

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 668 896**

51 Int. Cl.:

G01C 21/20 (2006.01)

G06Q 10/04 (2012.01)

G06Q 50/30 (2012.01)

G08G 5/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.12.2013** **E 13382579 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.02.2018** **EP 2889579**

54 Título: **Sistema y método para definir y predecir trayectorias de aeronave**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
23.05.2018

73 Titular/es:

THE BOEING COMPANY (100.0%)
100 North Riverside Plaza
CHICAGO, US

72 Inventor/es:

NAVARRO, FRANCISCO;
VALLS HERNANDEZ, ERNESTO;
VILAPLANA, MIGUEL;
CHESSA, PIERO y
QUEREJETA MASSAVEU, CARLOS

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 668 896 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Sistema y método para definir y predecir trayectorias de aeronave

Campo de la invención

5 La presente invención, tal como se expresa en el título de esta memoria descriptiva, se refiere a un método, y a un sistema asociado, para definir y predecir las trayectorias de aeronave más adecuadas durante un vuelo, logrando cada una de dichas trayectorias de aeronave, de la forma más conveniente, un factor de calidad predeterminado que es establecido previamente por un gestor de vuelo ubicado o bien a bordo o bien fuera de la aeronave, siendo dicho gestor de vuelo o bien una persona o bien una máquina. La misma es especialmente aplicable en la industria electrónica y de la aviónica, y en el campo de la gestión de tráfico aéreo.

10 Antecedentes de la invención

La definición de trayectoria de aeronave es una tarea importante a la que han de hacer frente los gestores de vuelo con el fin de alcanzar algunas metas programadas en relación con determinados factores de calidad (FOM, *figure of merit*).

15 Cuando se establece qué trayectoria de aeronave se va a considerar la mejor para un vuelo entre dos posiciones geográficas, no hay criterio único alguno para definir qué es "la mejor trayectoria", existiendo por lo tanto diferentes criterios, de acuerdo con los cuales, diferentes trayectorias de aeronave se podrían considerar de forma simultánea "la mejor", dependiendo esto de qué meta se ha de considerar el objetivo principal que ha de ser logrado por un determinado vuelo.

20 Estas metas, que también se denominan "factores de calidad" (FOM), se definen en términos del ahorro de costes, el ahorro de tiempo, el ahorro de distancia, o cualquier tarea que pudiera establecer un gestor de vuelo.

Por lo tanto, parece obvio que una trayectoria de aeronave que se podría considerar la mejor en términos del ahorro de tiempo para un vuelo entre dos posiciones geográficas, podría no ser la mejor en términos del ahorro de costes, y viceversa.

25 El problema de elegir la trayectoria más adecuada de acuerdo con el FOM que se va a optimizar aumenta su complejidad cuando se tienen en cuenta las condiciones meteorológicas en los diferentes segmentos de la trayectoria de vuelo en la que va a estar volando la aeronave.

30 Las condiciones meteorológicas pueden afectar de forma sustancial al desempeño de la aeronave durante el vuelo y a la consecución de las metas propuestas, de tal modo que es extremadamente conveniente, cuando no obligatorio, evitar las áreas en las que se pronostican tormentas o vientos fuertes, o al menos ser capaz de determinar en qué medida afectan de hecho estos aspectos meteorológicos a la consecución de determinados FOM en determinadas trayectorias.

35 A este respecto, en la actualidad los gestores de vuelo tienen en cuenta las condiciones meteorológicas de una forma determinista, es decir, estos analizan un pronóstico único que se considera válido para una región grande y durante un periodo de tiempo prolongado, no aprovechándose por lo tanto de los pronósticos de modelo numérico disponibles actuales, que contemplan diferentes pronósticos posibles, asignando a cada uno de dichos pronósticos una determinada probabilidad.

Se considera que la incertidumbre que está asociada con el pronóstico meteorológico es la mayor fuente de incertidumbre que influye en la definición y predicción de la trayectoria de aeronave durante un vuelo.

40 Es decir, si se desea saber qué trayectoria podría ser la mejor en términos del ahorro de costes (la más económica), y no se consideran varios escenarios meteorológicos, entonces es grande la incertidumbre en una trayectoria elegida que es, de hecho, la más económica.

Por lo tanto, existe una preocupación actual en la gestión de vuelo cuando se gestionan muchas fuentes de incertidumbre con el fin de reducir su incertidumbre asociada, evitando la propagación de la incertidumbre a las trayectorias predichas.

45 En lo que respecta al campo técnico de la invención, se podría admitir el documento EP 2667274 A1; este documento se refiere a un método para proporcionar una descripción de intención de aeronave usando una descomposición de la intención de vuelo en segmentos de vuelo. El documento WO 2013/082657 se refiere a un método y sistema para predecir la trayectoria de una aeronave. También cabe admitir el siguiente documento:

5 “Integration of probabilistic weather information with air traffic management decision support tools: a conceptual vision for the future” (Matthias Steiner, Cynthia K. Mueller, Goli Davidson y Jimmy A. Krozel. *13th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology*, 21 de enero de 2008 (21 - 01 - 2008) - 24 de enero de 2008 (24 - 01 - 2008), XP007922751, Nueva Orleans, Luisiana. Este documento presenta un enfoque de cómo los pronósticos meteorológicos de colectividades de alta resolución en el futuro no demasiado distante se pueden analizar desde un punto de vista de la aviación y encapsularse para su integración con herramientas de soporte de decisiones de ATM automatizadas.

10 Otro documento que describe tecnología relacionada es: “Identification and initial characterization of sources of uncertainty affecting the performance of future trajectory management automation systems” (Enrique Casado, Dr. Colin Goodchild, Dr. Miguel Vilaplana. Carteles de ATACCS 2012, 29 de mayo de 2012 (29 - 05 - 2012) - 31 de mayo de 2012 (31 - 05 - 2012), páginas 170 - 175, XP007922752, Londres. Este documento aborda una formulación estocástica alternativa del problema de predicción de trayectoria que considera de forma explícita las fuentes de incertidumbre que afectan a un modelo de masa puntual de 3 grados de libertad de movimiento de aeronave.

15 Por último, también cabe considerar el documento: “Survey of weather impact models used in air traffic management” (James Krozel), *10th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Conference / 13th AIAA / ISSMO Multidisciplinary Analysis Optimization Conference*; 13 - 15 de septiembre de 2010; Fort Worth, Texas, EE. UU., AIAA, EE. UU., n.º AIAA 5 2010-9020, 1 de enero de 2010 (01 - 01 - 2010), páginas 1 - 24, XP008170173, DOI: 10.2514/6.2010-9020. Este documento aborda el modelado del impacto meteorológico e identifica metodologías y tecnologías para traducir información meteorológica a impactos en la gestión de tráfico aéreo.

20 Descripción de la invención

25 La presente divulgación aborda el problema mencionado mediante la utilización de un lenguaje de descripción novedoso (en concreto, AIDL, *Aircraft Intent Description Language*, lenguaje de descripción de intención de aeronave) para definir con exactitud la totalidad de los parámetros implicados en la definición y predicción de trayectoria, suprimiendo por lo tanto una fuente de incertidumbre en la descripción de trayectoria, que es la incertidumbre que está asociada con la definición de trayectoria. Este lenguaje ya se ha definido en el documento de patente WO/2009/042405.

30 La presente divulgación se refiere a un método que, usando el lenguaje de descripción mencionado, determina la totalidad de los parámetros que se han de tener en cuenta para definir y predecir una trayectoria de aeronave, y crea un conjunto de variables estocásticas a partir de cada uno de los parámetros determinados, calculando posteriormente una trayectoria para la aeronave que cumple del mejor modo con un factor de calidad (FOM, *figure of merit*) dado, a partir de cada conjunto de variables estocásticas.

Los parámetros que son descritos por el lenguaje de descripción (AIDL) a partir de los cuales se va a crear un conjunto de variables estocásticas comprenden, entre otros: parámetros meteorológicos y parámetros de desempeño de aeronave.

35 Mediante la implementación del método de la presente divulgación se define un conjunto de trayectorias posibles, considerando cada una un escenario diferente, con una incertidumbre asociada. Por lo tanto, se determina con exactitud la incertidumbre que está asociada con cada una de las trayectorias calculadas (es decir, la incertidumbre con la que cada trayectoria calculada cumple con un determinado FOM), al tiempo que se asegura una trayectoria robusta que cumple del mejor modo con un FOM dado.

40 El método que se describe en la presente solicitud de patente es útil para ayudar al gestor de vuelo a decidir qué trayectoria es la más apropiada, dadas determinadas condiciones meteorológicas y de aeronave. El método de la presente divulgación se va a implementar con una herramienta de soporte de decisiones (DST, *decision support tool*) que ayudará a un gestor de vuelo a tomar decisiones. En algunos casos (es decir, cuando se consideran los UAV), es la propia DST la que toma la decisión de cuál de las trayectorias calculadas elegir.

45 La presente divulgación también se refiere a un sistema que comprende la totalidad del equipo necesario para implementar el método de la presente divulgación.

Según se ha indicado, la presente divulgación se refiere a un método para definir y predecir trayectorias de aeronave, para su uso en la gestión de vuelo de una aeronave, que comprende:

50 a. adquirir unos datos de entrada tanto de características de desempeño de aeronave como de datos atmosféricos, y

b. definir unos parámetros de trayectoria a los que se ha de someter la trayectoria de aeronave,

en donde

- 5 - los parámetros de trayectoria de aeronave se definen por medio de un lenguaje de descripción de intención de aeronave específico, que está constituido por unos símbolos específicos, en donde cada uno de dichos símbolos específicos es una combinación de instrucciones que se corresponden con al menos tres restricciones de trayectoria y cuatro instrucciones de configuración aplicables durante el intervalo de tiempo para el cual el símbolo correspondiente define la trayectoria, en el que cada segmento de la trayectoria de aeronave es descrito por cada símbolo del lenguaje de descripción de intención de aeronave, en el que cada combinación específica de símbolos del lenguaje de descripción de intención de aeronave describe completamente la totalidad de una trayectoria;
- 10 - los datos atmosféricos se adquieren en la forma de una pluralidad de colectividades de pronósticos atmosféricos, expresando cada pronóstico atmosférico dentro de una colectividad de pronósticos atmosféricos un escenario meteorológico determinado con una probabilidad asociada;

en donde el método comprende adicionalmente:

- 15 c. calcular una trayectoria predicha a partir de cada pronóstico atmosférico de una colectividad de pronósticos atmosféricos, teniendo asociada dicha trayectoria predicha una información con respecto a un determinado factor de calidad de la trayectoria de aeronave;

en donde una colectividad de trayectorias predichas se obtiene a partir de cada colectividad de pronósticos atmosféricos, teniendo cada trayectoria predicha de la colectividad de trayectorias predichas una probabilidad asociada derivada de la probabilidad de cada pronóstico atmosférico dentro de una colectividad de pronósticos atmosféricos, y;

- 20 d. seleccionar una trayectoria predicha de entre la colectividad de trayectorias predichas, al:
 - seleccionar un factor de calidad específico de cada trayectoria predicha de aeronave;
 - determinar, para cada trayectoria predicha dentro de una colectividad de trayectorias predichas, el valor del factor de calidad seleccionado;
 - 25 - calcular, de acuerdo con un criterio estadístico predeterminado, un valor estadístico del factor de calidad seleccionado, representando dicho valor estadístico calculado, de acuerdo con el factor de calidad seleccionado, la totalidad de las trayectorias predichas dentro de cada colectividad de trayectorias predichas;
 - determinar la trayectoria predicha, a partir de cada colectividad de trayectorias predichas, cuyo valor para el factor de calidad seleccionado se encuentra más cerca del valor estadístico previamente calculado del factor de
 - 30 de calidad seleccionado;
 - calcular, de acuerdo con un criterio estadístico predeterminado, la dispersión de valores para el factor de calidad seleccionado, con respecto al valor estadístico calculado del factor de calidad seleccionado para la totalidad de las trayectorias predichas de cada colectividad de trayectorias predichas;
 - seleccionar, de entre las trayectorias predichas calculadas, la trayectoria predicha cuyo valor para el factor de
 - 35 calidad seleccionado se encuentra más cerca del valor estadístico previamente calculado del factor de calidad seleccionado, y
- e. utilizar la trayectoria predicha seleccionada en la gestión de vuelo de una aeronave en al menos un segmento de un vuelo.

40 En una forma de realización preferida, cada uno de dichos símbolos específicos del lenguaje de descripción de intención de aeronave está constituido por la combinación de al menos tres restricciones de trayectoria y cuatro instrucciones de configuración, en donde se hace frente a la totalidad de los grados de libertad de la trayectoria de aeronave mediante la imposición de las tres restricciones de trayectoria, definiéndose por lo tanto completamente la trayectoria de aeronave mediante la imposición de las tres restricciones de trayectoria, seleccionadas estas restricciones de entre al menos lo siguiente:

- 45 - longitud;
- latitud;

- altitud;
- velocidad verdadera;
- marcación;
- mando de gases;

- 5
- ángulo de trayectoria;
 - ángulo de alabeo;
 - hipersustentación;
 - frenos aerodinámicos.

A su vez, cada factor de calidad se selecciona preferiblemente de entre al menos:

- 10
- combustible quemado;
 - tiempo de llegada en un punto de posición dado;
 - índice de coste;
 - rango de distancia horizontal cubierta;
 - posición en 2D en un instante dado;
- 15
- posición en 2D en un punto de posición dado;
 - posición en 2D sobre un segmento de trayectoria;
 - altitud en un instante dado;
 - altitud en un punto de posición dado;
 - altitud sobre un segmento de trayectoria;
- 20
- posición en 3D en un instante dado;
 - posición en 3D en un punto de posición dado;
 - posición en 3D sobre un segmento de trayectoria;
 - posición en 4D en un instante dado;
 - posición en 4D en un punto de posición dado;
- 25
- posición en 4D sobre un segmento de trayectoria;
 - velocidad en un punto de posición dado;
 - velocidad sobre un segmento de trayectoria;
 - actitud en un punto de posición dado;
 - actitud sobre un segmento de trayectoria;
- 30
- vórtice de estela en un instante dado;
 - vórtice de estela en un punto de posición dado.

La presente divulgación también se refiere a un sistema para definir y predecir trayectorias de aeronave, para su uso en la gestión de vuelo de una aeronave, en donde el sistema comprende:

5 a. una unidad de procesamiento, para calcular trayectorias predichas para cada segmento de un vuelo de aeronave utilizando un lenguaje de descripción de intención de aeronave específico, calculándose cada trayectoria predicha calculada sobre la base de unos datos de entrada estocásticos, siendo por lo tanto estocástica cada trayectoria predicha calculada, y teniendo una probabilidad asociada, seleccionados los datos de entrada de entre al menos lo siguiente:

- parámetros de modelo de desempeño de aeronave;
- pronósticos atmosféricos;

10 b. una unidad de servicio meteorológico digital probabilístico, que está configurada para dotar, a la unidad de procesamiento para calcular trayectorias predichas, de la entrada de una colectividad de pronósticos atmosféricos, expresando cada pronóstico atmosférico dentro de una colectividad de pronósticos atmosféricos un escenario meteorológico determinado con una probabilidad asociada;

c. una unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta, que está configurada para:

- 15
- dotar, a la unidad de procesamiento para calcular trayectorias predichas, de unos datos de entrada necesarios para predecir trayectorias, y;
 - seleccionar una trayectoria predicha de entre las trayectorias predichas que son calculadas por la unidad de procesamiento para calcular trayectorias predichas;

en donde la unidad de procesamiento para calcular trayectorias predichas está configurada para:

- 20
- calcular una trayectoria predicha a partir de cada pronóstico atmosférico de las colectividades de pronósticos atmosféricos;
 - determinar, para cada trayectoria predicha dentro de una colectividad de trayectorias predichas, el valor de un factor de calidad específico que es seleccionado por la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta;

25

- calcular, de acuerdo con un primer criterio estadístico predeterminado, un valor estadístico del factor de calidad seleccionado, representando dicho valor estadístico calculado, de acuerdo con el factor de calidad seleccionado, la totalidad de las trayectorias predichas dentro de cada colectividad de trayectorias predichas;

30

- determinar la trayectoria predicha, a partir de cada colectividad de trayectorias predichas, cuyo valor para el factor de calidad seleccionado se encuentra más cerca del valor estadístico previamente calculado del factor de calidad seleccionado;

- calcular, de acuerdo con un segundo criterio estadístico predeterminado, la dispersión de valores para el factor de calidad seleccionado, con respecto al valor estadístico calculado del factor de calidad seleccionado para la totalidad de las trayectorias predichas de cada colectividad de trayectorias predichas;

35 en donde la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta está configurada para seleccionar, de entre las trayectorias predichas calculadas, la trayectoria predicha cuyo valor para el factor de calidad seleccionado se encuentra más cerca del valor estadístico previamente calculado del factor de calidad seleccionado;

en donde la trayectoria predicha seleccionada es utilizada por un sistema de gestión de vuelo en el guiado de una aeronave en al menos un segmento de un vuelo.

En una forma de realización preferida, la unidad de servicio meteorológico digital probabilístico define:

40 a. un dominio de modelos atmosféricos que incluye uno o más parámetros que definen una región que encierra el volumen de espacio aéreo en el que se encuentra la trayectoria de vuelo;

b. un modelo atmosférico que proporciona múltiples escenarios atmosféricos de parámetros atmosféricos relevantes para el espacio aéreo, formando dichos escenarios unas colectividades de pronósticos atmosféricos.

Además, en una forma de realización preferida, la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta define:

ES 2 668 896 T3

- a. una trayectoria de vuelo predeterminada que incluye uno o más parámetros que definen la trayectoria de vuelo, por medio de la imposición de una combinación de tres parámetros de restricción de trayectoria para cada segmento de la trayectoria de vuelo;
- 5 b. un modelo de desempeño de aeronave que incluye uno o más parámetros que definen la respuesta de aeronave con condiciones externas;
- c. unos parámetros en relación con las condiciones iniciales de aeronave en el comienzo de un segmento de la trayectoria de vuelo;
- d. un conjunto de parámetros que definen al menos un factor de calidad de una trayectoria predicha que es calculada por la unidad de procesamiento para calcular trayectorias predichas;
- 10 e. al menos un criterio para elegir una trayectoria predicha de entre al menos una colectividad de trayectorias predichas que son calculadas por la unidad de procesamiento para calcular trayectorias predichas, basándose este al menos un criterio en buscar qué trayectoria predicha representa del mejor modo un valor estadístico central de un determinado factor de calidad;
- 15 f. al menos un criterio para el cálculo de una incertidumbre asociada con la que una trayectoria predicha elegida representa un valor estadístico central de un determinado factor de calidad.

La unidad de procesamiento para calcular trayectorias predichas:

- determina un conjunto de parámetros de entre los parámetros de entrada que son proporcionados por la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta, que se consideran estocásticos, estando por lo tanto sometido, este conjunto de parámetros, a incertidumbre;
- 20 - determina el tipo y el rango de incertidumbre del conjunto estocástico de parámetros.

La unidad de procesamiento para calcular trayectorias predichas:

- a. determina, sobre la base de parámetros para el modelo atmosférico, el modelo de desempeño de aeronave, la descripción de la trayectoria de vuelo y las condiciones iniciales, un conjunto de datos que representa una trayectoria predicha;
- 25 b. asigna valores, con unos rangos respectivos de incertidumbre, a los parámetros que se van a hacer estocásticos, para crear una pluralidad de casos posibles del conjunto de datos que representa la trayectoria predicha;
- c. calcula, sobre la base de la colectividad de pronósticos atmosféricos, la colectividad de trayectorias predichas, cada trayectoria predicha calculada sobre la base de un escenario atmosférico correspondiente;
- 30 d. evalúa el al menos un factor de calidad de cada trayectoria predicha dentro de una colectividad de trayectorias predichas, para obtener una población de valores de estos factores de calidad;
- e. identifica, de acuerdo con el primer criterio estadístico predeterminado, una trayectoria predicha dentro de cada colectividad de trayectorias predichas, que representa un valor central del al menos un factor de calidad evaluado;
- 35 f. obtiene, de acuerdo con el segundo criterio estadístico predeterminado, la dispersión de los valores del al menos un factor de calidad evaluado, que están asociados con las trayectorias restantes de la colectividad de trayectorias predichas, con respecto a la trayectoria predicha que se identifica en la fase previa.

Preferiblemente, la unidad de procesamiento para calcular trayectorias predichas comprende al menos:

- 40 a. una unidad de motor de aleatorización, para asignar valores a los parámetros que se van a hacer estocásticos, que se reciben de la unidad de servicio meteorológico digital probabilístico y la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta;
- b. una unidad de cálculo de trayectoria, para calcular trayectorias predichas sobre la base de unos datos de entrada que son proporcionados por la unidad de motor de aleatorización.

Dichos datos de entrada se seleccionan preferiblemente de entre al menos lo siguiente:

- parámetros de modelo de desempeño de aeronave;
 - Parámetros de descripción de trayectoria;
 - factores de calidad predeterminados;
 - criterios de selección de trayectoria;
- 5
- pronósticos atmosféricos.

La unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta está configurada para dotar, a la unidad de procesamiento para calcular trayectorias predichas, de la entrada de:

- parámetros de modelo de desempeño de aeronave;
 - parámetros de descripción de trayectoria;
- 10
- factores de calidad seleccionados, y;
 - criterios de selección de trayectoria.

Breve descripción de las figuras

Figura 1: muestra un diagrama de flujo que describe la totalidad de las diferentes fases que están comprendidas dentro del método de la divulgación.

- 15
- Figura 2: muestra un diagrama de bloques simplificado que ilustra los elementos principales del sistema de la presente divulgación.

Figura 3: muestra un diagrama de bloques más detallado, que se centra en los elementos principales que constituyen la unidad de predicción de trayectoria estocástica (s-TP) que se muestra en la figura 2.

- 20
- Figura 4: muestra unas interacciones distribuidas entre ser humano y máquina, y nociones de trayectoria que están implicadas en el ciclo de vida de la trayectoria.

Figura 5: muestra incertidumbres y elementos principales que están implicados en el proceso de TP que soporta el funcionamiento de una DST.

Figura 6: muestra una operación de una DST que es soportada por una predicción de trayectoria basada en AIDL.

Figura 7: muestra un modelo de trayectorias de muestra en términos del AIDL (BR y TE).

- 25
- Figura 8: muestra unos campos en 4D típicos que caracterizan un escenario atmosférico que se usa en TP (INSA).

Figura 9: muestra una ampliación probabilística de trayectorias predichas “posibles” sobre la base de una colectividad meteorológica.

Figura 10: muestra una operación robusta de una DST que es soportada por una TP estocástica basada en AIDL.

Figura 11: muestra unos elementos clave abordados.

- 30
- Figura 12: muestra una representación gráfica de los errores de TP geométricos.

Figura 13: muestra unos sistemas de referencia que están implicados en el cálculo de la métrica de XTE.

Figura 14: muestra unas interfaces y una arquitectura lógica de alto nivel de banco de pruebas.

Figura 15: una tabla que muestra unas variables que están implicadas en la formulación del problema de movimiento de un AV.

- 35
- Figura 16: una tabla que muestra una formulación de las fuerzas (acciones) que impulsan el movimiento de un AV.

Figura 17: una tabla que muestra una formulación de los aspectos ambientales que están implicados en el movimiento del AV.

Figura 18: una tabla que muestra aspectos de trayectoria que se consideran en una TP basada en AIDL.

Figura 19: una tabla que muestra unas posiciones que están implicadas en las definiciones de error de TP.

5 Figura 20: una tabla que muestra unos errores de TP en 4D.

Figura 21: una tabla que muestra unos errores de TP en actitud, velocidad y masa.

Figura 22: una tabla que muestra unos errores de AM en la presión, la temperatura y el viento.

Figura 23: una tabla que muestra unas aplicaciones, funciones y aspectos relacionados con la trayectoria.

10 Figuras 24a, 24b: unas tablas que muestran un estudio de los FOM de interés actual / potencial para las DST basadas en trayectoria representativas.

Figura 25: una tabla que muestra unos FOM representativos que describen la calidad en el punto de extremo de una única trayectoria.

Figura 26: una tabla que muestra unos criterios de selección de trayectoria típicos para derivar una medida central de las poblaciones de FOM.

15 Figura 27: una tabla que muestra unas medidas estadísticas típicas de la dispersión de FOM.

Figura 28: una tabla que muestra unos FOM representativos que describen la calidad de la totalidad de la trayectoria.

Figuras 29a, 29b: unas tablas que muestran unas interacciones entre la r-DST y la s-TP.

Figuras 30a, 30b: unas tablas que muestran unas interacciones entre la RE y la infraestructura de TC subyacente.

20 Figura 31: una tabla que muestra unas interacciones entre los componentes internos de la infraestructura de TC.

Figura 32: una tabla que muestra unas interacciones entre la P-DMET y la infraestructura de TC.

Descripción de una forma de realización a modo de ejemplo

Lo siguiente es una descripción de una forma de realización de la invención que hace referencia a las figuras.

25 La figura 1 muestra un diagrama de flujo que describe las diferentes fases que están comprendidas dentro del método de la divulgación.

30 De acuerdo con un aspecto de la presente divulgación, se divulga una forma de realización a modo de ejemplo de un método para definir y predecir trayectorias de aeronave, para su uso en la gestión de vuelo de una aeronave. El método comprende adquirir unos datos de entrada tanto de características de desempeño de aeronave (APM, *Aircraft Performance Model*, modelo de desempeño de aeronave) como de datos atmosféricos (AFE, *atmospheric forecast ensemble*, colectividad de pronósticos atmosféricos), y definir unos parámetros de trayectoria a los que se ha de someter la trayectoria de aeronave. El método comprende definir parámetros de trayectoria de aeronave por medio de un lenguaje de descripción de intención de aeronave específico (AIDL, *Aircraft Intent Description Language*), que está constituido por unos símbolos específicos, en el que cada segmento de la trayectoria de aeronave es descrito por cada símbolo del lenguaje de descripción de intención de aeronave (AIDL), en el que cada combinación específica de símbolos del lenguaje de descripción de intención de aeronave describe completamente la totalidad de una trayectoria.

35 El método comprende adquirir una pluralidad de colectividades de pronósticos atmosféricos (AFE, *atmospheric forecast ensemble*), expresando cada pronóstico atmosférico dentro de una colectividad de pronósticos atmosféricos (AFE) un escenario meteorológico determinado con una probabilidad asociada.

40 El método comprende calcular una trayectoria predicha a partir de cada pronóstico atmosférico de una colectividad de pronósticos atmosféricos (AFE). La trayectoria predicha tiene asociada una información con respecto a un

determinado factor de calidad (FOM, *figure of merit*) de la trayectoria de aeronave, en donde una colectividad de trayectorias predichas se obtiene a partir de cada colectividad de pronósticos atmosféricos (AFE). Cada trayectoria predicha de la colectividad de trayectorias predichas tiene una probabilidad asociada derivada de la probabilidad de cada pronóstico atmosférico dentro de una colectividad de pronósticos atmosféricos (AFE). El método incluye adicionalmente la utilización de una trayectoria predicha seleccionada en la gestión de vuelo de una aeronave en al menos un segmento de un vuelo.

De acuerdo con el método de la presente divulgación, una colectividad de pronósticos meteorológicos es producida por una unidad de servicio meteorológico digital probabilístico (2), p-DMET. Cada pronóstico meteorológico ilustra un determinado escenario meteorológico posible, teniendo todos los pronósticos meteorológicos dentro de la colectividad (AFE, *atmospheric forecast ensemble*) una determinada probabilidad asociada. En determinados casos, todos los pronósticos meteorológicos dentro de la colectividad (AFE) tienen la misma probabilidad asociada.

Entonces, se establece un conjunto de ligaduras, para cada segmento de la trayectoria de vuelo. Estas ligaduras están relacionadas con aspectos tales como la altura, la velocidad, los tiempos de llegada o la separación entre aeronaves.

Estas ligaduras se expresan en un lenguaje novedoso, en concreto, el lenguaje de descripción de intención de aeronave (AIDL, *Aircraft Intent Description Language*), de acuerdo con el cual existe una relación directa entre las ligaduras impuestas y la trayectoria de vuelo que va a ser seguida por la aeronave en cada segmento particular de la trayectoria.

El código de AIDL establece que cada posible combinación de tres ligaduras diferentes, con sus valores asociados, junto con cuatro parámetros de configuración de movimiento, constituyen un símbolo particular del alfabeto que define de forma inequívoca un segmento particular de la trayectoria de aeronave. Combinando cada símbolo durante un vuelo, se obtiene una trayectoria de aeronave totalmente definida para cada uno de los segmentos de la trayectoria de aeronave.

Por lo tanto, aprovechándose de este enfoque novedoso, se cancela la incertidumbre que está asociada con la predicción de trayectoria que es causada por la incertidumbre que está asociada con la definición de trayectoria.

No obstante, aún permanece la incertidumbre que está asociada con la predicción de trayectoria (TP, *trajectory prediction*) que es causada por la incertidumbre que está asociada tanto con el modelo de desempeño de aeronave (APM, *aircraft performance model*) como con el pronóstico meteorológico. Sin embargo, la incertidumbre que está asociada con la autenticidad del modelo de desempeño de aeronave (APM, *Aircraft Performance Model*) se ha de despreciar en comparación con la incertidumbre que está asociada con el pronóstico meteorológico.

Por lo tanto, la solución técnica principal que soluciona la presente divulgación es la de reducir la incertidumbre que está asociada con la predicción de trayectoria (TP, *trajectory prediction*) que es causada por la incertidumbre que está asociada con el pronóstico meteorológico que se usa para predecir dicha trayectoria.

En consecuencia, en lugar de usar un pronóstico meteorológico único, se obtiene una colectividad de posibles pronósticos meteorológicos (AFE, *atmospheric forecast ensemble*), ilustrando cada pronóstico un escenario meteorológico verosímil diferente que, junto con el conjunto de ligaduras, se usa para calcular la trayectoria predicha.

La trayectoria predicha, que logra de forma inequívoca las ligaduras que se establecen, se calcula por medio de un conjunto de ecuaciones que expresan la relación entre cada uno de los aspectos implicados en la trayectoria.

Hasta este punto, la novedad consiste en definir de forma inequívoca la trayectoria por medio de un conjunto predeterminado de ligaduras para cada segmento del vuelo, y utilizar una colectividad de pronósticos atmosféricos (AFE, *atmospheric forecast ensemble*) para calcular las trayectorias predichas.

Por lo tanto, se calcula cada segmento de trayectoria predicho, directamente en términos de un conjunto dado de ligaduras (lo que obvia la necesidad de ordenar directamente las maniobras de las aeronaves, que son definidas de forma implícita por la combinación impuesta de ligaduras). Adicionalmente, se obtiene un conjunto de trayectorias predichas estocásticas, resultando cada una de calcular una trayectoria predicha a partir de un escenario meteorológico particular, que se obtiene a partir de la colectividad de pronósticos atmosféricos (AFE).

Hasta este punto, se obtiene un conjunto de trayectorias predichas. Cada segmento de una trayectoria predicha se define en términos de un vector de estado, que define la posición en el espacio de la aeronave en todo momento, por medio de coordenadas espaciales, $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$, definiendo también el vector de estado algunos aspectos en relación con al menos el consumo de combustible, el tiempo de llegada o la separación con respecto a otras aeronaves en sus proximidades.

La totalidad de estos aspectos también se denominan factores de calidad (FOM, *figure of merit*), que un gestor de vuelo podría estar interesado en optimizar para cada caso particular.

Entonces, se selecciona un FOM preferido para su optimización, y las trayectorias predichas se vuelven a ordenar en términos de un determinado criterio estadístico que se refiere a ese FOM.

5 Por ejemplo, las trayectorias predichas se pueden volver a ordenar para mostrar cuál representa del mejor modo (es la más cercana a) la media estadística del consumo de combustible, y entonces se obtiene una medida de la dispersión para el consumo de combustible (o para cualquier otro FOM particular) en relación con la trayectoria predicha seleccionada, obtenida dicha medida de la dispersión a partir de la población de FOM que se corresponde con el espacio de muestras de trayectoria (es decir, la colectividad de trayectorias dada). Las medidas de la
10 dispersión de FOM se seleccionan de entre al menos: STD, MAE, SEE, RMS.

Por lo tanto, la presente divulgación proporciona una metodología general para hallar una trayectoria predicha robusta (RPT, *robust predicted trajectory*) y la población asociada de valores de FOM (u otras estadísticas de interés), dada una determinada definición del FOM.

15 La presente divulgación, según se ha expresado ya, también se refiere a un sistema de acuerdo con el método mencionado, previendo el sistema el equipo necesario para llevar a cabo el método descrito.

El sistema comprende una unidad de servicio meteorológico digital probabilístico (2), p-DMET, que crea las colectividades de pronósticos atmosféricos (AFE, *atmospheric forecast ensemble*), y da tales AFE como una entrada (que se codifica en el lenguaje AIDL) para una unidad de procesamiento principal (1) que está comprendida dentro del sistema de la presente divulgación, que es la unidad de procesamiento (1) para calcular trayectorias predichas,
20 en concreto, una unidad de predicción de trayectoria estocástica (s-TP).

En una forma de realización preferida, el sistema también comprende una unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST, que dota, a la unidad de procesamiento de predicción de trayectoria (1), s-TP, de al menos tres entradas principales (que se codifican en el lenguaje AIDL), que se refieren de forma respectiva a la definición de trayectoria, el FOM de interés que se va a buscar, y el criterio estadístico sobre el cual se va a presentar la información con respecto al FOM de interés y su incertidumbre asociada.
25

La figura 2 muestra un diagrama de bloques simplificado que ilustra los elementos principales del sistema de la presente divulgación.

La figura 3, a su vez, muestra un diagrama de bloques más detallado, que se centra en los elementos principales que constituyen la unidad de procesamiento de predicción de trayectoria estocástica (1), s-TP, y en la forma en la que se trata en la misma la información de entrada que es proporcionada por la unidad de servicio meteorológico digital probabilístico (2), p-DMET, y la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST.
30

La unidad de procesamiento de predicción de trayectoria estocástica (1), s-TP, basa su análisis, de acuerdo con el método de la presente divulgación, en una simulación de Monte Carlo, a través de la cual se posibilita que la s-TP produzca un conjunto de trayectorias estocásticas y lo trate de forma estadística. Para ese fin, la unidad de procesamiento (1), s-TP, está constituida por dos componentes principales:
35

unidad de motor de aleatorización, RE (*Randomization Engine*), (4): Este componente coordina el proceso que produce el conjunto de trayectorias estocásticas resultantes. La RE prepara los datos de entrada estocásticos en cada pasada de cálculo de trayectoria (TC, *trajectory computation*), de acuerdo con determinados parámetros de incertidumbre (δ) predefinidos, y envía los que se introducen a una unidad de cálculo de trayectoria (5), TC, para su cálculo. Además, esta se encuentra a cargo de manejar el conjunto de salidas con el fin de obtener la trayectoria predicha robusta y la incertidumbre de su factor de calidad (FOM, *figure of merit*) asociado.
40

Unidad de cálculo de trayectoria, TC (*trajectory computation*), (5): La unidad de cálculo de trayectoria (5), TC, es un componente que calcula, de una forma determinista, una trayectoria para cada conjunto de datos de entrada que son proporcionados por la unidad de motor de aleatorización (4), RE, en cada pasada. La unidad de cálculo de trayectoria (5), TC, está constituida por los siguientes componentes:
45

- i) un motor de trayectorias (TE, *trajectory engine*), que formula e integra el conjunto de ecuaciones que describen el movimiento de un AV (*air vehicle*, vehículo aéreo) durante un intervalo de interés (dominio de modelos de aeronaves en 4D, tal como se explicará en lo sucesivo con más detalle) tomando como entrada la secuencia de comandos de AIDL (la definición de trayectoria en código de AIDL) y condiciones iniciales;
- 50 ii) un modelo de desempeño de aeronave (APM, *aircraft performance model*), que proporciona los datos de desempeño de cualquier tipo particular de aeronave (id de AV) al motor de trayectorias (TE);

iii) un modelo de atmósfera probabilístico (PAM, *probabilistic atmosphere model*), que sustituye el escenario atmosférico determinista, que se usa normalmente en los enfoques convencionales de predicción de trayectoria, TP, por la posibilidad de seleccionar diferentes escenarios atmosféricos de entre un conjunto (o colectividad) de escenarios posibles, que son proporcionados por la unidad de servicio meteorológico digital probabilístico (2), p-DMET.

Lo siguiente es una aproximación global a los aspectos que están implicados en la presente divulgación: según ya se ha indicado, es esencial entender cómo la incertidumbre que está asociada con los datos que se alimentan a la unidad de procesamiento de predicción de trayectoria (1), s-TP, se propaga a las incertidumbres en aspectos específicos de interés de las trayectorias predichas. Por lo tanto, la presente divulgación proporciona una mejora en la eficiencia y la robustez de la predicción de trayectoria, que se logra al considerar, de forma explícita, predicciones de trayectoria estocásticas en lugar de deterministas para soportar la toma de decisiones en contextos diferentes.

En primer lugar, se considera de suma importancia entender la totalidad del ciclo de vida de una trayectoria de aeronave y cómo los diferentes fragmentos de información de trayectoria e incertidumbres presentes en cada fase del proceso de predicción de trayectoria se combinan entre sí para dar lugar a la trayectoria final (real) de cada vehículo aéreo y el desempeño de la solución de tráfico global.

La figura 4 ilustra las interacciones complejas que tienen lugar entre la automatización (DST, *decision support tools*, herramientas de soporte de decisiones) y los seres humanos en diferentes lugares y marcos temporales antes de que se establezca la decisión específica acerca de cómo operar una aeronave dada. Tales interacciones implican unas colecciones más o menos detalladas de los requisitos de trayectoria que se producen, se intercambian y se perfeccionan entre los actores que están implicados en un proceso de toma de decisiones colaborativo que se denomina negociación de trayectoria, cuyo resultado final es la trayectoria real por la que vuela cada aeronave que participa en un determinado tráfico. Las tres fases principales del ciclo de vida de la trayectoria de aeronave son:

1) Requisitos de trayectoria: la noción de plan de vuelo y sus posiblemente diferentes representaciones (por ejemplo, una secuencia de segmentos de ruta, puntos de ruta, tiempos estimados de llegada - ETA, *estimated time of arrival* -) más las correcciones tácticas impuestas por el control de tráfico aéreo (ATC, *Air Traffic Control*) durante la ejecución del vuelo (por ejemplo, ligaduras de velocidad o de tiempo, ligaduras de altitud y desviaciones de trayectoria lateral), a las que se hace referencia, de forma colectiva, como "intención de vuelo".

2) Decisiones operativas de aeronave: la fórmula específica que aplica la automatización de la gestión de vuelo o el piloto o la combinación de ambos para dirigir el funcionamiento de la aeronave, que se conoce como "intención de aeronave".

3) Resultados: la trayectoria real mostrada por la aeronave como resultado de tal forma específica de operación (que, por lo general, se representa como una secuencia, clasificada en función del tiempo, de posiciones y, posiblemente, información adicional tal como la velocidad y la masa instantánea).

El soporte que es proporcionado por las correspondientes herramientas de soporte de decisiones, DST, a los operadores humanos que están implicados en el proceso se basa, en general, en unos aspectos o calidades específicas de las trayectorias, tales como la posición, el tiempo o el consumo de combustible, que se anticipan por medio de un tipo de predicción de trayectoria, TP. Por lo tanto, la bondad de las decisiones que se toman para organizar la solución de tráfico y, por lo tanto, el desempeño resultante a unos niveles tanto individuales (de un único vuelo) como agregados (de tráfico) está vinculado directamente con el desempeño del proceso de predicción de trayectoria, TP, que subyace a cada función de DST.

La figura 5 ilustra un proceso genérico de predicción de trayectoria, TP. En términos generales, una herramienta de soporte digital, DST, itera con su infraestructura de TP subyacente al intentar un conjunto de requisitos de trayectoria y perfeccionar el mismo hasta que la trayectoria predicha resultante cumple con las metas operativas que son establecidos por la herramienta de soporte digital, DST.

Un caso trivial de tal idea es el caso de un detector de conflictos (DST = CD, *conflict detector*) que, dado el conocimiento disponible acerca de un conjunto dado de trayectorias (intenciones de vuelo), obtiene las trayectorias predichas correspondientes para realizar una verificación cruzada de las posiciones y los tiempos entre las mismas para identificar las pérdidas de separación potenciales. Un caso más sofisticado es el caso de un planificador de vuelos (DST = FP, *flight planner*), que podría iterar (con el tiempo, varias veces) con su infraestructura de TP para hallar una trayectoria comercial que cumple con unas restricciones dadas de ATC / ATFCM (*Air Traffic Flow and Capacity Management*, gestión de flujo y capacidad de tráfico aéreo) mientras que los grados de libertad (GDL) restantes que quedan se aprovechan para optimizar el consumo de combustible o el tiempo o un término medio de ambos (por ejemplo, el índice de coste).

En general, el proceso de TP engloba dos subprocesos internos principales: la generación de intenciones y el

cálculo de trayectoria. La generación de intenciones aborda la transición desde los requisitos de trayectoria dados a la siguiente fase del ciclo de vida de la trayectoria, es decir, la formulación de una forma específica de operar la aeronave (la intención de aeronave), cuyo objeto es dar como resultado una trayectoria que cumple con estos requisitos.

5 Por lo general, esto comporta un proceso de optimización que es realizado por el así denominado motor de intenciones, que justifica ligaduras adicionales que se requiere que cumpla cualquier trayectoria en el contexto operativo dado (por ejemplo, área de gestión de terminal (TMA, *Terminal Management Area*), altitud mínima o velocidad máx., zonas de exclusión de vuelo) así como para objetivos / ligaduras que persiguen preferencias de usuario específicas (por ejemplo, el índice de coste, aceleraciones máx.) siempre que se encuentren disponibles grados de libertad (GDL).

15 La generación de intenciones implica, en general, un bucle de iteración interno con el proceso de cálculo de trayectoria para hallar la “mejor” intención de aeronave, es decir, la que satisface la totalidad de las ligaduras al tiempo que se logra la mejor calidad con los objetivos aplicables. El cálculo de trayectoria, por otro lado, se encuentra a cargo de calcular el movimiento de la aeronave con características de desempeño asociadas (aerodinámica, de propulsión, limitaciones operativas, configuración, etc.) que ejecuta la intención de aeronave dada en presencia de un determinado escenario atmosférico (esencialmente, el viento, la temperatura y la presión), que también afecta directamente al desempeño característico de la respuesta de aeronave.

20 Para ese fin, un motor de trayectorias, TE, que plasma un modelo físico del proceso de vuelo, soluciona la formulación correspondiente de las ecuaciones de movimiento sobre la base de los aspectos predichos del desempeño de aeronave y las condiciones atmosféricas que son proporcionadas, de forma respectiva, por el modelo de desempeño de aeronave (APM, *aircraft performance model*) y el modelo de atmósfera (AM, *atmosphere model*) subyacentes. La transición desde la intención de aeronave a la trayectoria predicha requiere, por lo general, un proceso de integración numérica, que se basa en un cierto conocimiento acerca del estado de la aeronave en el instante inicial (condiciones iniciales).

25 La figura 5 también ilustra las fuentes de incertidumbre en la predicción de trayectoria que, esencialmente, se refieren al nivel de fidelidad y exactitud que está asociado con los elementos de información que están implicados por la totalidad del proceso de TP que se describe. De especial interés para las formas de realización que se describen en el presente documento son las fuentes de la incertidumbre que está asociada con el proceso de cálculo de trayectoria, es decir:

30 i) la incertidumbre en la definición de la trayectoria que se va a calcular según sea expresado por la intención de aeronave dada;

ii) la incertidumbre que está asociada con los pronósticos meteorológicos;

iii) los indicadores de desempeño clave (KPI, *key performance indicator*) que caracterizan la calidad de los aspectos de desempeño de aeronave que están implicados;

35 iv) la incertidumbre que está asociada con la observación de las condiciones iniciales, y;

v) la fidelidad del modelo de movimiento que es usado por el motor de trayectorias (TE, *trajectory engine*) para calcular las trayectorias.

40 La introducción de un método de definición de trayectoria tal como el lenguaje de descripción de intención de aeronave (AIDL, *Aircraft Intent Description Language*), que posibilita describir de manera formal la intención de aeronave sin ambigüedad, hace posible deshacerse de una fuente principal de incertidumbre, así como de la complejidad que está asociada con el proceso de generación de intenciones. Por lo tanto, suponiendo que la herramienta de soporte de decisiones (DST, *decision support tool*) es capaz de interactuar con una TP subyacente que se basa en AIDL, la imagen de la figura 5 se convierte en el esquema mucho más sencillo que se refleja en la figura 6, en la que la incertidumbre que está asociada con la intención de aeronave ya no es una incertidumbre importante en la definición de trayectoria, sino una residual, que está asociada con las ligeras diferencias que pueden tener lugar cuando se ejecuta en la práctica la definición ideal de tal intención de aeronave capturada en AIDL (un modelo de trayectorias de muestra en AIDL se muestra en la figura 7).

50 Siguiendo los resultados de la técnica anterior, el impacto de las incertidumbres tanto del modelo de desempeño de aeronave (APM, *Aircraft Performance Model*) como del modelo de movimiento de aeronave en la incertidumbre de la predicción de trayectoria se puede despreciar en comparación con el que es causado por la incertidumbre en los pronósticos atmosféricos.

En general, los modelos meteorológicos se formulan en términos de ecuaciones diferenciales que describen el

comportamiento de la atmósfera dentro de un determinado dominio temporal y espacial caracterizado por unas condiciones iniciales y de frontera dadas, de forma respectiva. Tales ecuaciones se corresponden con simplificaciones de las leyes generales de Navier-Stokes que rigen la dinámica de fluidos (cuya naturaleza caótica es ampliamente reconocida), que se resuelven de forma numérica sobre una discretización de los dominios del espacio y del tiempo. La naturaleza caótica del problema hace que su solución sea extremadamente sensible a los siguientes aspectos que, por lo tanto, representan la fuente principal de incertidumbre en el pronóstico meteorológico:

ii-1) Definición de dominio: forma de la cuadrícula, tamaño de célula, sistema de coordenadas, resolución y exactitud del modelo de elevación del terreno, superficies móviles (agua) y caracterización del suelo, horizonte temporal y paso de tiempo de integración;

ii-2) Modelo y resolutor: discretización espacial y temporal de las ecuaciones que plasman leyes físicas de la mecánica de fluidos y método de resolución;

ii-3) Condiciones iniciales / de frontera: las condiciones iniciales se toman del mejor conocimiento actual del estado atmosférico en el instante inicial, mientras que las condiciones de frontera se toman en los límites del dominio espacial a lo largo de la totalidad del intervalo de tiempo que abarca desde el instante inicial hasta el instante para el cual se requiere la solución.

El esquema que se describe produce una solución determinista. La idea de pronóstico estocástico introduce la noción de probabilidad en las predicciones. El método que se usa ampliamente para proporcionar información de incertidumbre a los pronósticos meteorológicos es la generación de colectividades. Una colectividad (meteorológica) es un conjunto de soluciones, cada una de las cuales se obtiene a través de la ejecución de uno o múltiples modelos meteorológicos sobre la base de diferentes datos de entrada, es decir, un espacio finito de sucesos probables, representando cada uno un escenario posible de condiciones atmosféricas. Las colectividades permiten que las agencias meteorológicas proporcionen unos niveles de confianza que están asociados con sus pronósticos. El presente método se aprovecha de un enfoque análogo para caracterizar la incertidumbre que está asociada con el pronóstico de los parámetros atmosféricos que son relevantes para la TP (véase la figura 9).

A pesar del hecho de que las fuentes de incertidumbre en la predicción de trayectoria son conocidas en cierta medida, la mayor parte de las herramientas de soporte de decisiones (DST, *decision support tool*) existentes se basan en una predicción de trayectoria determinista en lugar de estocástica, lo que implica que la incertidumbre en la predicción se considera de forma marginal o se ignora completamente. Por lo tanto, el presente método justifica conseguir caracterizar y aprovechar la incertidumbre de TP, lo que ayuda a que los DST logren un desempeño operativo más alto.

Sobre la base del análisis en lo que antecede, el método utiliza el enfoque que se bosqueja en la figura 10, que amplía el esquema de TP que se describe hasta el momento para hacer frente al tratamiento de la incertidumbre. El objetivo logrado es: a) sustituir el modelo de atmósfera determinista por uno probabilístico (PAM, *Probabilistic Atmosphere Model*, modelo de atmósfera probabilístico) que proporciona las colectividades de pronósticos atmosféricos (AFE, *atmospheric forecast ensemble*) que se mencionan, y; b) introducir un componente adicional que se indica como unidad de motor de aleatorización (4), RE, lo que posibilita una interacción nueva con el DST de cliente en términos de incertidumbre.

En efecto, con el fin de ser capaz de aprovechar la capacidad de delimitar de forma robusta la incertidumbre, una unidad de DST "robusta" (3), r-DST, obtiene de la unidad de procesamiento de predicción de trayectoria estocástica (1), s-TP, subyacente una medida de la incertidumbre en un determinado aspecto o calidad de la trayectoria, que es de interés para el fin del sector comercial de las DST. Por ejemplo, un gestor de llegadas (DST = AMAN, *arrival manager*) podría estar interesado en delimitar (de forma robusta) la incertidumbre en el tiempo (de llegada), mientras que un planificador de vuelos (DST = FP, *flight planner*) podría estar interesado en delimitar (de forma robusta) un factor de calidad (FOM, *figure of merit*) más complejo tal como el índice de coste. Para que la unidad de procesamiento (1), s-TP, produzca una medida (robusta) de la incertidumbre en el factor de calidad (FOM) de interés para la unidad de herramienta de soporte de decisiones (3), r-DST, la primera requiere que esta última proporcione una definición de un factor de calidad (FOM) de ese tipo.

La primera responsabilidad de la unidad de motor de aleatorización (4), RE, es aprender en qué FOM tiene interés la unidad de herramienta de soporte de decisiones (3), r-DST, y hallar la trayectoria predicha robusta que podría no ser la que más probablemente resultara más cercana a la trayectoria real en cada pasada, sino la que demuestre rendir el mejor FOM real a largo plazo (es decir, considerando la totalidad del espacio probabilístico).

La segunda responsabilidad de la unidad de motor de aleatorización (4), RE, es hallar la incertidumbre en el FOM que está asociado con tal trayectoria predicha robusta. Para lograr su fin, la unidad de motor de aleatorización (4), RE, requiere una interacción estrecha (posiblemente iterativa) con el motor de trayectorias, TE, para gestionar la

totalidad de las incertidumbres de entrada que se consideran (incertidumbres meteorológicas más, con el tiempo, de APM, de condiciones iniciales y relacionadas con la intención de aeronave) de una forma práctica pero estadísticamente racional.

5 El enfoque global que se describe dentro de la presente divulgación conduce a la representación esquemática de la figura 11, que bosqueja los tres elementos clave (cadena de servicios) que están implicados en la automatización de toma de decisiones y las interacciones entre los mismos.

10 El patrón que se representa en la figura 11 es aplicable a virtualmente cualquier escenario de automatización de gestión de tráfico aéreo (ATM, *Air Traffic Management*), ya se encuentre la herramienta de soporte de decisiones (DST, *decision support tool*) en tierra o a bordo, cuyo objeto es soportar las fases de planificación o de ejecución y con independencia del nivel de autonomía en el proceso de toma de decisiones (basado en operador o plenamente autónomo).

Tal como se ha indicado previamente, la divulgación también engloba la metodología estadística para evaluar la incertidumbre de TP una vez que se ha creado el conjunto de trayectorias estocásticas después de que se halla completado el proceso de TP.

15 Con respecto a la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST, esta unidad (3) se encuentra a cargo de determinar los siguientes dos aspectos:

20 i) la así denominada trayectoria predicha robusta (RPT, *robust predicted trajectory*), que es representativa de un valor central de la población de FOM, dado un determinado criterio de selección de trayectoria (TSC, *trajectory selection criterion*) que define un valor central de ese tipo (centroide), por ejemplo, la media, la moda, la mediana o un percentil dado, y;

ii) la población de FOM que se corresponde con el espacio de muestreo de trayectorias (es decir, la colectividad de trayectorias dada), a partir de la cual se pueden obtener medidas de la dispersión de FOM tales como STD, MAE, SEE o RMS.

25 Por lo tanto, la presente divulgación proporciona una metodología general para hallar la trayectoria predicha robusta (RPT) y la población asociada de valores de FOM (u otras estadísticas de interés), dada la definición del FOM que es proporcionado por la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST.

En lo sucesivo se proporcionan más detalles acerca del cálculo de parámetros estadísticos y el manejo de parámetros de incertidumbre.

30 Las fuentes de incertidumbre con respecto al proceso de predicción de trayectoria (TP, *trajectory prediction*) se pueden resumir tal como sigue:

- La incertidumbre en la definición de la trayectoria que se va a calcular (predecir);
- La incertidumbre que está asociada con los pronósticos de condiciones atmosféricas que son relevantes para la predicción de trayectoria, TP;
- 35 - Los indicadores de desempeño clave (KPI, *key performance indicator*) que caracterizan la calidad de los aspectos de desempeño de aeronave que están implicados en el cálculo de trayectorias predichas;
- La incertidumbre que está asociada con la observación de las condiciones iniciales que son necesarias para inicializar el proceso de cálculo de trayectoria;
- La fidelidad del modelo de movimiento que es usado por la unidad de motor de trayectorias (4), TE, para calcular las trayectorias.

40 La mayor parte de las DST actuales se basan en unos enfoques bastantes simplistas a la TP que apenas consideran tales incertidumbres. Algunas DST simplemente ignoran la incertidumbre de TP, lo que conduce a unas decisiones no fiables. Otras simplemente asignan unos márgenes de tolerancia grandes para hacer frente a la incertidumbre desconocida en el aspecto específico de interés, lo que conduce a un desempeño pobre (a menudo inaceptable).

45 Las diferencias principales entre las soluciones existentes al problema de la predicción de trayectoria, TP, y la solución que es proporcionada por la presente divulgación surgen de los siguientes hechos:

- 1.- La información de entrada determinista que es usada comúnmente por las DST existentes se sustituye en el

presente caso por entradas estocásticas que se obtienen a partir de diferentes fuentes de incertidumbre:

5 **a.** el pronóstico atmosférico determinista que es proporcionado por los servicios de DMET existentes se sustituye por las colectividades de pronósticos atmosféricos (AFE, *atmospheric forecast ensemble*) que son proporcionadas por la nueva unidad de servicio meteorológico digital probabilístico (2), p-DMET. Esto posibilita la obtención de una medida de cómo la incertidumbre meteorológica afecta a la incertidumbre de TP. Además, las interfaces de la nueva unidad de servicio meteorológico digital probabilístico (2), p-DMET, se han diseñado específicamente para soportar la unidad de procesamiento de predicción de trayectoria estocástica (1), s-TP, consiguiendo para el fin de una automatización de toma de decisiones robusta.

10 **b.** la entrada de la definición de trayectoria también es una fuente de incertidumbre clave, en especial para los métodos existentes en los que la definición de trayectoria depende tanto del lenguaje de definición de trayectoria específico que es usado por la DST como de la implementación de TP. Esta metodología propone el uso de los beneficios potenciales del lenguaje de descripción de intención de aeronave (AIDL, *Aircraft Intent Description Language*) como un lenguaje formal inequívoco para describir trayectorias de aeronave independientes de las implementaciones de TP y de DST específica, lo que permite deshacerse de la incertidumbre que está asociada con la definición de trayectoria.

15 **c.** el resto de las fuentes de incertidumbre que se identifican son menos relevantes en comparación con las dos que se han identificado en lo que antecede (pronósticos atmosféricos y definición de trayectoria). Sin embargo, la metodología posibilita un mecanismo para considerar y entender cómo se comportan otras incertidumbres menores, por medio de la definición de determinados parámetros de aleatorización que son proporcionados por la unidad de motor de trayectorias, TE, como vectores de parámetros estocásticos que están asociados con componentes diferentes (APM, AI, CI, AM) para el cálculo de trayectoria actual (δ_{APM} , δ_{AI} , δ_{CI} , δ_{AM}).

20 **2.-** El esquema de automatización de los enfoques de toma de decisiones existentes que son llevados a cabo por la cadena convencional de "DMET" - "TP" - "DST" se ha potenciado para ampliar la funcionalidad en el nuevo enfoque "p-DMET" - "s-TP" - "r-DST":

25 **a.** p-DMET: se encuentran ampliamente disponibles pronósticos meteorológicos genéricos, pero los servicios de pronóstico meteorológico especializados que se personalizan para un contexto basado en trayectoria son novedosos.

30 **b.** s-TP: la TP estocástica en lugar de determinista que es alimentada por medio de un pronóstico meteorológico probabilístico es nueva en la gestión de tráfico aéreo (ATM, *Air Traffic Management*).

La interacción entre la unidad de procesamiento de predicción de trayectoria estocástica (1), s-TP, y la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST, en términos del FOM y la incertidumbre relacionada nunca se ha abordado.

35 La capacidad de gestionar las entradas de incertidumbre y producir una predicción de trayectoria estocástica y su medida de incertidumbre en términos de FOM proporciona beneficios potenciales para el proceso de toma de decisiones de la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST.

40 **c.** r-DST: el uso de factores de calidad (FOM, *figure of merit*) personalizados para caracterizar la incertidumbre de TP para su aprovechamiento en el soporte de decisiones automatizado es nuevo en comparación con el estado actual de la técnica, en el que las DST que se basan en una TP determinista no justifican la incertidumbre. El análisis de la correlación entre la incertidumbre en las medidas de FOM y el desempeño de DST nunca se ha intentado antes.

45 **3.-** La infraestructura interna de los predictores de trayectoria de la automatización de soporte de decisiones existente se desarrolla, en general, para satisfacer los requisitos de una herramienta específica. Además, la automatización define, por lo general, la trayectoria de aeronave que se va a calcular por medio de un "lenguaje de descripción patentado". Por lo tanto, la predicción de trayectoria existente se basa en una solución que acopla la implementación de TP específica con la descripción de trayectoria específica de la DST. El uso de una TP basada en AIDL también es una idea novedosa que permite desacoplar la definición de trayectoria y la implementación de TP específica.

50 Por lo tanto, el presente método y sistema son mejores que los enfoques existentes para el soporte de toma de decisiones debido a que:

- adoptan el AIDL para eliminar una fuente importante de incertidumbre, que está asociada con la definición de trayectoria;

- consideran información adicional acerca de la otra fuente importante de incertidumbre, es decir, el pronóstico de condiciones atmosféricas, a través del enfoque de p-DMET;
 - proponen un esquema formal (sobre la base del enfoque de FOM) que es independiente de los aspectos específicos de las trayectorias predichas cuya incertidumbre asociada es de interés para las DST;
- 5 - mejoran la robustez del proceso de toma de decisiones, debido a que el mismo considera la incertidumbre cuando se seleccionan las trayectorias predichas sobre las cuales se toman las decisiones y posibilita obtener adicionalmente una medida de tal incertidumbre, que se aprovecha para tomar decisiones más racionales.

10 La presente divulgación es especialmente valiosa para los usuarios del espacio aéreo y proveedores de servicios de gestión de tráfico aéreo / sistemas aéreos no tripulados (ATM / UAS, *Air Traffic Management / Unmanned Aerial Systems*) en el contexto de los entornos operativos de vehículos aéreos (AV, *aerial vehicle*) basados en trayectoria futuros. En particular, las técnicas de toma de decisiones innovadoras para la planificación, la gestión de llegadas, la detección y evitación y aterrizaje de contingencia en condiciones con un motor parado, podrían aprovechar, entre otras cosas, modelos de predicción de trayectoria estocástica sobre la base de pronósticos de colectividades meteorológicas con el fin de obtener unos resultados más robustos que los proporcionados por procesos de automatización deterministas existentes.

15 El método que se propone podría ahorrar costes en operaciones grandes de las empresas de transporte aéreo. Las decisiones operativas que están basadas en un enfoque estocástico se encuentran más cerca de la realidad que las que están basadas en enfoques deterministas y, por lo tanto, es más sencillo ajustar mejor el coste real de las operaciones (perfeccionamientos operativos significativos sin comprometer la seguridad).

20 Lo siguiente es un análisis detallado del proceso de predicción de trayectoria (TP, *trajectory prediction*) y sus fuentes asociadas de incertidumbre de TP.

El problema matemático que permite calcular la trayectoria de un vehículo aéreo (AV, *air vehicle*) con suposiciones razonables que tienen sentido desde un punto de vista operativo en la gestión de tráfico aéreo (ATM, *Air Traffic Management*) se describe convencionalmente por medio de la siguiente estructura:

25 Las ecuaciones de movimiento que rigen el movimiento del centro de gravedad del AV (tres grados de libertad, 3 GDL), sometido a fuerzas aerodinámicas (L y D), de propulsión (T) y gravitatorias (W), dentro de un campo de viento (w) en 4D:

$$\begin{aligned}
 & \frac{dv_{TAS}}{dt} - \frac{T - D - W \operatorname{sen} \gamma_{TAS}}{m} + \dot{w}_1^{WFS} = 0 \\
 \text{[E1]} \quad & \frac{d\gamma_{TAS}}{dt} - \frac{1}{v_{TAS}} \left[\frac{L \cos \mu_{TAS} - W \cos \gamma_{TAS}}{m} + \left(\dot{w}_3^{WFS} \cos \mu_{TAS} + \dot{w}_2^{WFS} \operatorname{sen} \mu_{TAS} \right) \right] = 0 \\
 & \frac{d\chi_{TAS}}{dt} - \frac{1}{v_{TAS} \cos \gamma_{TAS}} \left[\frac{L}{m} \mu_{TAS} + \left(\dot{w}_3^{WFS} \operatorname{sen} \mu_{TAS} - \dot{w}_2^{WFS} \cos \mu_{TAS} \right) \right] = 0
 \end{aligned}$$

La ecuación de variación de masa sobre la base de un modelo del consumo de combustible (F):

$$\text{[E2]} \quad \frac{dm}{dt} + F = 0$$

30 Las ecuaciones de navegación en geometría elipsoidal que son definidas por los radios de curvatura del meridiano (M) y del primer vertical (N) local:

$$\begin{aligned}
 & \frac{d\lambda}{dt} - \frac{v_{TAS} \cos \gamma_{TAS} \operatorname{sen} \chi_{TAS} + w_2}{(N + h) \cos \varphi} = 0 \\
 \text{[E3]} \quad & \frac{d\varphi}{dt} - \frac{v_{TAS} \cos \gamma_{TAS} \cos \chi_{TAS} + w_1}{(M + h)} = 0 \\
 & \frac{dh}{dt} - v_{TAS} \operatorname{sen} \gamma_{TAS} = 0
 \end{aligned}$$

Los efectos de las instrucciones de movimiento de AIDL, que cierran los 3 grados de libertad de control:

$$\begin{aligned}
 & q_1(\lambda, \phi, h, m, v_{TAS}, \chi_{TAS}, \delta_T, \gamma_{TAS}, \mu_{TAS}, \delta, \theta, V, g, w_1^{WFS}, w_2^{WFS}, w_3^{WFS}, t) = 0 \\
 \text{[E4]} \quad & q_2(\lambda, \phi, h, m, v_{TAS}, \chi_{TAS}, \delta_T, \gamma_{TAS}, \mu_{TAS}, \delta, \theta, V, g, w_1^{WFS}, w_2^{WFS}, w_3^{WFS}, t) = 0 \\
 & q_3(\lambda, \phi, h, m, v_{TAS}, \chi_{TAS}, \delta_T, \gamma_{TAS}, \mu_{TAS}, \delta, \theta, V, g, w_1^{WFS}, w_2^{WFS}, w_3^{WFS}, t) = 0
 \end{aligned}$$

Los efectos de las instrucciones de configuración de AIDL, que cierran los 4 grados de libertad de configuración:

$$\begin{aligned}
 & d_1(\delta_{HL}, \delta_{SB}, \delta_{LG}, \delta_{AR}) = c_1(\lambda, \phi, h, m, v_{TAS}, \chi_{TAS}, \delta_T, \gamma_{TAS}, \mu_{TAS}, \delta, \theta, V, g, w_1^{WFS}, w_2^{WFS}, w_3^{WFS}, t) = 0 \\
 \text{[E5]} \quad & d_2(\delta_{HL}, \delta_{SB}, \delta_{LG}, \delta_{AR}) = c_2(\lambda, \phi, h, m, v_{TAS}, \chi_{TAS}, \delta_T, \gamma_{TAS}, \mu_{TAS}, \delta, \theta, V, g, w_1^{WFS}, w_2^{WFS}, w_3^{WFS}, t) = 0 \\
 & d_3(\delta_{HL}, \delta_{SB}, \delta_{LG}, \delta_{AR}) = c_3(\lambda, \phi, h, m, v_{TAS}, \chi_{TAS}, \delta_T, \gamma_{TAS}, \mu_{TAS}, \delta, \theta, V, g, w_1^{WFS}, w_2^{WFS}, w_3^{WFS}, t) = 0 \\
 & d_4(\delta_{HL}, \delta_{SB}, \delta_{LG}, \delta_{AR}) = c_4(\lambda, \phi, h, m, v_{TAS}, \chi_{TAS}, \delta_T, \gamma_{TAS}, \mu_{TAS}, \delta, \theta, V, g, w_1^{WFS}, w_2^{WFS}, w_3^{WFS}, t) = 0
 \end{aligned}$$

5 Las expresiones [E1], [E2] y [E3] son ecuaciones diferenciales mientras que [E4] y [E5] representan ligaduras algebraicas. La totalidad de las mismas constituye, de forma colectiva, un así denominado sistema de ecuaciones diferenciales algebraicas (EDA) que, en notación compacta, se puede reescribir como:

$$\text{[E4]} \quad q(\mathbf{X}, \mathbf{u}, \mathbf{E}, t) = 0$$

$$\text{[E5]} \quad d(\Delta) = c(\mathbf{X}, \mathbf{E}, t) \quad (\text{de [E5]})$$

$$\text{[E6]} \quad \dot{\mathbf{X}} = F(\mathbf{X}, \mathbf{u}, \Delta, \mathbf{A}, \mathbf{E}, t) \quad (\text{de [E1], [E2] y [E3]})$$

10 En las que las variables se han elegido de acuerdo con el esquema que se refleja en la tabla que se muestra en la figura 15.

Las ecuaciones [E4], [E5] y [E6] se pueden solucionar de forma numérica para unas condiciones iniciales dadas:

$$\text{[E7]} \quad \mathbf{u}(t_0) = \mathbf{u}_0$$

$$\text{[E8]} \quad \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0$$

$$15 \quad \text{[E9]} \quad \dot{\mathbf{X}}(t_0) = \dot{\mathbf{X}}_0$$

lo que da lugar a la trayectoria predicha, es decir, una secuencia discreta de “n” muestras del vector de estado X_j , o, por lo general, una versión ampliada del mismo Y_j con información adicional acerca de unas características de movimiento, de configuración, ambientales y de desempeño de aeronave que se calculan en cada paso de integración j:

$$20 \quad \text{[E10]} \quad \mathbf{Y}_j = \{\mathbf{X}_j, \mathbf{u}_j, \Delta_j, \mathbf{E}_j\} \quad j = \{0, \dots, n\} \quad \text{Muestra de trayectoria ampliada } j$$

$$\text{[E11]} \quad \mathbf{T} = \{\mathbf{Y}_j\} \quad \text{Trayectoria ampliada}$$

25 La definición de una trayectoria de AV en términos del AIDL (la intención de aeronave) asegura que la combinación específica de las ecuaciones [E4] y [E5] aplicables a lo largo de un intervalo de tiempo dado que se denomina intervalo de operación es conocida a lo largo de la totalidad de la trayectoria. Por lo tanto, cualquier trayectoria se puede dividir siempre en una secuencia de operaciones, dentro de cada una, el problema de calcular el segmento de trayectoria correspondiente es definido por tal combinación específica de instrucciones de movimiento y de configuración. Usando la analogía del lenguaje, una trayectoria se puede “articular” como una secuencia de “palabras” o “símbolos”, siendo cada palabra una combinación de 7 “letras”, que se corresponden con las 3 instrucciones de movimiento más las 4 instrucciones de configuración aplicables durante el intervalo de tiempo para el cual la palabra correspondiente define la trayectoria. Por lo tanto, el problema de calcular una trayectoria subyace a solucionar una secuencia de ecuaciones diferenciales, problemas de EDA, siendo proporcionada la parte algebraica por el AIDL y en donde las condiciones iniciales para el siguiente segmento de la trayectoria se toman del estado final del segmento previo calculado.

30

La aproximación al cálculo de trayectoria de AV que se presenta se basa en un modelo de desempeño de aeronave

(APM, *aircraft performance model*) de variación de masa cinética de 3 GDL (grados de libertad), que modela las fuerzas aerodinámicas y de propulsión, así como el consumo de combustible (que está implicado en el cálculo de fuerzas gravitatorias) como una función de los aspectos de movimiento y las condiciones ambientales locales (véase la tabla en la figura 16).

5 **[E12]** $A = A(X, E, u)$

Asimismo, las características ambientales que están implicadas en el problema de cálculo de trayectoria se proporcionan por medio del así denominado modelo de la Tierra (EM, *Earth Model*), cuyas características dependen, en general, de la posición y el tiempo locales (véase la tabla en la figura 17), es decir:

[E13] $E = E(X, t)$

10 El modelo de la Tierra, EM, se puede dividir en dos modelos secundarios: el geoide, que proporciona modelos para el geopotencial y la gravedad, por lo general unos elipsoidales, como una función de la latitud y la altitud y el así denominado "modelo de atmósfera en 4D" (AM, *atmosphere model*), que proporciona la presión, la temperatura y el viento de la atmósfera como una función de la posición y el tiempo (véase la figura 8).

15 Mientras que el modelo del geoide consiste en una formulación convencional bastante sencilla, el modelo de atmósfera, AM, implica la totalidad de un dominio tecnológico en relación con las ciencias de la atmósfera / meteorológicas, la observación de la Tierra, la validación y la distribución de datos, los modelos y las agencias de pronóstico meteorológico, etc., que representa una complejidad importante más allá del alcance del problema de cálculo de trayectoria de un vehículo aéreo (AV, *air vehicle*), de hecho, una preocupación importante en cuanto a la incertidumbre de TP.

20 Por lo tanto, se supone que el modelo de atmósfera (AM, *atmosphere model*) está acoplado con un servicio externo que se denomina DMET (o p-DMET en el enfoque probabilístico de la presente divulgación), a cargo de hacer frente a la complejidad que está asociada con el pronóstico de las condiciones atmosféricas relevantes para la TP en un dominio geoespacial y temporal dado.

25 Tal como se muestra, la aproximación al cálculo de trayectoria de AV que se presenta maneja mucha más información que solo 4D o posiciones y tiempo. En particular, la figura 18 muestra una tabla que refleja la totalidad de los aspectos de trayectoria que se consideran.

30 En la medida en el interés en la determinación de errores y métricas en la predicción de trayectoria, cualquier marco de trabajo riguroso para estudiar la incertidumbre de TP requiere definir qué quiere decir un error de TP para los diferentes aspectos de trayectoria de interés potencial para las r-DST, así como establecer unas métricas apropiadas para medir los mismos.

35 Un tipo de errores son los así denominados "errores en 4D". Para empezar, se considera la figura 12, que ilustra una trayectoria predicha típica y la aeronave en una posición predicha dada que se indica como "P". Sin olvidar que hay presente incertidumbre, se espera que la posición real "A" de la aeronave en ese mismo instante de tiempo difiera de la predicha, P. Para este fin, es útil el concepto de elipsoide de covarianza, un elipsoide que está centrado en P, que contiene la posición real A con una probabilidad dada (por ejemplo, un sigma, dos sigmas, etc.). La idea es confinar un volumen de ese tipo por medio de un enfoque sencillo, es decir, un tipo de caja cuyas 3 dimensiones aportan una medida de los errores de TP geométricos: el error en distancia a lo largo de la ruta (ATER, *along track error in distance*), el error transversal a la ruta (XTE, *cross-track error*) y el error vertical (VE, *vertical error*). La figura 12 representa el concepto, que implica habitualmente las siguientes tres posiciones (véase la tabla en la figura 19).

40 En efecto, para vincular las posiciones predicha, P, y real, A, en el instante "t", que son temporalmente coincidentes, se necesita hallar una tercera posición "N", que se denomina "posición nominal", que es la espacialmente correspondiente con A, a lo largo de la trayectoria predicha, es decir, la posición predicha más cercana que se corresponde con la real. Por lo tanto, para conectar P y A, es necesario mover una cantidad ATER a lo largo de la ruta predicha hasta que se alcanza N, entonces una cantidad XTE en la dirección transversal a la ruta, más una cantidad VE en la dirección vertical. N se corresponde con un instante de tiempo diferente de t y tal diferencia de tiempo es el así denominado error en tiempo a lo largo de la ruta (ATET, *along track error in time*).

45 La tabla que se muestra en la figura 20 muestra los errores de TP definidos hasta el momento junto con sus métricas, sobre la base de aspectos de trayectoria en 4D, en donde la métrica para el XTE requiere una explicación adicional tal como sigue.

50 Sean N' y A' la huella de N y A, de forma respectiva, sobre la superficie (elipsoidal) de referencia, es decir, los puntos de las coordenadas geodésicas $[A_N, \varphi_N, 0]$ y $[A_A, \varphi_A, 0]$, de forma respectiva. Para errores pequeños, la

norma del vector $\overrightarrow{N'A'}$ aproxima la distancia geodésica entre N' y A', de tal modo que su 2ª componente en el sistema de referencia TND es, por lo tanto, una buena aproximación del XTE.

El sistema de referencia TND se define como:

- 5 - X_1^{TND} está orientado a lo largo de la componente horizontal de la velocidad con respecto a tierra V_H en el punto N - tangente a la trayectoria lateral.
- X_2^{TND} se obtiene mediante una rotación en el sentido de las agujas del reloj de $\pi / 2$ de X_1^{TND} sobre el plano local tangente a la superficie de referencia en N' - normal con respecto a la trayectoria lateral.
- X_3^{TND} apunta hacia el nadir (abajo) de tal modo que los 3 ejes forman un sistema cartesiano orientado a derechas.

10 Tal como se ilustra en la figura 13, el sistema de TND resulta de una rotación de magnitud χ^N del LLS (*local level system*, sistema de ejes horizonte local) en N' en torno a su tercer eje X_3^{LLS} , siendo χ^N la marcación geodésica (verdadera) de la trayectoria predicha en el punto N.

El vector $\overrightarrow{N'A'}$ se puede expresar en el sistema de referencia centrado en la Tierra, fijo a la Tierra (ECEF, *Earth-Centered-Earth-Fixed*) tal como sigue:

$$[E14] \overrightarrow{N'A'}_{ECEF} = \begin{bmatrix} N(\cos\phi^A \cos\lambda^A - \cos\phi^N \cos\lambda^N) \\ N(\cos\phi^A \operatorname{sen}\lambda^A - \cos\phi^N \operatorname{sen}\lambda^N) \\ N(1-e^2)(\operatorname{sen}\phi^A - \operatorname{sen}\phi^N) \end{bmatrix}$$

15 siendo N y "e", de forma respectiva, el radio de curvatura en el primer vertical y la excentricidad del elipsoide de referencia.

Un vector de ese tipo, expresado en el LLS, da como resultado:

$$[E15] \overrightarrow{N'A'}^{LLS} = R_2\left(-\frac{\pi}{2} - \phi^N\right) R_3(\lambda^N) \overrightarrow{N'A'}^{ECEF}$$

20 en la que las matrices R_3 y R_2 representan unas rotaciones elementales convencionales consecutivas en torno a los ejes 3, a continuación en torno a 2.

Por último, el vector $\overrightarrow{N'A'}$ se puede expresar en el sistema de TND como:

$$[E16] \overrightarrow{N'A'}^{TND} = R_3(\chi^N) \overrightarrow{N'A'}^{LLS}$$

25 Una vez que se han definido las métricas de error de TP en 4D, se pueden desarrollar métricas de error de TP adicionales, como errores de actitud, de velocidad o de consumo de combustible, que están asociadas con otros aspectos de trayectoria, tal como se representa en la tabla que se muestra en la figura 21.

Las métricas de error de velocidad se pueden adaptar a diferentes tipos de velocidad, tales como IAS, CAS, GS o MACH. De forma similar, las métricas de error de actitud se pueden adaptar a la referencia con respecto a tierra, o bien magnética o bien verdadera, en lugar de una referencia aerodinámica.

30 Por último, es interesante definir métricas adicionales que aprovechan observaciones reales de propiedades atmosféricas que se obtienen a lo largo de la trayectoria real, que se pueden usar para evaluar la exactitud de las condiciones atmosféricas predichas.

La tabla de la figura 22 muestra tales conceptos y métricas de error adicionales que están asociados con el modelo de atmósfera (AM, *atmosphere model*).

35 La tabla de la figura 23 muestra una lista no exhaustiva de sistemas relacionados con la trayectoria (DST) típicos, funciones relacionadas con la trayectoria típicas que abordan los mismos, y aspectos relacionados con la trayectoria sobre los cuales operan tales funciones. A pesar de que cada DST relacionada con la trayectoria, en principio,

combina una funcionalidad relacionada con la trayectoria de formas específicas según sea requerido por sus objetivos comerciales, se puede identificar una gran cantidad de similitud entre las DST actuales en uso o las futuras por las que se abogue dentro de las diferentes aplicaciones comerciales y militares en los dominios tanto de ATM como de UAS.

5 Una premisa de diseño fundamental de la tecnología de AIDL es posibilitar una infraestructura común capaz de soportar, idealmente, cualquier función relacionada con la trayectoria de tal modo que una gran parte de la funcionalidad de cualquier DST relacionada con la trayectoria se puede lograr y, probablemente, mejorar a través de la combinación de un conjunto de funciones relacionadas con la trayectoria convencionales primitivas.

10 Tal como ya se ha explicado, la mayor parte de las DST se basan de algún modo en la TP en alguna fase para soportar un tipo de análisis de sensibilidad, que sustenta en última instancia su proceso de toma de decisiones. Por lo tanto, cuando se introduce incertidumbre en una TP, es fundamental concebir un enfoque que albergue suficiente generalidad para que una infraestructura de TP atienda a tantas DST como sea posible.

15 En efecto, cuando se considera una colectividad "W" de escenarios atmosféricos de pronóstico W_i que se supone que captura "de forma razonable" la posible evolución de las condiciones atmosféricas dentro de un dominio en 4D de interés, esta se puede caracterizar mediante $[\lambda_1, \lambda_2] \times [\varphi_1, \varphi_2] \times [h_1, h_2] \times [t_1, t_2]$:

$$[E17] \quad W = \{W_i\} \quad i=\{1, \dots, q\}$$

20 A pesar de que la expresión "de forma razonable" podría parecer poco clara, entrando dentro del alcance de la tecnología de p-DMET, el punto clave en el presente caso es que, a pesar de que lo más probable es que el escenario atmosférico real no acabe coincidiendo con ninguno de los elementos de W, el rango de condiciones cubiertas por sus elementos aporta una medida de la incertidumbre que está asociada con el pronóstico.

Dada W, se puede obtener una colectividad T correspondiente de trayectorias predichas posibles T_i , calculada cada una sobre la base del escenario atmosférico correspondiente W_i , siendo igual el resto de las entradas para la totalidad de los "q" casos:

$$[E18] \quad T = \{T_i\} \quad i=\{1, \dots, q\}$$

25 Para algunas aplicaciones, la DST está interesada en la evaluación de un factor de calidad (FOM, *figure of merit*) de una única trayectoria, lo que, considerando los "q" escenarios atmosféricos posibles, da lugar a una población de valores de FOM posibles:

$$[E19] \quad FOM_i = f(T_i) \quad i=\{1, \dots, q\}$$

30 En este caso, la DST requiere: **a)** seleccionar una de las trayectorias ($i = R$) de entre T, que es representativa de un valor central de la población de FOM en el sentido de la media, la moda, la mediana, un percentil, u otra medida estadística, y; **b)** obtener la dispersión del FOM que está asociado con el resto de las trayectorias con respecto a la seleccionada.

Los ejemplos de los FOM en este caso son:

- Combustible quemado: $\Delta m = m_n - m_0$
- 35 - Tiempo de llegada en un punto de posición dado (tiempo de vuelo): $\Delta t = t_n - t_0$
- Índice de coste (el coste del tiempo frente al coste del combustible): $CI = \Delta t - \Delta m$
- Alcance (distancia horizontal cubierta): $\Delta r = r_n - r_0$
- posición en 2D en un instante o punto de posición dado (λ_n, φ_n) o sobre un segmento de trayectoria (ATER, XTE)
- Altitud en un instante o punto de posición dado (h_n) o sobre un segmento de trayectoria (VE)
- 40 - posición en 3D en un instante o punto de posición dado ($\lambda_n, \varphi_n, h_n$) o sobre un segmento de trayectoria (ATER, XTE, VE)
- posición en 4D en un instante o punto de posición dado ($\lambda_n, \varphi_n, h_n, t_n$) o sobre un segmento de trayectoria (ATER, XTE, VE, ATET)

- Velocidad en un punto de posición dado ($v_{TAS,n}$) o sobre un segmento de trayectoria (SE)
- Actitud ($\chi_{TAS,n}$, $\mu_{TAS,n}$, $\gamma_{TAS,N}$) en un punto de posición dado o sobre un segmento de trayectoria (BE, PAE, BAE)
- Vértice de estela en un instante o punto de posición dado: función de la velocidad (v_{TAS}), la configuración (δ_{HL}^k , δ_{SB}^k , δ_{LG}^k) y el viento (w^k)

5 En otras aplicaciones, la DST está interesada en un factor de calidad agregado de un conjunto de trayectorias "S", que se evalúan de forma simultánea:

$$[E20] \quad S = \{T_i^k\} \quad k=\{1, \dots, s\} \quad i=\{1, \dots, q\}$$

$$[E21] \quad FOM_i = f(T_i^1, T_i^2, \dots, T_i^s) \quad i=\{1, \dots, q\}$$

10 El FOM en este caso es una función de múltiples trayectorias. Para cualquier posible escenario atmosférico W_i , el conjunto de trayectorias correspondientes adoptan una forma específica, que aporta un FOM_i global específico.

Una vez más, la DST en este caso requiere: **a)** seleccionar el índice $i = R$ del escenario que da lugar al conjunto específico de trayectorias predichas robustas que representa del mejor modo un valor central de la población de FOM, y ; **b)** obtener la dispersión del FOM que está asociado con el resto de los escenarios con respecto al seleccionado.

15 Por lo general, los ejemplos de los FOM en este caso están asociados con el tráfico o una flota de vehículos, por ejemplo:

- Combustible quemado: $\Sigma \Delta m^k = \Sigma (m_n^k - m_0^k)$ para $k = \{1, \dots, s\}$
- Ruido: función de la posición ($ATER^k$, XTE^k , VE^k), el empuje (T^k), la configuración (δ_{HL}^k , δ_{SB}^k , δ_{LG}^k) y el viento (w^k)
- 20 - Emisiones: función del combustible quemado y el viento
- Conflictividad: número de sucesos de LOS perdidos multiplicados por la probabilidad de LOS (función de $ATER^k$, XTE^k y VE^k)

25 Las tablas de las figuras 24a y 24b esbozan de forma cualitativa las relaciones entre un conjunto representativo de DST que se consideran y los FOM en los que las mismas tienen (o podrían potencialmente tener) interés, en aras de sus procesos de toma de decisiones.

Tal como se muestra en las tablas de la figura 24a y 24b, se pueden distinguir dos casos secundarios diferentes, dependiendo de si la DST solo está interesada en la evaluación del FOM en el punto de extremo de la trayectoria, o por la totalidad de la trayectoria.

30 Tal como ya se ha indicado, cualquier r-DST basada en trayectoria está interesada en, esencialmente, dos elementos:

- a) la así denominada trayectoria predicha robusta (RPT, *robust predicted trajectory*), que es representativa de un valor central de la población de FOM, dado un determinado criterio de selección de trayectoria que define un valor central de ese tipo (centroide), por ejemplo, la media, la moda, la mediana o un percentil dado, y ;
- 35 b) la población de FOM que se corresponde con el espacio de muestreo de trayectorias (es decir, la colectividad de trayectorias dada), a partir de la cual se pueden obtener medidas de la dispersión de FOM tales como STD, MAE, SEE o RMS.

Lo siguiente es una presentación de una metodología general para hallar la trayectoria predicha robusta (RPT) en el sentido que se describe, junto con la población asociada de valores de FOM, dada la definición del FOM que es proporcionado por la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST.

40 Por razones de simplicidad, se considera que la única fuente de incertidumbre en TP procede del pronóstico atmosférico, es decir, la intención de aeronave expresada en AIDL, las condiciones iniciales (CI) y el modelo de desempeño de aeronave (APM, *aircraft performance model*) permanecen invariantes, mientras que el escenario

atmosférico W_i puede ser cualquiera de los miembros de la colectividad W (véase la ecuación [E17]).

La metodología que se presenta en lo sucesivo se refiere al caso de la trayectoria única ya presentado, en lugar de al caso de múltiples trayectorias. Tal como se ha indicado en lo que antecede, se distinguen dos casos secundarios:

a) Calidad en el punto de extremo:

- 5 En este caso, la aplicación de la función de FOM dada a cada una de las trayectorias $\{T_i\}$ de la colectividad T da lugar a una población de valores de FOM que se indican como:

$$[E22] \quad z_i = \text{FOM}(T_i) \quad i=\{1, \dots, q\}$$

$$[E23] \quad \mathbf{z} = \{z_i\} = [z_1, z_2, \dots, z_q]^T$$

en las que, en los ejemplos que se estudian, el FOM adopta las formas que se ilustran en la tabla de la figura 25.

- 10 Con el fin de seleccionar un valor central representativo de la población de FOM, un criterio de selección de trayectoria (TSC, *trajectory selection criterion*) ha de ser proporcionado por la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST. La tabla de la figura 26 muestra los criterios más típicos que se usan en Estadística para derivar medidas centrales de una variable estadística.

- 15 Mediante la aplicación del TSC a la población de valores de FOM, la medida central correspondiente, z_c , se puede obtener como:

$$[E24] \quad z_c = \text{TSC}(\mathbf{z})$$

Debido a que es improbable que la z_c calculada coincida con ninguno de los valores de la población z , se selecciona el más cercano como el más representativo de la medida central. Considerando las siguientes ecuaciones

$$[E25] \quad \varepsilon_i = z_i - z_c \quad i=\{1, \dots, q\}$$

20
$$[E26] \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \{\varepsilon_i\} = [z_1, z_2, \dots, z_q]^T$$

una expresión de la población de las diferencias entre los valores de FOM calculados z_i y la medida central z_c , la menor en cuanto a su valor absoluto se puede indicar como:

$$[E27] \quad \varepsilon_R = [\text{mín}\{\varepsilon_i^2\}]^{1/2} \quad R \in \{1, \dots, q\}$$

- 25 que define el índice R que identifica la trayectoria T_R de la colectividad cuyo FOM asociado es el más cercano al valor central z_c , es decir, la trayectoria predicha robusta, RPT:

$$[E28] \quad T_R = T [R]$$

$$[E29] \quad z_R = \text{FOM}(T_R) = \mathbf{z}[R]$$

Una vez que se ha hallado la RPT, la población de las desviaciones de FOM con respecto al así denominado centroide z_R se puede expresar como:

30
$$[E30] \quad e_i = z_i - z_R \quad i=\{1, \dots, q\}$$

$$[E31] \quad \mathbf{e} = \{e_i\} = [e_1, e_2, \dots, e_q]^T$$

que se espera que represente la población de la dispersión de FOM, en el caso de que las condiciones atmosféricas reales difiriesen del escenario W_R que se elige para calcular la RPT.

- 35 A partir de la población "e" se puede obtener cualquier medida estadística de la dispersión que tenga sentido para la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST. La tabla de la figura 27 muestra las más típicas.

b) Calidad de la totalidad de la trayectoria:

5 El enfoque que se ha descrito en lo que antecede se puede generalizar al caso en el que la r-DST no solo está interesada en la evaluación de la incertidumbre de los aspectos de trayectoria en un punto de posición o instante de tiempo dado, pero por la totalidad de la trayectoria. Tal es el caso cuando se evalúan variables tales como conformidad con navegación de área probabilística (p-RNAV) de la geometría de la trayectoria o guiado de tiempo / velocidad continuo.

Los ejemplos de unos FOM típicos de interés en este caso se muestran en la tabla de la figura 28.

10 En este caso, un grado de libertad (GDL) adicional desempeña un papel que está asociado con el índice j, que identifica cada una de las muestras Y_{ij} de cada una de las trayectorias T_i de la colectividad. Debido a esto, no se usa directamente el FOM dado, sino que un factor correspondiente (que se indica como "z" en la figura 28) se aplica en su lugar a nivel de muestra de trayectoria para obtener una población de los FOM de nivel de muestra de trayectoria tal como sigue:

$$[E32] \quad z_{ij} = \text{FOM}(Y_{ij}) \quad i=\{1, \dots, q\} \quad j=\{1, \dots, n\}$$

$$[E33] \quad \mathbf{z} = \{z_{ij}\} = \begin{bmatrix} z_{11} & \dots & z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{q1} & \dots & z_{qn} \end{bmatrix}$$

15 Las expresiones [E32] y [E33] suponen que la totalidad de las trayectorias que pertenecen a la colectividad que se considera tienen el mismo número de muestras de vector de estado.

A continuación, el TSC se aplica por columnas sobre la población de z, de tal modo que el valor central z_{cj} se obtiene para cada conjunto de muestras de trayectoria correspondientes:

$$[E34] \quad z_{cj} = \text{TSC}(z_{ij}) \quad j=\{1, \dots, n\}$$

$$20 \quad [E35] \quad \mathbf{z}_C = \{z_{cj}\} = [z_{c1}, z_{c2}, \dots, z_{cn}]^T$$

Considerando las ecuaciones:

$$[E36] \quad \sigma_{ij} = z_{ij} - z_{cj} \quad i=\{1, \dots, q\} \quad j=\{1, \dots, n\}$$

$$[E37] \quad \boldsymbol{\sigma} = \{\sigma_{ij}\} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \dots & \sigma_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{q1} & \dots & \sigma_{qn} \end{bmatrix}$$

25 como una expresión de la población de las diferencias entre valores de FOM de nivel de muestra de trayectoria calculados z_{ij} y la medida central z_{cj} , la menor en cuanto a su valor absoluto se puede indicar como:

$$[E38] \quad R = [\text{mín}\{\sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2\}]^{1/2} \quad R \in \{1, \dots, q\}$$

Que define el índice R que identifica la trayectoria T_R de la colectividad cuyo FOM asociado es el más cercano al valor central z_C , es decir, la trayectoria predicha robusta, RPT:

$$[E39] \quad \mathbf{T}_R = \mathbf{T}[R]$$

30 Y el centroide, que es, en este caso, el valor n-dimensional:

$$[E40] \quad \mathbf{z}_R = \{z_{Rj}\} = [z_{R1}, z_{R2}, \dots, z_{Rn}]^T$$

Una vez que se ha hallado la RPT, la población de las desviaciones de FOM con respecto al centroide z_R se puede expresar como:

$$[E41] \quad e_{ij} = Z_{ij} - Z_{Rj} \quad i=\{1, \dots, q\} \quad j=\{1, \dots, n\}$$

$$[E42] \quad \mathbf{e} = \{e_{ij}\} = \begin{bmatrix} e_{11} & \dots & e_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{q1} & \dots & e_{qn} \end{bmatrix}$$

Y de este punto en adelante, se pueden derivar medidas de dispersión de FOM a partir de la población “e”, siguiendo un enfoque análogo al que se describe en el caso considerado anterior (calidad en el punto de extremo).

5 Lo siguiente es una breve descripción que aborda la arquitectura de un banco de pruebas sobre la base de las premisas establecidas sobre el método descrito en lo que antecede, que tiene por objeto soportar los análisis estocásticos de diferentes aspectos de trayectoria según se requiera para ejecutar muchos casos de estudio diferentes.

10 Con el fin de proporcionar una visión amplia de la arquitectura, la siguiente descripción presenta tanto una vista estática de sus componentes lógicos principales como una vista dinámica que detalla las interacciones principales entre los mismos.

La figura 14 muestra la arquitectura lógica de banco de pruebas global, incluyendo sus tres sistemas principales (r-DST, s-TP y p-DMET) y los subsistemas de su elemento central, que es la unidad de procesamiento de predicción de trayectoria estocástica (1), s-TP.

15 Las funciones principales de los sistemas / subsistemas que se identifican en el diagrama de la figura 14 junto con sus interfaces, se explican posteriormente.

a) Unidad de DST robusta (3), r-DST:

20 En general, las DST existentes basan su proceso de toma de decisiones en predictores de trayectoria (TP, *trajectory predictor*), por lo general un componente interno que se desarrolla *ad hoc*, que se basan en una única trayectoria predicha (determinista) para cada conjunto de entradas tales como tipo de AV, definición de trayectoria y escenario atmosférico.

25 La arquitectura que se propone mantiene esta funcionalidad, a pesar de que la TP se presenta como una infraestructura de cálculo de trayectoria (TC, *trajectory computation*) basada en AIDL externa. Las interfaces 1, 5, 7 y 8 que se muestran en la figura 14, permiten que la DST, de forma respectiva, establezca el dominio en 4D para el cual se necesita un AM, seleccione el tipo de AV, proporcione la intención de aeronave y solicite / recupere la trayectoria predicha.

30 El concepto de DST robusta que se considera en el presente caso, no obstante, difiere de las DST existentes en que se habilitan mecanismos nuevos para permitir que la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST, base su proceso de toma de decisiones en información adicional acerca de la sensibilidad de las trayectorias predichas a aspectos que se sabe que son inciertos. Además, tales mecanismos permiten que la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST, seleccione los aspectos específicos de la trayectoria predicha cuya incertidumbre es relevante para el proceso de toma de decisiones.

35 La nueva funcionalidad se logra a través de la interfaz 13 de la figura 14, que permite que la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST, dote a la unidad de procesamiento de predicción de trayectoria estocástica (1), s-TP, del FOM de interés, criterios de selección de trayectoria (TSC, *Trajectory Selection Criteria*), e información de configuración acerca de cómo aleatorizar las variables estocásticas que están implicadas en el proceso de TC (estocástico), de tal modo que la unidad de procesamiento de predicción de trayectoria estocástica (1), s-TP, devuelve la trayectoria predicha robusta (RPT, *robust predicted trajectory*) y la incertidumbre de FOM que se calcula en consecuencia. La interfaz 13 de la figura 14 también dota, a la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST, de metadatos en relación con las capacidades de aleatorización de s-TP; esencialmente los parámetros que se pueden aleatorizar, el rango de valores que pueden adoptar los mismos y una medida de la complejidad que está implicada en el cálculo para la configuración de aleatorización dada.

45 Las tablas de las figuras 29a y 29b proporcionan detalles adicionales acerca de las interacciones entre la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST, y la unidad de procesamiento de predicción de trayectoria estocástica (1), s-TP.

b) Unidad de procesamiento de predicción de trayectoria basada en AIDL estocástica (1), s-TP:

La unidad de procesamiento de predicción de trayectoria estocástica (1), s-TP, está constituida por dos componentes principales, que se representan en la figura 14 como unidad de motor de aleatorización (4), RE, y unidad de cálculo de trayectoria (5), TC. Esencialmente, el enfoque se basa en una simulación de Monte Carlo. Por lo tanto, la unidad de motor de aleatorización (4), RE, trabaja de forma iterativa con la unidad de cálculo de trayectoria subyacente (5), TC, que calcula una trayectoria para cada combinación de la totalidad de las variables estocásticas que son seleccionadas por la unidad de motor de aleatorización (4), RE. Después de que las variables estocásticas que intervienen en el proceso de aleatorización hayan tomado todos sus valores posibles, lo que es diseñado por la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST, la unidad de motor de aleatorización (4), RE, recopila todas las trayectorias predichas “posibles” y realiza el análisis de FOM que se ha explicado en lo que antecede (un análisis de una única trayectoria y de múltiples trayectorias) o uno generalizado de forma similar, en el caso de que las variables estocásticas que se consideran difiriesen del caso en lo que antecede.

- Unidad de motor de aleatorización (4), RE:

La unidad de motor de aleatorización (4), RE, logra la funcionalidad de la unidad de procesamiento de predicción de trayectoria estocástica (1), s-TP, a través de la interfaz 13 que se ha descrito en lo que antecede. Para ese fin, la unidad de motor de aleatorización (4), RE, interacciona a través de las interfaces 8, 9, 10, 11 y 12 con la unidad de cálculo de trayectoria subyacente (5), TC, tal como se describe en las tablas de las figuras 30a y 30b.

La unidad de motor de aleatorización (4), RE, se encuentra a cargo de la construcción de la secuencia de aleatorización que, por lo general, consiste en una serie de bucles anidados, asociado cada uno con un único parámetro estocástico que barre su rango correspondiente en unos pasos que son seleccionados por la unidad de motor de aleatorización (4), RE, para manejar de forma apropiada la complejidad de cálculo. Cada vez que se realiza una combinación específica, la unidad de motor de aleatorización (4), RE, llama a la interfaz 8 y recupera la trayectoria predicha que está asociada con tal combinación. Cuando esta acaba de barrer la totalidad de los rangos de los parámetros estocásticos, la unidad de motor de aleatorización (4), RE, conmuta para realizar el análisis que se ha explicado en lo que antecede.

- Unidad de cálculo de trayectoria (5), TC:

La unidad de cálculo de trayectoria (5), TC, es el componente a cargo de calcular una trayectoria predicha para cada conjunto de entradas, incluyendo valores dados para los parámetros estocásticos que están implicados. Por lo tanto, a pesar de que los parámetros estocásticos se manejan a través de sus interfaces con la unidad de motor de aleatorización (4), RE, la unidad de cálculo de trayectoria (5), TC, funciona de una forma determinista. Sus elementos principales son el motor de trayectorias (TE, *trajectory engine*), el modelo de desempeño de aeronave (APM, *aircraft performance model*) y el modelo de atmósfera probabilístico (PAM, *probabilistic atmosphere model*). La tabla de la figura 31 describe las interfaces entre los mismos.

c) Unidad de servicio meteorológico digital probabilístico (2), p-DMET:

La unidad de servicio meteorológico digital probabilístico (2), p-DMET, del sistema de la presente divulgación, se encuentra a cargo de dotar, a la unidad de procesamiento de predicción de trayectoria estocástica (1), s-TP, de los pronósticos atmosféricos probabilísticos sobre la base del enfoque de colectividad que se propone. Para ese fin, la misma interacciona con la unidad de cálculo de trayectoria (5), el componente interno PAM de la TC, a través de la interfaz 2, cuyo diseño de alto nivel se bosqueja en la tabla de la figura 32.

El presente método y sistema son innovadores, en comparación con el estado actual de la técnica, debido a que:

1) este implica una combinación sin precedentes de capacidades y campos de competencia (pronóstico meteorológico, servicios meteorológicos, predicción y gestión de trayectoria, procesamiento de conjuntos masivos de datos y operaciones de tráfico aéreo);

2) el mismo se centra en la incertidumbre de pronóstico meteorológico, en combinación con otras fuentes de incertidumbre, que se propagan por la totalidad del ciclo de vida de extremo a extremo de la trayectoria del aeroplano, con el objeto de entender y cuantificar detenidamente su efecto final sobre las decisiones operativas del usuario;

3) el método especifica unas métricas (en términos de los FOM o unos parámetros agregados equivalentes) que caracterizan la incertidumbre en relación con los productos actuales del estado de la técnica para el soporte de decisiones de gestión de tráfico aéreo (ATM, *Air Traffic Management*) y, por lo tanto, una medición del beneficio operativo de los productos futuros;

En particular, las tres unidades de investigación principales contienen un número de aspectos innovadores específicos:

con respecto a la unidad de servicio meteorológico digital probabilístico (2), p-DMET:

- 4) a pesar de que se encuentran ampliamente disponibles pronósticos meteorológicos genéricos, no se encuentran disponibles productos / servicios de pronóstico meteorológico especializados que se personalizan para las operaciones de líneas aéreas y de ATM en un contexto basado en trayectoria;
- 5) la incertidumbre de pronóstico meteorológico se extrae de una colectividad de modelos y condiciones dirigidos por tres organizaciones diferentes con experiencia consolidada en el sector, lo que asegura unos resultados de amplio alcance;

con respecto a la unidad de procesamiento de predicción de trayectoria estocástica (1), s-TP:

- 6) la TP estocástica en lugar de determinista que es alimentada por medio de pronósticos meteorológicos probabilísticos es nueva en la gestión de tráfico aéreo (ATM, *Air Traffic Management*);
- 7) nunca se ha abordado la interacción entre la unidad de procesamiento de predicción de trayectoria estocástica (1), s-TP, y la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST, en términos del FOM y la incertidumbre relacionada;

con respecto a la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), r-DST:

- 8) el uso de unos FOM personalizados para caracterizar la incertidumbre de TP para su aprovechamiento en el soporte de decisiones automatizado es nuevo en comparación con el estado actual de la técnica, en el que las DST que se basan en una TP determinista no justifican la incertidumbre;
 - 9) nunca se ha intentado antes el análisis de la correlación entre la incertidumbre en las medidas de FOM y el desempeño de DST.
- 20) Hasta el momento, nunca se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad para bosquejar los requisitos que es necesario que satisfagan los modelos meteorológicos que subyacen a las DST basadas en TP para soportar de manera eficaz los objetivos del programa SESAR (*Single European Sky ATM Research*, investigación asociada a la gestión del tránsito aéreo del cielo único europeo).

REIVINDICACIONES

1. Método para definir y predecir trayectorias de aeronave, para su uso en la gestión de vuelo de una aeronave, que comprende:

- 5 a. adquirir unos datos de entrada tanto de características de desempeño de aeronave como de datos atmosféricos,
- b. definir unos parámetros de trayectoria a los que se ha de someter la trayectoria de aeronave,

en donde:

- 10 - los parámetros de trayectoria de aeronave se definen por medio de un lenguaje de descripción de intención de aeronave específico, que está constituido por unos símbolos específicos, en donde cada uno de dichos símbolos específicos es una combinación de instrucciones que se corresponden con al menos tres restricciones de trayectoria y cuatro instrucciones de configuración aplicables durante el intervalo de tiempo para el cual el símbolo correspondiente define la trayectoria, en el que cada segmento de la trayectoria de aeronave es descrito por cada símbolo del lenguaje de descripción de intención de aeronave, en el que cada combinación específica de símbolos del lenguaje de descripción de intención de aeronave describe completamente la totalidad de una trayectoria;
- 15 - los datos atmosféricos se adquieren en la forma de una pluralidad de colectividades de pronósticos atmosféricos, expresando cada pronóstico atmosférico dentro de una colectividad de pronósticos atmosféricos un escenario meteorológico determinado con una probabilidad asociada;

caracterizado por que el método comprende adicionalmente:

- 20 c. calcular una trayectoria predicha a partir de cada pronóstico atmosférico de una colectividad de pronósticos atmosféricos, teniendo asociada dicha trayectoria predicha una información con respecto a un determinado factor de calidad de la trayectoria de aeronave;

en donde una colectividad de trayectorias predichas se obtiene a partir de cada colectividad de pronósticos atmosféricos, teniendo cada trayectoria predicha de la colectividad de trayectorias predichas una probabilidad asociada derivada de la probabilidad de cada pronóstico atmosférico dentro de una colectividad de pronósticos atmosféricos, y;

- 25 d. seleccionar una trayectoria predicha de entre la colectividad de trayectorias predichas, al:
 - seleccionar un factor de calidad específico de cada trayectoria predicha de aeronave;
 - 30 - determinar, para cada trayectoria predicha dentro de una colectividad de trayectorias predichas, el valor del factor de calidad seleccionado;
 - calcular, de acuerdo con un criterio estadístico predeterminado, un valor estadístico del factor de calidad seleccionado, representando dicho valor estadístico calculado, de acuerdo con el factor de calidad seleccionado, la totalidad de las trayectorias predichas dentro de cada colectividad de trayectorias predichas;
 - 35 - determinar la trayectoria predicha, a partir de cada colectividad de trayectorias predichas, cuyo valor para el factor de calidad seleccionado se encuentra más cerca del valor estadístico previamente calculado del factor de calidad seleccionado;
 - calcular, de acuerdo con un criterio estadístico predeterminado, la dispersión de valores para el factor de calidad seleccionado, con respecto al valor estadístico calculado del factor de calidad seleccionado para la totalidad de las trayectorias predichas de cada colectividad de trayectorias predichas;
 - 40 - seleccionar, de entre las trayectorias predichas calculadas, la trayectoria predicha cuyo valor para el factor de calidad seleccionado se encuentra más cerca del valor estadístico previamente calculado del factor de calidad seleccionado, y;

- e. utilizar la trayectoria predicha seleccionada en la gestión de vuelo de una aeronave en al menos un segmento de un vuelo.

45 2. Método para definir y predecir trayectorias de aeronave según la reivindicación 1, en donde cada uno de dichos

símbolos específicos del lenguaje de descripción de intención de aeronave está constituido por la combinación de al menos tres restricciones de trayectoria y cuatro instrucciones de configuración, en donde se hace frente a la totalidad de los grados de libertad de la trayectoria de aeronave mediante la imposición de las tres restricciones de trayectoria, definiéndose por lo tanto completamente la trayectoria de aeronave mediante la imposición de las tres restricciones de trayectoria, seleccionadas estas restricciones de entre al menos lo siguiente:

- 5 i. longitud;
- ii. latitud;
- iii. altitud;
- iv. velocidad verdadera;
- 10 v. marcación;
- vi. mando de gases;
- vii. ángulo de trayectoria;
- viii. ángulo de alabeo;
- ix. hipersustentación;
- 15 x. frenos aerodinámicos.

3. Método para definir y predecir trayectorias de aeronave según la reivindicación 1, en donde dicho factor de calidad se selecciona de entre al menos:

- i. combustible quemado;
- ii. tiempo de llegada en un punto de posición dado;
- 20 iii. índice de coste;
- iv. rango de distancia horizontal cubierta;
- v. posición en 2D en un instante dado;
- vi. posición en 2D en un punto de posición dado;
- vii. posición en 2D sobre un segmento de trayectoria;
- 25 viii. altitud en un instante dado;
- ix. altitud en un punto de posición dado;
- x. altitud sobre un segmento de trayectoria;
- xi. posición en 3D en un instante dado;
- xii. posición en 3D en un punto de posición dado;
- 30 xiii. posición en 3D sobre un segmento de trayectoria;
- xiv. posición en 4D en un instante dado;
- xv. posición en 4D en un punto de posición dado;
- xvi. posición en 4D sobre un segmento de trayectoria;

xvii. velocidad en un punto de posición dado;

xviii. velocidad sobre un segmento de trayectoria;

xix. actitud en un punto de posición dado;

xx. actitud sobre un segmento de trayectoria;

5 xxi. vórtice de estela en un instante dado;

xxii. vórtice de estela en un punto de posición dado.

4. Sistema para definir y predecir trayectorias de aeronave, para su uso en la gestión de vuelo de una aeronave, comprendiendo dicho sistema:

10 a. una unidad de procesamiento (1), para calcular trayectorias predichas para cada segmento de un vuelo de aeronave utilizando un lenguaje de descripción de intención de aeronave específico, calculándose cada trayectoria predicha calculada sobre la base de unos datos de entrada estocásticos, siendo por lo tanto estocástica cada trayectoria predicha calculada, y teniendo una probabilidad asociada, seleccionados los datos de entrada de entre al menos lo siguiente:

 i. parámetros de modelo de desempeño de aeronave;

15 ii. pronósticos atmosféricos;

b. una unidad de servicio meteorológico digital probabilístico (2), que está configurada para dotar, a la unidad de procesamiento (1) para calcular trayectorias predichas, de la entrada de una colectividad de pronósticos atmosféricos, expresando cada pronóstico atmosférico dentro de una colectividad de pronósticos atmosféricos un escenario meteorológico determinado con una probabilidad asociada;

20 c. una unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), que está configurada para:

 i. dotar, a la unidad de procesamiento (1) para calcular trayectorias predichas, de unos datos de entrada necesarios para predecir trayectorias, y;

 ii. seleccionar una trayectoria predicha de entre las trayectorias predichas que son calculadas por la unidad de procesamiento (1) para calcular trayectorias predichas;

25 en donde la unidad de procesamiento (1) para calcular trayectorias predichas está configurada para:

 - calcular una trayectoria predicha a partir de cada pronóstico atmosférico de las colectividades de pronósticos atmosféricos;

30 - determinar, para cada trayectoria predicha dentro de una colectividad de trayectorias predichas, el valor de un factor de calidad específico que es seleccionado por la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3);

 - calcular, de acuerdo con un primer criterio estadístico predeterminado, un valor estadístico del factor de calidad seleccionado, representando dicho valor estadístico calculado, de acuerdo con el factor de calidad seleccionado, la totalidad de las trayectorias predichas dentro de cada colectividad de trayectorias predichas;

35 - determinar la trayectoria predicha, a partir de cada colectividad de trayectorias predichas, cuyo valor para el factor de calidad seleccionado se encuentra más cerca del valor estadístico previamente calculado del factor de calidad seleccionado;

40 - calcular, de acuerdo con un segundo criterio estadístico predeterminado, la dispersión de valores para el factor de calidad seleccionado, con respecto al valor estadístico calculado del factor de calidad seleccionado para la totalidad de las trayectorias predichas de cada colectividad de trayectorias predichas;

en donde la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3) está configurada para seleccionar, de entre las trayectorias predichas calculadas, la trayectoria predicha cuyo valor para el factor de calidad seleccionado se encuentra más cerca del valor estadístico previamente calculado del factor de calidad

seleccionado; en donde la trayectoria predicha seleccionada es utilizada por un sistema de gestión de vuelo en el guiado de una aeronave en al menos un segmento de un vuelo.

5. Sistema para definir y predecir trayectorias de aeronave según la reivindicación 4, en donde la unidad de servicio meteorológico digital probabilístico (2) define:

5 a. un dominio de modelos atmosféricos que incluye uno o más parámetros que definen una región que encierra el volumen de espacio aéreo en el que se encuentra la trayectoria de vuelo;

b. un modelo atmosférico que proporciona múltiples escenarios atmosféricos de parámetros atmosféricos relevantes para el espacio aéreo, formando dichos escenarios unas colectividades de pronósticos atmosféricos.

10 6. Sistema para definir y predecir trayectorias de aeronave según la reivindicación 4, en donde la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3) define:

a. una trayectoria de vuelo predeterminada que incluye uno o más parámetros que definen la trayectoria de vuelo, por medio de la imposición de una combinación de tres parámetros de restricción de trayectoria para cada segmento de la trayectoria de vuelo;

15 b. un modelo de desempeño de aeronave que incluye uno o más parámetros que definen la respuesta de aeronave con condiciones externas;

c. unos parámetros en relación con las condiciones iniciales de aeronave en el comienzo de un segmento de la trayectoria de vuelo;

d. un conjunto de parámetros que definen al menos un factor de calidad de una trayectoria predicha que es calculada por la unidad de procesamiento (1) para calcular trayectorias predichas;

20 e. al menos un criterio para elegir una trayectoria predicha de entre al menos una colectividad de trayectorias predichas que son calculadas por la unidad de procesamiento (1) para calcular trayectorias predichas, basándose este al menos un criterio en buscar qué trayectoria predicha representa del mejor modo un valor estadístico central de un determinado factor de calidad;

25 f. al menos un criterio para el cálculo de una incertidumbre asociada con la que una trayectoria predicha elegida representa un valor estadístico central de un determinado factor de calidad.

7. Sistema para definir y predecir trayectorias de aeronave según la reivindicación 4, en donde la unidad de procesamiento (1) para calcular trayectorias predichas:

30 a. determina un conjunto de parámetros de entre los parámetros de entrada que son proporcionados por la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3), que se consideran estocásticos, estando por lo tanto sometido, este conjunto de parámetros, a incertidumbre;

b. determina el tipo y el rango de incertidumbre del conjunto estocástico de parámetros.

8. Sistema para definir y predecir trayectorias de aeronave según la reivindicación 4, en donde la unidad de procesamiento (1) para calcular trayectorias predichas:

35 a. determina, sobre la base de parámetros para el modelo atmosférico, el modelo de desempeño de aeronave, la descripción de la trayectoria de vuelo y las condiciones iniciales, un conjunto de datos que representa una trayectoria predicha;

b. asigna valores, con unos rangos respectivos de incertidumbre, a los parámetros que se van a hacer estocásticos, para crear una pluralidad de casos posibles del conjunto de datos que representa la trayectoria predicha;

40 c. calcula, sobre la base de la colectividad de pronósticos atmosféricos, la colectividad de trayectorias predichas, cada trayectoria predicha calculada sobre la base de un escenario atmosférico correspondiente;

d. evalúa el al menos un factor de calidad de cada trayectoria predicha dentro de una colectividad de trayectorias predichas, para obtener una población de valores de estos factores de calidad;

e. identifica, de acuerdo con el primer criterio estadístico predeterminado, una trayectoria predicha dentro de

cada colectividad de trayectorias predichas, que representa un valor central del al menos un factor de calidad evaluado;

5 f. obtiene, de acuerdo con el segundo criterio estadístico predeterminado, la dispersión de los valores del al menos un factor de calidad evaluado, que están asociados con las trayectorias restantes de la colectividad de trayectorias predichas, con respecto a la trayectoria predicha que se identifica en la fase previa.

9. Sistema para definir y predecir trayectorias de aeronave según la reivindicación 8, en donde la unidad de procesamiento (1) para calcular trayectorias predichas comprende al menos:

10 a. una unidad de motor de aleatorización (4), para asignar valores a los parámetros que se van a hacer estocásticos, que se reciben de la unidad de servicio meteorológico digital probabilístico (2) y la unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3);

b. una unidad de cálculo de trayectoria (5), para calcular trayectorias predichas sobre la base de unos datos de entrada que son proporcionados por la unidad de motor de aleatorización (4).

10. Sistema para definir y predecir trayectorias de aeronave según la reivindicación 4, en donde dichos datos de entrada se seleccionan de entre al menos lo siguiente:

15 i. parámetros de modelo de desempeño de aeronave;

ii. parámetros de descripción de trayectoria;

iii. factores de calidad predeterminados;

iv. criterios de selección de trayectoria;

v. pronósticos atmosféricos.

20 11. Sistema para definir y predecir trayectorias de aeronave según la reivindicación 4, en donde dicha unidad de herramienta de soporte de decisiones robusta (3) está configurada para dotar, a la unidad de procesamiento (1) para calcular trayectorias predichas, de la entrada de:

- parámetros de modelo de desempeño de aeronave;

- parámetros de descripción de trayectoria;

25 - factores de calidad seleccionados, y;

- criterios de selección de trayectoria.

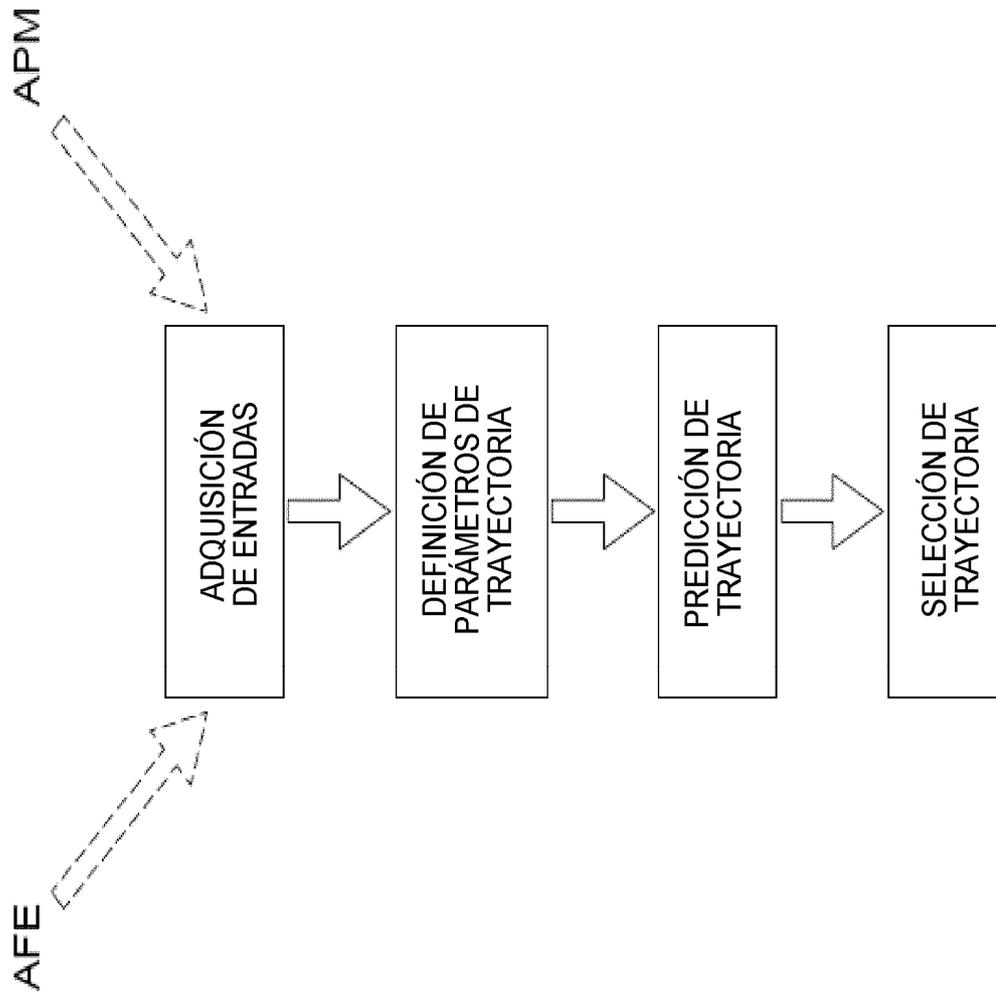


FIG. 1

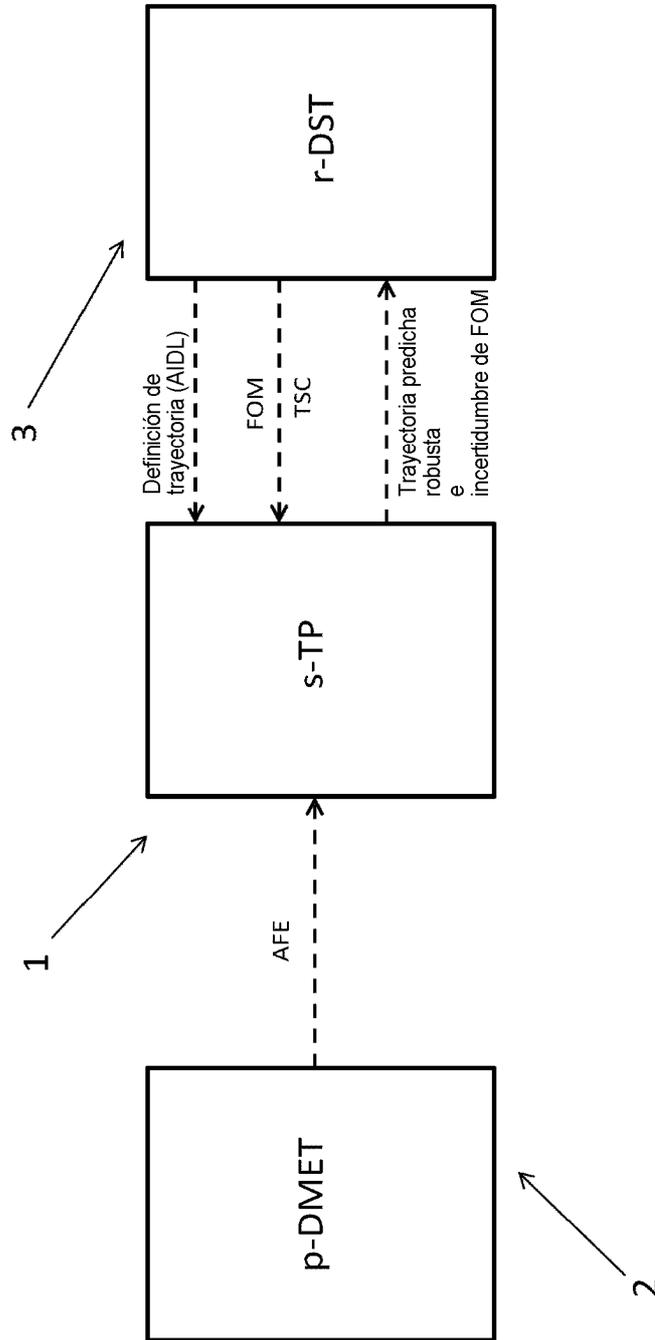


FIG. 2

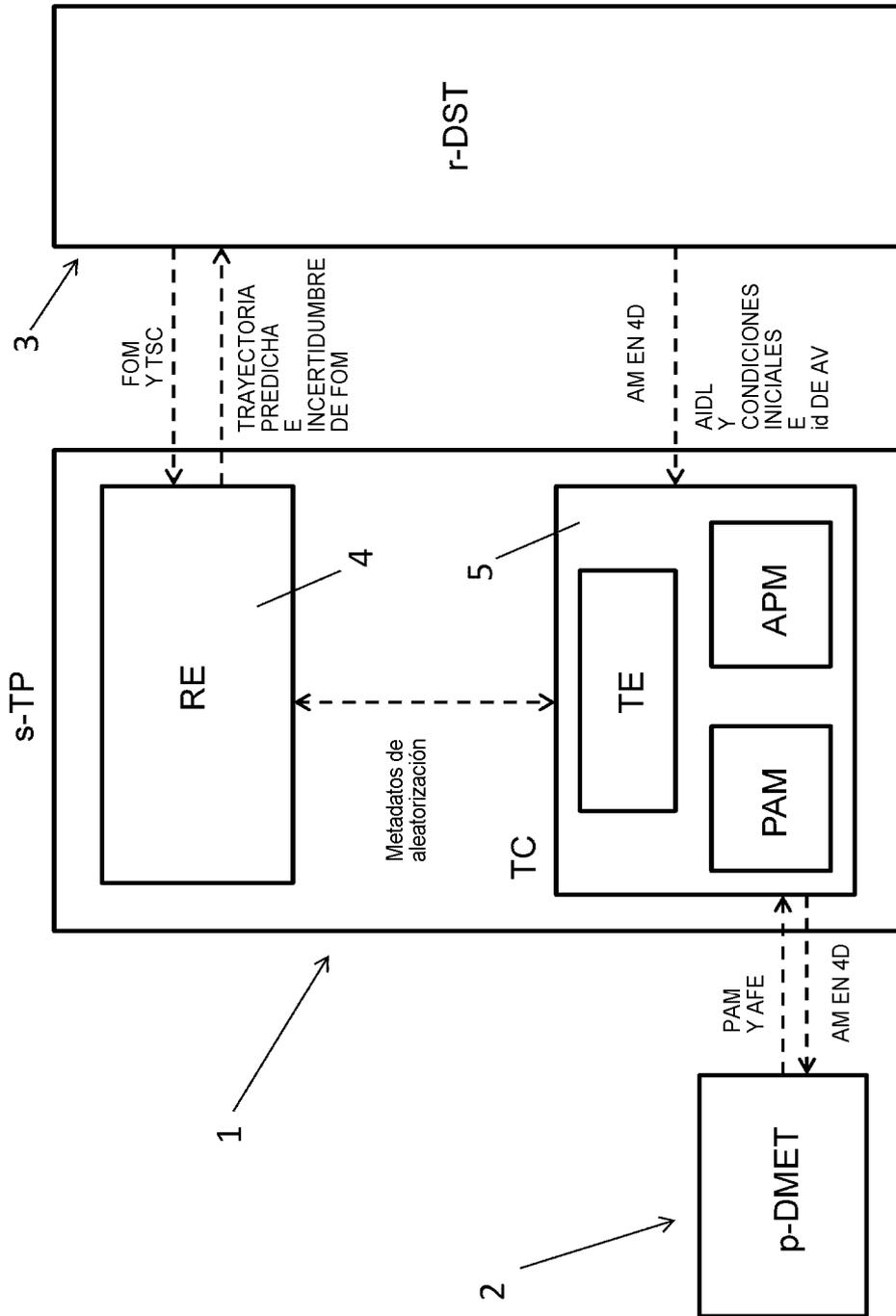


FIG. 3

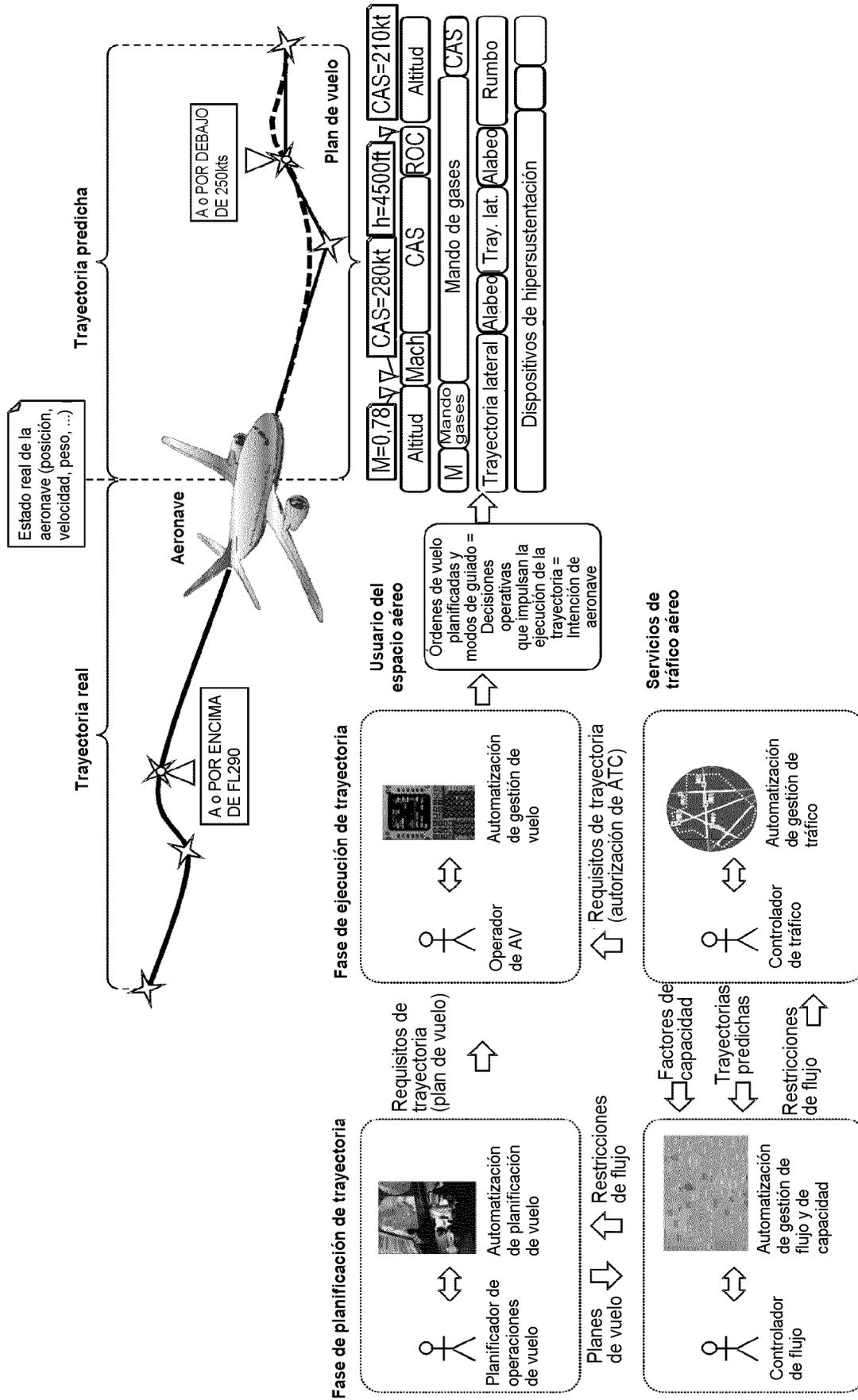


FIG. 4

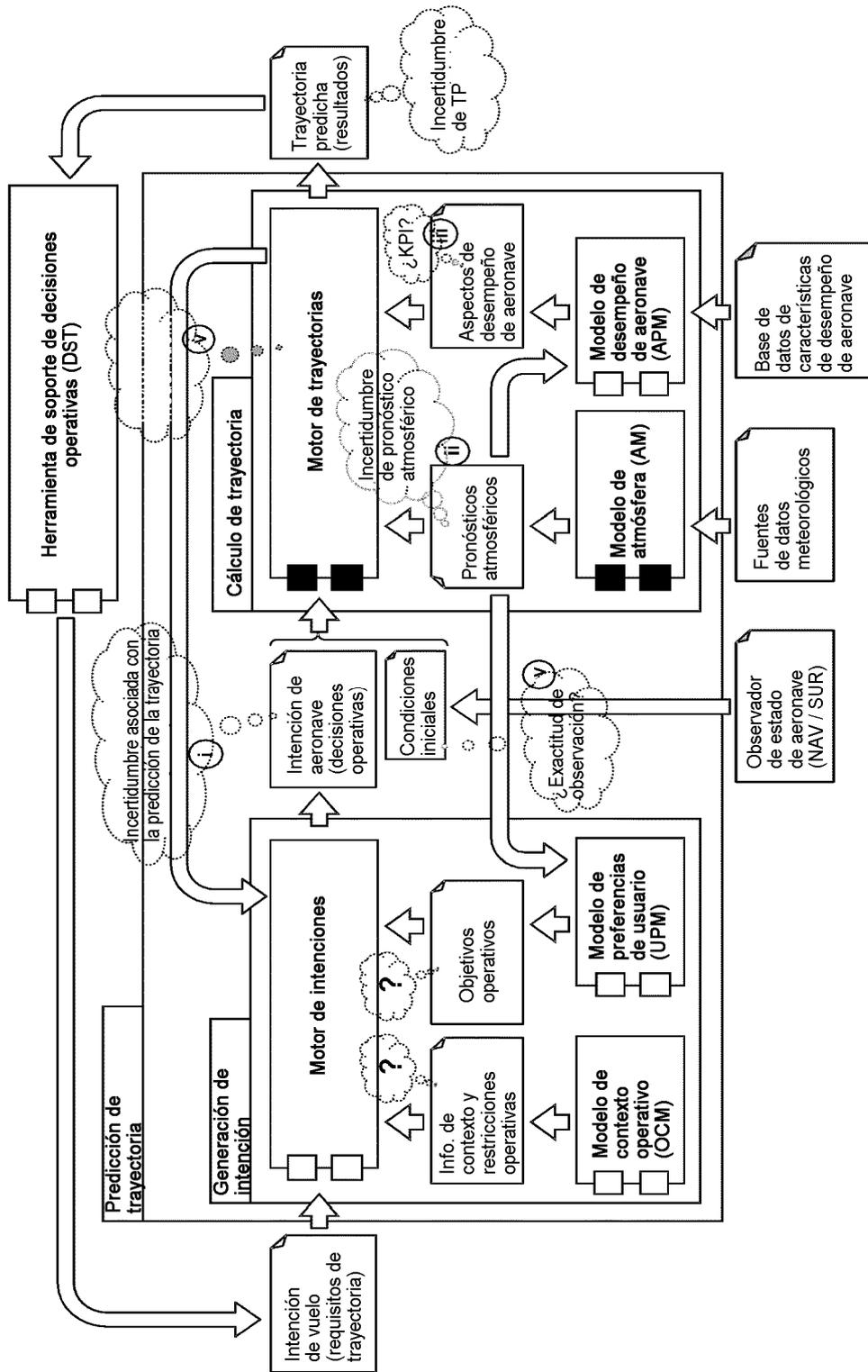


FIG. 5

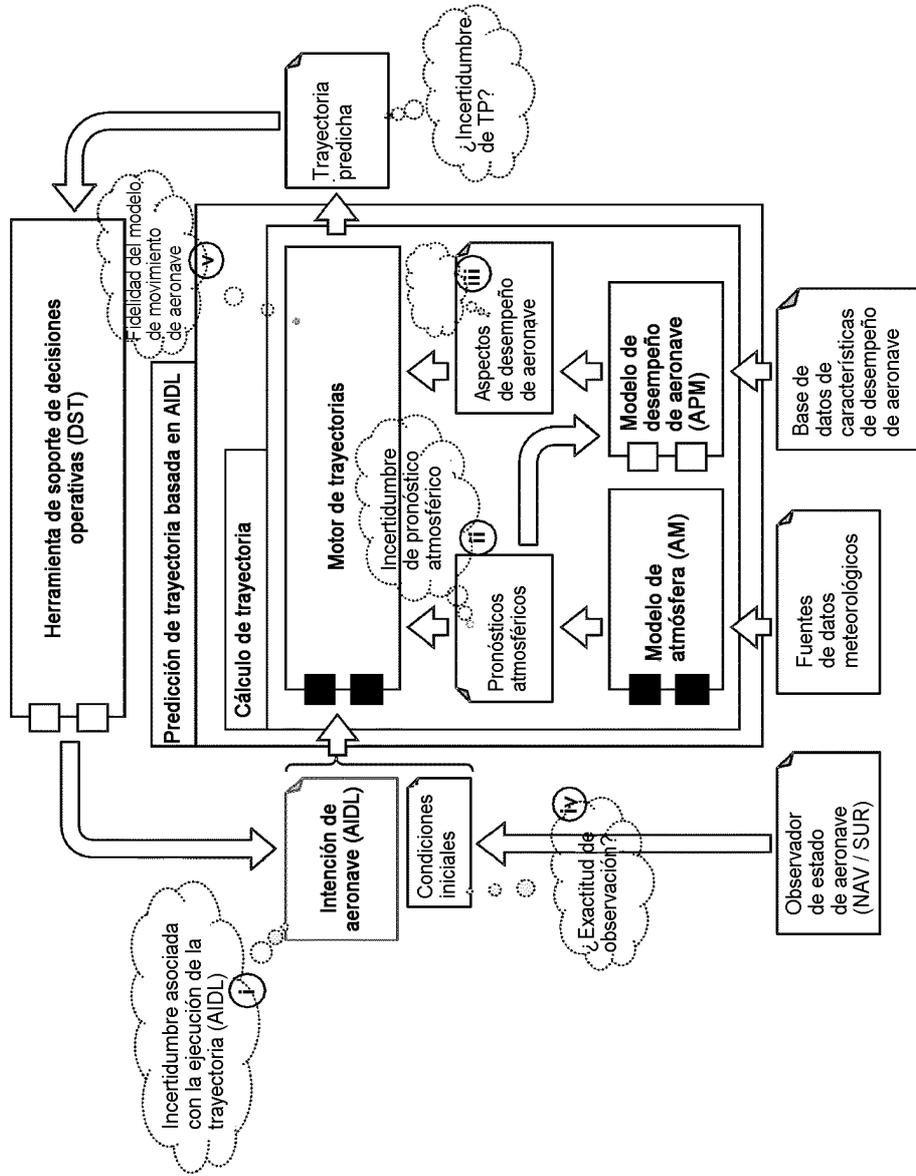


FIG. 6

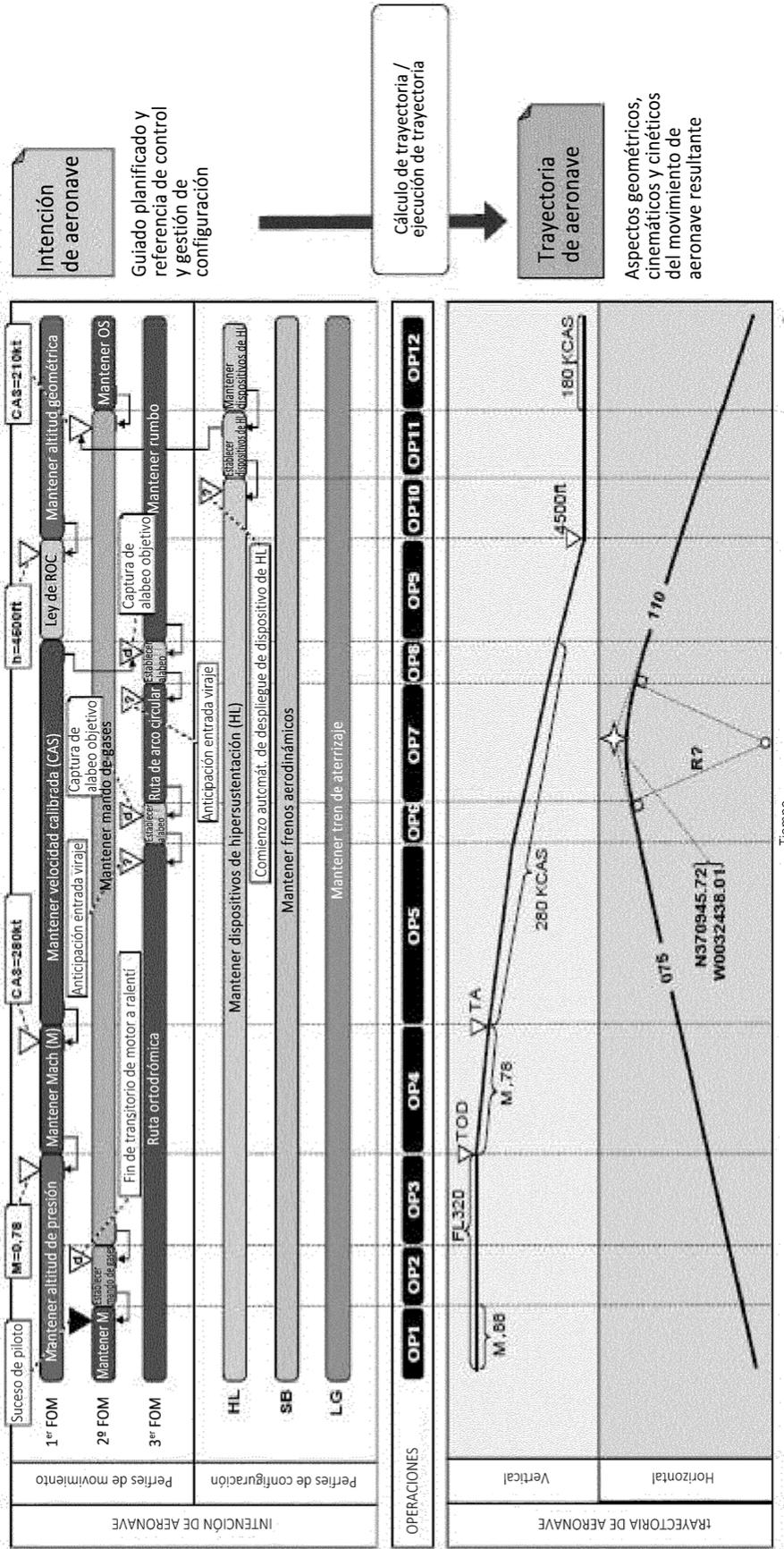


FIG. 7

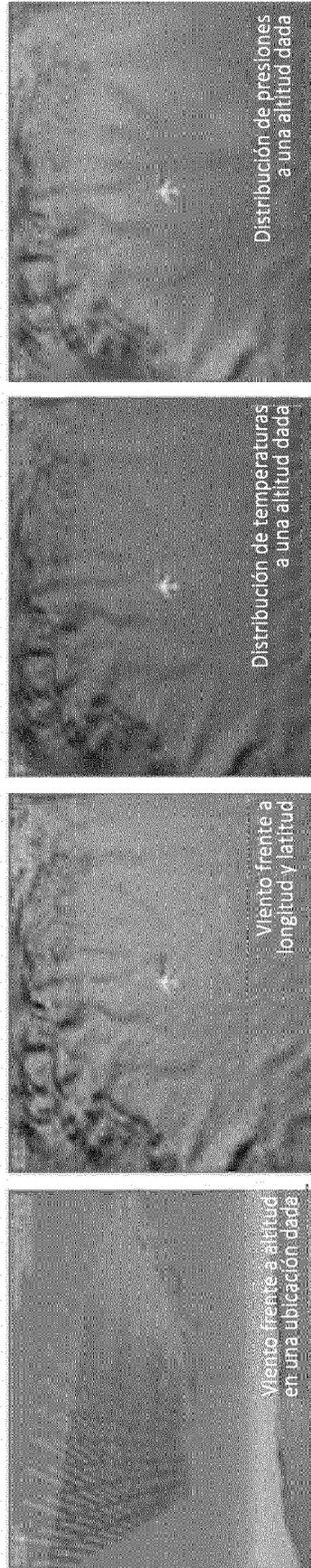


FIG. 8

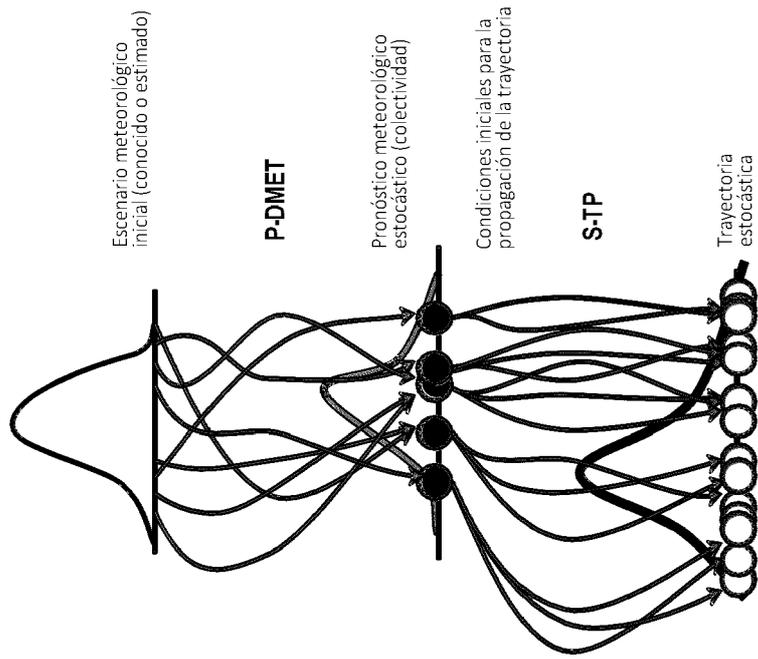


FIG. 9

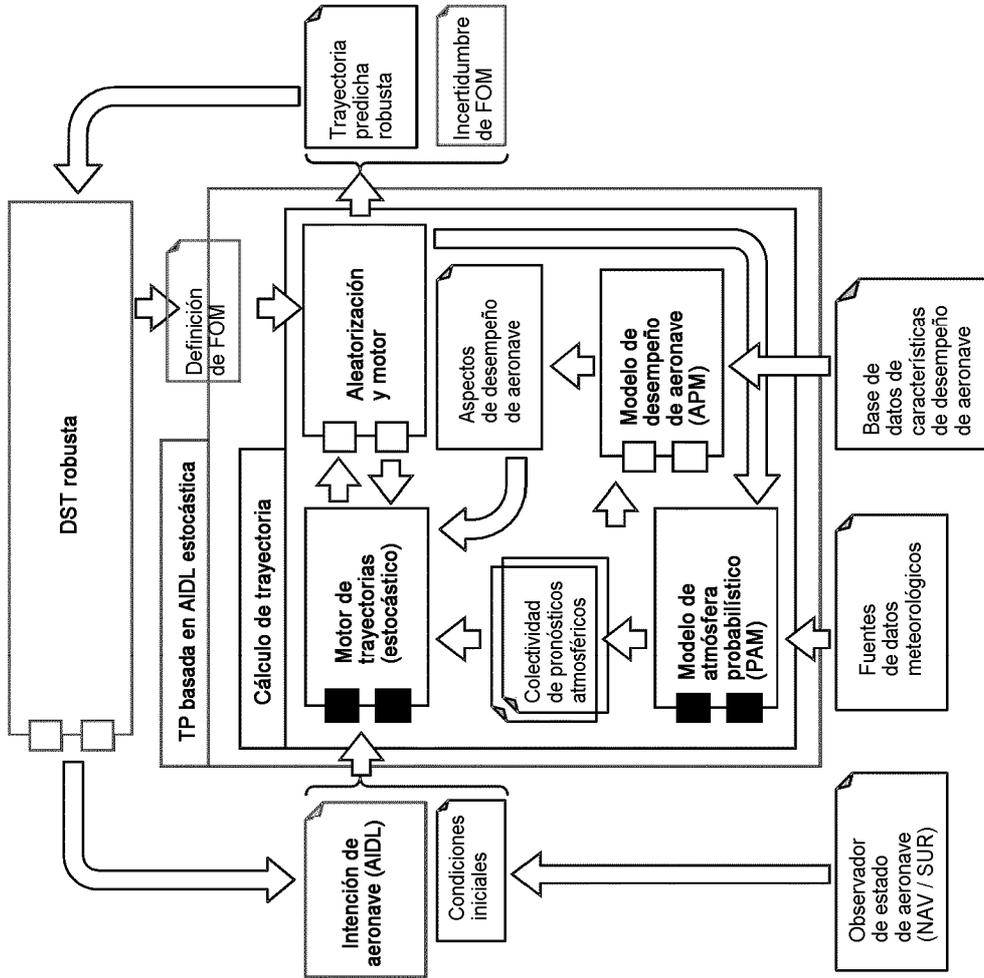


FIG. 10

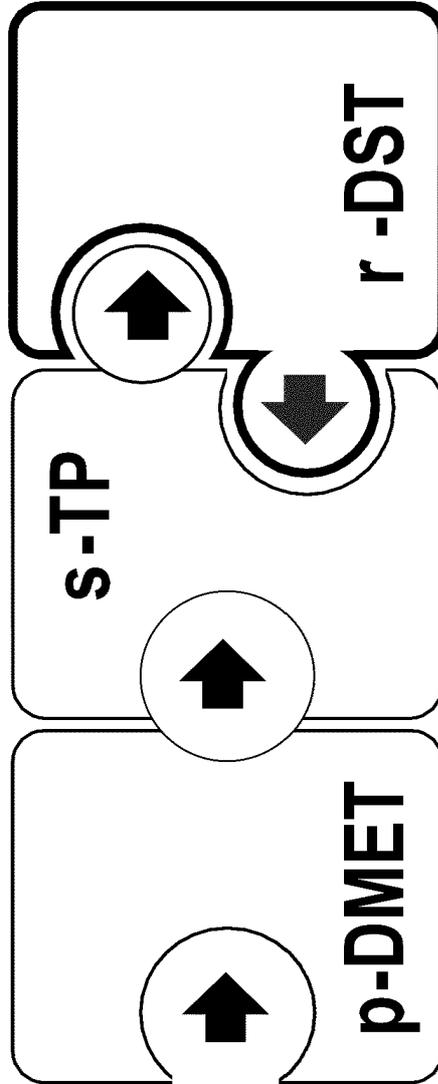


FIG. 11

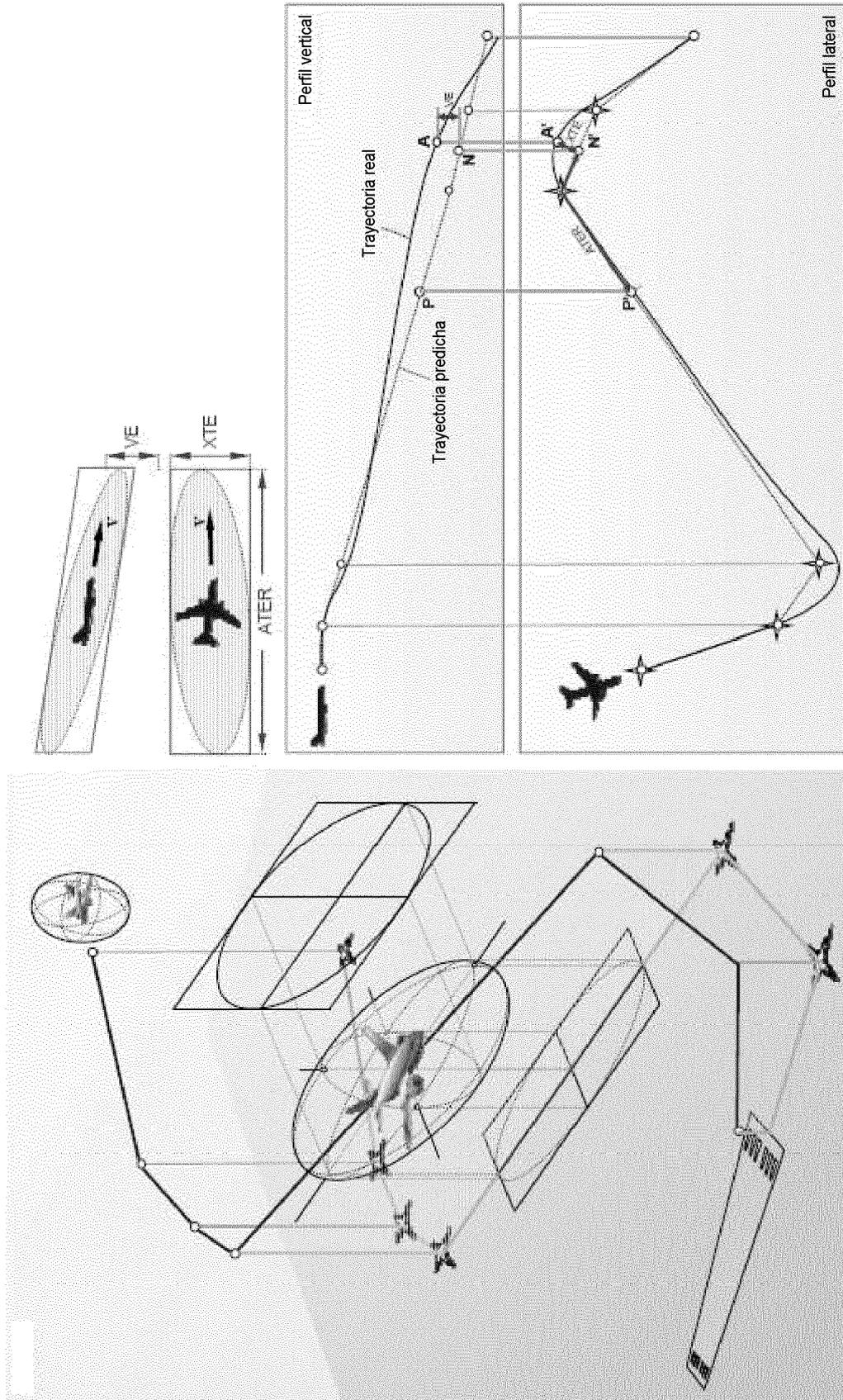


FIG. 12

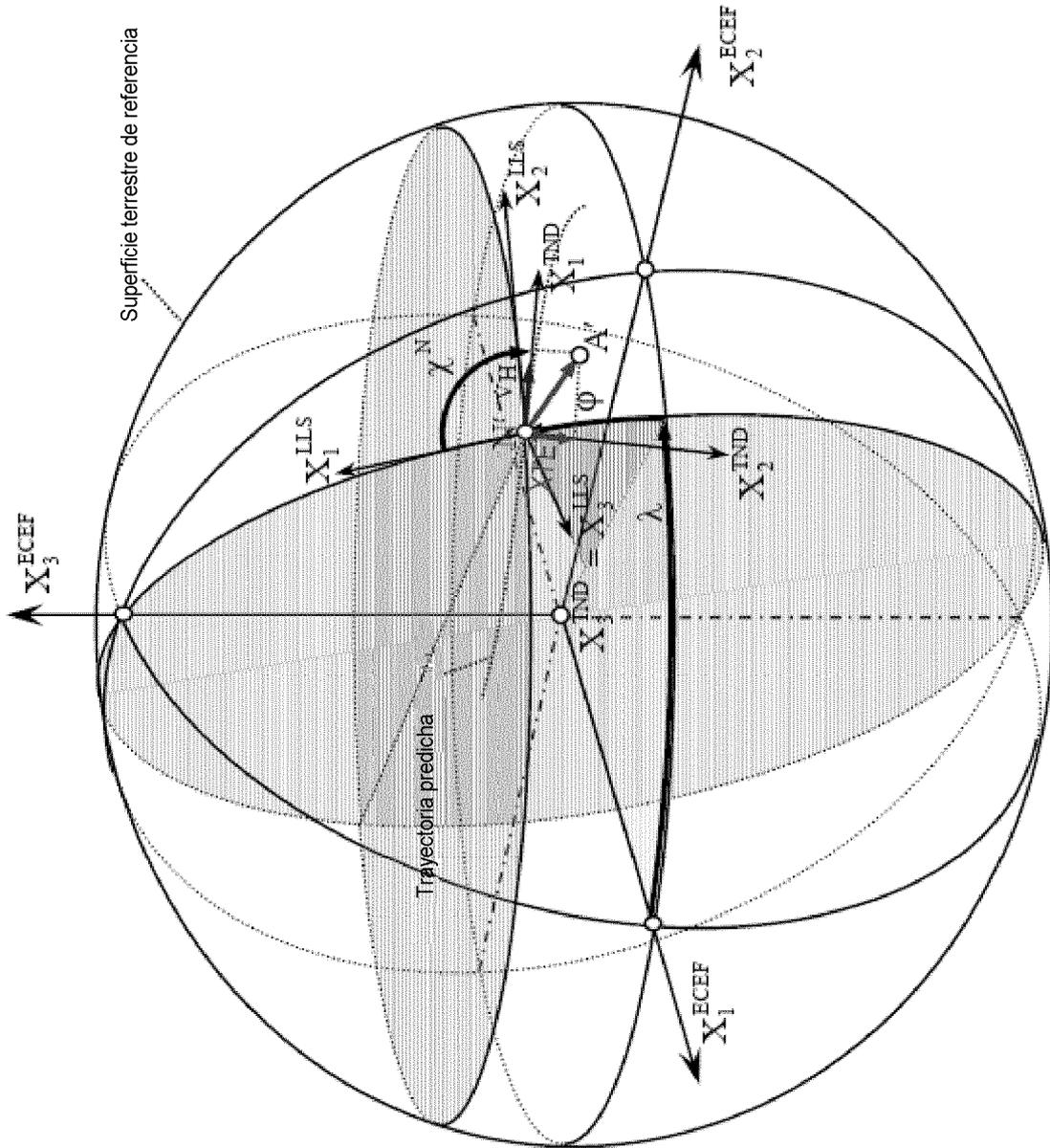


FIG. 13

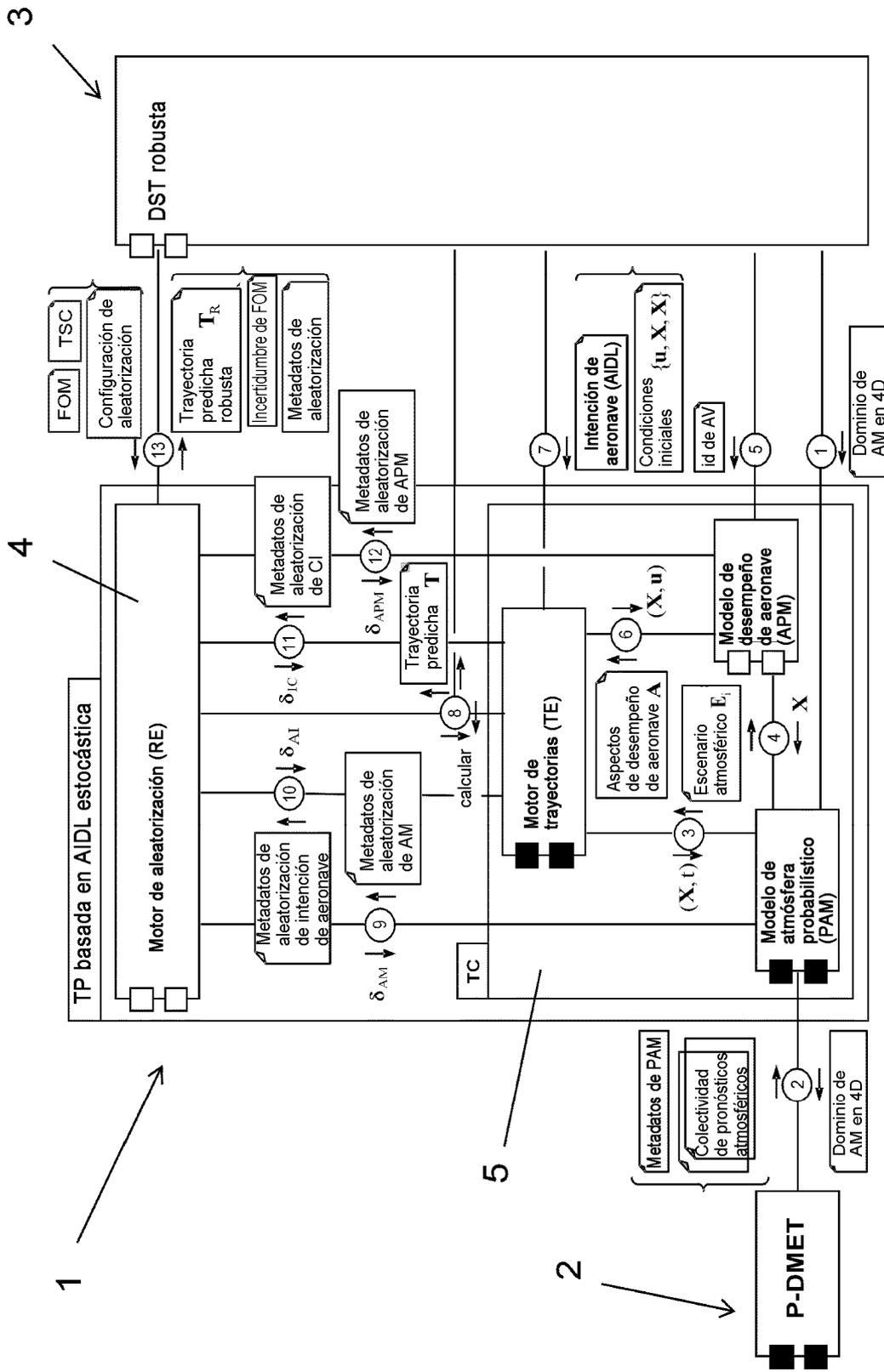


FIG. 14

Variable independiente		t	tiempo
Variables de estado	X	λ	longitud
		φ	latitud
		h	altitud
		m	masa
		V_{TAS}	velocidad verdadera
		χ_{TAS}	marcación
Variables de control	u	δ_T	mando de gases
		γ_{TAS}	ángulo de trayectoria
		μ_{TAS}	ángulo de alabeo
Variables de configuración	Δ	δ_{HL}	hipersustentación
		δ_{SB}	frenos aerodinámicos
		δ_{LG}	tren de aterrizaje
		δ_{AR}	referencia de altitud
Variables de (modelo terrestre) ambientales	E	$\delta=p/p_0$	relación de presiones
		$\theta=T/T_0$	relación de temperaturas
		V	geopotencial
		g	gravedad
		w_1	componente del viento - este
		w_2	componente del viento - norte
		w_3	componente del viento - Cenit
Variables de desempeño de aeronave	A	L	sustentación
		D	resistencia aerodinámica
		T	empuje
		F	flujo de combustible

FIG. 15

A	L	$f(\delta, M, \alpha, \delta_{HL}, \delta_{SB})$	Sustentación	Aerodinámica
	D	$f(\delta, M, \alpha, \delta_{HL}, \delta_{SB}, \delta_{LG})$	Resistencia aerodinámica	
	T	$f(\delta, M, \delta_T)$	Empuje	Propulsión
	F	$f(\delta, \theta, M, \delta_T)$	Consumo de combustible	Peso

FIG. 16

E	V	$f(\varphi, h)$	Geopotencial	Geoide	
	g		Gravedad (elipsoidal)		
	$\delta = p/p_0$	$f(\lambda, \varphi, h, t)$	Relación de presiones	Presión	Atmósfera
	$\theta = T/T_0$		Relación de temperaturas	Temperatura	
	w ₁		Componente del viento - este	Viento horizontal	
	w ₂		Componente del viento - norte		
	w ₃		Componente del viento - Cenit	Viento vertical	

FIG. 17

Movimiento	Lateral	μ_{TAS}	Actitud lateral		Geometría	
		χ_{TAS}	Geometría en 2D	Geometría en 3D		
		λ, φ r				
	Longitudinal	h	Altitud	Actitud longitudinal		
		γ_{TAS}				
		$v_{TAS} \sin \gamma_{TAS}$	Velocidad vertical			
		dv_{TAS}/dh	Aceleración			
	De propulsión	$v_{TAS} \cos \gamma_{TAS}$	Velocidad horizontal		Cinemática	
		v_{TAS}	Velocidad absoluta			
		t	Sincronización			
		δ_T	Acciones de propulsión			
		T				
		F	Acciones gravitatorias			
	$m; W$					
Aerodinámico	L	Acciones aerodinámicas				
	D					
Configuración	Hipersustentación	δ_{HL}	Configuración aerodinámica			
	Frenos aerodinámicos	δ_{SB}				
	Tren de aterrizaje	δ_{LG}				
	Referencia de altitud	δ_{AR}	Configuración de referencia de altitud			

FIG. 18

Espacialmente correspondiente	P	Posición predicha en el instante t	Coincidentes en el tiempo
	A	Posición real en el instante t	
	N	Posición nominal (a lo largo de la trayectoria predicha) más cercana a la posición real	

FIG. 19

Predicho	Real	Nominal	Concepto de error de TP	Métrica
t^P	$t^A = t^P$	t^N	Error a lo largo de la ruta - tiempo (ATET)	$ATET = t^N - t^P$
r^P	r^A	r^N	Error a lo largo de la ruta - distancia (ATER)	$ATER = r^N - r^P$
λ^P, φ^P	λ^A, φ^A	λ^N, φ^N	Error transversal a la ruta (XTE)	$XTE = \overline{N^A} \vec{A}_2^{TND}$
h^P	h^A	h^N	Error vertical (VE)	$VE = h^A - h^N$

FIG. 20

Predicho	Real	Nominal	Concepto de error de TP	Métrica
	χ_{TAS}^A	χ_{TAS}^N	Error de marcación (BE)	$BE = \chi_{TAS}^A - \chi_{TAS}^N$
	γ_{TAS}^A	γ_{TAS}^N	Error de ángulo de trayectoria (PAE)	$PAE = \gamma_{TAS}^A - \gamma_{TAS}^N$
	μ_{TAS}^A	μ_{TAS}^N	Error de ángulo de alabeo (BAE)	$BAE = \mu_{TAS}^A - \mu_{TAS}^N$
	v_{TAS}^A	v_{TAS}^N	Error de velocidad (SE)	$SE = v_{TAS}^A - v_{TAS}^N$
m^P	m^A	m^N	Error de consumo de combustible (FE)	$FE = m^A - m^P$

FIG. 21

Observado	Predicho	Concepto de error de AM	Métrica
p^A	p^N	Error de presión (PE)	$PE=p^A-p^N$
T^A	T^N	Error de temperatura (TE)	$TE=T^A-T^N$
w_E^A	w_E^N	Error de viento - este (EWE)	$EWE=w_E^A-w_E^N$
w_N^A	w_N^N	Error de viento - norte (NWE)	$NWE=w_N^A-w_N^N$
w_Z^A	w_Z^N	Error de viento - Cenit (ZWE)	$ZWE=w_Z^A-w_Z^N$

FIG. 22

Aplicaciones relacionadas con la trayectoria	Funciones relacionadas con la trayectoria	Aspectos relacionados con la trayectoria
<ul style="list-style-type: none"> • Herramientas de cálculo de desempeño de vehículo aéreo • Herramientas de diseño de procedimientos • Planificación de vuelo (AOC / FOC) • Herramientas de gestión de flujo de tráfico (ATFM) • Sistemas de procesamiento de datos de vuelo (FPDS) • Sistemas de detección de conflictos a medio plazo (CD) • Predicción de encuentro de vórtice de estela • Unidades asesoradoras en resolución de conflictos (CR) • Secuenciación y programación (S&S) • Detección y actuación (S&A) • Evitación de colisión (TCAS / ACAS) • Gestores de salidas (DMAN) • Gestores de llegadas (AMAN) • Gestores en ruta (EMAN) • Bolsas de vuelo electrónicas (EFB) • Sistemas de gestión de vuelo (FMS) • Sistemas de control de vuelo (FCS) • Estaciones de control terrestre (GCS) de UAS • Sistemas de mando y control de misión (C2) • Sensores basados en trayectoria y cargas útiles • Simuladores de vuelo • Herramientas de simulación de tráfico • Herramientas de simulación de combate • Herramientas de análisis de trayectoria • Etc ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelado de trayectoria • Descripción de trayectoria • Predicción de trayectoria • Optimización de trayectoria • Compresión de trayectoria • Cifrado / autenticación de trayectoria • Compartición / intercambio de trayectoria • Traducción / emulación de trayectoria • Negociación de trayectoria • Ejecución de trayectoria (GNC) • Ingeniería inversa de trayectoria • Etc ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Posición • Tiempo • Velocidad • Altitud • Consumo de combustible • Ruido y emisiones • Eficiencia combustible / tiempo • Márgenes de seguridad • Etc ...

FIG. 23

Factor de calidad (FOM)																							
Trayectoria única													Múltiples trayectorias										
Calidad en el punto de extremo													Calidad de la totalidad de la trayectoria				Calidad en el punto de extremo	Calidad de la totalidad de la trayectoria					
combustible quemado	tiempo de vuelo	coste (tiempo frente a coste de combustible)	alcance	posición en 2D	altitud	posición en 3D	posición en 4D	velocidad	actitud	vértice de estela	ATER	ATE	XTE	VE	SE	BE	BAE	PAE	combustible quemado	ruido	emisiones	conflictividad	
$\Delta m = m_n - m_0$	$\Delta t = t_n - t_0$	$CI \cdot \Delta t - \Delta m$	$\Delta r = r_n - r_0$	(λ_n, φ_n)	h_n	$(\lambda_n, \varphi_n, h_n)$	$(\lambda_n, \varphi_n, h_n, t_n)$	$V_{TAS,n}$	$(\gamma_{TAS,n}, \mu_{TAS,n}, \gamma_{TAS,n})$	$f(V_{TAS,n}, \delta_{HL,n}, \delta_{SB,n}, \delta_{LG,n}, w_n)$	r	t	(λ, φ)	h	v_{TAS}	χ_{TAS}	μ_{TAS}	γ_{TAS}	$\Sigma \Delta m^k$	$f(ATER^k, XTE^k, VE^k, T^k, \delta_{HL}^k, \delta_{SB}^k, \delta_{LG}^k, w^k)$	$f(\Sigma \Delta m^k, w^k)$	$(ATER^k, XTE^k, VE^k)$	
Herramientas de cálculo de desempeño de vehículo aéreo	x	x	x	x	x																		
Herramientas de diseño de procedimientos				x	x	x	x					x	x	x							x		
Planificación de vuelo (AOC/FOC)	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x									
Herramientas de gestión de flujo de tráfico (ATFM)		x																					x
Sistemas de procesamiento de datos de vuelo (FPDS)		x		x	x	x	x				x	x	x	x									x
Sistemas de detección de conflictos a medio plazo (CD)											x		x	x									
Predicción de encuentro de vértice de estela						x				x		x	x										
Unidades asesoradoras en resolución de conflictos (CR)				x	x	x																	
Secuenciación y programación (S&S)		x						x															
Detección y actuación (S&A)				x	x	x					x		x	x									
Evitación de colisión (TCAS / ACAS)																							

FIG. 24a

Aspectos de interés para la R-DST	Definición de FOM (z)	Dimensiones del valor de FOM
Combustible quemado	$\Delta m = m_n - m_0$	1 (univariado)
Tiempo de llegada en un punto de posición dado (tiempo de vuelo)	$\Delta t = t_n - t_0$	1 (univariado)
Índice de coste (el coste del tiempo frente al coste del combustible)	$CI \cdot \Delta t - \Delta m$	1 (univariado)
Alcance (distancia horizontal cubierta)	$\Delta r = r_n - r_0$	1 (univariado)
Posición en 2D en un instante o punto de posición dado	(λ_n, φ_n)	2 (bivariado)
Altitud en un instante o punto de posición dado	h_n	1 (univariado)
Posición en 3D en un instante o punto de posición dado	$(\lambda_n, \varphi_n, h_n)$	3 (trivariado)
Posición en 4D en un instante o punto de posición dado	$(\lambda_n, \varphi_n, h_n, t_n)$	4 (tetravariado)
Velocidad en un punto de posición dado	$v_{TAS,n}$	1 (univariado, p. ej., IAS, CAS, Mach, etc.)
Actitud	$\chi_{TAS,n}, \mu_{TAS,n}, \gamma_{TAS,n}$	3 (trivariado)
Vértice de estela en un instante o punto de posición dado	Modelo de $v_{TAS,n}, \delta_{HL,n}, \delta_{SB,n}, \delta_{LG,n}, \mathbf{W}_n$	N (N-variado; tantos parámetros como sea requerido por el modelo de vértice de estela)

FIG. 25

Criterio de selección de trayectoria (TSC)			
MEDIA	MODA	MEDIANA	PERCENTIL X
$E[\mathbf{z}] = \sum z_i/q$	más frecuente	percentil 50	percentil x

FIG. 26

Medidas de dispersión de FOM	Notación	Expresión compacta
Función de distribución de probabilidad	$\{c_i\} \quad i=\{1, \dots, q\}$	PDF(\mathbf{e})
Desviación típica (STD)	$STD = [\sum (e_i - MEDIA)^2/n]^{1/2}$	$E[(\mathbf{e} - E[\mathbf{e}])^2]^{1/2}$
Error absoluto máx (MAE)	$MAE = \max\{e_i^2\}$	$\square \mathbf{e} \square_{\infty}$
Sumas de errores cuadráticos (SSE)	$SSE = \sum e_i^2$	$\mathbf{e}^T \mathbf{e}$
Media cuadrática (RMS)	$RMS = (SSE/n)^{1/2}$	$(\mathbf{e}^T \mathbf{e}/n)^{1/2}$

FIG. 27

Aspectos de interés para la R-DST	Definición de FOM	z	Dimensiones del valor de FOM
Posición en 2D a lo largo de la totalidad de la trayectoria	[ATER,XTE]	(λ, φ)	2 (bivariado)
Altitud lo largo de la totalidad de la trayectoria	VE	H	1 (univariado)
Posición en 3D a lo largo de la totalidad de la trayectoria	[ATER,XTE,VE]	(λ, φ, h)	3 (trivariado)
Posición en 4D a lo largo de la totalidad de la trayectoria	[ATER,XTE,VE,ATET]	(λ, φ, h, t)	4 (tetravariado)
Velocidad a lo largo de la totalidad de la trayectoria	SF	v_{TAS}	1 (univariado, p. ej., IAS, CAS, Mach, etc.)
Actitud a lo largo de la totalidad de la trayectoria	[BE,PAE,BAE]	$\chi_{TAS}, \mu_{TAS}, \gamma_{TAS}$	3 (trivariado)

FIG. 28

Interfaz	Elemento de información intercambiado	Descripción
1	dominio de AM en 4D	Dominio en 4D para el cual se requieren las predicciones atmosféricas. Este es, esencialmente, un cubo en 4D de la forma $[\lambda_1, \lambda_2] \times [\varphi_1, \varphi_2] \times [h_1, h_2] \times [t_1, t_2]$ que engloba el volumen operativo del espacio aéreo y el marco temporal dentro del cual se requieren las trayectorias predichas.
5	id de AV	Esta entrada identifica el tipo de AV para el cual se requieren las trayectorias predichas. El modelo de APM buscará en su base de datos y configurará las características de APM correspondientes si las halla, o sugerirá el uso de un sinónimo, si se encuentra disponible.
7	intención de aeronave (AI)	Estructura de datos que contiene la descripción de AIDL de la trayectoria que se va a calcular, es decir, la intención de aeronave
	condiciones iniciales (CI)	Estructura de datos que contiene todos los aspectos conocidos del vector de estado de AV al comienzo del proceso de cálculo de trayectoria: $\mathbf{u}(t_0) = \mathbf{u}_0, \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0, \dot{\mathbf{X}}(t_0) = \dot{\mathbf{X}}_0$
8	calcular	Orden que desencadena el proceso de cálculo sobre la base de instancias de AM, de APM, de AIDL y de CI configuradas en la infraestructura de TC
	trayectoria predicha	Estructura de datos que contiene la salida del proceso de TC, es decir, la trayectoria predicha \mathbf{T} como una secuencia de vectores de estado de AV ampliados: $\mathbf{T} = \{\mathbf{Y}_j\} \quad j = \{1, \dots, n\}$

FIG. 29a

Interfaz	Elemento de información intercambiado	Descripción
13	metadatos de aleatorización	La información a la que se hace referencia mediante los metadatos de aleatorización es doble: - Estructura de datos que contiene los parámetros que se pueden aleatorizar junto con sus intervalos correspondientes. Esta puede ser un resumen o una consolidación de los metadatos de aleatorización que se intercambian a través de las interfaces 9, 10, 11 y 12. Véanse las figuras 30a y 30b para consultar detalles adicionales. - Una medida de la complejidad de cálculo que está asociada con el establecimiento configuración de aleatorización actual; por ejemplo, el número de pasadas de trayectorias necesarias, una estimación del tiempo de cálculo, etc.
	configuración de aleatorización	Estructura de datos que contiene las opciones de aleatorización que usará el motor de aleatorización para tratar los parámetros estocásticos. En esencia, la configuración de aleatorización consiste en un conjunto de banderas que indican cuáles de los parámetros estocásticos se deberán aleatorizar e información adicional que define la discretización de su intervalo correspondiente de valores posibles. Adicionalmente, la configuración de aleatorización podría contener opciones para ayudar a la R-DST a manejar / limitar la complejidad de cálculo inherente a la TP estocástica. La R-DST deberá usar esta información para explorar la sensibilidad de la trayectoria a los diferentes parámetros estocásticos de interés en cada caso.
	FOM	Función que calcula el FOM de interés para la R-DST. Este puede ser cualquiera de los FOM que se estudian en las figuras 25 y 28 u otra TBD.
	TSC	Criterio de selección de trayectoria que se usa para derivar un valor central de la distribución de FOM y la RPT correspondiente según se define en la figura 26. Este puede ser cualquiera de los criterios que se incluyen en la figura 26 u otra TBD.
13	trayectoria predicha robusta	Estructura de datos que contiene la salida del proceso de S-TP, es decir, \mathbf{T}_R de RPT como una secuencia de vectores de estado de AV ampliados: $\mathbf{T}_R = \{\mathbf{Y}_{R,j}\} \quad j = \{1, \dots, n\}$

FIG. 29b

Interfaz	Elemento de información intercambiado	Descripción
8	calcular	Explicado en las figuras 29a y 29b
	trayectoria predicha	Explicado en las figuras 29a y 29b.
9	metadatos de aleatorización de AI	<p>Estructura de datos que contiene la información en relación con la aleatorización de la intención de aeronave, es decir, los parámetros englobados por el vector δ_{AI}, junto con sus intervalos correspondientes:</p> <p>[E1] $\delta_{AI} \in [\delta_{AI,1}, \delta_{AI,2}]$</p> <p>Por ejemplo:</p> <p>[E2] $\delta_{AI} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_z \end{bmatrix}$ $a_1 = \text{desencadenar_captura_exactitud} \in [-0,1, 0,3] s$ $a_2 = \text{nivel_continuidad_lateral} \in \{0, 1, 2\}$ $a_3 = \text{nivel_continuidad_vertical} \in \{0, 1, 2\}$ etc ...</p> <p>siendo $\{a_1, \dots, a_z\}$ los parámetros estocásticos designados para aleatorizar la descripción de AI, por ejemplo, desencadenar captura de exactitud, suavización de L1 / L2 / V1, etc.</p>
	δ_{AI}	Vector de valores dados a la RE para los parámetros estocásticos asociados con la intención de aeronave para la pasada de cálculo de trayectoria actual
10	metadatos de aleatorización de AM	<p>Estructura de datos que contiene la información en relación con la aleatorización del modelo de atmósfera, es decir, los parámetros englobados por el vector δ_{AM}, junto con sus intervalos correspondientes:</p> <p>[E3] $\delta_{AM} \in [\delta_{AM,1}, \delta_{AM,2}]$</p> <p>Por ejemplo, en el enfoque propuesto para el pronóstico atmosférico probabilístico sobre la base de colectividades, la aleatorización de AM es controlada por un único parámetro discreto i, que el índice del miembro de colectividad, es decir:</p> <p>[E4] $\delta_{AM} = [i]; \quad i \in [1, \dots, q]$</p>
	δ_{AM}	Vector de valores dados a la RE para los parámetros estocásticos asociados con el modelo de atmósfera para la pasada de cálculo de trayectoria actual

FIG. 30a

Interfaz	Elemento de información intercambiado	Descripción
11	metadatos de aleatorización de APM	<p>Estructura de datos que contiene la información en relación con la aleatorización del APM, es decir, los parámetros englobados por el vector δ_{APM}, junto con sus intervalos correspondientes:</p> <p>[E5] $\delta_{APM} \in [\delta_{APM,1}, \delta_{APM,2}]$</p> <p>Por ejemplo, una forma sencilla de aleatorizar el APM podría ser mediante la distorsión de los coeficientes de sustentación, de resistencia aerodinámica, de empuje y de combustible calculados de forma determinista en una cantidad de % aleatoria, que se sabe que se encuentra dentro de determinados límites, es decir:</p> $[E6] \delta_{APM} = \begin{bmatrix} \Delta C_L \\ \Delta C_D \\ \Delta C_T \\ \Delta C_F \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \Delta C_L \in [-1.0\%, 1.5\%] \\ \Delta C_D \in [-2.0\%, 1.4\%] \\ \Delta C_T \in [-1.2\%, 1.0\%] \\ \Delta C_F \in [-0.5\%, 3.0\%] \end{array}$ <p>En un caso de este tipo, el esquema de aleatorización de APM consistiría en 4 parámetros estocásticos continuos.</p>
	δ_{APM}	Vector de valores dados a la RE para los parámetros estocásticos asociados con el APM para la pasada de cálculo de trayectoria actual
12	metadatos de aleatorización de CI	<p>Estructura de datos que contiene la información en relación con la aleatorización de las condiciones iniciales, es decir, los parámetros englobados por el vector δ_{IC}, junto con sus intervalos correspondientes:</p> <p>[E7] $\delta_{IC} \in [\delta_{IC,1}, \delta_{IC,2}]$</p> <p>Por ejemplo: una forma sencilla de aleatorizar las condiciones iniciales podría ser mediante la distorsión de su valor en una cantidad de % aleatoria, que se sabe que se encuentra dentro de determinados límites (errores de observación), es decir:</p> $[E8] \delta_{IC} = \begin{bmatrix} \Delta u_0 \\ \Delta X_0 \\ \Delta \dot{X}_0 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \Delta u_0 \in [u_0^1, u_0^2]\% \\ \Delta X_0 \in [X_0^1, X_0^2]\% \\ \Delta \dot{X}_0 \in [\dot{X}_0^1, \dot{X}_0^2]\% \end{array}$ <p>En un caso de este tipo, el esquema de aleatorización de CI consistiría en 15 parámetros estocásticos continuos.</p>
	δ_{IC}	Vector de valores dados a la RE para los parámetros estocásticos asociados con las condiciones iniciales para la pasada de cálculo de trayectoria actual

FIG. 30b

Interfaz	Elemento de información intercambiado	Descripción
3	(X,t)	Solicitud de TE para aspectos atmosféricos en una ubicación y un instante dados
	escenario atmosférico	Respuesta de AM con aspectos ambientales en la ubicación y el instante solicitados. La estructura de datos incluye la totalidad de los elementos en la figura 17. Las condiciones atmosféricas se toman del escenario atmosférico actualmente activo.
4	X	Solicitud de APM para aspectos atmosféricos en una ubicación dada
	escenario atmosférico	Respuesta de AM con aspectos ambientales requeridos por el APM. Las condiciones atmosféricas se toman del escenario atmosférico actualmente activo.
6	(X,u)	Solicitud de TE para aspectos de desempeño de aeronave asociados con un estado de AV dado
	aspectos de desempeño de aeronave	Respuesta de AM con aspectos de desempeño de aeronave solicitados. La estructura de datos incluye la totalidad de los elementos en la figura 16.

FIG. 31

Interfaz	Elemento de información intercambiado	Descripción
2	dominio de AM en 4D	Explicado en las figuras 29a y 29b.
	metadatos de PAM	<p>Estructura de datos que contiene la información en relación con cómo los datos de pronóstico atmosférico se estructuran y se proporcionan al PAM:</p> <p>En esencia, tal información describe:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Referencia de tiempo (por ejemplo, tiempo UTC + k o GPS) - Número de miembros de la <i>colectividad</i> de AM (<i>escenarios</i> de AM): q (por lo general, q < 30) - Un escenario de AM W_i está compuesto por 5 <i> cubos en 4D </i> que se corresponden con las características atmosféricas de interés para la TP: la presión, la temperatura y las 3 componentes del viento a lo largo del dominio en 4D seleccionado - Cada cubo en 4D está compuesto por un número n_t de <i> cubos en 3D </i> temporalmente equiespaciados una cantidad Δt (por lo general, $\Delta t = 10$ min) - Cada cubo en 3D está compuesto por un número n_h de <i> capas </i> equiespaciadas en altitud una cantidad Δh (por lo general, $n_h \sim 30$) - Cada capa tiene la estructura de una cuadrícula en 2D de $n_x \times n_y$ valores de la característica atmosférica correspondiente, equiespaciados respectivamente $\Delta \lambda$ y $\Delta \phi$ (por lo general, $n_x \sim n_y \sim 100$) - Los valores proporcionados son adimensionales y se ajustan a escala mediante los factores correspondientes para reducir el tamaño de los datos. Se podrían usar mecanismos de compresión adicionales. La información de metadatos de PAM deberá contener los parámetros necesarios para deshacer la adimensionalización, el ajuste a escala y la compresión para recuperar los aspectos atmosféricos deseados, p, T y w - El pronóstico atmosférico proporcionado por cada escenario es válido durante un intervalo de tiempo de $\Delta t_r = n_t \Delta t$ (por lo general, 2,5 horas), mientras que la P-DMET produce una renovación del escenario cada Δt_r (por lo general, 1 hora), que es la <i>tasa de renovación del escenario</i>. Esto permite un intervalo de tiempo de $\Delta t_r - \Delta t_r$ para que el PAM recupere la actualización de escenario, una vez que este está listo. - El tiempo inicial $t_{0,i}$ para $i = \{1, \dots, q\}$ está desplazado una cantidad de tiempo $\Delta t_0 = \Delta t_r / q$ para diseminar tanto como sea posible las interacciones a lo largo del tiempo entre la P-DMET y el PAM, evitando de ese modo los picos de uso de ancho de banda. - Posiblemente, otra información con respecto a aspectos de QoS, metadatos de segmentación de mensajes, catálogo / realimentación acerca de la disponibilidad de dominios en 4D, notificaciones, abono / autenticación, etc.
	colectividad de pronósticos atmosféricos	Secuencia de estructuras de datos que contienen los datos de pronóstico atmosférico real según son descritos por los metadatos de PAM, que es recibida por el PAM y ensamblada para posibilitar la funcionalidad requerida por la TC

FIG. 32