiempo empleado para recorrer la trayectoria, la etapa inicial de crucero dura alrededor de 250 segundos, la fase de ascenso unos 200 segundos, la fase en vuelo de crucero establecido dura 1500 segundos, la fase de descenso 170 segundos y la última fase en vuelo establecido ronda los 300 segundos.

Por tanto, la fase de cambio de nivel en ascenso se realiza en 3 minutos y 30 segundos y la fase de descenso en 2 minutos y 50 segundos. Por esto, se puede afirmar que el modelo cumple con los criterios utilizados para el seguimiento de una trayectoria real.

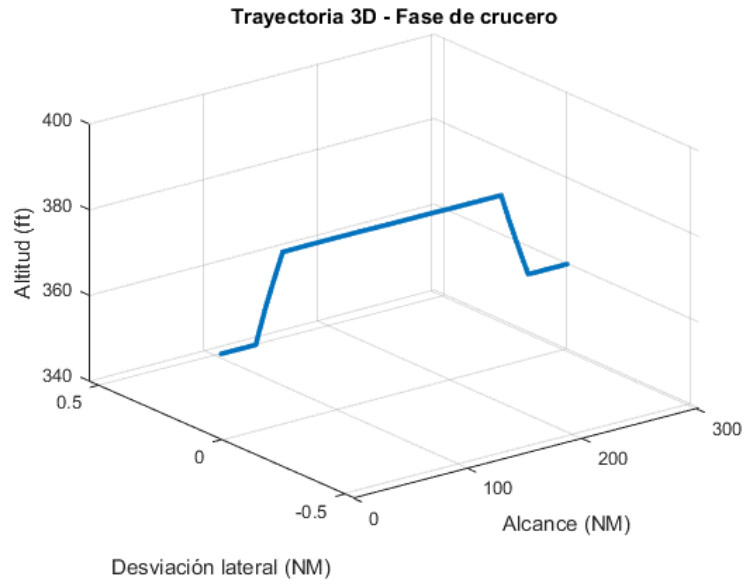


Ilustración 6. Representación 3D de la trayectoria modelizada

4.4 Validación del modelo

Una vez desarrollado el modelo de trayectoria que seguirá una aeronave a lo largo de la fase de crucero según diferentes escenarios, se hace necesario comprobar que el modelo construido cumple con características que se acercan a la realidad. Es decir, se trata de comprobar que la trayectoria modelizada cumple con los rasgos que definen una trayectoria real.

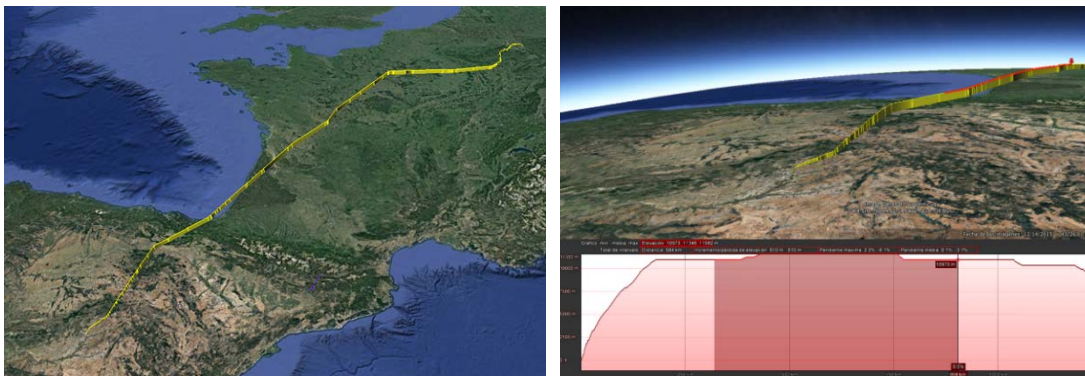


Ilustración 7. Representación en NEST del vuelo Madrid-Colonia

Para realizar estas comprobaciones se han tomado una serie de vuelos reales que siguen unas trayectorias similares a la que se ha modelizado o que contienen una fase que se asemeje a las que aparecen en la trayectoria modelo. El objetivo es conseguir validar el modelo desarrollado, contrastando todos los parámetros posibles que afectan a la definición de una trayectoria y a su

seguimiento. Cabe resaltar que se ha elegido un ascenso y descenso entre niveles de vuelo de 2000 metros, lo que supone dos cambios de nivel de vuelo en cada operación (de FL380 a FL360).

Para la validación del modelo se ha elegido una ruta de similares características a la definida en el modelo de MATLAB. Esta ruta es operada por una aeronave A320 entre Madrid y Colonia y se ha extraído de la herramienta NEST de EUROCONTROL[8]. La fase de ascenso dura alrededor de 15 minutos, la fase de crucero 1 hora y media, y la fase de descenso 25 minutos aproximadamente. El recuadro azul Ilustración 8 resalta el tramo en el que se centrará el modelo, ya que dicho segmento se ajusta a las características del trabajo. Consiste en un horizonte temporal de 40min, adecuado para hacer las simulaciones teniendo en cuenta las limitaciones de tiempo de computación.

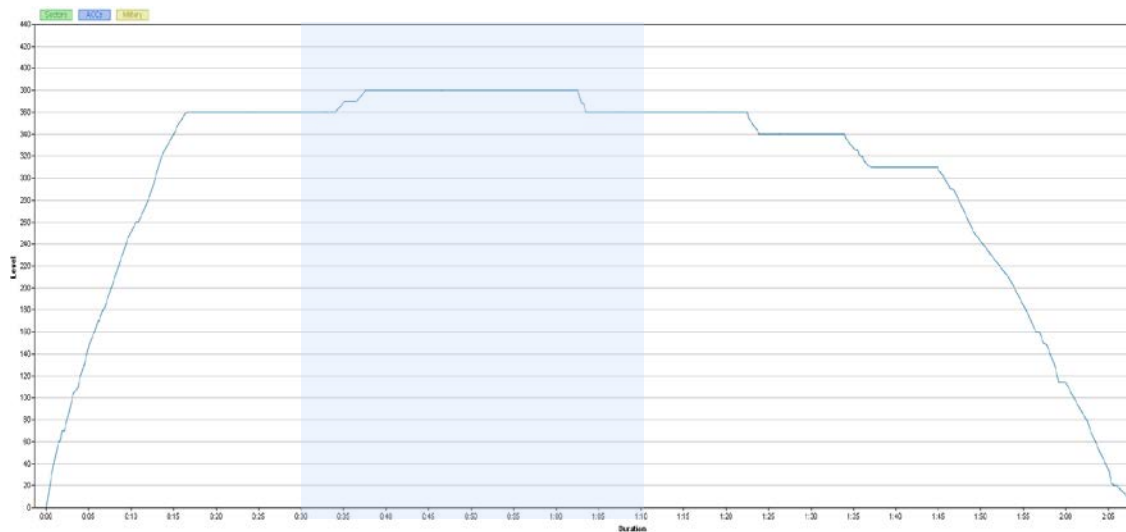


Ilustración 8. Representación del plano vertical de la trayectoria del vuelo Madrid – Colonia y limitación de la fase a estudiar

Comparando los datos de la trayectoria con los resultados del modelo desarrollado de trayectoria mediante MATLAB, se obtiene que el modelo cumple con los tiempos que marca el vuelo entre Madrid y Colonia (Alemania).

5 SIMULACIÓN DE MONTE CARLO DE LAS TRAYECTORIAS 4D

El método de Monte Carlo, es una técnica que permite resolver problemas matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias, es decir, se trata de un procedimiento que analiza distribuciones de variables aleatorias usando simulaciones de números aleatorios. Este método va a dar solución a una gran variedad de problemas matemáticos (ya sea estocástico o determinista), al tratarse de una técnica que combina conceptos estadísticos con la capacidad que tienen los ordenadores para generar números pseudo-aleatorios y automatizar cálculos. Por lo tanto, resultará de gran utilidad en aquellos casos en los que no es posible obtener información sobre la realidad a analizar, o cuando la experimentación no es posible, o es muy costosa.

El primer paso para ejecutar la simulación es definir los valores que toman las variables de entrada con las correspondientes probabilidades asociadas, es decir, se trata de asignar una distribución probabilística a cada variable de entrada. El siguiente paso, es la ejecución de la simulación numérica, tanto de las variables de entrada como de las variables de salida. De acuerdo con los estudios de probabilidad, en cada disparo se obtendrá un valor diferente para cada variable de entrada, que debidamente combinadas dichas variables, resultará en una distribución estadística diferente para cada variable de salida. Estas distribuciones probabilísticas son las que permitan extraer las conclusiones del comportamiento del modelo.

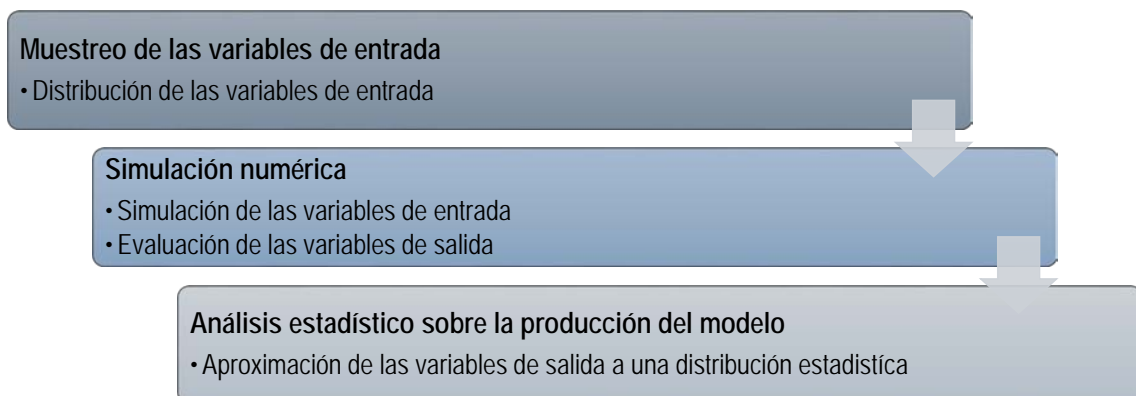


Ilustración 9. Procedimiento de la simulación.

Las variables de entrada son aquellas que se consideran que van a influir de alguna manera en la trayectoria de la aeronave. Tras haber realizado un análisis detallado de los parámetros que influyen en la trayectoria, se ha determinado que aquéllos que poseen mayor influencia en la misma son la masa, el viento, la temperatura, presión y densidad, los sistemas de navegación y los factores humanos. Por tanto, para cada experimento ejecutado, la masa inicial de la aeronave en esta fase de crucero es diferente a la del experimento anterior. Esto se ha considerado conveniente dado que, aunque es lo más normal, no todas las aeronaves despegan con el mismo TOW. Así, se analizan diferentes posibilidades, ampliando el abanico de aplicación del modelo y aumentando el grado de adaptación a la realidad.

En resumen, la clave de la simulación de Monte Carlo consiste en crear un modelo de simulación del proceso que se quiere analizar, identificando las variables cuyo comportamiento aleatorio

determina el comportamiento global del sistema, para así generar las muestras aleatorias y analizar el comportamiento del sistema ante los valores generados. Tras repetir N veces este experimento, se dispondrá de N observaciones sobre el comportamiento del sistema, obteniéndose el resultado final del mismo. El número de experimentos que se realicen influirá en la fiabilidad de los cálculos obtenidos, ya que una muestra no es representativa de la realidad. Por ello, se realizan un número de experimentos tal que si se aumentara el número esto no supusiese un cambio razonable en el cálculo. El número de experimentos se sitúa en torno a 1.000 o 10.000 trayectorias simuladas, cada una de las cuales cuenta con valores diferentes de cada parámetro debido a la aleatoriedad introducida

La Ilustración 10 corresponde a la simulación de 1000 trayectorias de la fase en ruta.

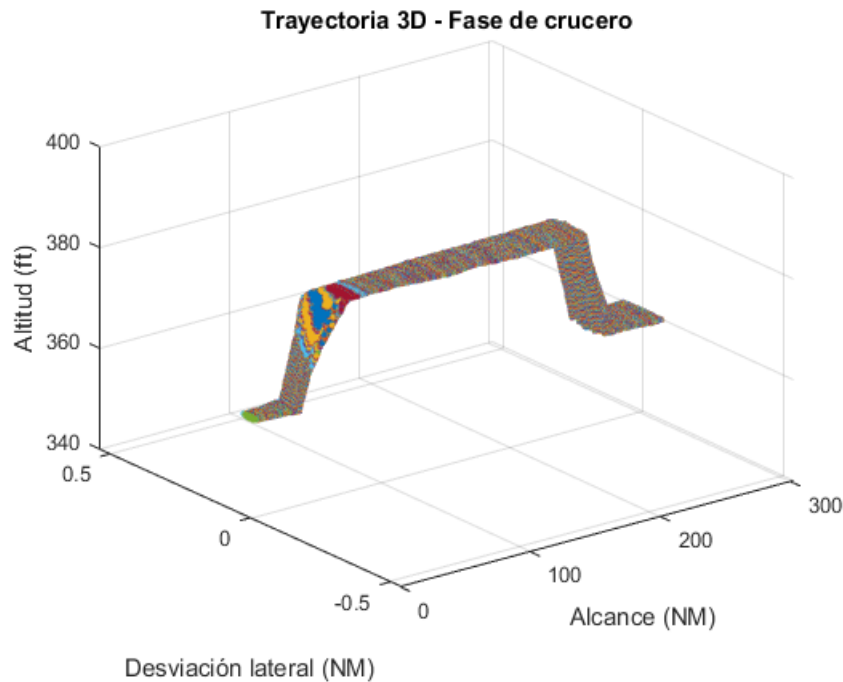


Ilustración 10. Resultados simulación MC – Trayectorias en 3D

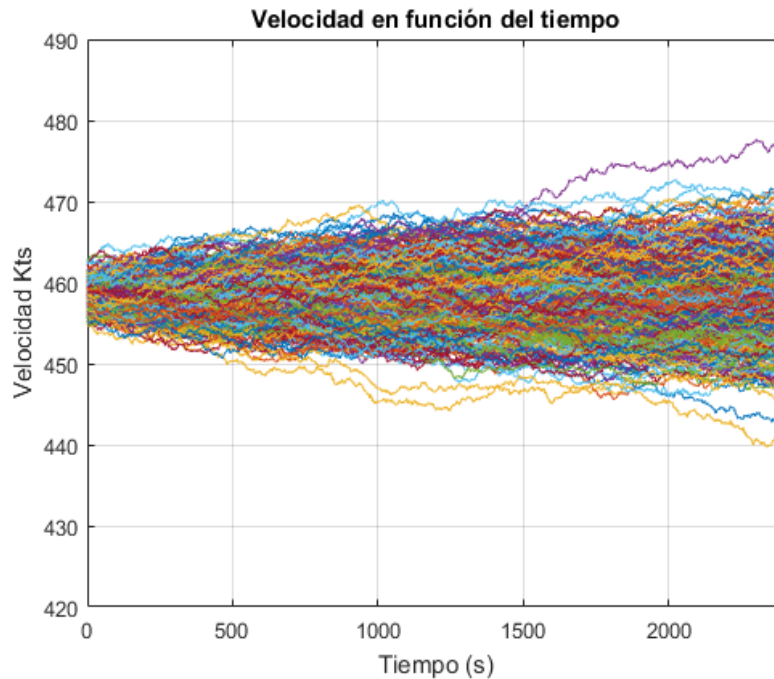


Ilustración 11. Representación de la variación de la velocidad de la aeronave en función del tiempo de vuelo

5.1 Definición de la ventana de paso

El objetivo de este apartado es definir una ventana de paso, tanto en tiempo como en espacio, donde se encontrará la aeronave en los puntos de control definidos. Como se ha mencionado en el apartado anterior, los datos utilizados para obtener las siguientes conclusiones se obtienen de la Simulación de Monte Carlo.

El concepto de ventana de paso nace a partir de las cuatro dimensiones de la trayectoria de la aeronave. En este contexto, las trayectorias de las aeronaves se describen en un espacio cuatridimensional (tres dimensiones espaciales clásicas y tiempo). Se trata de relacionar la posición 3D con el tiempo, de manera que al fijar una de ellas, la otra se encontrará dentro de un rango de valores, el cual recibe el nombre de ventana de paso. Si el intervalo hace referencia a valores de tiempo de paso de la aeronave por un punto, dicha ventana adquiere el nombre de ventana de tiempo, mientras que, si el intervalo hace referencia a una distancia de la aeronave respecto a un punto, dicha ventana se designará como ventana de posición.

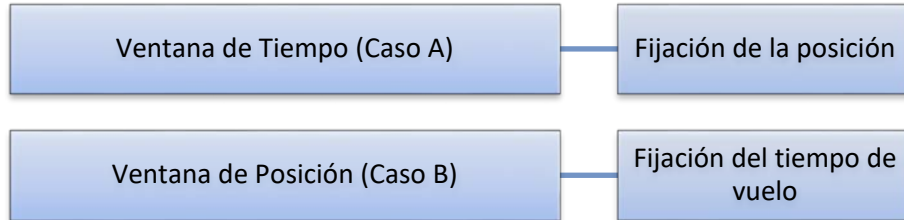


Ilustración 12. Parámetros que se fijarán en cada caso de análisis.

Se pueden dar varios posibles enfoques sobre la ventana de paso dependiendo de la variable que sea fijada. En este trabajo se realizan dos casos de análisis (A y B), donde se fijará la posición en el primero, y el tiempo en el segundo.

El procedimiento que seguir para estimar la ventana de paso comienza con fijar una de las variables. A continuación, se tratará de ajustar la variación de la otra de acuerdo con una distribución normal estándar, para establecer las diferentes ventanas de paso según la probabilidad deseada para cada punto de control.

Tabla 1. Puntos definidos para analizar las ventanas de paso

Puntos de la trayectoria	Definición
Punto de control 1	108NM (200000m)
Punto de control 2	290NM (540000m)
Punto de control 3	15 min (900s)
Punto de control 4	30 min (1800s)

Al igual que los puntos 1 y 2, los puntos de control 3 y 4 se encuentran definidos por tiempo con una separación suficiente que permite establecer una comparativa entre los parámetros característicos de la trayectoria que han sido recogidos en las simulaciones.

A modo de ejemplo de los resultados, a partir de todos los tiempos de llegada de 10.000 simulaciones para los puntos de control, se ha obtenido la distribución estadística de la Ilustración 13. En el punto de control 1, ésta se ha aproximado a una distribución normal estándar, centrada en 848 segundos de vuelo, cuya desviación típica es de 3 segundos. Con esto se puede decir que, la aeronave se encontrará en el punto de control 1 (108NM) dentro de una ventana de tiempo de $\pm 6s$ con un 95,44% de probabilidad.

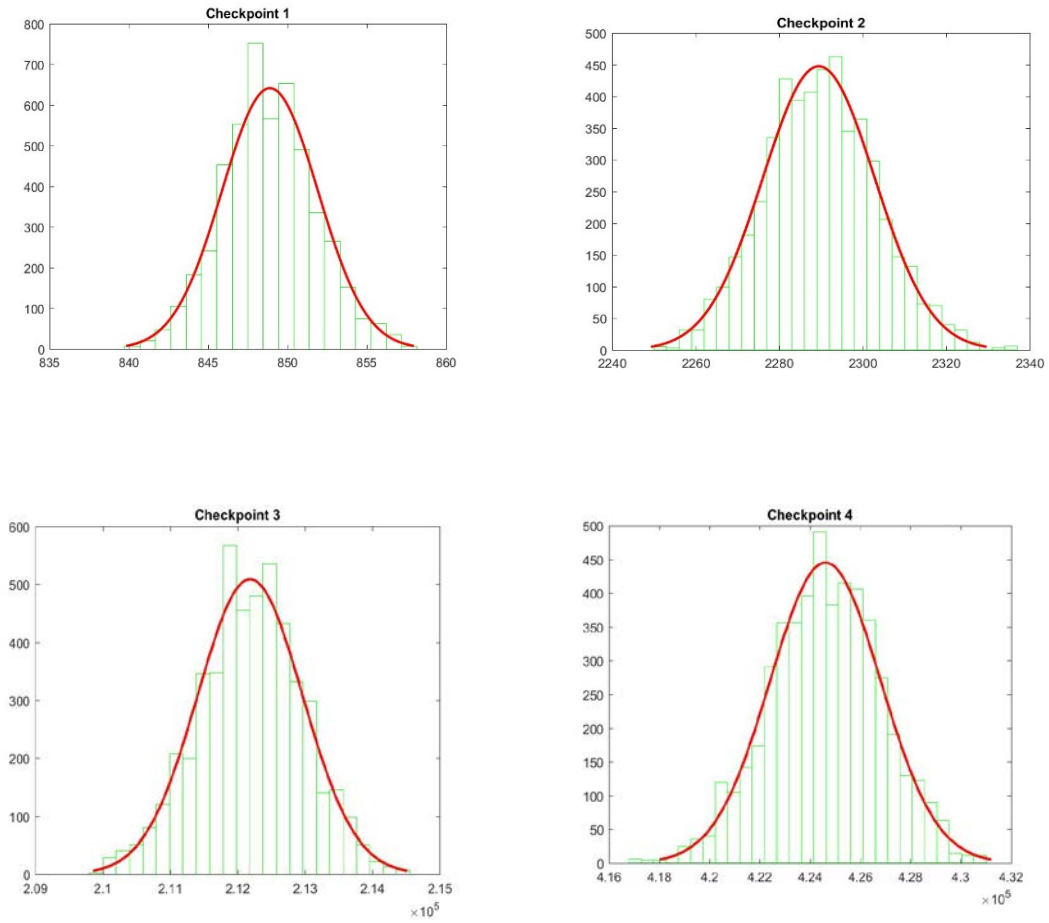


Ilustración 13. Distribuciones estadísticas para los puntos de control

6 ANÁLISIS DE LAS RELACIONES CAUSALES Y DE LA SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad mide cuánto pueden llegar a afectar a los resultados de un modelo variaciones relativamente pequeñas en los valores de los parámetros. En primer lugar, sirve para comprobar la lógica interna de un modelo, ayuda a entender cómo funciona el modelo o por qué no funciona correctamente y aprender más acerca de su funcionamiento. Por otro lado, el análisis de sensibilidad sirve para definir la importancia de cada parámetro, algo que se considera de gran utilidad para conocer entre qué rangos de variación se han de encontrar las entradas del modelo. Por último, sirve para detectar si el modelo está excesivamente parametrizado, esto ocurre cuando existen parámetros a los que el modelo resulta insensible, en este caso será necesario eliminar algunos para simplificar el modelo.

Para estos dos casos de explotación de los resultados de las simulaciones obtenidas, se utiliza el teorema de Bayes o de la probabilidad condicional para la construcción de una red (red bayesiana) que permita hacer las dos evaluaciones planteadas. La red bayesiana brinda información sobre cómo se relacionan las variables, las cuales pueden ser interpretadas como relaciones de causa-efecto. En otras palabras, el problema quedará organizado mediante un conjunto de variables y las relaciones de dependencia entre ellas. Dado este modelo, se puede hacer inferencia bayesiana; es decir, estimar la probabilidad posterior de las variables no conocidas, en base a las variables conocidas.

La red bayesiana del modelo de predicción de trayectorias está formada por 10 nodos interrelacionados entre sí. Cada nodo corresponde a un parámetro o factor de influencia en la trayectoria, cuyos valores se encuentran discretizados en diferentes estados de estudio. El número de estados es indiferente, considerándose tantos estados sean necesarios para reflejar el valor de cada parámetro. Cada estado lo forma un rango entre un valor mínimo y uno máximo, siendo el estado siguiente un rango comprendido entre el valor máximo anterior y un valor superior a este último.

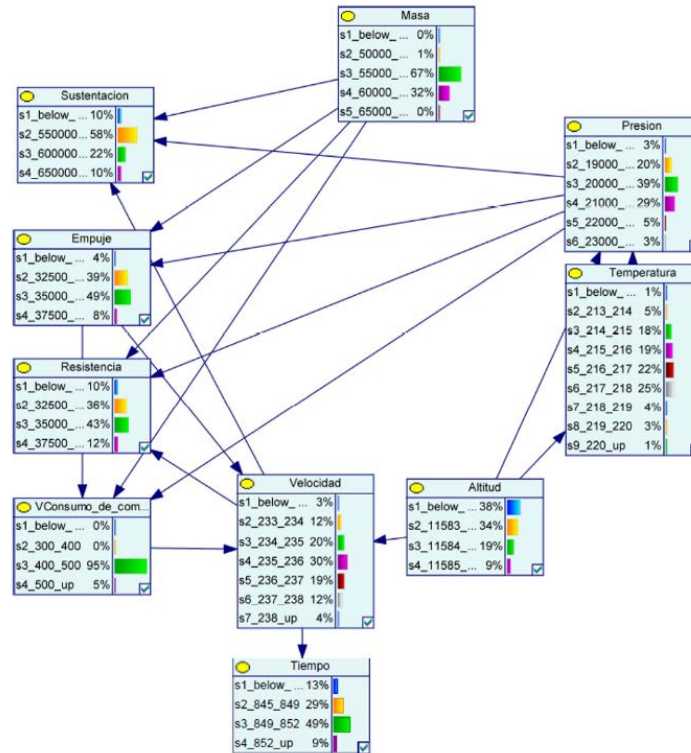


Ilustración 14. Relaciones de causalidad entre los parámetros de influencia en la trayectoria 4D en el punto de control 1

La Ilustración 14 muestra las relaciones de causalidad entre los parámetros de influencia en la trayectoria, tomados en el Punto de control 1. En esta red se puede ver las diferentes relaciones entre nodos (parámetros) que permiten evaluar de forma directa la influencia entre unas y otras.

Este tipo de red ha permitido expresar de una manera gráfica y representativa las relaciones de causalidad entre los parámetros que intervienen en el modelo de predicción, para poder descartar aquellos cuya influencia es despreciable en la trayectoria final de la aeronave. Conocer las relaciones de causalidad, permite hacer un análisis inverso, es decir, fijando una ventana de paso, descubrir entre qué valores han de encontrarse las variables de entrada del modelo.

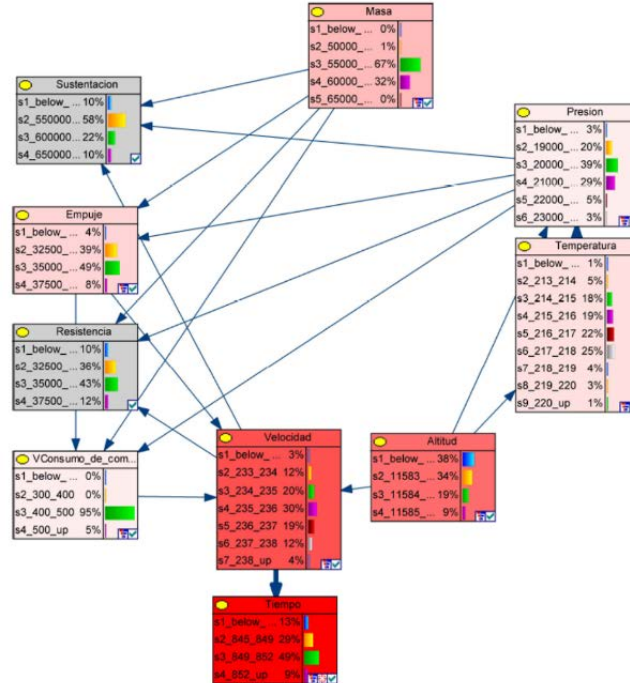


Ilustración 15. Intensidad de las relaciones de causalidad entre los parámetros de influencia en la trayectoria 4D en el punto de control 1

En la Ilustración 15 se representan la intensidad de las relaciones entre los parámetros para el ejemplo del Punto 1. Se ha fijado como "Target" o parámetro objetivo el tiempo de llegada de las aeronaves, de manera que, cuanto mayor sea la intensidad del color rojo de cada recuadro, más estrecha será la influencia con éste, y, por tanto, mayor será la interdependencia entre las mismas. Además, para reforzar la representación gráfica, el grosor de la flecha indica también la intensidad de las relaciones entre los parámetros. En este sentido, se observa para este punto que los parámetros de mayor influencia son la velocidad y el nivel de vuelo (altitud) en el que se encuentre la aeronave.

A su vez, esta forma de representación permite estudiar la intensidad de estas relaciones de la red bayesiana, de donde se deduce que, tanto el empuje como la velocidad y la altitud de la aeronave son los factores que poseen mayor influencia sobre la trayectoria. Además, se ha de tener en cuenta la influencia del peso (masa) de la aeronave en la trayectoria final.

6.1 Globalización de la red

El siguiente paso consiste en crear una nueva red que contemple la trayectoria de una manera más global, es decir, se trata ahora de aumentar el número de puntos de análisis de la trayectoria. En el caso introducido anteriormente se eligieron dos checkpoints, situados en posiciones cercanas al inicio y al final de la trayectoria respectivamente. En este caso se establecen cinco checkpoints a lo largo de la trayectoria, coincidiendo cada uno en cada una de las secciones en que se divide la trayectoria. Así, cada uno de los checkpoints elegido actuará a modo de representante de todos los puntos recogidos en la sección en la que se encuentra situado. Esto permite conseguir un análisis del cumplimiento de la trayectoria inicial más exhaustivo y detallado que en el estudio anterior.

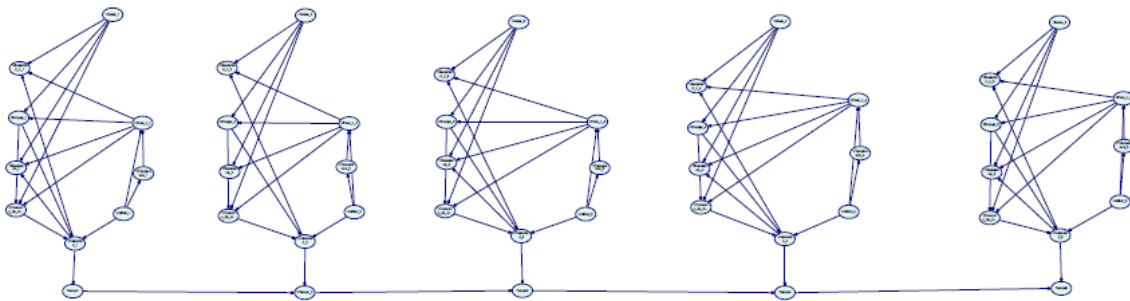


Ilustración 16. Ampliación de la red – Red Global

Cada uno de los puntos de análisis o checkpoints que se han definido se encuentran situados en cada una de las secciones en que se ha dividido la trayectoria. Por tanto, la toma de datos se ha realizado en los siguientes puntos, medidos en millas náuticas:

- Checkpoint 1 → 15NM
- Checkpoint 2 → 45NM
- Checkpoint 3 → 150NM
- Checkpoint 4 → 260NM
- Checkpoint 5 → 290NM

La ampliación del modelo causal a todos los tramos del modelo de Trayectoria 4D construida, permite evaluar un punto de cada sección de la trayectoria a modo de muestra por cada cambio de actuación de la aeronave (vuelo estabilizado, cambio de nivel ascendente, vuelo estabilizado, cambio de nivel descendente, vuelo estabilizado), se tiene un estudio más completo que permite aumentar la fiabilidad de la red global, se ofrece una visión más global de la trayectoria pudiendo observar de una manera más pormenorizada cada característica de la trayectoria y se presenta una evolución de la trayectoria y sus variaciones de una forma más particularizada, conociendo cómo varía cada parámetro de un checkpoint al siguiente.

7 GENERALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS

Con el fin de facilitar la planificación estratégica de las trayectorias 4D, se han elaborado una serie de ábacos que podrán ser de utilidad en las etapas previas al vuelo de la aeronave. La principal función de un ábaco consiste en relacionar tres variables y así poder obtener una de ellas fijando las otras dos variables. De esta manera, se tiene, por ejemplo, el tiempo de vuelo, el nivel de vuelo y la ventana de posición. Fijando el tiempo de vuelo y el nivel de vuelo de la aeronave se podría conocer la ventana de posición en millas en ese punto. Con ello se trata de prever en cierta medida el comportamiento de la aeronave durante la fase de crucero de la trayectoria

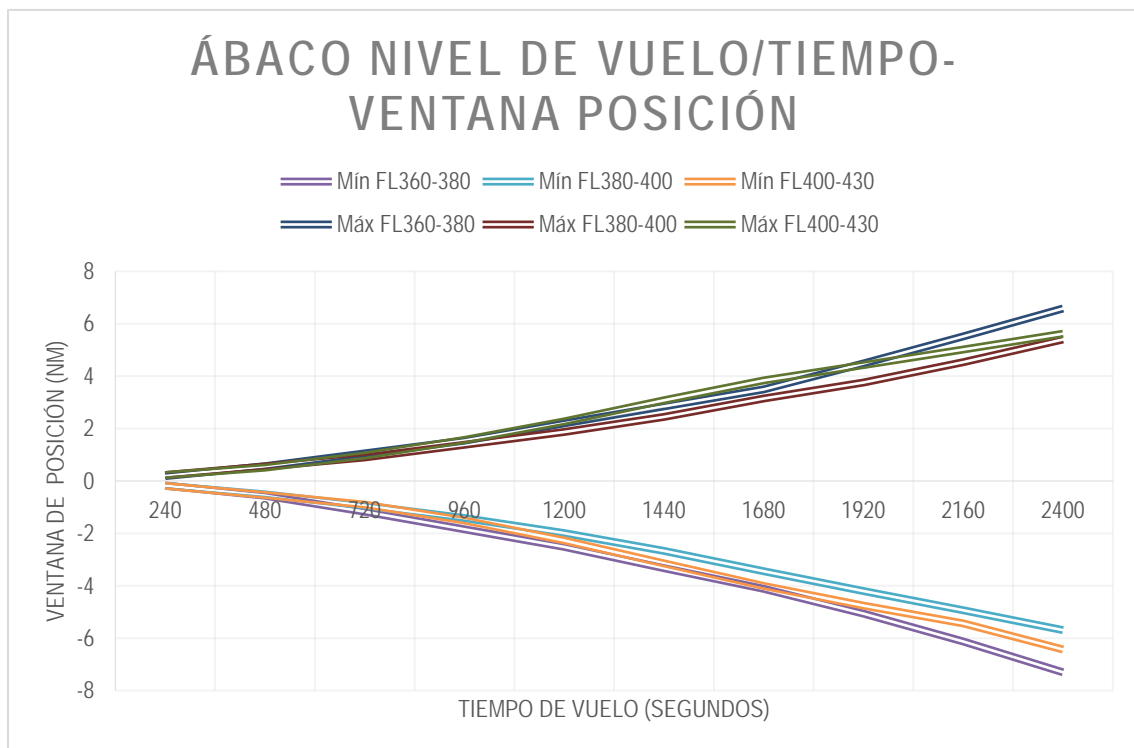


Ilustración 17. Ábacos de relaciones entre la ventana de posición en función del tiempo de vuelo y la masa de la aeronave

Las relaciones obtenidas relacionan por una parte TOW con tiempo de vuelo o alcance para obtener las dos ventanas de paso y, por otra parte, el nivel de vuelo con tiempo de vuelo y alcance para obtener también las dos ventanas de paso

8 CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

Las operaciones basadas en trayectorias tendrán en cuenta las trayectorias preferidas de los usuarios del espacio aéreo, lo que exigirá una predicción muy exigente de las limitaciones de tiempo. Los resultados de los diferentes análisis realizados permiten profundizar en la definición y evaluación de los parámetros de influencia de las trayectorias 4D, con el fin de aplicar estos resultados a una mejor estimación y planificación de las trayectorias por parte del operador y el ATC. A modo de conclusiones:

- Se presenta una metodología para estimar los TWs de trayectoria 4D en los diferentes puntos de control a lo largo de la fase de vuelo en ruta. Los TWs pueden aplicarse para ayudar en la gestión de la puntualidad; es decir, en lugar de centrarse en la reducción terminal de la incertidumbre (por ejemplo, aumentando la precisión de los equipos), se propone un enfoque transitivo en el que la incertidumbre temporal se gestiona y se restringe en varios puntos intermedios a lo largo de la duración de un vuelo.
- Se presenta una descripción del problema de movimiento de la aeronave (predicción de trayectoria) basada en la metodología BADA 4.0 de EUROCONTROL y se particulariza para un escenario de fase en ruta. El modelo se valida con datos reales de vuelo. Posteriormente, se consideran e introducen factores estocásticos dentro de la formulación identificando y modelando los parámetros más influyentes (fuentes de incertidumbre) sobre el modelo de trayectoria.
- Un enfoque Monte Carlo permite realizar 10.000 simulaciones y evaluar la variación en los resultados del modelo de trayectoria. Por lo tanto, se puede cuantificar el tamaño de los TWs estableciendo una tolerancia en la precisión del tiempo (intervalo de dispersión). Los resultados muestran que, con una probabilidad del 95,44%, la aeronave alcanza los 108 NM en un intervalo de ± 6 segundos, mientras que alcanza los 290 NM en un intervalo de ± 27 segundos. Hay un crecimiento no lineal del tamaño de la TW con respecto a la distancia volada. Este resultado implica que se produce una degradación en el tiempo a medida que aumenta la distancia recorrida por la aeronave.
- Un análisis causal a través de un enfoque BN permite expresar de forma gráfica y cuantitativa las relaciones causales entre los parámetros que intervienen en el modelo de predicción. Esto puede ser usado para descubrir la influencia de las diferentes variables sobre la trayectoria de la aeronave. Los resultados muestran que el empuje, la velocidad, la altitud y la masa del avión son los factores que más influyen en la determinación de los TWs. Además, el modelo causal permite gestionar la incertidumbre en la definición de TW (análisis directo) o descubrir en qué valores se debe fijar las variables de entrada para alcanzar un TW objetivo específico (análisis retrospectivo).
- Se presentan diferentes gráficos para ilustrar la influencia de FL y TOW en el tamaño de los TWs en todo el segmento de trayectoria evaluado, que puede ser implementado como una herramienta de planificación estratégica.

Por último, destacar que la principal contribución de esta parte del proyecto es el desarrollo de un modelo para la definición y predicción de los TWs de trayectoria 4D. Puede ser útil para la gestión de la incertidumbre y la mejora de la previsibilidad, que son elementos clave en el futuro concepto operativo de la ATM. La caracterización de los TWs, así como la estimación de las desviaciones potenciales de las trayectorias planificadas, pueden aplicarse para mejorar la sincronización del tráfico (secuenciación de tráfico previa al vuelo), facilitar la resolución de conflictos y ayudar a la gestión de desviaciones en el marco operativo de las 4D-trayectorias.

Los trabajos previstos en 2018 buscarán conocer los efectos de la variabilidad de los parámetros sobre la definición de las ventanas de paso (impacto en predictibilidad y degradación), ampliando el alcance a las diferentes fases de una trayectoria. Para ello, se considerarán las siguientes etapas:

- Desarrollo del **modelo de fiabilidad** (sistemas multi-estado) asociado a las trayectorias 4D. Explotación de **funcionalidades** del modelo de fiabilidad: tiempo entre fallos, probabilidad de degradación, medidas correctoras. A partir del modelo desarrollado en 2017 para analizar la fiabilidad y la potencial degradación de las trayectorias 4D, se explotarán las posibles aplicaciones del modelo: tiempo entre fallos (tiempo necesario para refrescar la predicción), probabilidad de degradación, medidas correctoras). El modelo se basa en la definición de un vector de estado representativo de la trayectoria 4D, que permite graduar el nivel de degradación de la misma. La teoría de las cadenas de Markov se empleará para la simulación y desarrollo de las funcionalidades del modelo.
- **Extensión** del análisis a las **diferentes fases de vuelo** (ascenso, ruta, descenso): Los modelos desarrollados a lo largo del año 2017 para la fase de ruta se aplicarán a nuevas fases de la trayectoria, con el objetivo de obtener un resultado global para una trayectoria real "media" (parámetros de influencia, modelo causal, predictibilidad y análisis de confiabilidad). Se busca obtener una serie de escenarios parciales (ascenso, ruta con cambio de nivel, ruta con viraje, descenso) que combinados permitan modelizar diferentes trayectorias. Más allá de la operativa común en las trayectorias, el impacto de la variabilidad de los parámetros de influencia sobre las ventanas de paso es muy diferente dependiendo del escenario considerado.
- Evaluación de los **condicionantes/limitaciones** de implementación de trayectorias 4D desde el punto de vista de los **servicios ATM** y **sistemas CNS**. A partir de los resultados anteriores (análisis de predictibilidad y fiabilidad), se espera proponer una serie de limitaciones y condicionantes a la implementación del concepto operacional de trayectorias 4D (y las ventanas de paso asociadas) en los diferentes escenarios analizados.
- Análisis del **impacto del concepto operacional** asociado a las trayectorias 4D en términos de complejidad y balance capacidad/demanda (gestión de la incertidumbre). Se seleccionarán y definirán una serie de indicadores de rendimiento para estimar el impacto

de las trayectorias 4D (y las ventanas de paso establecidas) en las principales áreas de análisis: (i) seguridad, (ii) medio ambiente, (iii) capacidad, y (iv) eficiencia de costes. Particularmente, el análisis se centrará en los parámetros de influencia sobre complejidad y balance capacidad/demanda a en un entorno operacional de trayectorias 4D (gestión de la incertidumbre).

9 PUBLICACIONES

La divulgación de parte de la investigación sobre la integración de RPAS en un espacio aéreo no segregado se considera de un alto interés económico, investigador y social que se espera que tenga una gran adopción entre la comunidad ATM. Por lo tanto, el desarrollo de este trabajo ha permitido la publicación del mismo en distintos eventos y congresos de difusión científica:

- Divulgación de los objetivos y las tareas realizadas del proyecto en el World ATM Congress, 7-9 Marzo 2017, Madrid, España.
- "Prediction of 4D-trajectory time-windows based on Bada, Monte Carlo simulation and Bayesian inference", 7th EASN International Conference on Innovation in European Aeronautics Research, 26-29 September 2017, Warsaw, Poland. ISSN 2523-5052.
- "4D-Trajectory Predictability and Uncertainty Management" World ATM Congress, 6-8 Marzo 2018, Madrid, España.
- "Air Traffic Management based on 4D Trajectories: A Reliability Analysis using Multi-state Systems Theory", XIII Congreso de Ingeniería del Transporte, 6-8 Junio 2018, Gijón.

Además, diversas investigaciones del proyecto se encuentran en distintas fases de revisión en principales revistas de investigación científica

10 REFERENCIAS

- [1] SESAR, *SESAR Concept of Operations Step 2 Edition 2014*, 01.01.00. Brussels, 2014.
- [2] ICAO, "Global Air Traffic Management Operational Concept," 2005.
- [3] FAA, "The Future of the NAS," no. June, 2016.
- [4] G. Enea and M. Porretta, "A comparison of 4D-trajectory operations envisioned for Nextgen and SESAR, some preliminary findings," *28th Congr. Int. Counc. Aeronaut. Sci.*, pp. 1–14, 2012.
- [5] T. Pabst, T. Kunze, M. Schultz, and H. Fricke, "Modeling external disturbances for aircraft in flight to build reliable 4D trajectories," in *3rd International Conference on Application and Theory of Automation in Command and Control Systems*, 2013.
- [6] ICAO, "Tbo Concept," pp. 1–50, 2015.
- [7] EUROCONTROL, "BADA Technical Documentation and Datasets." 2017.
- [8] EUROCONTROL, "NEST modelling tool." 2017.