

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 704 398**

51 Int. Cl.:

**B64C 39/02** (2006.01)

**G05D 1/00** (2006.01)

**G01C 21/20** (2006.01)

**G08G 5/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.07.2015** **E 15382365 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.10.2018** **EP 3118578**

54 Título: **Método y sistema de generación autónoma de trayectorias laterales más cortas para sistemas aéreos no tripulados**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**18.03.2019**

73 Titular/es:

**THE BOEING COMPANY (100.0%)  
100 North Riverside Plaza  
Chicago, IL 60606-1596, US**

72 Inventor/es:

**VALLS HERNÁNDEZ, ERNESTO;  
NAVARRO FÉLIX, FRANCISCO A.;  
SÁNCHEZ TAMARGO, DAVID;  
QUEREJETA MASAVEU, CARLOS y  
CUADRADO SÁNCHEZ, JESÚS**

74 Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

ES 2 704 398 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**

Método y sistema de generación autónoma de trayectorias laterales más cortas para sistemas aéreos no tripulados

Antecedentes

5 La presente divulgación se refiere a un método y un sistema para la generación autónoma de trayectorias laterales más cortas para Sistemas Aéreos No Tripulados (UAS) que evitan las Zonas de Exclusión Aérea (NFZs). La divulgación propone una solución segura, práctica y eficaz para generar de manera autónoma trayectorias laterales geodésicas pseudo-óptimas para UAS evitando NFZs y teniendo en cuenta los requisitos de tiempo de cálculo y las capacidades de cálculo necesarias para obtener la mejor solución posible en el tiempo requerido en tiempo real. El método se fundamenta en una secuencia efectiva de etapas que combinan de manera inteligente algoritmos

10 heurísticos, geodésicos y geométricos para proporcionar una solución eficiente y eficaz para los escenarios de UAS más comunes.

15 Se conocen métodos para calcular una trayectoria entre un punto inicial y un punto de destino evitando obstáculos como el método divulgado en la solicitud de patente con el número de publicación EP2863177A1. Sin embargo, el método divulgado en el documento EP2863177A1 está destinado a todo tipo de vehículos, incluidos automóviles, camiones, motocicletas, vehículos terrestres, vehículos voladores, vehículos submarinos y vehículos espaciales, entre otros. Por tanto, este método no tiene en cuenta los detalles de cada tipo de vehículo. Otro método conocido para calcular una trayectoria entre un punto inicial y un punto de destino evitando obstáculos es el método divulgado en la solicitud de patente con el número de publicación US2006/0235610A1, que se basa en la aplicación de un proceso de rasterización de polígonos.

20 La generación autónoma de trayectorias laterales de vuelo con UAS sin intervención de piloto remoto todavía representa un desafío importante en los UAS. Las limitadas capacidades de cálculo a bordo, la alta complejidad de los escenarios geodésicos, la gran cantidad de NFZs y la congestión del espacio aéreo son algunos de los problemas que aún dificultan la solución de este problema. Los escenarios en el dominio de los UAS están con frecuencia llenos de polígonos de NFZ geodésicos que pueden estar ubicados en cualquier parte del mundo, con cualquier extensión, con formas muy complejas definidas por un gran número de vértices. Por ejemplo, los límites de las características geográficas más comunes, como ciudades o aeropuertos, generalmente son considerados como NFZs. Esto hace que la identificación geodésica de la trayectoria más corta en extensas áreas en la superficie de la tierra evitando las NFZs plantee algunos problemas que otras soluciones existentes no resuelven.

30 Algunos de los problemas específicos asociados con la generación de una trayectoria lateral más corta para UAS son los siguientes:

- cada plataforma de UAS concreta tiene rendimientos y limitaciones específicos que deben considerarse para proporcionar trayectos seguros y aptos para volar;
- la predictibilidad del movimiento del vehículo y, por tanto, su precisión de posición está sometida a grandes incertidumbres;
- 35 - Los escenarios de UAS generalmente comprenden un gran número de NFZs con geometrías complejas que requieren grandes recursos de cálculo y tiempo para ser ejecutados, especialmente bajo los limitados recursos de cálculo de los habituales ordenadores a bordo de los UAS. Además, los requisitos de cálculo en tiempo real de las misiones con UAS también son limitados; y,
- Los escenarios de funcionamiento de los UAS se encuentran en cualquier parte del mundo y pueden tener cualquier extensión. La definición de escenarios en datos geodésicos (por ejemplo, WGS84) aumenta la complejidad de la solución de la trayectoria lateral más corta. Intentar resolver el problema geodésico completo en la geometría elipsoidal requeriría algoritmos geodésicos complejos y grandes requisitos de cálculo.

40

45 La divulgación descrita en el presente documento considera los problemas citados asociados a las particularidades de la definición del trayecto autónomo en escenarios de funcionamiento de UAS y proporciona una definición autónoma de una trayectoria lateral geodésica más corta pseudo-óptima para UAS evitando las NFZs, que pueda definirse en cualquier parte del mundo y tenga cualquier extensión geográfica. Además, la divulgación proporciona el mejor resultado posible dentro de un rango de tiempo requerido. La solución otorga un trayecto de UAS seguro y fiable y proporciona un buen equilibrio entre la eficiencia de cálculo y la precisión de la solución.

Resumen

50 Para lograr las ventajas y evitar los inconvenientes enumerados anteriormente, la presente divulgación proporciona una mejora significativa con respecto a las soluciones existentes ya que describe un método y un sistema para la generación autónoma de trayectorias laterales más cortas para Sistemas Aéreos No Tripulados (UAS) evitando Zonas de Exclusión Aérea (NFZs) que tienen en cuenta los requisitos de tiempo de cálculo y las capacidades de cálculo para obtener la mejor solución posible en tiempo real. Las NFZs son territorios o áreas sobre las cuales no se permite volar a las aeronaves.

55

Por lo tanto, un primer aspecto de la presente divulgación es un método de generación autónoma de la trayectoria lateral más corta para Sistemas Aéreos No Tripulados (UAS), en donde se define previamente un Radio de Giro constante (RG) y una trayectoria vertical constante de una plataforma de UAS. El método comprende las etapas de:

- 5 a) recibir un escenario inicial definido en coordenadas cartográficas, comprendiendo el escenario inicial un punto de Origen y un punto de Destino que definen un vector que representa una intención de vuelo inicial de la plataforma de UAS y al menos una Zona de Exclusión Aérea (NFZ);
- 10 b) estimar un tiempo de cálculo para obtener la trayectoria lateral más corta que evite al menos una NFZ, siendo el tiempo de cálculo requerido directamente proporcional a un número total de vértices de al menos una NFZ y verificar si el tiempo de cálculo estimado es menor o igual a un tiempo de cálculo requerido proporcionado previamente; y, aplicar un algoritmo de reducción de vértice a al menos una NFZ solo cuando el tiempo de cálculo estimado es mayor que el tiempo de cálculo requerido;
- c) determinar un área de seguridad que rodea cada NFZ individual, en donde el área de seguridad se define trasladando los límites de la NFZ hacia su exterior por una distancia de desplazamiento;
- 15 d) construir un gráfico de visibilidad que comprenda todas las trayectorias laterales posibles entre el punto de Origen y el punto de Destino evitando las áreas de seguridad, siendo las trayectorias laterales posibles todas las combinaciones posibles de vectores que conectan los vértices de las áreas de seguridad; y
- e) determinar la trayectoria lateral más corta entre todas las trayectorias laterales posibles generadas en la etapa d).

De manera ventajosa, cuando el escenario inicial está definido en coordenadas geodésicas en lugar de coordenadas cartográficas, el método:

- 20 - define una proyección cartográfica del escenario inicial considerando una extensión geométrica y una ubicación geográfica del escenario inicial; y

- convierte el escenario inicial definido en coordenadas geodésicas en un escenario inicial equivalente definido en coordenadas cartográficas aplicando la proyección cartográfica definida al escenario inicial definido en coordenadas geodésicas.

- 25 De manera ventajosa, para reducir la complejidad del cálculo de la trayectoria lateral, el método:

- determina un Espacio de Configuración como un área delimitada por dos líneas perpendiculares, pasando cada línea perpendicular a través de los puntos de Origen y Destino, respectivamente, al vector de intención de vuelo inicial; y,

- descarta cualquier NFZ ubicada fuera del Espacio de Configuración.

- 30 De manera más ventajosa, cuando al menos una NFZ se ha descartado y al menos una de las NFZs está ubicada dentro del Espacio de Configuración, el método comprende además ejecutar las etapas b) a e) considerando solo las NFZs dentro del Espacio de Configuración.

- 35 De manera ventajosa, el método estima un factor de escala para cada punto del escenario que se introduce por la conversión del escenario inicial definido en coordenadas geodésicas en el escenario inicial equivalente definido en coordenadas cartográficas. Este factor de escala es un parámetro variable que depende de los valores de longitud y latitud de los diferentes puntos del escenario geodésico y representa una medida de la distorsión introducida por la proyección cartográfica.

- 40 De manera más ventajosa, el método verifica que los puntos de Origen y Destino estén ubicados fuera de cualquiera de las áreas de seguridad que rodean las NFZs y estima un Factor de Distorsión de la Proyección (FDP) como el factor de escala mínimo que asegura que la distancia de desplazamiento de seguridad sea siempre igual o mayor que una distancia de seguridad mínima. Este FDP será el factor de escala que garantiza que ninguna de las distancias de desplazamiento de seguridad en el plano cartográfico definido sea inferior a la distancia de seguridad mínima establecida en el elipsoide geodésico.

- 45 De manera ventajosa, cuando el tiempo de cálculo estimado excede el tiempo de cálculo requerido, el método reduce el número total de vértices de las NFZs aplicando un algoritmo de reducción de vértices a cada NFZ. Preferiblemente, este algoritmo de reducción de vértice se selecciona entre un algoritmo de cuadro definidor mínimo y un algoritmo de simplificación lineal. Cuando se selecciona el algoritmo de simplificación lineal, el método aplica un algoritmo de Douglas-Peucker personalizado a cada NFZ, determinando una Distancia Lineal máxima (DL) que corresponde a una distancia de simplificación mayor entre cada NFZ original o la NFZ simplificada correspondiente.

- 50 De manera ventajosa, la Distancia de Desplazamiento empleada en la etapa c) para determinar el área de seguridad se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{Distancia de Desplazamiento} = \text{FDP} \times (\text{RG} + \text{PU})$$

en donde FDP es el Factor de Distorsión de la Proyección, RG es el Radio de Giro de la plataforma de UAS y PU es un valor de Incertidumbre de Posición de la plataforma de UAS. Si el algoritmo de simplificación lineal se aplica a las áreas de seguridad, la Distancia de Desplazamiento se calcula mediante la siguiente expresión

5 
$$\text{Distancia de Desplazamiento} = \text{FDP} \times (\text{RG} + \text{PU} + \text{DL})$$

en donde DL es la Distancia Lineal máxima.

Opcionalmente, se puede introducir un área de seguridad constante para aumentar la distancia de seguridad entre el UAS y las NFZs, por lo que la distancia de desplazamiento se calcularía mediante la siguiente expresión:

$$\text{Distancia de Desplazamiento} = \text{FDP} \times (\text{RG} + \text{PU} + \text{DL} + \text{DC})$$

10 en donde DC es la Distancia de Seguridad Constante sumada a la Distancia de Desplazamiento.

Opcionalmente, si el escenario inicial es proporcionado directamente en coordenadas cartográficas, por lo que no hay necesidad de una proyección cartográfica, la distancia de desplazamiento se calculará como la suma del Radio de Giro más el valor de Incertidumbre de Posición y finalmente más la Distancia de Seguridad Constante y/o la Distancia Lineal.

15 De manera ventajosa, la etapa c) del método comprende cortar los bordes en bisel de las porciones angulares de las áreas de seguridad, donde las porciones angulares tienen un ángulo menor que un umbral de ángulo predefinido. Preferiblemente, el umbral de ángulo podría ser cualquier ángulo posible entre 0 y 90 grados.

De manera más ventajosa, la etapa c) comprende además combinar las áreas de seguridad superpuestas de NFZs contiguas.

20 De manera más ventajosa, la etapa c) comprende además aplicar un algoritmo de envoltura convexa a las áreas de seguridad para simplificar los polígonos de NFZ resultantes.

En otro aspecto, la presente divulgación proporciona un sistema para generar de manera autónoma la trayectoria lateral más corta para los UAS que evita las NFZs. El sistema comprende:

25 - un generador autónomo de trayectoria lateral configurado para recibir un escenario inicial en coordenadas cartográficas, comprendiendo el escenario inicial al menos una NFZ y un punto de origen y destino que determinan un vector de intención de vuelo inicial de la plataforma de UAS;

30 - medios para determinar un tiempo de cálculo estimado para obtener la trayectoria lateral más corta evitando las NFZs, siendo dicho tiempo de cálculo directamente proporcional a un número total de vértices de las NFZs, y verificar si el tiempo de cálculo estimado es menor o igual a un tiempo de cálculo requerido proporcionado previamente;

- medios para reducir el número total de vértices de las NFZs mediante la aplicación de un algoritmo de reducción de vértice a cada NFZ solo cuando el tiempo de cálculo estimado sea mayor que el tiempo de cálculo requerido;

35 - medios para determinar una distancia de desplazamiento y crear un área de seguridad que rodea cada NFZ en donde el área de seguridad se define trasladando los límites de la NFZ hacia su exterior por la distancia de desplazamiento de seguridad;

- medios para crear un gráfico de visibilidad con todas las trayectorias laterales posibles entre los puntos inicial y de destino que evitan las áreas de seguridad, siendo las trayectorias laterales posibles todas las combinaciones posibles de vectores que conectan los vértices de las áreas de seguridad; y

40 - estando además el generador de trayectoria lateral configurado para determinar la trayectoria lateral más corta entre todas las trayectorias laterales generadas.

De manera ventajosa, el sistema comprende medios para definir una proyección cartográfica del escenario inicial definido en coordenadas geodésicas y convertir dicho escenario inicial en un escenario inicial equivalente definido en coordenadas cartográficas aplicando la proyección cartográfica al escenario inicial.

45 De manera ventajosa, el sistema comprende además medios para determinar un espacio de configuración como un área delimitada por dos líneas perpendiculares, pasando cada línea perpendicular a través de los puntos de Origen y Destino, respectivamente, al vector de intención de vuelo inicial; y medios para identificar y descartar cualquier NFZ ubicada fuera del Espacio de Configuración.

De manera ventajosa, el sistema comprende medios para estimar un factor de escala introducido por la conversión del escenario inicial definido en coordenadas geodésicas en el escenario inicial definido en coordenadas cartográficas.

- 5 De manera ventajosa, el sistema comprende medios para verificar que los puntos de Origen y Destino están ubicados fuera de cualquier área de seguridad y medios para estimar un Factor de Distorsión de la Proyección como el factor de escala mínimo que asegura que las distancias de desplazamiento de seguridad sean siempre iguales a, o mayores que, una distancia mínima de seguridad.

De manera ventajosa, el algoritmo de reducción de vértice se seleccionará preferiblemente entre un algoritmo de cuadro definidor y un algoritmo de simplificación lineal.

- 10 Algunas de las ventajas de la presente divulgación frente al estado de la técnica existente son:

- La mayoría de las soluciones existentes asumen escenarios bien conocidos en coordenadas planas o no consideran los problemas geodésicos relacionados con las distorsiones. Por tanto, dichas soluciones existentes proporcionan una simplificación del problema técnico descrito en el presente documento. La presente divulgación funciona con escenarios geodésicos y considera los problemas relacionados con las distorsiones para proporcionar una solución más precisa. Para ello, la divulgación selecciona de manera autónoma la proyección cartográfica que mejor reduce los factores de distorsión. Esta es una diferencia técnica con las soluciones existentes.

- 15

- El sistema y el método propuestos permiten manejar cualquier tipo de escenarios geométricos sin limitación en cuanto a su extensión, número de polígonos de NFZ, forma o ubicación tanto de las NFZs como de los puntos de Origen y Destino.

- 20 - El método también incluye una tarea de recorte para seleccionar las NFZs directamente relacionados con el problema de la trayectoria más corta. Esta es una solución novedosa para reducir la complejidad de los escenarios.

- El sistema y el método propuestos consideran como entrada un requisito de tiempo de cálculo en el que se debe encontrar una posible trayectoria resultante. Después, estima el tiempo de cálculo esperado para el escenario de entrada y decide una estrategia de simplificación para cumplir con el requisito de tiempo. Como consecuencia, se obtiene una trayectoria más corta pseudo-óptima. Las soluciones existentes no consideran un requisito de tiempo de cálculo, lo que es un inconveniente importante que podría poner en riesgo la misión del UAS.

- 25

- Los supuestos sobre el escenario se han reducido tanto como ha sido posible para proporcionar una solución fiable para cualquier escenario. Por el contrario, la mayoría de las soluciones existentes asumen diferentes simplificaciones: i) consideran los escenarios de entrada como escenarios planos locales para deshacerse de la complejidad debido a la geografía y la cartografía; ii) el espacio de configuración suele estar bien identificado desde el inicio; iii) asumen que los polígonos directamente relacionados con el problema de la trayectoria más corta están concentrados en áreas limitadas; iv) asumen un número pequeño de polígonos simples (definidos por unos pocos vértices).

- 30

- Las soluciones existentes no proporcionan una solución autónoma fiable para cualquier escenario geográfico. Esta es una limitación importante, especialmente en las misiones de UAS en las que la flexibilidad para abordar de manera autónoma los diferentes escenarios de funcionamiento es realmente importante. Las soluciones existentes normalmente requieren algunas tareas humanas para preparar convenientemente cada escenario de funcionamiento de acuerdo con los requisitos de la misión. La divulgación supera esta limitación mediante la preparación autónoma de los escenarios para cumplir con los requisitos de la misión.

- 35

- La definición autónoma de la distancia de desplazamiento de seguridad considera los factores de incertidumbre más relevantes. La distancia de desplazamiento se calcula mediante la suma de dos componentes, una constante proporcionada por el usuario y una segunda calculada internamente por el método. De este modo, el método asegura la no invasión de NFZs y se adapta mejor al Espacio de Configuración, haciendo que el método sea más eficiente, eficaz y seguro. Por el contrario, las soluciones actuales normalmente funcionan con un valor de compensación constante estimado inicialmente por los usuarios.

- 40

- La divulgación aumenta la automatización, la eficiencia y la seguridad de las operaciones de UAS en los casos donde se requiere una definición de la trayectoria lateral. Se necesita una intervención humana mínima o incluso ninguna intervención para definir las trayectorias más cortas pseudo-óptimas, lo que es de gran relevancia en situaciones críticas (por ejemplo, fallos críticos a bordo). Este problema no sería fácilmente accesible ni resuelto de manera óptima por operadores humanos sin el soporte de la automatización.

- 50

- Reducción del impacto ambiental. La trayectoria más corta generalmente se asocia a la trayectoria más eficiente en términos de consumo de combustible. Además, el riesgo potencial de incursión en áreas naturales protegidas puede reducirse si se incluyen como NFZs.

- Para resolver el problema de la existencia de rendimientos y limitaciones específicos en el UAS, el método asume que: i) el radio de giro del UAS se definirá inicialmente y será constante durante la ejecución de la trayectoria más

- 55

corta (por ejemplo, puede considerarse el radio de giro de la plataforma de UAS en el peor caso) y; ii) la trayectoria vertical del UAS estará limitada a altitudes seguras y constantes.

5 Para lograr la solución mencionada anteriormente, la presente divulgación añade márgenes de seguridad para evitar incursiones en NFZs con el fin de reducir las grandes incertidumbres asociadas con la predictibilidad del movimiento y la precisión de la posición del UAS.

También reduce la complejidad del escenario evitando limitaciones de tiempo de cálculo, para proporcionar la mejor solución posible en el intervalo de tiempo requerido.

10 Convierte el escenario geodésico en uno plano que reduce la complejidad de los escenarios de funcionamiento del UAS. Por otra parte, dicha conversión produce nuevos problemas que deben resolverse: i) NFZs planas distorsionadas y; ii) aumenta la incertidumbre de la ubicación geodésica del UAS. Para resolver estos problemas, la divulgación reduce la distorsión a valores razonables y los tiene en cuenta en la solución global.

15 Algunas de las aplicaciones o usos del método y sistema propuestos pueden ser: funciones avanzadas de gestión autónoma de contingencias de UAS, funciones como Regreso al Origen, Vinculación Perdida, Fallo de Motor y Percibir y Actuar, capaces de evitar las NFZs de una manera eficiente y eficaz y Estaciones de Control en Tierra (ECT) para respaldar al piloto remoto en el modelado de trayectorias de vuelo laterales para operaciones de UAS. Además de las aplicaciones para UAS, el método también puede ser útil en el sector de la GTA, para fines de diseño de procedimientos y planificación de trayectos, así como algoritmo de base para herramientas dinámicas de automatización de gestión de trayectos, como resolución de conflictos.

Breve descripción de las figuras

20 Figura 1. Muestra un diagrama de flujo de un modo de realización concreto del método para la generación autónoma de trayectorias laterales más cortas para Sistemas Aéreos No Tripulados (UAS) que eviten las Zonas de Exclusión Aérea (NFZs). Dicho diagrama de flujo representa las etapas principales de dicho método.

Figura 2. Muestra un diagrama de flujo de un modo de realización concreto de las etapas secundarias que conforman la etapa Heurística de la figura 1.

25 Figura 3. Muestra un diagrama de flujo de un modo de realización concreto de las etapas secundarias que conforman la etapa de Transformación del Diseño Geodésico de la figura 1.

Figura 4. Muestra un diagrama de flujo de un modo de realización concreto de las etapas secundarias que conforman la etapa de Reducción de la Complejidad de la figura 1.

30 Figura 5. Muestra un diagrama de flujo de un modo de realización concreto de las etapas secundarias que conforman la etapa de Incursión en Zonas de Exclusión Aérea de la figura 1.

Figura 6. Muestra un diagrama de flujo de un modo de realización concreto de las etapas secundarias que conforman la etapa de Definición de Trayectoria Lateral de la figura 1.

Figura 7. Muestra un modo de realización concreto de un escenario en el que se ha definido el ECTC. La figura 7a muestra el escenario geodésico y la figura 7b muestra el mismo escenario proyectado en coordenadas cartográficas.

35 Figura 8. Muestra un modo de realización concreto de un escenario al que se le aplica una estrategia de simplificación. Específicamente, la figura 8a muestra la aplicación de la estrategia de cuadro definidor y la figura 8b muestra la aplicación de la estrategia de simplificación lineal.

Figura 9. Muestra la aplicación de la estrategia de corte en bisel del borde a una NFZ concreta.

Figura 10. Muestra un modo de realización concreto en el que se superponen dos NFZs.

40 Figura 11. Muestra la estrategia de combinación aplicada al modo de realización concreto de la figura 10.

Figura 12. Muestra casos concretos en los que no se puede aplicar el algoritmo de envoltura convexa. Específicamente, la figura 12a muestra un caso en el que, como resultado de la aplicación del algoritmo de envoltura convexa, se descartaría una trayectoria potencial y la figura 12b muestra un caso en el que se descartaría el punto de destino.

45 Figura 13. Muestra un modo de realización concreto en el que el algoritmo de Gráfico de Visibilidad se aplica a un Espacio de Configuración concreto (ECTC) que incluye 3 NFZs.

Figuras 14 a 19. Muestran un modo de realización concreto en el que el método de la presente divulgación se aplica a un escenario geodésico concreto.

Descripción detallada

A continuación, se lleva a cabo una descripción de varios ejemplos de modos de realización concretos de la presente divulgación, con carácter ilustrativo y no limitativo, haciendo referencia a la numeración utilizada en las figuras.

5 En un modo de realización concreto de la divulgación, el método está constituido por cinco etapas principales bien distinguidos que se muestran en el diagrama de flujo de la figura 1. Las figuras 2 a 6 muestran las etapas secundarias correspondientes de cada etapa principal.

10 Una vez que se proporciona un escenario (1) inicial, dicho escenario (1) inicial corresponde a un escenario de funcionamiento de UAS concreto con una ubicación y extensión específicas, la primera etapa principal del método es la "etapa (2) Heurística". La etapa (2) Heurística evalúa el escenario (1) inicial para definir la mejor estrategia para encontrar una solución viable que proporcione un buen equilibrio entre tiempo de cálculo y precisión de la trayectoria lateral final. Como se muestra en la figura 2, la etapa (2) Heurística consta de tres etapas secundarias:

15 La primera etapa secundaria es la evaluación (10) de la Geometría del Escenario. Esta etapa secundaria obtiene información geométrica, que comprende los puntos (12) de Origen (salida) y Destino (llegada) (O&D) y los NFZs (13) existentes del escenario (1) inicial para identificar la proyección (11) cartográfica que mejor reduzca las distorsiones en el escenario global. Inicialmente, la mayoría de los escenarios están definidos generalmente en coordenadas geodésicas en la superficie de la Tierra y contienen todas las NFZs, incluidas aquellas NFZs que no están directamente relacionadas con el Espacio de Configuración de la Trayectoria más Corta (ECTC). El ECTC es definido como el área de interés del escenario inicial global. Sin embargo, las NFZs fuera del ECTC, asumiendo que existan, deben recortarse para obtener una estimación más precisa de los parámetros cartográficos. Este recorte se ejecutará una vez que el escenario se haya convertido a un plano cartográfico (por medio de la proyección cartográfica) en la subsiguiente primera etapa secundaria de la segunda etapa principal. Por tanto, la etapa (2) Heurístico hace una estimación preliminar de la ubicación del escenario y su extensión geométrica en base a todas las NFZs y, opcionalmente, hará una segunda estimación una vez que se haya completado el recorte. En base a la información geométrica obtenida, la etapa (2) Heurística define una proyección (11) cartográfica que se utilizará en la etapa (3) de Transformación del Diseño Geodésico para convertir el escenario geodésico original y recortado en uno cartográfico. Al final de la etapa (10) secundaria de Evaluación, se identifican los parámetros necesarios para definir una proyección (11) cartográfica óptima para cada escenario. Por ejemplo, los escenarios con NFZs ubicados en hasta 10° a ambos lados del segmento de O&D (un segmento que une los puntos de O&D) pueden proyectarse a través de una sencilla Proyección Oblicua de Mercator; sin embargo, esta proyección no se puede aplicar directamente en escenarios globales (NFZs ubicadas a más de 10° del segmento de O&D) porque la distorsión sería mayor de lo esperado.

20 La segunda etapa secundaria es la estimación (14) del Tiempo de Cálculo. En base al análisis previo de diferentes escenarios, se desarrollan algunas funciones internas para estimar el tiempo de cálculo total de la ejecución del método para cada escenario concreto. Dicho tiempo de cálculo depende principalmente de: i) El número de NFZs que estarán potencialmente involucradas en el ECTC; ii) la eficiencia de los algoritmos implementados y; iii) Los recursos de cálculo. Aunque estos parámetros no son constantes, se estiman con precisión para definir la función interna que estimará el tiempo de cálculo esperado.

25 La tercera etapa secundaria es la Definición (15) de Estrategia. Esta etapa (15) secundaria considera el tiempo de cálculo estimado previamente obtenido y los requisitos de tiempo de cálculo (si se han definido previamente) y encuentra una solución viable para cumplir con ese tiempo. Si el tiempo estimado es mayor que el requerido, de modo que el tiempo de cálculo estimado no es aceptable, debe llevarse a cabo una etapa (4) de Reducción de la Complejidad sobre las NFZs como se indica en la figura 1. Si se necesita la etapa (4) de Reducción de la Complejidad, la etapa (1) Heurística selecciona la mejor estrategia de reducción de la complejidad para cumplir con el tiempo de cálculo requerido. La reducción de la complejidad del escenario implica reducir la precisión de la trayectoria final porque alguno de los vértices que definen las NFZs originales serán eliminados del escenario. Por tanto, el Heurístico (2) equilibra el tiempo de cálculo contra la pérdida de precisión en la trayectoria lateral final. Dependiendo del escenario y el contexto donde se aplique el método, puede preferirse una solución más rápida en lugar de una más precisa y lenta (por tanto, la estrategia de simplificación Lineal o de Cuadro Definidor debe ser seleccionada por el Heurístico, consultar figura 4).

30 La segunda etapa principal del método es la Transformación (3) del Diseño Geodésico. Los escenarios generalmente están definidos en coordenadas geodésicas en la superficie de la tierra, aunque también pueden proporcionarse en coordenadas Cartesianas. Esta etapa es opcional, ya que solo se ejecuta si el escenario (1) inicial se proporciona en coordenadas geodésicas. Solucionar el problema de la trayectoria lateral más corta en coordenadas geodésicas requeriría altos recursos de cálculo. Por tanto, la solución debe encontrarse en un dominio plano. La etapa (3) de Transformación del Diseño Geodésico convierte el escenario (1) geodésico inicial en uno Cartesiano y hace una estimación del Factor de Distorsión de la Proyección (FDP). La figura 3 muestra las etapas secundarias de esta etapa (3):

35 La primera etapa secundaria es la Aplicación (20) de la Proyección Cartográfica. Esta etapa (20) secundario aplica la proyección cartográfica definida en la etapa (2) Heurística al escenario (1) inicial global para convertirlo a las coordenadas Cartesianas de la proyección correspondiente. El resultado es un escenario (21) plano inicial. La figura

7a muestra un ejemplo concreto de un escenario (60) geodésico que comprende una pluralidad de NFZs (61,62) y un UAS (66) que vuela desde un punto (63) de origen a uno de destino (64). El segmento (65) de O&D une, en coordenadas geodésicas, ambos puntos (63,64). La figura 7b muestra la conversión cartográfica del escenario geodésico de la figura 7a en coordenadas Cartesianas.

5 La segunda etapa secundaria es un Recorte (22) Cartesiano aplicado en el escenario (21) plano inicial. Este recorte permite definir el ECTC como el área que solo está formada por los polígonos de NFZs potencialmente involucrados en la definición de la trayectoria lateral más corta. Para identificar dichos polígonos, el método asume que: i) es posible considerar las líneas geodésicas en el plano cartográfico como segmentos rectos (en lugar de ser curvos), porque el FDP se mantiene bajo cierto valor de tolerancia; y ii) la proyección cartográfica utilizada es conforme (los ángulos en la superficie de la tierra se mantienen en el plano). Estos supuestos permiten reducir la complejidad del problema de recorte. Como se desprende de la figura 7, el segmento (65) de O&D se considera un segmento recto y es fácil definir las dos líneas (67) perpendiculares que pasan a través de los puntos de O&D (63,64). Esas líneas definen la porción de tierra aproximada que contiene el ECTC (68). Dado que el método está diseñado para UAS que siempre vuelan desde los puntos de origen a los puntos de destino, los NFZs (61) detrás de esas líneas (67) pueden desestimarse. Como consecuencia, las NFZs (61) remotas son descartadas del escenario original y, a continuación, se reduce el número inicial de polígonos de NFZs y se cambia la extensión del escenario. Por lo tanto, las estimaciones iniciales hechas por la etapa (2) Heurística deben actualizarse.

20 Si los resultados del escenario se recortan y el número de NFZs se reduce (eliminando las NFZs ubicadas fuera del ECTC), se debe realizar una segunda intervención de la etapa (23) Heurística para actualizar los parámetros cartográficos y el tiempo de cálculo estimado del escenario basándose en el nuevo escenario proyectado y recortado. Por el contrario, si no hay NFZs ubicadas fuera del ECTC y, por lo tanto, el número de NFZs permanece igual antes y después del recorte (22) cartesiano, el método pasa directamente la etapa secundaria (24) de Estimación del Factor de Distorsión de la Proyección (FDP).

25 La etapa secundaria (24) de Estimación del FDP obtiene información sobre la distorsión máxima producida en las NFZs por la proyección cartográfica. Dependiendo de la ubicación de los polígonos de NFZs en el plano de proyección cartográfica, el factor de distorsión puede ser igual, mayor o menor que uno. Entre ellos, los factores de distorsión mayores que uno se consideran relevantes para el método, ya que las medidas de distancia en el plano cartográfico serán una distancia geodésica más corta en la superficie de la tierra. Por ejemplo, una medida de 1 metro en el plano considerando un FDP de 1,0001 corresponderá a 0,9999 metros en la superficie de la tierra. Por lo tanto, se debe tener en cuenta el FDP para definir la distancia segura en la etapa (5) de prevención de incursiones en la NFZ para evitar una distancia segura resultante en la superficie de la tierra más corta de lo esperado.

35 Una vez que se ha definido el ECTC (opcionalmente, podría definirse de manera aún más precisa en la segunda iteración de la etapa (23) Heurística) y el FDP se ha estimado (24), la siguiente etapa secundaria es la Validación (25) del Escenario Cartesiano. Los escenarios deben cumplir con algunos requisitos específicos para que puedan ser calculados por el algoritmo de trayectoria más corta. Esta etapa (25) secundaria primero verifica (26) si los puntos de Origen y Destino están dentro de algún polígono de NFZ. Si alguno de los puntos de O&D está dentro de algún polígono, entonces no hay ninguna trayectoria lateral posible que no invada las NFZs y el método no sería aplicable. En segundo lugar, el método verifica (27) la geometría de los polígonos de NFZs proyectados. La geometría no puede ser compleja en el sentido de que los polígonos con orificios o polígonos de auto-intersección no son compatibles. Si la complejidad de los polígonos es elevada, el método puede aplicar un algoritmo de simplificación convencional a los contornos de NFZ. En tercer lugar, el método verifica (28) si el FDP tiene un valor razonable y la distorsión para el escenario específico es viable. Para realizar esta última validación, se establece previamente un umbral de FDP, de modo que el FDP obtenido se compara con el FDP predefinido. Al final de la etapa secundaria (26) de validación, el resultado será la porción del escenario plano correspondiente al ECTC que incluye un conjunto de polígonos planos de NFZ dentro de dicho ECTC.

50 La tercera etapa principal del método que se muestra en la figura 1 es la Reducción (4) de la Complejidad. El número total de vértices que definen las NFZ es esencial para obtener una solución óptima en un tiempo de respuesta requerido. La etapa (4) de reducción de la complejidad aplica diferentes estrategias de reducción de vértices para simplificar la geometría de los polígonos de NFZ a fin de reducir el tiempo de cálculo total en las siguientes etapas. Esta etapa (4) solo se ejecuta cuando el tiempo de cálculo estimado para obtener la trayectoria lateral más corta es mayor que el requerido. Si esto no sucede, los polígonos de NFZ plana se consideran directamente como polígonos de NFZ plana simplificados. La reducción en el número de estos vértices resulta en una menor precisión en la trayectoria lateral obtenida, ya que su definición se basa en los vértices de NFZ. Por el contrario, una definición más precisa de los polígonos de NFZ proporciona mejores soluciones de la trayectoria a expensas de más tiempo de cálculo. Teniendo en cuenta estos problemas, la etapa heurística (2,23) establece un equilibrio entre el tiempo de cálculo requerido y el número de vértices para recomendar una estrategia de reducción adecuada. Como se muestra en la figura 4, el método aplica la estrategia de reducción sobre los polígonos (30) de NFZ plana dentro del ECTC y se obtendrá en esta etapa un conjunto de polígonos (33) de NFZ Plana Simplificados. Se consideran entonces dos posibles estrategias de reducción:

60 La estrategia (31) de simplificación de Cuadro Definidor define todos los polígonos por áreas rectangulares reduciendo el número de vértices a cuatro veces el número de NFZs. Esta solución proporciona un menor tiempo de



cálculo a expensas de la precisión en la solución de la trayectoria. La figura 8a muestra la aplicación de la estrategia de simplificación de cuadro definidor a un NFZ (69) concreto. Como resultado de dicha estrategia se obtiene un cuadro (70) de cuatro lados con dimensiones correspondientes a las distancias más largas de la NFZ plana inicial.

5 La estrategia (32) de Simplificación Lineal se basa en un algoritmo de Douglas-Peucker personalizado. Esta estrategia (32) utiliza una distancia interna, que se denomina Distancia Lineal (DL), entre los lados de los polígonos (30) de NFZ plana y los lados correspondientes de los polígonos (33) de NFZ Plana simplificados, para reducir el número de vértices. La figura 8b muestra el polígono (71) simplificado de NFZ resultante obtenido al aplicar el algoritmo de Douglas-Peucker personalizado en el mismo polígono (69) de NFZ de la figura 8a. El método selecciona y mantiene la distancia DL máxima entre las distancias (72) lineales obtenidas. Este enfoque proporciona un buen equilibrio entre la reducción de la complejidad, el tiempo de cálculo y la precisión de la trayectoria. TDL es igual a 0 si se aplica la estrategia (31) de simplificación de Cuadro Definidor.

La cuarta etapa principal del método mostrado en la figura 1 es la Prevención (5) de Incursiones en la NFZ. La etapa (5) desplaza una distancia de seguridad a los Polígonos (33) de NFZ Plana Simplificados que vienen de la etapa anterior. Como se muestra en la figura 5, esta etapa (5) comprende las siguientes etapas secundarias:

15 La Estimación (40) de la Distancia de Desplazamiento calcula una distancia de separación segura para evitar incursiones en las NFZs, considerando todos los factores de influencia que podrían hacer que los UAS ingresen en las NFZs. Dicha distancia se define para priorizar la ausencia de incursiones en las NFZs, lo que implica sobredimensionar algunos de los factores de influencia a considerar. Por tanto, las trayectorias más cortas serán conservadoras desde una perspectiva de seguridad y, por lo tanto, serán pseudo-óptimas con respecto a la distancia geodésica real. Se deben considerar los siguientes factores: i) El FDP (41) estimado previamente distorsiona las distancias geodésicas reales; por tanto, la medida de distancia de desplazamiento en el plano no es realista en la superficie de la tierra; ii) la Simplificación Lineal traslada los límites de las NFZs hacia su interior, como máximo, la DL (42). Por lo tanto, esta Distancia Lineal (DL) debe ser modificada; iii) el peor Radio (43) de Giro del UAS (RG) también es un factor de distancia a considerar; iv) la Incertidumbre (44) de Posición (PU) del UAS, que dependerá principalmente de las capacidades de navegación del UAS. La siguiente expresión reúne todos estos factores para estimar una distancia de desplazamiento segura

$$\text{Distancia de desplazamiento (DD)} = \text{FDP} * (\text{DL} + \text{RG} + \text{PU})$$

Opcionalmente, se puede añadir una Distancia de desplazamiento Constante (DC) para asegurar una distancia mínima de las NFZs. En este caso, la estimación final de la distancia de desplazamiento debería ser:

30 
$$\text{Distancia de desplazamiento (DD)} = \text{FDP} * (\text{DL} + \text{RG} + \text{PU} + \text{DC})$$

La Aplicación (45) de la Distancia de Desplazamiento (traslada el límite de los polígonos (73) de la NFZ hacia su exterior a la distancia (75) de desplazamiento específica (DD) calculada en la etapa (40) secundaria anterior. Esto resulta en un conjunto de NFZs (74) planas desplazadas. Cuando cualquiera de los ángulos de un polígono (74) de NFZ desplazado es muy agudo, deben cortarse (46) en bisel para aumentar el Espacio de Configuración y no perder las trayectorias laterales potenciales, como se muestra en la figura 9. El área (76) recortada deja fuera los polígonos (47) de NFZ plana desplazados y simplificados.

40 Como resultado de la aplicación de la distancia de desplazamiento, algunos polígonos de NFZ (77,78), con sus respectivas áreas de desplazamiento (79,80) que los rodean, pueden superponerse como se muestra en la figura 10. Después, se combinan (48) creando un nuevo polígono (49) de NFZ simplificado con un área (81) de desplazamiento única, como se muestra en la figura 11.

Al final de la etapa (5) de prevención de incursiones en la NFZ, se obtiene un conjunto de Polígonos (49) de NFZ Plana Simplificados, Desplazados y Combinados.

45 La quinta etapa principal del método que se muestra en la figura 1 es la etapa (6) de Identificación de la Trayectoria Lateral. Esta etapa (6) encuentra la distancia de la trayectoria más corta pseudo-óptima entre los puntos de Origen y Destino. Esta etapa (6) comprende las siguientes etapas secundarias:

Una primera etapa secundaria es la aplicación de un algoritmo (51) de Gráfico de Visibilidad al ECTC para encontrar todas las trayectorias laterales posibles entre los puntos de O&D. Dicho algoritmo encuentra la trayectoria más corta a través de los límites de los polígonos de envoltura convexa. La entrada para esta etapa secundaria serán los polígonos (49) de NFZ cartográfica Simplificados, Desplazados y Combinados que provienen de la etapa anterior. Por lo tanto, la primera etapa secundaria interna es la aplicación (50) de un algoritmo de Envoltura Convexa. Sin embargo, el algoritmo de envoltura convexa no se puede aplicar en los casos en que los puntos de origen y destino o cualquier otro punto de una NFZ estén contenidos dentro de las áreas de envoltura convexa de otra NFZ, ya que en estos casos se descartarán las potenciales trayectorias más cortas. La figura 12a muestra un caso concreto en el que el algoritmo de envoltura Convexa modificaría (ver línea discontinua (84)) el perímetro de la NFZ1 (82) de modo que la NFZ1 (82) y NFZ2 (83) se solaparían cerrando el espacio entre ambas NFZ (82,83) descartando una potencial trayectoria más corta. La figura 12b muestra otro caso concreto en el que el punto (85) de destino se

encuentra dentro de los límites de los polígonos de envoltura convexa. Por tanto, si se aplica el algoritmo de envoltura convexa el método nunca encontraría una solución.

Después de la aplicación (50) del algoritmo de Envoltura Convexa, se aplica el algoritmo (51) de Gráfico de Visibilidad para identificar todas las trayectorias geométricas probables entre los puntos de O&D, como se muestra en la figura 13. Dicha figura muestra 3 polígonos de NFZ cartográfica Simplificados, Desplazados y Combinados (86,87,88) (las líneas discontinuas representan las áreas de desplazamiento que rodean las NFZs) y un UAS (89) que intenta llegar a un punto (90) de destino desde un punto (91) de origen. El algoritmo (51) identifica las conexiones visibles entre el conjunto total de puntos del ECTC. Si el segmento de línea que conecta dos puntos (o ubicaciones) no pasa a través de ningún obstáculo, se crea un nuevo borde entre ellos y se añade al gráfico. Estos segmentos de línea conectan los puntos de O&D con el vértice de las áreas de desplazamiento. Estos segmentos de línea se representan con líneas continuas en la figura 13. Además, la longitud de cada borde se calcula (ya sean distancias Euclidianas o Geodésicas) y se añaden como un atributo del borde que se usará para identificar la distancia de la trayectoria más corta.

Una vez que se ha desarrollado el gráfico de visibilidad, la siguiente etapa secundaria es la ejecución del algoritmo (52) de Dijkstra que encuentra la trayectoria con el coste más bajo (es decir, la distancia de trayectoria más corta) entre los puntos de O&D.

La siguiente etapa secundaria es la selección del conjunto (53) cartográfico de puntos de referencia que define la trayectoria más corta y después, los puntos de referencia se convierten (54) a coordenadas geodésicas para definir una trayectoria geodésica más corta pseudo-óptima. Finalmente, se obtendrá la trayectoria (55) geodésica definida por los puntos de referencia y el UAS volará por la trayectoria lateral geodésica más corta creada.

Ha de considerarse que la trayectoria lateral más corta obtenida es pseudo-óptima por dos razones. La primera razón es porque solo trabajando con coordenadas planas sin distorsión puede asegurarse que la trayectoria obtenida sea la más corta. La segunda razón es que la simplificación de polígonos y el añadir un desplazamiento introducen necesariamente algunas distorsiones que afectarán a la trayectoria obtenida.

El método funcionaría incluso cuando no hay NFZ dentro del ECTC ya que la trayectoria lateral más corta será la línea recta.

Las figuras 14 a 19 muestran un modo de realización concreto de la aplicación del método a un escenario específico. Dicho escenario (100) en coordenadas geodésicas, como se muestra en la figura 14, tiene un ECTC (101) delimitado entre los puntos de Origen (O) y Destino (D), dichos puntos que definen el vector (104) de intención de vuelo de, por ejemplo, una (105) plataforma de UAS. El método primero ejecuta la etapa (2) heurística analizando el escenario (100) geodésico inicial. Como resultado de esta etapa heurística, el método obtiene una proyección cartográfica del escenario (100) geodésico inicial. El ECTC (100) comprende un primer conjunto (102) de NFZs potencialmente involucradas en la solución de la trayectoria lateral que debe considerarse. Hay un segundo conjunto (103) de NFZs ubicadas fuera del ECTC (101) que se recortarán para reducir la complejidad del escenario geodésico inicial. Después de la aplicación de la transformación (3) del diseño geodésico al escenario (1) geodésico original, se obtiene un escenario (106) cartográfico original, como se muestra en la figura 15, estando dicho escenario (106) enfocado en la NFZ (107-113) potencialmente involucrada en la solución de la trayectoria lateral. Dado que el escenario se ha recortado, el segundo conjunto (103) de NFZs se ha descartado, la etapa heurística se ejecuta nuevamente sobre el escenario (106) plano recortado. El método estima un tiempo de cálculo que se necesita para obtener una solución de la trayectoria lateral y lo compara con el tiempo de cálculo requerido previamente definido. En este caso, se selecciona una estrategia de simplificación lineal para reducir el tiempo de cálculo estimado. Después, el método calcula el FDP y verifica: i) que los puntos de Origen y Destino están fuera de cualquier NFZ, no hay polígonos complejos y el FDP obtenido está por debajo de un umbral predefinido. Se aplica la estrategia de simplificación lineal seleccionada que consiste en un algoritmo de Douglas-Peucker personalizado que simplifica los polígonos al reducir su número de vértices (los polígonos de NFZ resultantes están marcados con líneas discontinuas en la figura 15). A continuación, se calcula la distancia lineal máxima (DL).

La figura 16 muestra los polígonos de NFZ simplificados (107-113) a los que se ha añadido el área de seguridad. La línea discontinua que rodea cada NFZ (107-113) representa el área de seguridad. Dicha área de seguridad está definida por el FDP, la Distancia Lineal y el Radio de Giro de la aeronave (105) no tripulada y la Incertidumbre de la Posición introducida por el sistema de navegación a bordo. Las áreas de seguridad de NFZs (107,108) y NFZs (111,113) se superponen, por lo que se combinan. Opcionalmente, el método puede cortar en bisel los bordes de cualquiera de las NFZs si es necesario. Luego se aplica el algoritmo de envoltura convexa encontrando la trayectoria más corta a través de los límites de los polígonos de envoltura convexa. La figura 17 muestra el resultado de la aplicación del algoritmo de envoltura convexa al escenario (104). El área de seguridad de la NFZ combinada (107,108), la NFZ combinada (111,113) y la NFZ (109) se modifica, ver línea de trazos discontinuos.

La figura 17 muestra las NFZs con las áreas de seguridad resultantes que las rodean. El método aplica el algoritmo de Gráfico de Visibilidad que identifica todas las trayectorias geométricas probables entre los puntos de Origen y Destino. Todas las trayectorias geométricas identificadas conectan vértices de las áreas de seguridad evitando pasar sobre cualquiera de las NFZs. Finalmente, el método identifica la trayectoria (114) lateral más corta aplicando

el algoritmo de Dijkstra, ver figura 19. El conjunto cartográfico de puntos de referencia que define la trayectoria más corta se convierte a coordenadas geodésicas para definir una trayectoria geodésica más corta pseudo-óptima que se envía a un generador de trayectos de la aeronave no tripulada. Finalmente, la aeronave (105) no tripulada volará por la trayectoria (114) lateral geodésica más corta obtenida.

5

**REIVINDICACIONES**

1. Un método de generación autónoma de la trayectoria lateral más corta para sistemas aéreos no tripulados (UAS), en donde se define previamente un Radio de Giro constante (RG) y una trayectoria vertical constante de una plataforma de UAS, el método que comprende las etapas de:
  - 5 a) recibir un escenario inicial definido en coordenadas cartográficas, comprendiendo el escenario inicial un punto (91) de origen y un punto (90) de destino que definen un vector que representa una intención de vuelo inicial de la plataforma de UAS y al menos una Zona de Exclusión de Vuelo (NFZ) (86, 87, 88);
  - 10 b) estimar un tiempo de cálculo para obtener la trayectoria lateral más corta que evite al menos una NFZ, siendo el tiempo de cálculo requerido directamente proporcional a un número total de vértices de al menos una NFZ y verificar si el tiempo de cálculo estimado es menor o igual a un tiempo de cálculo requerido previamente proporcionado; y, aplicar un algoritmo de reducción de vértice a al menos una NFZ solo cuando el tiempo de cálculo estimado es mayor que el tiempo de cálculo requerido;
  - c) determinar un área de seguridad que rodea cada NFZ individual, en donde el área de seguridad se define trasladando los límites de la NFZ hacia su exterior por una distancia de desplazamiento;
  - 15 d) construir un gráfico de visibilidad que comprenda todas las trayectorias (92) laterales posibles entre el punto (91) de origen y el punto (90) de destino evitando las áreas de seguridad, siendo las trayectorias laterales posibles todas las combinaciones posibles de vectores que conectan los vértices de las áreas de seguridad; y
  - e) determinar la trayectoria lateral más corta entre todas las trayectorias laterales posibles generadas en la etapa d).
2. El método de generación autónoma de la trayectoria lateral más corta, de acuerdo con la reivindicación 1, en donde cuando el escenario inicial está definido en coordenadas geodésicas, antes de la etapa a), el método comprende:
  - 20 definir una proyección cartográfica del escenario inicial considerando una extensión geométrica y una ubicación geográfica del escenario inicial; y
  - 25 convertir el escenario inicial definido en coordenadas geodésicas en un escenario inicial equivalente definido en coordenadas cartográficas aplicando la proyección cartográfica definida al escenario inicial definido en coordenadas geodésicas.
3. El método de generación autónoma de la trayectoria lateral más corta, de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, que comprende:
  - 30 determinar un espacio de configuración como un área delimitada por dos líneas perpendiculares al vector de intención de vuelo inicial, pasando cada línea perpendicular a través de los puntos de origen y destino, respectivamente; y,
  - descartar cualquier NFZ ubicada fuera del Espacio de Configuración.
4. El método de generación autónoma de la trayectoria lateral más corta, de acuerdo con la reivindicación 3, en donde cuando se ha descartado al menos una NFZ y al menos una de las NFZ está ubicada dentro del Espacio de Configuración, el método comprende además ejecutar las etapas b) a e) considerando solo las NFZs dentro del Espacio de Configuración.
5. El método de generación autónoma de la trayectoria lateral más corta, de acuerdo con la reivindicación 2, en donde se comprende el estimar un factor de escala introducido por la conversión del escenario inicial definido en coordenadas geodésicas en el escenario inicial equivalente definido en coordenadas cartográficas.
- 40 6. El método de generación autónoma de la trayectoria lateral más corta, de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el algoritmo de reducción de vértice se selecciona entre un algoritmo de cuadro definidor mínimo y un algoritmo de simplificación lineal.
7. El método de generación autónoma de la trayectoria lateral más corta, de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la etapa c) comprende además cortar en bisel los bordes de las porciones angulares de las áreas de seguridad, donde las porciones angulares tienen un ángulo menor que un umbral de ángulo predefinido.
- 45 8. El método de generación autónoma de la trayectoria lateral más corta, de acuerdo con la reivindicación 7, en donde la etapa c) comprende además la combinación de las áreas de seguridad superpuestas de NFZs contiguas.
9. Un sistema para generar de manera autónoma la trayectoria lateral más corta para sistemas aéreos no tripulados (UAS) que comprende:

- un generador autónomo de trayectoria lateral configurado para recibir un escenario inicial en coordenadas cartográficas, comprendiendo el escenario inicial al menos una Zona de Exclusión de Vuelo (NFZ) (86, 87, 88) y un punto (91) de origen y un punto (90) de destino que determinan un vector de intención de vuelo inicial de la plataforma de UAS;
- 5 medios para determinar un tiempo de cálculo estimado para obtener la trayectoria lateral más corta evitando las NFZs, siendo dicho tiempo de cálculo directamente proporcional a un número total de vértices de las NFZs, y verificar si el tiempo de cálculo estimado es menor o igual a un tiempo de cálculo requerido previamente proporcionado;
- 10 medios para reducir el número total de vértices de las NFZs mediante la aplicación de un algoritmo de reducción de vértice a cada NFZ solo cuando el tiempo de cálculo estimado sea mayor que el tiempo de cálculo requerido;
- medios para determinar una distancia de desplazamiento y para crear un área de seguridad que rodea cada NFZ en donde el área de seguridad se define trasladando los límites de la NFZ hacia su exterior por la distancia de desplazamiento de seguridad;
- 15 medios para crear un gráfico de visibilidad con todas las trayectorias (92) laterales posibles entre el punto (91) de origen y el punto (90) de destino que evitan las áreas de seguridad, siendo las trayectorias laterales posibles todas las combinaciones posibles de vectores que conectan los vértices de las áreas de seguridad y
- estando además el generador de trayectoria lateral configurado para determinar la trayectoria lateral más corta entre todas las trayectorias laterales generadas.
- 20 10. El sistema para generar de manera autónoma la trayectoria lateral más corta, de acuerdo con la reivindicación 9, que comprende medios para definir una proyección cartográfica del escenario inicial definido en coordenadas geodésicas y convertir el escenario inicial en un escenario inicial definido en coordenadas cartográficas aplicando la proyección cartográfica al escenario inicial.
- 25 11. El sistema para generar de manera autónoma la trayectoria lateral más corta, de acuerdo con la reivindicación 10, que comprende medios para determinar un Espacio de Configuración como un área delimitada por dos líneas perpendiculares al vector de intención de vuelo inicial, pasando cada línea perpendicular a través de los puntos de origen y destino, respectivamente, y medios para identificar y descartar cualquier NFZ ubicada fuera del Espacio de Configuración.
- 30 12. El sistema para generar de manera autónoma la trayectoria lateral más corta, de acuerdo con la reivindicación 10, que comprende medios para estimar un factor de escala introducido por la conversión del escenario inicial definido en coordenadas geodésicas en el escenario inicial definido en coordenadas cartográficas.
- 35 13. El sistema para generar de manera autónoma la trayectoria lateral más corta, de acuerdo con la reivindicación 9, que comprende medios para verificar que los puntos de Origen y Destino están ubicados fuera de cualquier área de seguridad y medios para estimar un Factor de Distorsión de la Proyección como el factor de escala mínimo que asegura que las distancias de desplazamiento de seguridad son siempre iguales o mayores que una distancia de seguridad mínima.

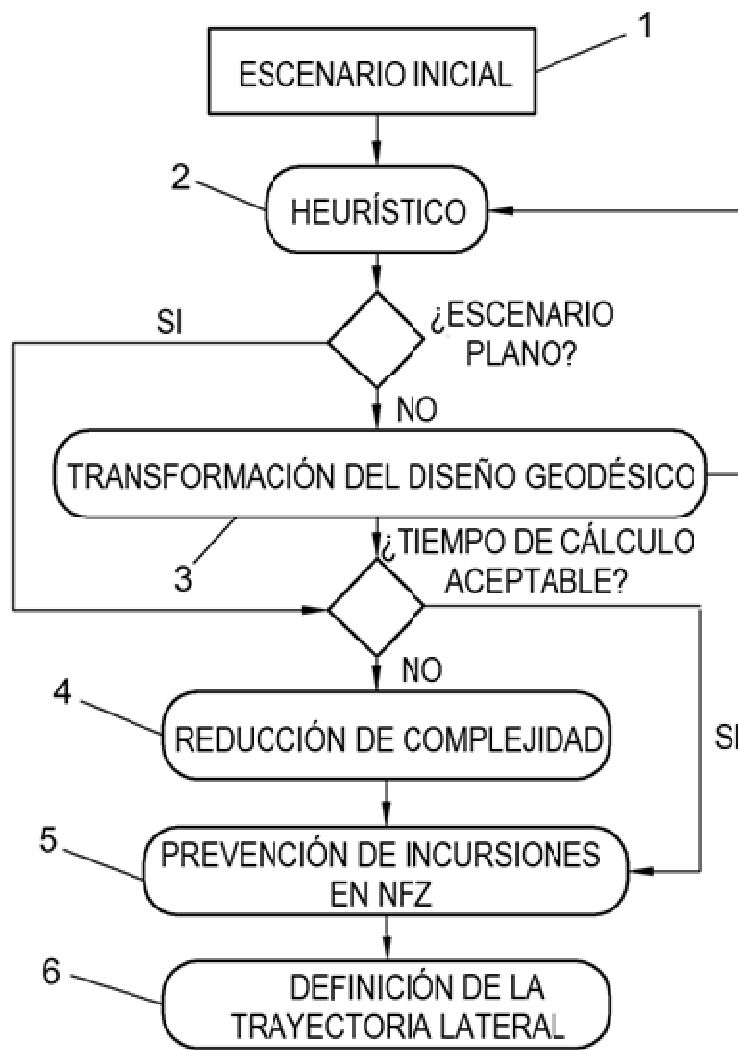


FIG. 1

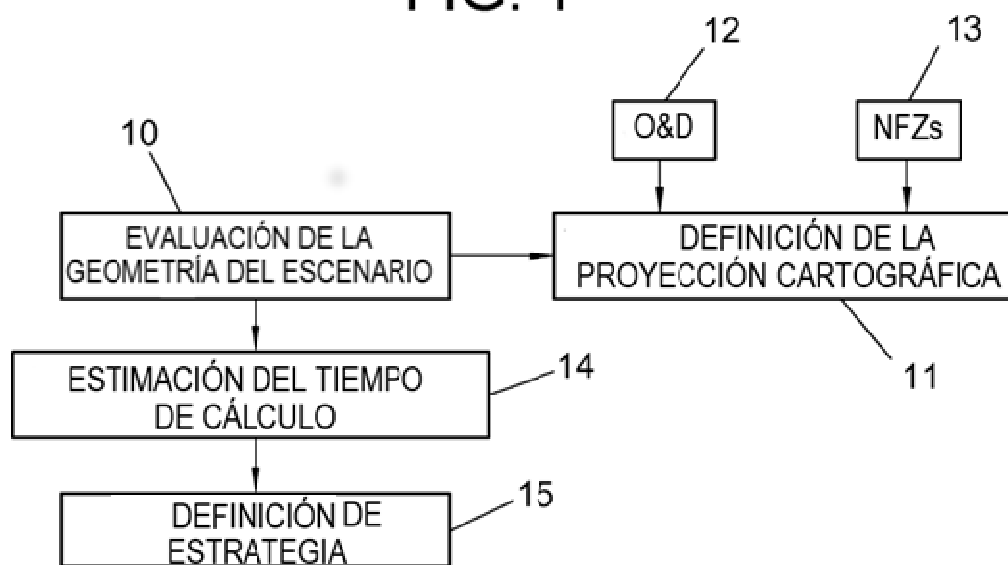


FIG. 2

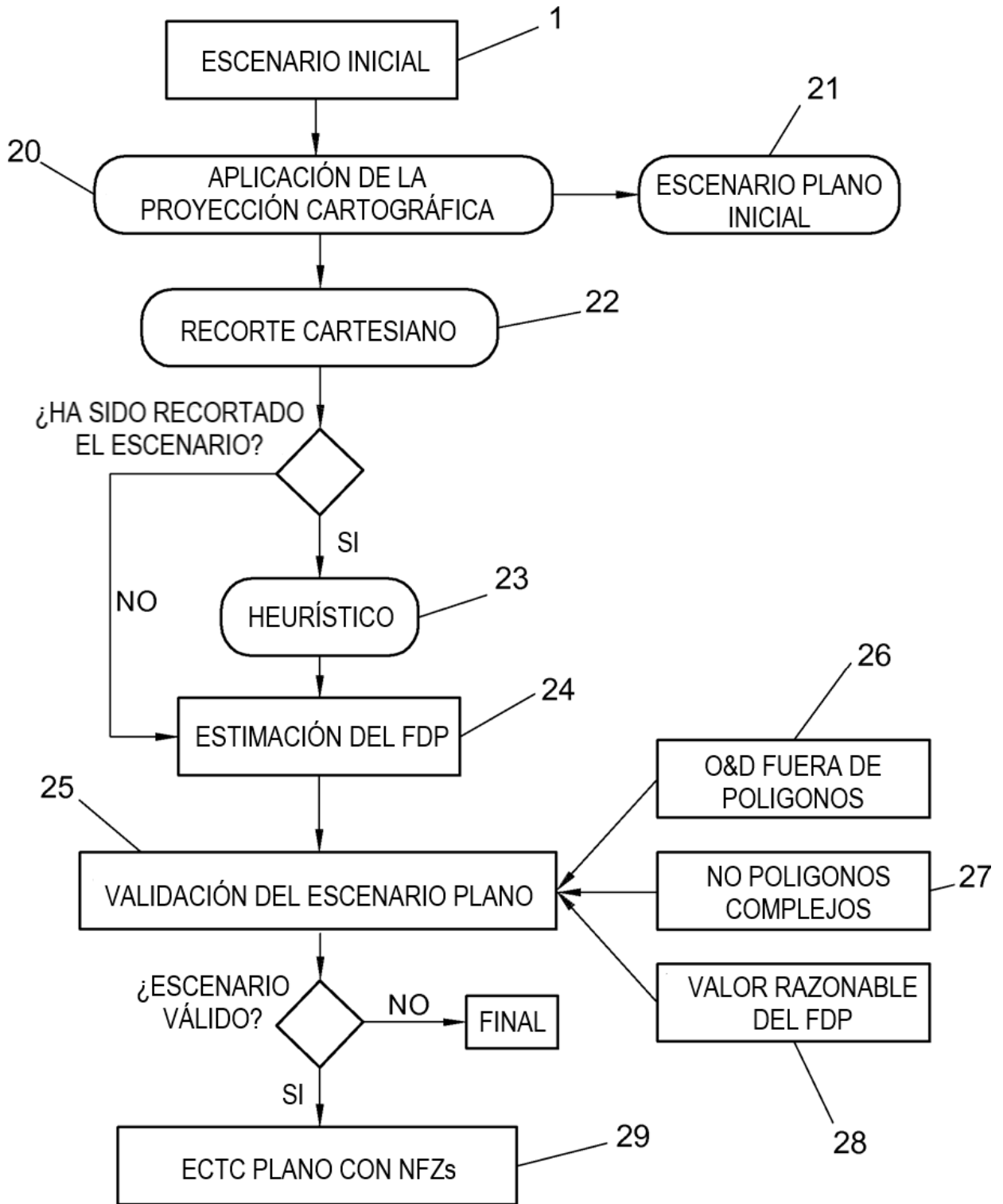


FIG. 3

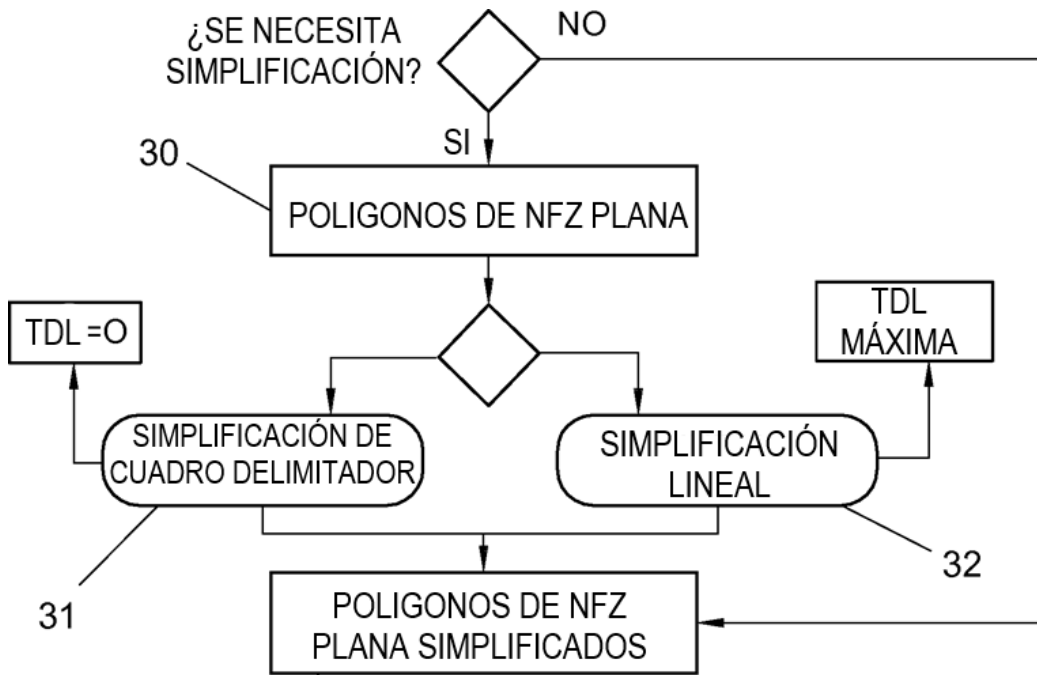


FIG. 4

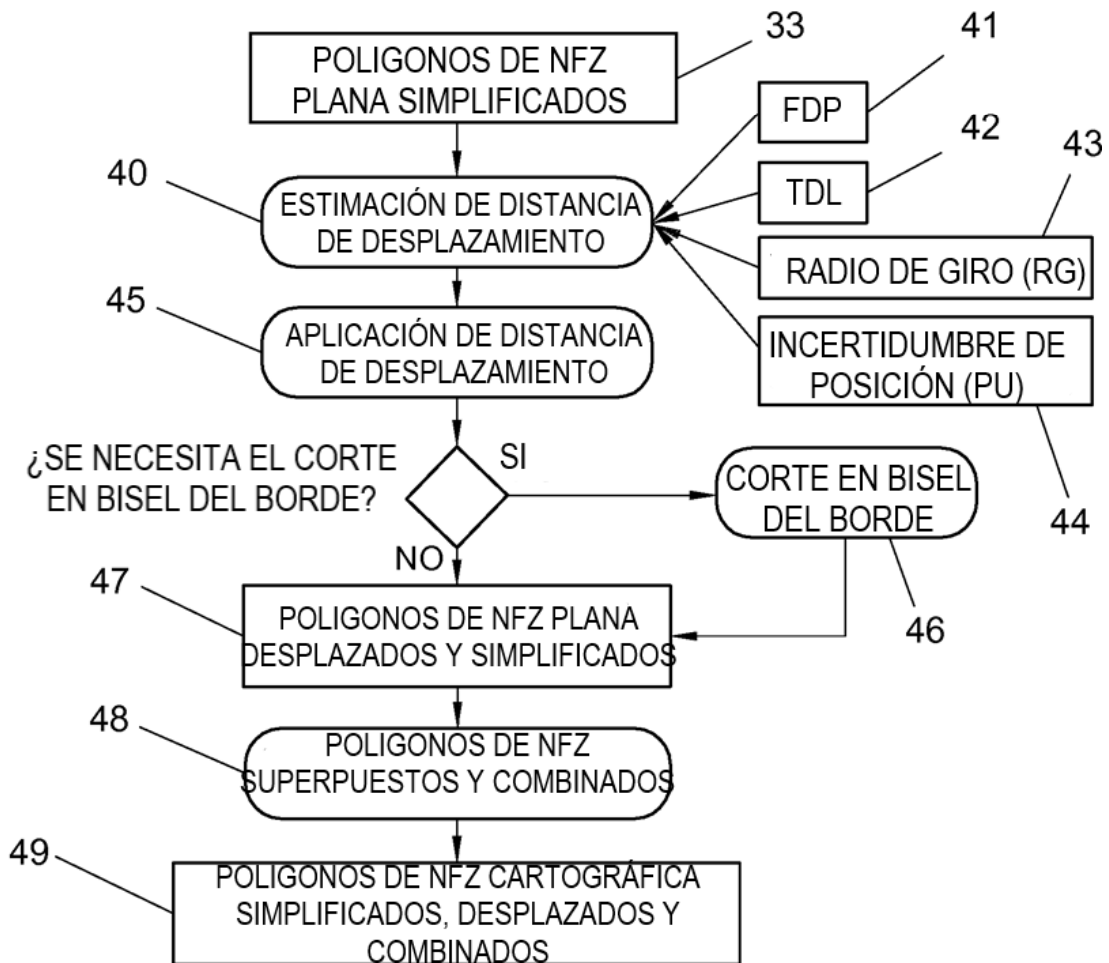


FIG. 5



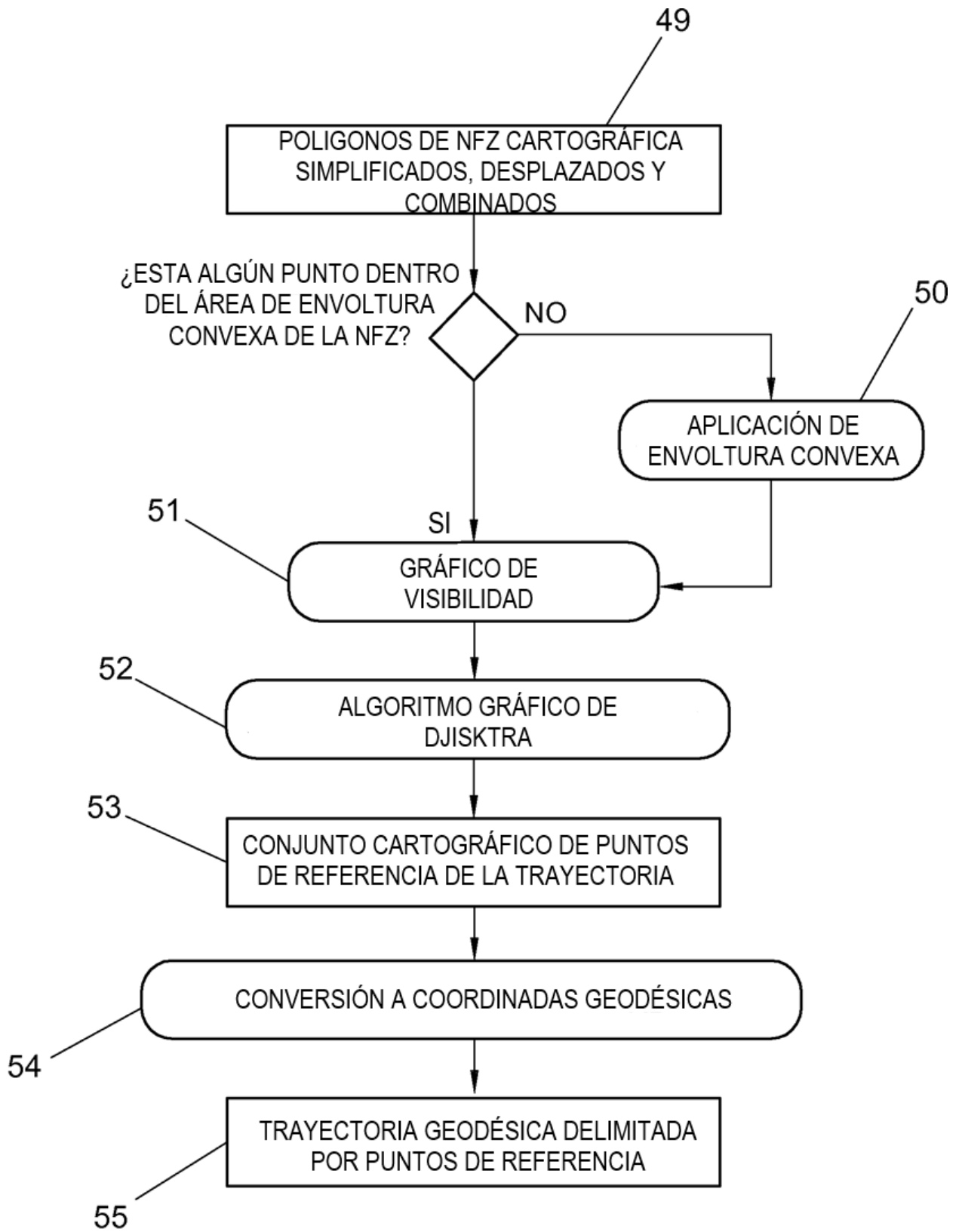


FIG. 6

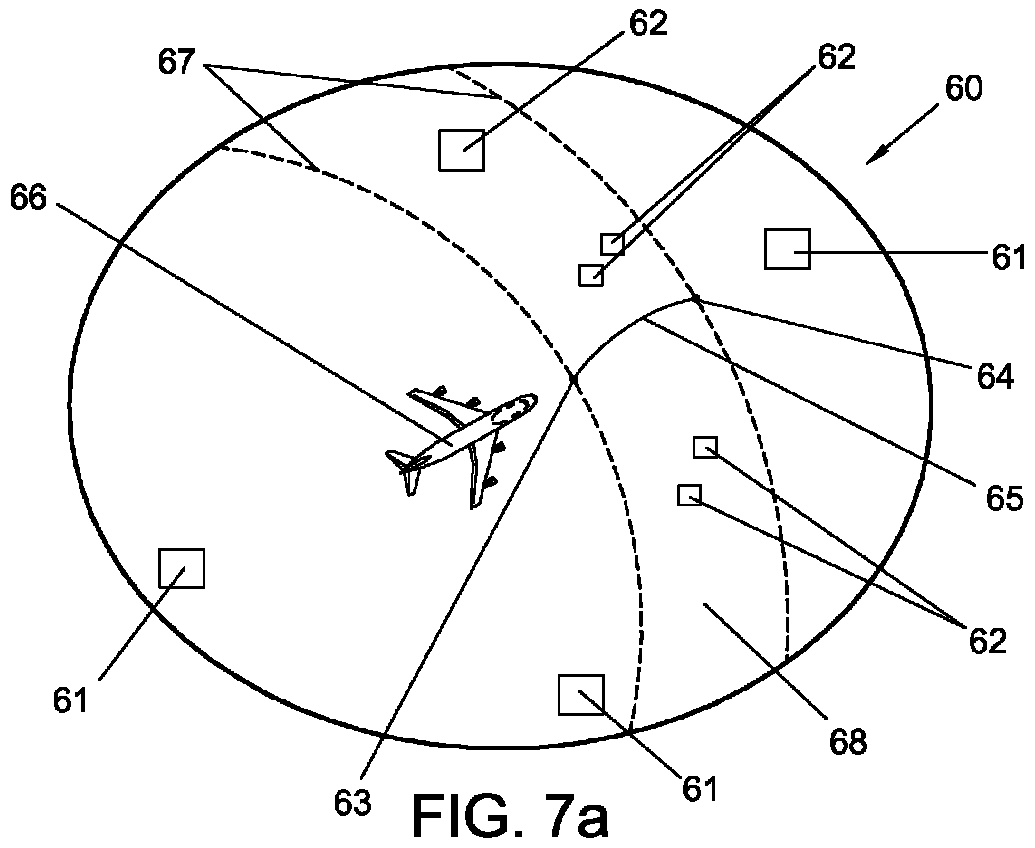


FIG. 7a

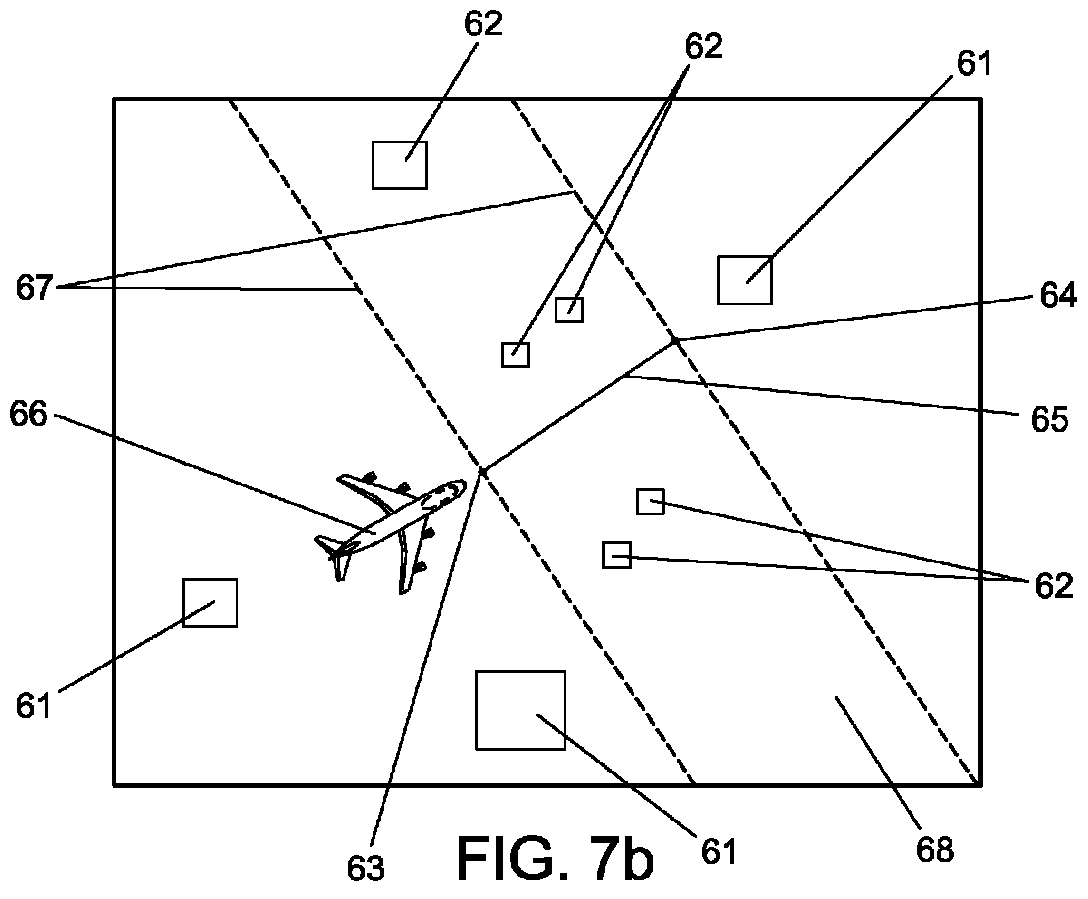


FIG. 7b

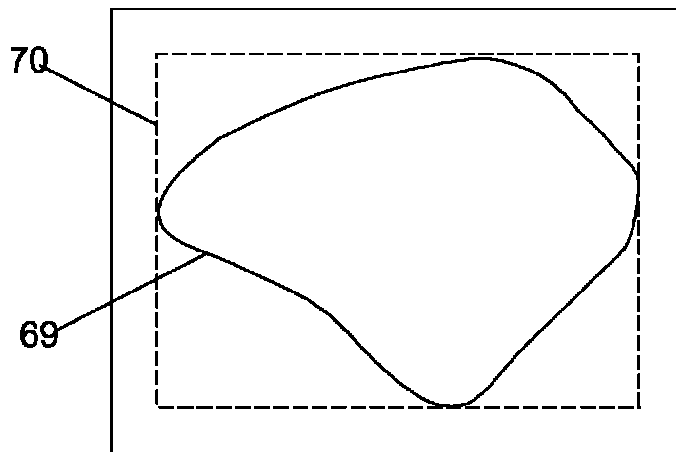


FIG. 8a

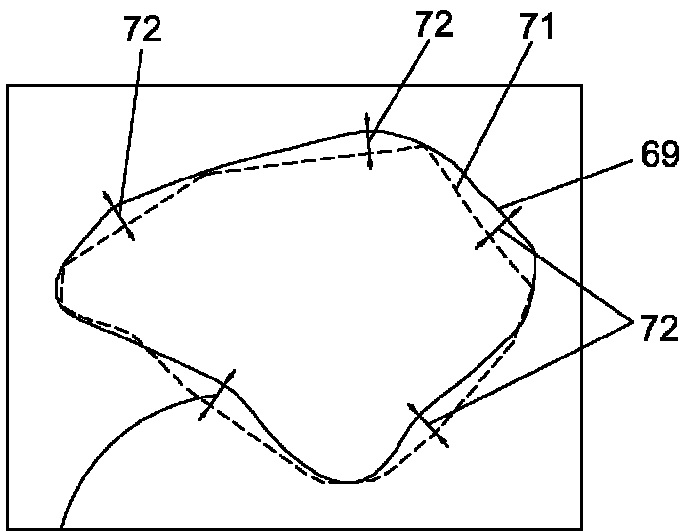


FIG. 8b

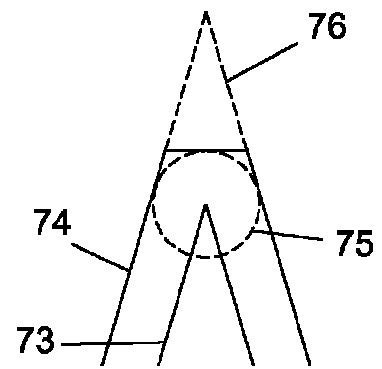


FIG. 9

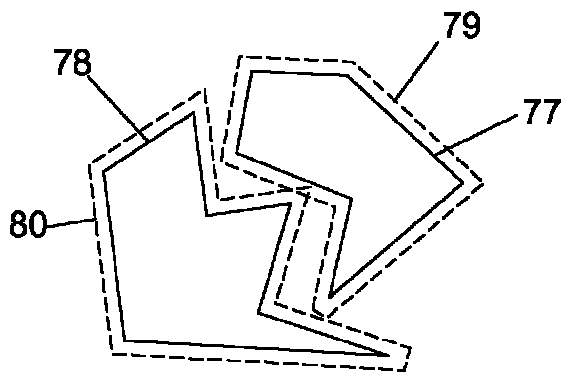


FIG. 10

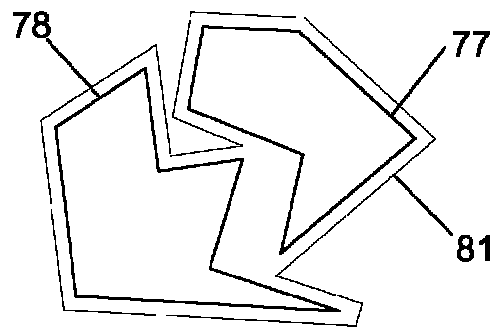


FIG. 11

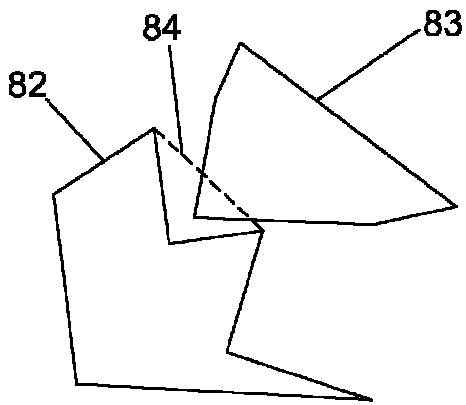


FIG. 12a

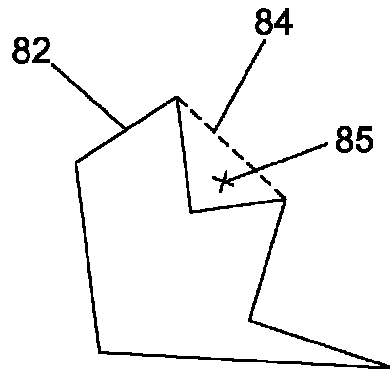


FIG. 12b

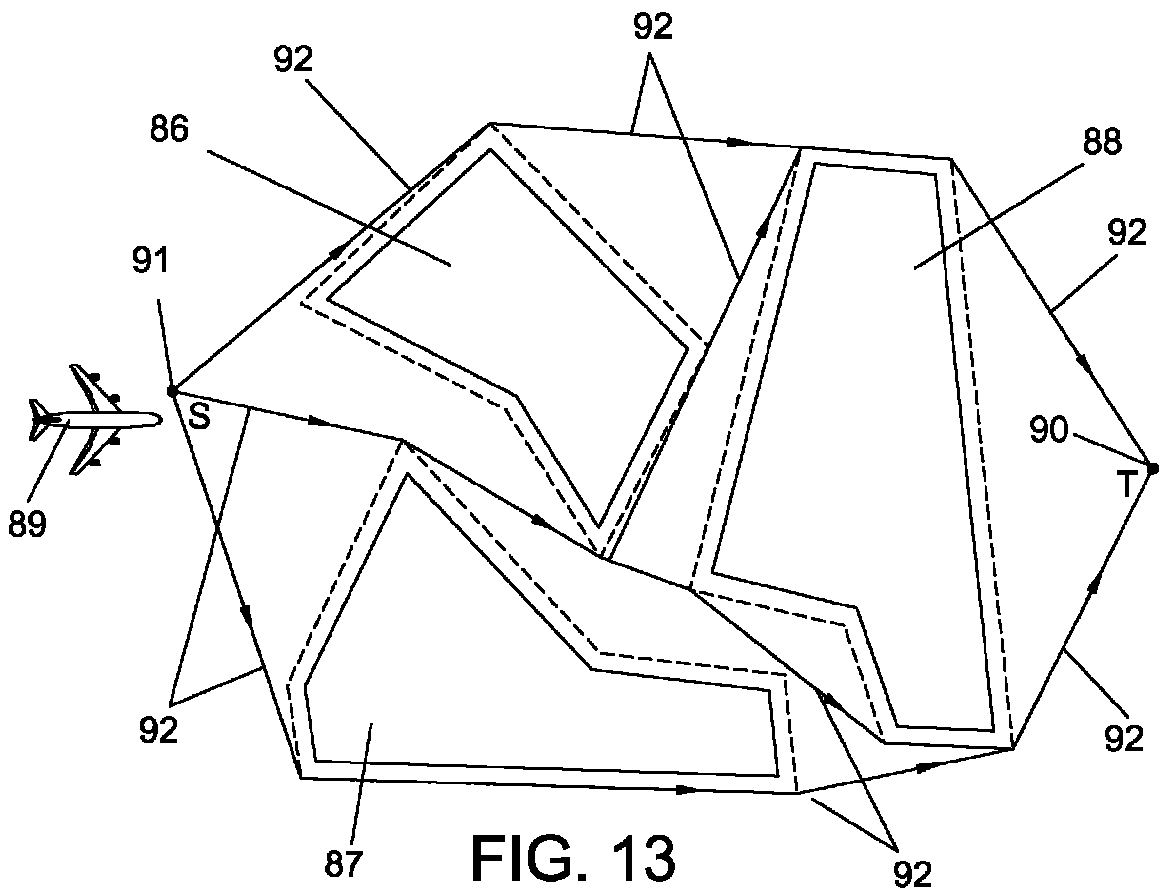
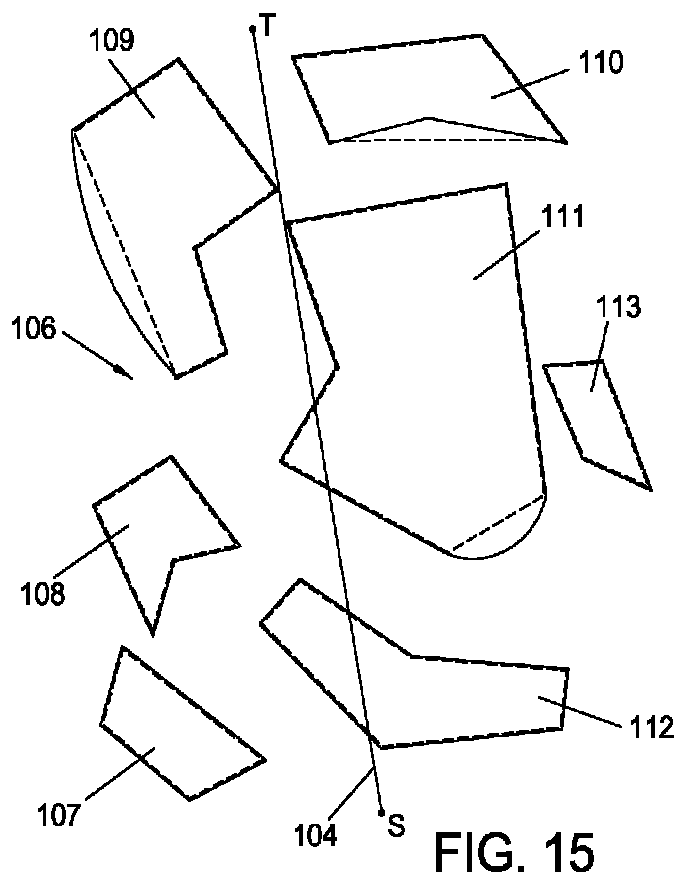
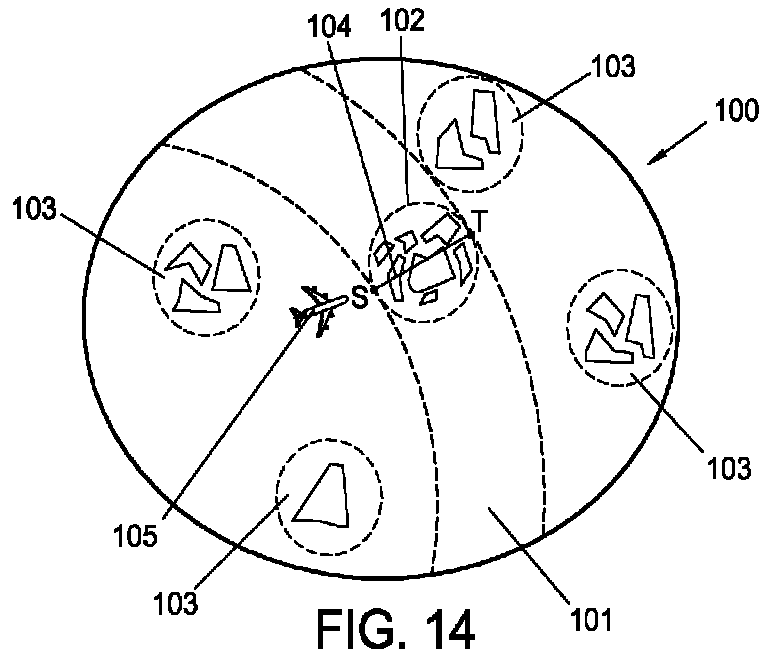


FIG. 13



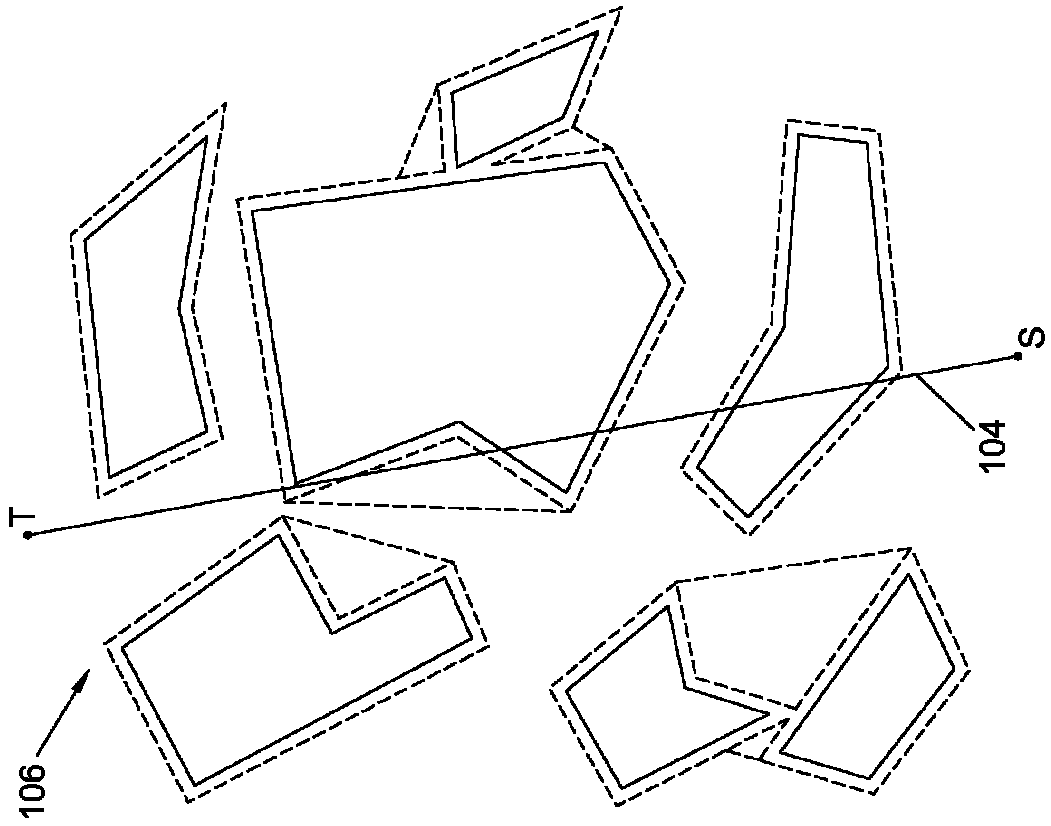


FIG. 17

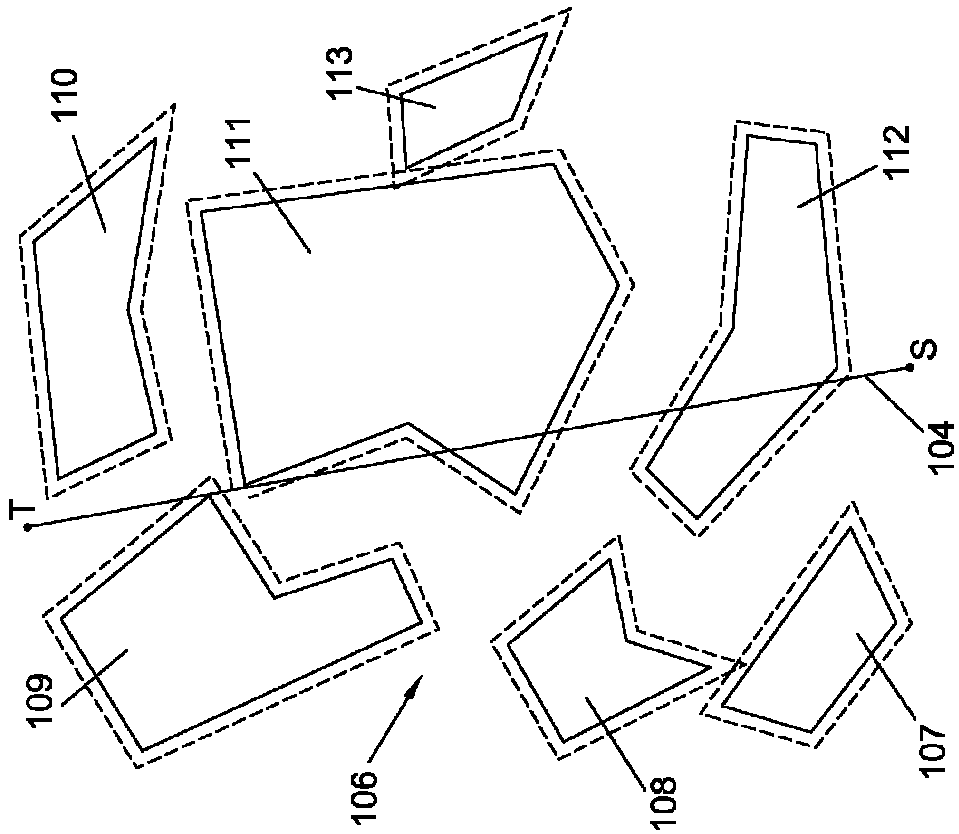


FIG. 16

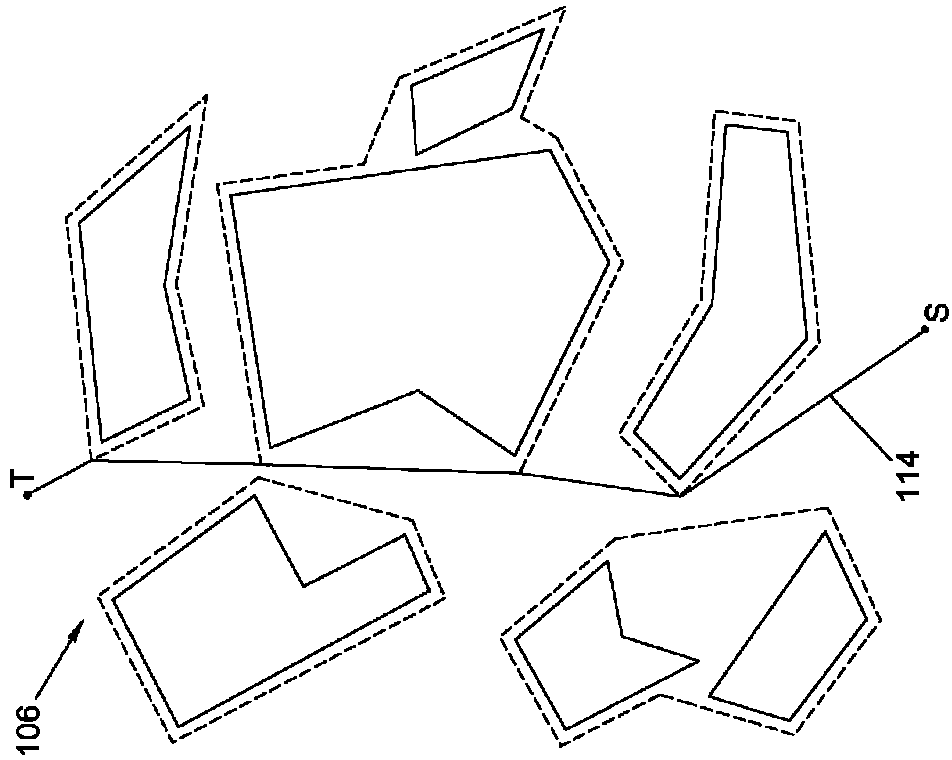


FIG. 19

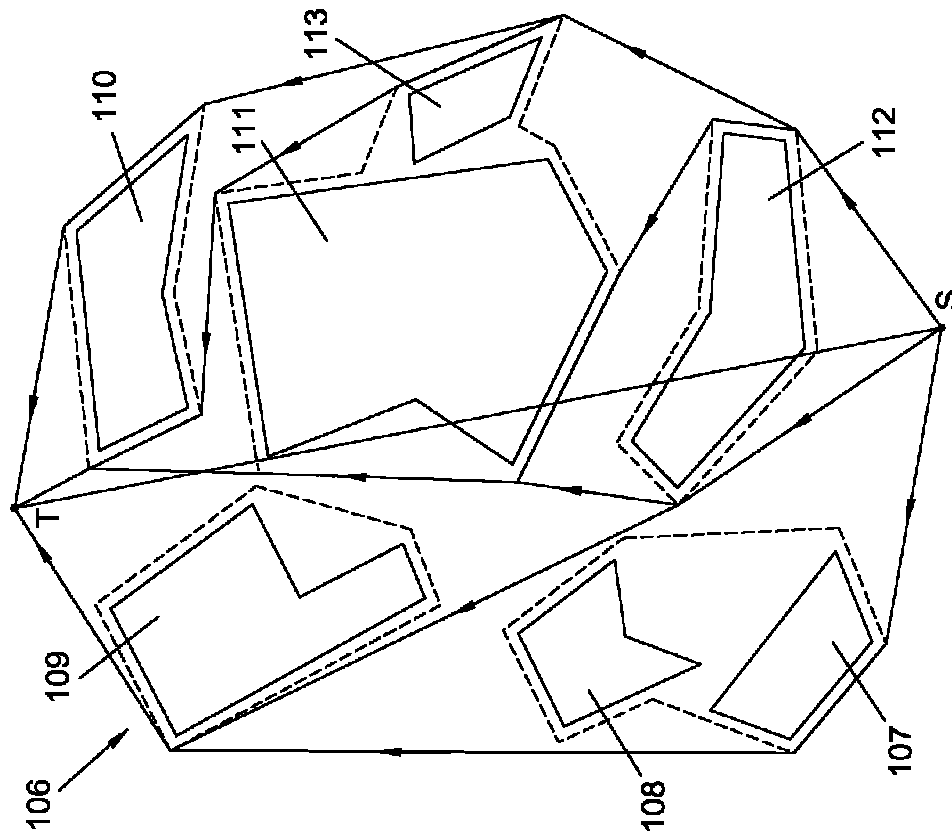


FIG. 18