



Análisis de parámetros de influencia en la definición de trayectorias 4D

Entregable 1 (E1). Análisis inicial y revisión bibliográfica

Hoja de Identificación del documento

Título:	Análisis de parámetros de influencia en la definición de trayectorias 4D. Entregable 1 (E1). Análisis inicial y revisión bibliográfica.
Código:	E1
Fecha:	Febrero 2017
Fichero:	

Autor:	Pablo González García, Álvaro Rodríguez Sanz
Revisor:	Fernando Gómez Comendador
Aprobado:	

Versiones:			
Numero	Fecha	Autor	Comentarios
01	01 / 02 / 2017	Pablo González García Álvaro Rodríguez Sanz	

Resumen Ejecutivo

A lo largo del documento se reflejan las referencias en las que se apoya el proyecto, definiendo previamente la justificación, los objetivos, el alcance y la utilidad del mismo.

Se repasa el 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. Por un lado se examinan los avances que se han conseguido en lo concerniente a factores de influencia en la definición de una trayectoria 4D y se observa la sensibilidad de las trayectorias a la variación de los parámetros de estudio, mientras que, por otro lado, se incluyen algunos casos en los que se han tenido en cuenta ventanas de paso por waypoints y su proceso de gestión.

Por último, se menciona la manera en que se aplica al proyecto el contenido anteriormente expuesto.

Con todo ello se trata de determinar el ámbito de aplicación del proyecto, con el objetivo de conocer el estado actual de las trayectorias 4D, sus necesidades y posibles soluciones a los problemas que presenta.

Índice de Contenidos

1	Análisis inicial.....	5
1.1	Justificación	5
1.2	Objetivos	5
1.3	Alcance.....	6
1.4	Utilidad / aplicabilidad.....	8
2	Revisión bibliográfica.....	9
2.1	Concepto operacional de las trayectorias 4D según SESAR.....	9
2.2	Análisis de las trayectorias 4D (requisitos, implicaciones, beneficios)	10
2.3	Proyectos relacionados	11
2.3.1	Factores de influencia sobre trayectorias 4D	12
2.3.2	Sensibilidad a la variación de los parámetros	12
2.3.3	Definición de ventanas de paso (waypoints) y proceso de gestión.....	13
2.4	Aplicación al proyecto.....	13
3	Referencias	14

1 ANÁLISIS INICIAL

1.1 Justificación

SESAR [1] es un proyecto conjunto de la comunidad de transporte aéreo europea cuyo objetivo es la implantación de una red de ATM (Air Traffic Management) europea de altas prestaciones, con el objeto de acomodar a través de la implantación de nuevos procedimientos y tecnologías, el incremento de demanda previsto para los próximos años.

Dentro del programa SESAR, las trayectorias 4D constituyen una parte fundamental para la implementación del concepto operacional. Una trayectoria 4D consiste en una trayectoria 3D a la que se le añade la dimensión del tiempo, es decir, cada punto o waypoint de la trayectoria está definido por una longitud, una latitud, un nivel de vuelo y un tiempo, con restricciones asociadas donde y cuando sea necesario.

Al emplear estas trayectorias 4D se posibilita que los usuarios sigan trayectorias prácticamente sin restricciones, siempre y cuando éstos cumplan con los tiempos establecidos. Dado el nivel de exigencia requerido y con el objetivo de garantizar el nivel de cumplimiento que tendrá la aeronave a lo largo de la trayectoria, se hace necesario realizar un análisis que permita conocer con precisión la ventana de tiempo en la que se encuentra la aeronave en cada waypoint.

1.2 Objetivos

Los objetivos que se persiguen son:

- Identificar y acotar los parámetros de influencia en el seguimiento de una trayectoria 4D.
- Aplicar un modelo causal que permita conocer cómo variará la trayectoria al modificar estos parámetros.
- Definir una ventana de tiempo en la que se va a encontrar la aeronave a su paso por cada waypoint.

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.

1.3 Alcance

Las trayectorias 4D consisten en conjuntos de segmentos consecutivos que unen diferentes waypoints, los cuales tienen fijados un tiempo determinado de paso por los mismos con la finalidad de evitar posibles conflictos.

Por esta razón, es importante definir una ventana de paso que garantice el cumplimiento con el tiempo de paso asignado por cada punto de la trayectoria o waypoint. Esta ventana de paso puede depender de una serie de parámetros que se analizan previamente, tales como parámetros relativos a la aeronave, al escenario o a factores humanos. Una vez que se conocen los parámetros que afectan al seguimiento de una trayectoria y sus posibles variaciones a partir de la aplicación de un modelo causal, se puede definir la ventana de paso.

El análisis se va a centrar en la fase de crucero de una aeronave tipo presentada bajo distintos escenarios. La optimización de la trayectoria en la fase de crucero induce la mayor parte de los ahorros en costes.

Para cumplir con los objetivos propuestos se van a llevar a cabo las siguientes actividades:

- **Análisis inicial**

Se define y acota el problema, detallando la justificación, objetivos, alcance y utilidad previstos para el trabajo.

- **Revisión bibliográfica**

Se analiza el estado del arte de los campos que componen el trabajo, tales como el concepto operacional de las trayectorias 4D según SESAR, el análisis de las trayectorias 4D, la caracterización y modelización de las trayectorias 4D, factores de influencia sobre las mismas y la definición de ventanas de paso y proceso de gestión.

- **Análisis metodológico**

Se revisan las metodologías y herramientas necesarias para desarrollar el trabajo: identificación de factores de influencia (BADA - Base of Aircraft Data, *Eurocontrol*), simulación de trayectorias (MATLAB y SIMULINK), sensibilidad a la variabilidad de los factores (Simulaciones de Montecarlo), estudio de causalidad y modelos de prognosis (Modelos Causales).

- **Modelización de la aeronave y la trayectoria 4D**

Se modeliza la aeronave, obteniendo una aeronave tipo haciendo uso de la metodología BADA en la que se identifican y caracterizan los parámetros de interés.

- **Caracterización de trayectorias 4D**

Se caracterizan las trayectorias 4D. Se identifican, definen y caracterizan los parámetros globales de influencia y se determina la relación teórica entre los mismos.

- **Modelización de parámetros en trayectorias 4D (identificación y caracterización)**

Una vez seleccionada la fase de vuelo y la aeronave tipo de estudio, se definen los procedimientos de operación, identificando y caracterizando los parámetros de influencia.

- Parámetros propios de la aeronave
- Parámetros propios del escenario
- Parámetros relativos a los factores humanos

- **Caracterización y modelización de parámetros de influencia de la trayectoria**

Se diseña un modelo generador de trayectorias para la fase de vuelo seleccionada. Para ello, se utiliza un software específico como MATLAB o SIMULINK, a partir de las ecuaciones y datos tomados de la documentación del BADA para un modelo de aeronave tipo.

- **Modelización y simulación de trayectorias 4D**

Una vez definido el modelo, se identifican cuáles son los parámetros con mayor influencia para el caso de estudio. Se analizan los posibles escenarios a modelizar para la fase de vuelo elegida y se establece un escenario base para el análisis. Se identificarán también aquellos parámetros que no han sido modelizados en el caso de estudio y que podrían participar en modelizaciones futuras.

- **Análisis de resultados y definición de la ventana de paso**

A partir de los resultados obtenidos de la simulación, se procederá a la definición de la ventana temporal de paso que garantice el cumplimiento de los requisitos por parte de la aeronave en cada punto del escenario elegido. Se estudia la sensibilidad del resultado ante la variabilidad de parámetros empleando técnicas de Simulación de Montecarlo.

- **Análisis de causalidad y modelo de reducción de incertidumbre**

Tras analizar las relaciones e interdependencias entre factores, se desarrolla un modelo causal que permita mejorar la predictibilidad y reducir la incertidumbre. El objetivo es descubrir de qué factores depende principalmente el cumplimiento de las ventanas de paso y cómo se relacionan entre sí para poder establecer las relaciones de causalidad que aporten las probabilidades de que ventanas futuras cumplan los requisitos conocido el estado actual. El análisis inverso indicará, en caso de que no se cumplan los requisitos, cuáles son los factores que con mayor probabilidad han causado el incumplimiento.

- **Conclusiones finales, aplicabilidad y recomendaciones**

Se revisan los resultados del estudio, se establecen conclusiones, limitaciones, aplicabilidad de los modelos y recomendaciones de desarrollo futuro.

1.4 Utilidad / aplicabilidad

El trabajo podrá ser empleado como una herramienta que permita conocer la evolución de una trayectoria 4D según la actuación sobre la misma de los parámetros contemplados y sus correspondientes variaciones.

Por otro lado, disponer de las posibles desviaciones que pueden sufrir las trayectorias conlleva consecuentemente una mejora tanto en la sincronización del tráfico aéreo como en la gestión y resolución de conflictos.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concepto operacional de las trayectorias 4D según SESAR

Los objetivos que presenta el programa SESAR [2] para el año 2050 son los siguientes:

- Aumentar la capacidad del Espacio Aéreo x3
- Aumentar la seguridad x10
- Reducción impacto medioambiental -10%
- Reducción de costes -50%

Una de las medidas clave que propone SESAR para alcanzar estas metas es la utilización de trayectorias 4D por parte de los usuarios del Espacio Aéreo, aumentando la capacidad del mismo y disminuyendo el impacto ambiental.

El concepto de operaciones 4D se basa en dos elementos distintos:

- La sincronización entre la trayectoria 4D del aire y de tierra, pasando de controlar el Espacio Aéreo a gestionar las trayectorias.
- Secuenciación de vuelos utilizando CTO (Controlled Time Over) o CTA (Controlled Time of Arrival) cuando y donde se requiera. Por ejemplo, esto es útil en la activación y desactivación del espacio aéreo restringido.

Se busca que los usuarios tengan mayor peso en la toma de decisiones y entre ellas se encuentran la posibilidad de seguir la trayectoria deseada o la capacidad de autosepararse. Para mantener la separación y explotar los beneficios de estas trayectorias 4D, las aeronaves deben mantenerse dentro de volúmenes muy pequeños alrededor de su trayectoria de referencia negociada. Por ello, es necesario que las trayectorias 4D se sigan con un alto grado de exactitud, precisión, integridad de los datos y siempre desde el lado de la seguridad operacional.

También hay que tener en cuenta la existencia de una nube de información actualizada, SWIM (System Wide Information Management), que facilitará la toma de decisiones y, en consecuencia, la eficiencia del sistema ATM.

Al conocer el tiempo de paso por cada waypoint, se puede conseguir una secuenciación de vuelos previa con un alto grado de cumplimiento. Además, basándose en el intercambio de información entre aeronaves y ATC (Air Traffic Control) a través de enlace de datos, una gestión de tráfico basada en la trayectoria puede tomar en cuenta las trayectorias preferidas del usuario, así como beneficiarse de una predicción altamente precisa de los movimientos de aeronaves.

2.2 Análisis de las trayectorias 4D (requisitos, implicaciones, beneficios)

Uno de los requisitos para hacer uso de las trayectorias 4D consiste en instalar en las aeronaves los dispositivos necesarios para seguir estas trayectorias, por lo que habrá que tener esto en cuenta a la hora de elegir la aeronave tipo.

La implantación de trayectorias 4D implica un cambio en los procedimientos, ya que al conocer el tiempo de paso por los waypoints el sistema será más previsible, y con esto cambiará la manera de actuar. Contribuirá a mejorar la fiabilidad del sistema AMAN (Arrival MANager) o a reducir la carga de trabajo de los controladores, por ejemplo.

Este concepto operacional pretende obtener beneficios para todos los miembros de la comunidad ATM, esperando los siguientes beneficios a partir de la utilización de trayectorias 4D:

- Un entorno rico en información, con datos en tiempo real, así como datos de predicción y tendencias del sistema que permite la optimización de los servicios a los usuarios del espacio aéreo.
- Mejora de las operaciones de tráfico aéreo mediante el aumento de la previsibilidad del tráfico debido a una navegación más precisa y al aumento de colaboración.
- Operaciones óptimas para las compañías aéreas (rutas y niveles preferidos).
- Más autonomía en la toma de decisiones desde la perspectiva del usuario del espacio aéreo.
- Incremento de la seguridad operacional.
- Aumento de las capacidades tanto en ruta como en aeropuerto.
- Absorción del retraso.
- Reducción de costes (combustible, tiempo...).
- Disminución del impacto ambiental mediante la reducción de emisiones y ruido (operaciones continuas CCO (Continuous Climb Operation) / CDO (Continuous Descent Operation)).
- Reducción del tiempo de vuelo en TMA debido a una mejor sincronización del tráfico.

- Reducción de la carga de trabajo del controlador (menos conflictos dado que la información llega con mucha antelación, disminución de la comunicación por voz...).
- Trayectorias de vuelo mejoradas.

2.3 Proyectos relacionados

Con el propósito de tener una visión general de los avances que se han logrado en lo que concierne a las trayectorias 4D, se realiza una búsqueda de los proyectos que se están desarrollando hoy en día.

Existen dos líneas diferenciadas de investigación en cuanto a las trayectorias 4D. Por un lado la relacionada con la sincronización y gestión de conflictos y por otro lado la dedicada a la predicción de trayectorias, si bien es cierto que existe una clara correspondencia entre ellas.

Este proyecto está asociado a la predicción de trayectorias mediante las cuáles se podrá proceder a la sincronización de las mismas en posteriores estudios.

Dentro del programa SESAR, un vuelo de prueba ha confirmado que el sistema i4D ofrece importantes ventajas desde el punto de vista de la seguridad y en términos medioambientales, al tiempo que mejora la predictibilidad del vuelo y la eficiencia general de la red. [3]

Dadas las ventajas mencionadas, múltiples investigaciones tratan la predicción de trayectorias en diferentes fases de vuelo. La predicción de trayectorias está afectada por la sensibilidad del impacto de las incertidumbres tales como el conocimiento real de las actuaciones de las aeronaves o el viento. [4] Por tanto, la trayectoria de una aeronave lleva asociada una sensibilidad inherente que en algunos casos se ha simulado mediante coeficientes proporcionados por BADA, modelando la atmósfera según la norma DIN ISO 2533 (ISA) y sin considerar el efecto del viento en la trayectoria. [5]

Una mejora en el intercambio de información relacionada con la trayectoria determina el impacto en el rendimiento de ATM. [6] Esta afirmación es el resultado de la realización de modelos de predicción de la trayectoria mediante el método BADA de Eurocontrol, validados con los datos operativos para asegurar la validez del impacto de la variabilidad en los parámetros. Entre estos parámetros están la tasa de descenso, parámetros de giro, corrección de la resistencia o la velocidad.

Conseguir una predicción precisa de las trayectorias es una condición fundamental para disponer de una detección y resolución de conflictos fiable. De nuevo, se ha utilizado el modelo BADA para sintetizar trayectorias detalladas y realistas y se ha modelado la atmósfera (campos de viento y temperatura) según datos de predicciones meteorológicas reales para el volumen de espacio aéreo considerado y el intervalo de tiempo de la muestra. [7]

2.3.1 Factores de influencia sobre trayectorias 4D

Muchas de estas investigaciones tienen en cuenta parámetros que afectan al seguimiento de la trayectoria, coincidiendo en el viento como el de mayor afección. Se ha analizado la influencia del viento de cizalladura sobre el rendimiento óptimo [8] o incluso se ha considerado como una de las incertidumbres más relevantes y únicas en la afección en el desvío de trayectorias. [9]

Además del viento, existen otros parámetros que influyen en la predicción del modelo de una trayectoria. Se proponen parámetros como el espacio aéreo (restricciones de la trayectoria), las actuaciones de la aeronave (modelo de avión) o parámetros relativos al escenario, como pueden ser la meteorología, el aeropuerto y la geografía. [10] A estos podrían sumarse parámetros como las variaciones en los procedimientos, la inexactitud de la navegación o la intervención ATM. Estos parámetros provocan incertidumbre en la evolución de la aeronave, tienen diversos impactos en las funciones ATM, se deben a una causa y por lo tanto, se han buscado soluciones potenciales que reduzcan estas incertidumbres. [11]

La trayectoria inicial, el tiempo de espera, la fase de vuelo o el tipo de avión también influyen en la predicción de las trayectorias [12], pero los parámetros más importantes en la definición de una trayectoria incluyen las condiciones meteorológicas (viento, temperatura), el rendimiento de la aeronave (peso, velocidad) y el rendimiento de navegación. [13]

2.3.2 Sensibilidad a la variación de los parámetros

Derivado de la predicción de trayectorias surge la resolución de conflictos, para la cual se establece un marco que permite tener en cuenta niveles de incertidumbre utilizando un simulador estocástico. Mediante procesos iterativos basados en la cadena de Markov Montecarlo se optimiza un criterio de valor esperado. [14]

Se ha observado que es posible modelar la propagación de la incertidumbre en forma de funciones de transferencia que pueden determinarse mediante la simulación de Montecarlo, describiendo la propagación de errores de las incertidumbres de entrada a lo largo de la trayectoria y evaluando el efecto de mitigación que lo retroalimenta. [15]

2.3.3 Definición de ventanas de paso (waypoints) y proceso de gestión

En términos de seguridad, es más razonable predecir intervalos de tiempo que posiciones exactas de las aeronaves. [16]

De hecho, en un experimento realizado por Eurocontrol dedicado al estudio de la fase de crucero de vuelos de aproximadamente 40 minutos de duración, se estableció una ventana de tolerancia de entre -2 minutos y +3 minutos, y de ± 30 segundos para CTA. Además, se expuso a los pilotos a situaciones en las que las aeronaves se desviaban de la trayectoria planeada. El resultado obtenido demostró que la adherencia a las trayectorias 4D era factible en crucero mientras que la ventana de paso de ± 30 segundos era más difícil de lograr y requería coordinación entre pilotos y controladores. [17]

Sumado a esto, se ha presentado un modelo para estimar la incertidumbre longitudinal de la trayectoria futura de un avión mientras que vuela hacia un CTA. [18] Las incertidumbres se deben al pronóstico meteorológico que conduce a correcciones de velocidad para cumplir con el CTA.

Este modelo permite calcular una ventana de incertidumbre longitudinal alrededor de la posición de una aeronave, lo que podría emplearse para reducir la separación entre dos aviones en pista que realizan una operación CTA en presencia de incertidumbre meteorológica. Otra utilidad del modelo consiste en calcular la magnitud total de las correcciones de velocidad necesarias para compensar el error de viento y lograr un CTA dentro de una tolerancia de ajuste.

2.4 Aplicación al proyecto

Este proyecto pretende aportar una predicción de la evolución de la trayectoria según la variación de los parámetros considerados.

A partir de la elección de los parámetros y del análisis de la importancia de cada parámetro en su contribución a la variación de la trayectoria, se define una ventana de paso por cada waypoint empleando una simulación de Montecarlo.

Por último, se estudia mediante métodos causales el camino que seguirá la aeronave en caso de que se degrade la trayectoria, es decir, qué posibles puntos podrá ocupar la trayectoria conociendo el punto de paso por el anterior waypoint.

3 REFERENCIAS

Referencia bibliográfica	Descripción
[1]	Enaire, [En línea]. Disponible: http://www.enaire.es/csee/Satellite/navegacion-aerea/es/Page/1237551223699/ .
[2]	SESAR, «Concept of Operations Document - Step 1».
[3]	Indra, [En línea]. Disponible: http://www.indracompany.com/es/noticia/vuelos-4d-lograr-trafico-aereo-predecible .
[4]	E. Casado, L. D'Alto y M. Vilaplana, «Analysis of the impact of intent uncertainty on the accuracy of predicted trajectories for arrival management automation».
[5]	L. Walter, M. Pusch, F. Holzapfel y D. Knorr, «Quantifying trajectory uncertainty using a sensitivity-based complexity metric component». <i>Institute of Flight System Dynamics</i> .
[6]	S. Mondoloni, «Improved trajectory information for the future flight planning environment» <i>Tenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, ATM 2013</i> .
[7]	A. Ranieri, R. Martínez, M. Piera, J. López y M. Vilaplana, «STREAM – Strategic Trajectory de-confliction to enable seamless aircraft conflict management».
[8]	A. Valenzuela y D. Rivas, «Analysis of wind-shear effects on optimal aircraft cruise».
[9]	D. González-Arribas, M. Soler y M. Sanjurjo, «Wind-Based Robust Trajectory Optimization using Meteorological Ensemble Probabilistic Forecasts».
[10]	X. Prats, J. Quevedo, F. Nejari y V. Puig, «Optimización de trayectorias de aviones para minimizar la molestia acústica modelizada mediante lógica borrosa». <i>Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial</i> .
[11]	ICAO, «Managing unpredictable evolution in trajectory based operations,» vol. Air Traffic Management Requirements and Performance Panel, 2014.
[12]	M. Paglione, H. Ryan, R. Oaks, J. Summerill y M. Lee Cale, «Trajectory Prediction Accuracy Report».



Referencia bibliográfica	Descripción
[13]	P. Weitz, «Determination and visualization of uncertainties in 4d-trajectory prediction».
[14]	A. Lecchini Visintini, W. Glover, J. Lygeros y J. Macisjowski, «Monte Carlo Optimization for Conflict Resolution in Air Traffic Control» vol. 7, nº 4, December 2006.
[15]	A. Schwithal y P. Hecker, «Uncertainty assessment for ETA prediction towards 4D trajectory operation».
[16]	M. Ghasemi Hamed, D. Gianozza, M. Serrurier y N. Durand, «Statistical prediction of aircraft trajectory: regression methods vs point-mass model».
[17]	Eurocontrol, [En línea]. Disponible: https://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/EEC_News_2008_2_TM.html .
[18]	D. De Smedt y J. Bronsvort, «Model for Longitudinal Uncertainty during Controlled Time of Arrival Operations».