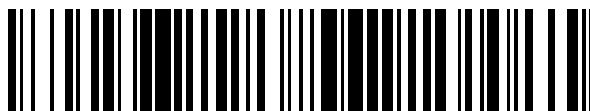


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 778 828**

51 Int. Cl.:

G05D 1/10 (2006.01)

G05D 1/00 (2006.01)

F03D 17/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.09.2017 E 17382598 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.01.2020 EP 3454159**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo de navegación autónoma**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
12.08.2020

73 Titular/es:

**ALERION TECHNOLOGIES, S.L. (100.0%)
Calle Etxaide 10, Bajo Derecha
20005 Donostia - San Sebastian (Gipuzkoa), ES**

72 Inventor/es:

**GHIGLINO NOVOA, PABLO, FRANCISCO;
BARBADILLO AMOR, JAVIER;
COMÍN CABRERA, FRANCISCO, JOSÉ y
PEÑAGARICANO MUÑOA, OIER**

74 Agente/Representante:

GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo

ES 2 778 828 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

Procedimiento y dispositivo de navegación autónoma

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a vehículos aéreos no tripulados (UAV, *Unmanned Aircraft Vehicles*) y sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS, *Remotely Piloted Aircraft Systems*) conocidos habitualmente como drones o aeronaves no tripuladas, que usan computación de alto rendimiento, visión artificial, fusión de sensores y software de navegación autónoma.

10 Más particularmente, la presente invención se refiere a un procedimiento y dispositivo (dron) de navegación autónoma, especialmente para entornos extremos, que tiene aplicación en la inspección de componentes (por ejemplo, componentes de un aerogenerador o turbina eólica), recogida de objetos, para tareas de limpieza, etc.

Antecedentes de la invención

15 Hoy en día, los drones pueden aplicarse en muchos campos. Por ejemplo, puede sustituirse a los técnicos humanos que inspeccionan turbinas eólicas y sus componentes como palas por vehículos aéreos no tripulados (UAV) o sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) para evitar a estos técnicos altamente especializados un trabajo tedioso y bastante costoso, así como para impedir que haya accidentes mientras el técnico escala para las tareas de inspección.

20 Se divulga un ejemplo de drones para este propósito concreto en el documento EP2527649A1 que hace referencia a un UAV para inspeccionar componentes de una turbina eólica. Se guía el UAV hasta el componente que es necesario inspeccionar, que tiene una determinada distancia predefinida entre el UAV y el componente escogido de manera que se pueden recopilar imágenes de alta resolución del componente mediante el UAV. Por tanto, se realiza la inspección con control remoto para detectar automáticamente daños en el componente basándose en las imágenes recopiladas por el UAV o los datos de imagen resultantes (por ejemplo, detectar patrones térmicos de greitas en palas de la turbina eólica). Se usan datos de GPS para el control remoto de este UAV. Otros ejemplos relevantes de drones que inspeccionan estructuras de forma autónoma se divulgan en el documento WO2017050893A1 y en el documento US2016017866A1.

25 Sin embargo, una detección eficaz de daños en los componentes de un aerogenerador requiere obtener imágenes de alta resolución a poca distancia y, por lo tanto, requiere que el procedimiento de navegación haga que el UAV vuele en relación con la estructura, y no que use mediciones de posicionamiento absolutas tales como GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, Beidou), referencias visuales, sistemas de captura de movimiento, u otros procedimientos.

30 Por otro lado, la tecnología de LiDAR (*Light Detection and Ranging*, medición y detección de distancia por luz) se conoce bien. LiDAR es un procedimiento de levantamiento que mide la distancia hasta un objetivo iluminando ese objetivo con una luz de láser pulsado, y que mide los pulsos reflejados con un sensor. Los sensores de exploración LiDAR se usan ampliamente en industrias tales como levantamiento topográfico, reconstrucción 3D y robótica. Pueden combinarse las mediciones de LiDAR con mediciones inerciales y temporales para una reconstrucción 3D exacta de superficies y objetos. Esto está usándose ahora ampliamente en vehículos autónomos, levantamiento y reconstrucción de objetos.

35 Por tanto, es altamente deseable proporcionar un procedimiento de navegación para un vehículo aéreo no tripulado que permita ajustes de trayectoria para detectar y rastrear objetos o componentes individuales de una estructura mientras navega a una distancia relativa del objeto/la estructura.

Sumario de la invención

40 La presente invención resuelve los problemas mencionados anteriormente y supera las limitaciones de trabajo del estado de la técnica expuestas anteriormente proporcionando un procedimiento de navegación autónoma para un dron (UAV, RPAS) que usa una combinación de mediciones obtenidas mediante un dispositivo de exploración por láser LiDAR, que puede ser o bien bidimensional (2D) o bien tridimensional (3D), procesamiento de imágenes y fusión de sensores inerciales.

45 Se divulga un dispositivo de navegación autónoma (dron) basado en LiDAR para que vuele de manera exacta alrededor de un objetivo, que es un objeto individual o una estructura compuesta por múltiples objetos que van a rastrearse (por ejemplo, un generador de energía eólica), estando el dron configurado para:

- Volar a una distancia predeterminada del objetivo (por ejemplo, la estructura del aerogenerador). Esta distancia puede ser variable o fija, pero siempre una distancia predeterminada que es relativa desde el dron hasta el objetivo.
- 50 - Mantener el objetivo (por ejemplo, la estructura del aerogenerador) centrado en la imagen grabada por la cámara del dron. El LiDAR y la cámara están calibrados de tal manera que para cada fotograma de imagen, el dron conoce qué píxeles corresponden a mediciones de LiDAR. Esto permite mantener uno o más objetos de la estructura objetivo (por ejemplo, las palas de turbina eólica) siempre centrados con respecto al dron.

- Realinear el dron en caso de perturbaciones del viento, rastreo inexacto de la trayectoria, o correcciones. Si las mediciones de LiDAR indican que la estructura ya no está centrada con respecto a la cámara, el dron puede realinearse por sí mismo de manera instantánea.

5 - Mantener la estructura centrada y a una distancia fija independientemente de la orientación de los objetos (por ejemplo, las palas del aerogenerador).

Un primer aspecto de la presente invención se refiere a un procedimiento de navegación autónoma para rastrear objetos, de una turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 1.

10 En un segundo aspecto de la presente invención, se divulga un dispositivo (dron) que implementa el procedimiento de navegación autónoma descrito anteriormente. El dispositivo comprende un dispositivo de exploración LiDAR (2D o 3D), sensor de visión artificial y medios de procesamiento de un ordenador de a bordo (OBC, *on-board computer*) configurado para realizar el procedimiento descrito anteriormente.

15 En un último aspecto de la presente invención, se divulga un programa informático, que comprende medios de código de programa informático adaptados para realizar las etapas del procedimiento descrito, cuando se ejecuta dicho programa en medios de procesamiento de un dispositivo para navegación autónoma (UAV, RPAS, denominado habitualmente dron).

El sector eólico es un escenario de aplicación principal y una oportunidad de negocio del mayor potencial, pero la presente invención también tiene otras aplicaciones, centradas principalmente en estructuras irregulares o de enrejado (no un cubo): torres de CSP (*Concentrated Solar Power*, energía solar concentrada), torres de observación, torres de caída de parques de atracciones, faros, torres de radiotelevisión, torres de transmisión, puentes colgantes, ...

20 El dron y procedimiento de navegación autónoma según los aspectos de la invención descritos anteriormente tienen varias ventajas con respecto a la técnica anterior, que pueden resumirse de la siguiente manera:

25 - La presente invención proporciona mediciones más exactas relacionadas con el objeto que va a rastrear el dron dado que puede ajustarse su vuelo en todo momento para obtener imágenes de alta resolución. En una aplicación particular, la invención constituye una plataforma autónoma para inspeccionar las palas de generadores de energía eólica, independientemente de su tamaño, ubicación geográfica y orientación. Esto se logra debido a la implementación y tecnologías de navegación relativa basadas en LiDAR y visión artificial aplicadas a la navegación alrededor de turbinas eólicas, y al mantenimiento de la plataforma centrada con respecto a la estructura del aerogenerador en todo momento.

30 - La presente invención también proporciona un procedimiento que es conforme y repetible independientemente de las condiciones del viento y la geometría del aerogenerador. Las mediciones de LiDAR garantizan un rastreo y centrado correctos de las palas en la imagen que no pueden proporcionar el posicionamiento GNSS y el pilotaje humano. Los resultados son repetibles y conformes con cada vuelo, haciendo que sea un procedimiento fiable y manipulable a lo largo del tiempo.

35 - La presente invención elimina la necesidad de interacción humana, haciendo que la plataforma sea completamente autónoma y realice un procedimiento automático, independientemente de la geometría de la estructura del aerogenerador.

- La presente invención reduce considerablemente los tiempos de inspección dado que permite que el UAV siga de manera más exacta un trayecto óptimo. Sin la tendencia a inexactitudes de GNSS o intervención humana.

Estas y otras ventajas resultarán evidentes a la vista de la descripción detallada de la invención.

40 **Descripción de los dibujos**

Con el propósito de ayudar a la comprensión de las características de la invención, según una realización práctica preferente de la misma y con el fin de complementar esta descripción, se adjuntan las siguientes figuras como parte integrante de la misma, que tienen un carácter ilustrativo y no limitativo:

45 La figura 1 muestra un escenario de aplicación de un dispositivo de navegación autónoma para rastrear un generador de energía eólica, según una realización preferente de la invención.

La figura 2 muestra una máquina de estados simplificados de un sensor LiDAR en el dispositivo de navegación autónoma para detectar la turbina de energía eólica.

La figura 3 muestra los puntos de referencia de la trayectoria y los umbrales de altitud para el despegue y aterrizaje del dispositivo de navegación autónoma.

50 La figura 4 muestra una maniobra de ascenso del dispositivo de navegación autónoma para salvar el aerogenerador.

La figura 5 muestra un diagrama de flujo de control del dispositivo de navegación autónoma.

La figura 6 muestra una trayectoria de viraje en ángulo del dispositivo de navegación autónoma.

La figura 7 muestra una trayectoria de giro orbital del dispositivo de navegación autónoma.

5 La figura 8A muestra un ajuste de trayectoria reactivo del dispositivo de navegación autónoma cuando la pala está demasiado cerca.

La figura 8B muestra un ajuste de trayectoria reactivo del dispositivo de navegación autónoma cuando la pala está demasiado lejos.

La figura 8C muestra un ajuste de trayectoria reactivo del dispositivo de navegación autónoma cuando la pala no está centrada.

10 Realización preferente de la invención

15 El contenido definido en esta descripción detallada se proporciona para ayudar a una comprensión exhaustiva de la invención. Por consiguiente, los expertos habituales en la técnica reconocerán que pueden realizarse cambios derivativos y modificaciones de las realizaciones descritas en el presente documento sin apartarse del ámbito y el espíritu de la invención. Además, se omite la descripción de funciones y elementos bien conocidos para mayor claridad y concisión.

Por supuesto, las realizaciones de la invención pueden implementarse en una variedad de sistemas arquitectónicos de dispositivos de navegación autónoma o drones. Cualquier implementación o diseño arquitectónico particular presentado en el presente documento se proporciona solamente con fines de ilustración y comprensión y no se pretende que limite aspectos de la invención.

20 Una realización preferente de la invención se refiere a un procedimiento de navegación de un dron (1) para detectar y rastrear partes individuales de un aerogenerador (10) que comprende, tal como se muestra en la figura 1, los siguientes objetos que van a rastrearse: las palas (11, 11'), el mástil (12) y la góndola (13). Este procedimiento se usa principalmente para detectar la orientación del aerogenerador (10) y ajustar la posición del dron (1) para que esté
25 delante de la góndola (13) para iniciar la inspección. El procedimiento propuesto también se usa para detectar el extremo de las palas (11, 11') y para ayudar a realizar giros circulares manteniendo una distancia constante hasta la punta de las palas (11, 11'). El funcionamiento básico de este dron (1) es el siguiente:

- El operario sitúa las palas (11, 11') del aerogenerador de modo que una pala (11) de las mismas apunte hacia el cielo de manera tan vertical como sea posible, creando una forma de Y invertida.
- Se sitúa el dron (1) delante de la góndola (12) para iniciar la inspección.
- 30 - Se inspecciona verticalmente la pala (11) vertical con giros de 90 grados y se inspeccionan las otras dos palas (11'), en primer lugar el borde de ataque, luego el borde de salida, después las dos carcasas.
- el dron (1) aterriza en la posición de despegue o el suelo (20).

El dron (1) inspecciona la pala (11) vertical de la siguiente manera:

- 35 - Despega y alcanza una altitud predeterminada, preferiblemente 10 metros, y se mide la distancia hasta el mástil (12) del aerogenerador y la anchura de la estructura.
- Inicia el ascenso delante del mástil (12), mientras rastrea la estructura mediante mediciones de distancia de LiDAR y determina continuamente la anchura.
- Detecta una y después dos de las palas (11') mientras se asciende y se rastrea el mástil (12).
- 40 - Continúa ascendiendo y rastreando el mástil (12) y las palas (11') hasta que se unen en una estructura circular, es decir, la góndola (13) para determinar la posición y orientación del dron (1) con respecto a la góndola (13).
- Ajusta la posición del dron (1) de tal manera que esté centrado con respecto a la góndola (13) y a una distancia fija.
- Asciende una altura predeterminada y se aproxima al comienzo de la tercera pala (11) a una distancia fija.
- 45 - Asciende por la tercera pala (11), la más vertical, que puede estar bastante inclinada, mientras se mantiene esta pala (11) vertical centrada con respecto a la cámara del dron (1).
- Gira 90 grados en sentido antihorario en la punta de la pala (11) vertical para inspeccionar el otro lado.
- Desciende mientras se rastrea la pala (11) vertical, se ajusta la posición para mantener la cámara centrada en la

pala (11) vertical.

- Gira 90 grados en sentido antihorario en un cuarto de círculo en la punta de la pala (11) vertical para inspeccionar el otro lado.

5 - Ascende mientras se rastrea la pala (11) vertical y se ajusta la posición para mantener la cámara centrada en la pala (11) vertical.

- Gira 90 grados en sentido antihorario en un cuarto de círculo en la punta de la pala (11) vertical para inspeccionar el otro lado.

- Desciende mientras se rastrea la pala (11) vertical y se ajusta la posición para mantener la cámara centrada en la pala (11) vertical.

10 - Gira 90 grados en sentido antihorario en un cuarto de círculo en la punta de la pala (11) vertical para inspeccionar el otro lado.

- Regresa para aterrizar sobre el suelo (20) mientras se mantiene la estructura del aerogenerador (10) a una distancia de seguridad.

El dron (1) inspecciona las otras dos palas (11') de la siguiente manera:

15 - Rastrea el borde de ataque a través de una línea que está aproximadamente 30 grados por debajo de la línea horizontal.

- Gira 180 grados para inspeccionar el borde de salida.

- Rastrea el borde de salida a través de una línea que está aproximadamente 30 grados por debajo de la línea horizontal.

20 - Gira 90 grados para inspeccionar la carcasa superior de la pala (11').

- Desciende con un ángulo de 30 grados mientras se rastrea la pala (11').

- Desciende hasta la carcasa inferior de la pala (11').

- Ascende con un ángulo de 30 grados.

- Continúa hasta el siguiente sitio y se repite el procedimiento anterior.

25 Para rastrear objetos, el dron (1) comprende al menos un sensor LiDAR, que puede medir la distancia hasta una superficie o varias superficies con cada medición. La información proporcionada por cada medición de LiDAR procedente del sensor LiDAR puede usarse para determinar la anchura, altura y distancia hasta varios objetos al mismo tiempo, y rastrear estos objetos en el tiempo con mediciones sucesivas. En primer lugar, se descartan todas las mediciones procedentes del sensor LiDAR cuya distancia está más cerca o más lejos que un umbral de interés,

30 mediante un algoritmo de segmentación ejecutado por medios de procesamiento, un ordenador de a bordo, del dron (1). Además, un filtro retira las mediciones aisladas en términos de distancia relativa para evitar datos con ruido. Entonces se agrupan las mediciones según la distancia relativa usando un umbral que sea adecuado para el modelo de turbina eólica. Por ejemplo, la unión de la pala (11, 11') con la góndola (13) no puede considerarse un único objeto puesto que la góndola (13) está varios metros más cerca que la pala (11, 11'). Para este caso específico, es interesante

35 adaptar el umbral para poder segmentar esos objetos en lugar de obtener un único objeto que después puede someterse a procesamiento posterior. El resultado de esta segmentación es una serie de objetos LiDAR identificados por la posición de las muestras. Después, el dron (1) aplica un algoritmo de rastreo para cada serie detectada de objetos segmentados, con el fin de descartar aquellos objetos que no persisten en el tiempo, como mediciones con ruido, objetos volantes o insectos, o cualquier otro evento transitorio. Para cada serie de objetos segmentados, se

40 comprueba cada objeto frente a los objetos rastreados actualmente. Para cada objeto LiDAR segmentado, se computa un conjunto de atributos o características para este rastreo: si las características de objeto coinciden con cualquier objeto rastreado, se actualiza la nueva posición y el objeto permanece rastreado; si las características no coinciden con ningún objeto entrante durante varias lecturas, entonces se pierde el rastro y se elimina el objeto de la lista. Para evitar perder el rastreo debido a mediciones de LiDAR con ruido existe un umbral para mediciones consecutivas cuando se pierde el objeto. Esto quiere decir que si se ocluye un objeto durante un par de iteraciones, este no se perderá. La salida del algoritmo para cada exploración de LiDAR es una serie de objetos rastreados con identificador,

45 características y estado de rastreo. Considerando que un objeto de LiDAR es un grupo de lecturas de LiDAR definidas por distancias y ángulos, entonces se calculan las siguientes características: distancia media, distancia proyectada, anchura, altura, ángulo izquierdo, ángulo derecho, ángulo superior y ángulo inferior. Estas características e

50 identificador son suficientes para detectar las partes del aerogenerador. La detección de turbina eólica usa los objetos rastreados para hacer coincidir un patrón de búsqueda basándose en la navegación alrededor de las turbinas eólicas. Esto usa conocimiento previo de la forma del aerogenerador y la ruta de navegación. Por ejemplo, se sabe que cuando el dron (1) está enfrentado a la torre o el mástil (12), ningún objeto puede estar cerca de la turbina eólica por encima

de una determinada distancia con respecto al suelo (20). El algoritmo de detección de turbina eólica, cuya máquina de estados se muestra en la figura 2, para buscar el mástil (12) inicia después de un umbral de altura para evitar vegetación y objetos bajos y buscar un objeto de determinada anchura en la región central. Usando esta información una máquina de estados puede definir los estados de navegación y las posibles transiciones y eventos. Dado que el dispositivo de exploración de LiDAR tiene un campo de visión reducido, los objetos rastreados no aparecen como objetos completos y esta situación obliga a adaptar los estados de navegación para hacerlos coincidir con objetos parciales en las posiciones deseadas.

La figura 2 presenta un esquema de estados y transiciones simplificados para configurar el dron (1) para que realice la detección del aerogenerador (10) mediante LiDAR. Se alcanza el estado de "torre de rastreo" tan pronto como aparezca un objeto centrado dentro de los umbrales de distancia y anchura deseados durante algunas iteraciones consecutivas. Aunque es un algoritmo simple, es muy robusto porque no se supone que ningún objeto esté en la zona alrededor del mástil (12). La máquina de estados está en este estado mientras se rastrea el objeto o las dos palas (11'), no estando las palas (11') en una posición vertical sino en una más baja, aparecen en escena. Las condiciones para el rastreo son muy permisivas para evitar perder el objeto por vibración, oclusiones temporales o lecturas con ruido. El evento "detectadas dos palas" desencadena la transición al estado de "torre de rastreo y palas inferiores". Este evento se produce cuando aparecen dos objetos a izquierda y derecha del objeto rastreado previamente, es decir, la torre o el mástil (12). Eventualmente, esos tres objetos convergen en la góndola (13) en alguna iteración, lo que desencadena la transición a "góndola de rastreo". Este estado es muy importante porque se usa la altura de la góndola (13) para calcular el prisma de navegación. Finalmente, cuando aparece en escena un nuevo objeto alineado con la góndola (13), pero más alejado y más estrecho, se desencadena la transición al estado de "pala de rastreo". Este estado, que rastrea la pala (11) vertical, producirá una transición a "punta de rastreo" cuando se detecta en la parte superior el extremo del objeto.

Para añadir más robustez a la detección LiDAR, se aplica visión artificial combinada con navegación LiDAR. En las siguientes etapas de navegación, se repiten los mismos estados de la máquina de estados simplificados con variaciones menores. Además, se usa la información procedente de etapas previas, tal como la posición de la góndola (13). Dado que pueden calibrarse las lecturas de LiDAR para corresponder a píxeles en la cámara del dron (1), el resultado de calibración es una matriz de rotación y una matriz de traslación que proyectan las mediciones de LiDAR sobre el sistema de referencia de imagen. La calibración permite que se muestre la medición de LiDAR en una imagen en escala de grises o RGB 2D. Esta calibración proporciona una serie de mediciones con la distancia, posición x e y, en la imagen para cada fotograma captado por la cámara. Esto es muy útil para mejorar algoritmos de visión artificial dado que añade información de profundidad a la imagen. Por ejemplo, cuando se detecta la góndola (13) usando LiDAR, un algoritmo de visión artificial para detectar la góndola (13) puede añadir robustez y precisión. El algoritmo de visión artificial busca tres palas (11, 11'), cada pala puede considerarse un par de segmentos paralelos, que convergen en un punto central, separadas por ángulos de 120 grados. Los resultados de LiDAR muestran qué píxeles en la imagen están cerca de los bordes de la pala (11, 11'). En una realización preferente de la invención, se detecta la góndola (13) cuando tanto LiDAR como la visión artificial informan de su detección.

Aunque las capacidades de detección y rastreo de aerogeneradores proporcionadas por LiDAR tal como se describió anteriormente hacen, en teoría, que la navegación sea indiferente en cuanto a las dimensiones y la posición del aerogenerador (10), se desea proporcionar una estimación inicial de la posición relativa del dron (1) y la base (30) del mástil del aerogenerador, así como las dimensiones principales del aerogenerador (10). Esto es para que la navegación sea más segura y más robusta con respecto a errores de sensor de dron e incertidumbres ambientales. Todas las ubicaciones objetivo se definen como posiciones en las que se supone que el RPAS está estabilizado horizontalmente, es decir los ángulos de cabeceo y balanceo son nulos. Por tanto, los puntos de referencia correspondientes a esos objetivos P pueden definirse como una serie de cuatro elementos: las tres coordenadas cartesianas lineales ($x \equiv$ hacia delante, $y \equiv$ hacia la izquierda y $z \equiv$ hacia arriba) y el rumbo angular θ .

$$P = [x, y, z, \theta]$$

Este esquema de navegación supone que el dron (1) está configurado y armado sobre terreno plano, dentro de un alcance de 10-20 metros desde el mástil (12) del aerogenerador y enfrentado aproximadamente al mismo, de modo que se garantiza que el objeto más cercano detectado por el LiDAR después del despegue es el propio mástil (12).

Tal como se muestra en la figura 3, tras la configuración e inicialización de la inspección, la ubicación de partida $P_H = [0, 0, 0, 0]$ se define como la posición actual del dron (1) y se ordena una maniobra de despegue convencional automatizada. Una vez que se alcanza un umbral de altitud de despegue mínima z_T , el ordenador de a bordo, OBC, del dron (1) toma el control e inicia las órdenes para su navegación hacia un punto de referencia inicial directamente por encima de la ubicación de partida a una altitud 3 m por encima de dicho punto de referencia inicial $P_T = [0, 0, 0, z_T + 3]$. Una vez que se completa un vuelo de inspección nominal, el OBC ordena al dron (1) que navegue hacia un punto de referencia final $P_L = [0, 0, 0, z_L - 3]$, directamente por encima de la ubicación de partida y a una altitud 3 m inferior a un umbral de altitud de aterrizaje máxima (z_L). Una vez que se alcanza dicho umbral, se ordena una maniobra de aterrizaje convencional automatizada que tiene como objetivo la ubicación de partida y el OBC libera el control. El propósito de estos umbrales de altitud y los márgenes entre ellos y los puntos de referencia inicial/final, tal como se representan en la figura 3, es para garantizar transiciones de control seguras y robustas entre OBC y maniobras de despegue/aterrizaje automatizadas. En caso de niveles críticos de batería baja o comportamiento anómalo, el piloto

humano puede abortar de manera instantánea la navegación en cualquier punto desencadenando un regreso automático a la maniobra de partida. Esta maniobra sigue uno de dos posibles comportamientos:

a. Si el dron (1) está horizontalmente en un alcance de 10 m desde la posición de partida P_H o está inspeccionando las carcacas de las palas (11') oblicuas desde abajo, el dron (1) navegará en horizontal directamente hasta la ubicación verticalmente por encima de la posición de partida, y luego descenderá hacia la misma y aterrizará.

b. Si el dron (1) está en horizontal más alejado que 10 m de la posición de partida P_H y no está inspeccionando las carcacas de las palas (11') oblicuas desde abajo, el dron (1) ascenderá en primer lugar en vertical hasta un umbral de altitud definido (z_s), luego navegará en horizontal hasta la ubicación verticalmente por encima de la posición de partida, y finalmente descenderá hacia la misma y aterrizará. Esta maniobra de ascenso adicional, tal como se muestra en la figura 4, se realiza para garantizar que se salva la estructura del aerogenerador. Por tanto, el umbral de altitud (z_s) corresponde a la suma de la altura de la góndola del aerogenerador (n_H), el desfase de altitud con respecto al suelo (g_{AO}) entre la base (30) del mástil del aerogenerador y la ubicación de partida del RPAS (P_H), el radio de la góndola $n_D/2$, n_D que indica el diámetro de la góndola, la longitud de pala (b_L) más un margen de seguridad de 20 metros, es decir,

$$z_s = n_H + g_{AO} + n_D/2 + b_L + 20$$

El umbral de altitud (z_s) del segundo caso descrito anteriormente actúa en ambos sentidos, lo que significa que si durante el funcionamiento normal el dron (1) alcanza ese nivel de altitud, que indica un comportamiento de ascenso indefinido/anómalo, se generará automáticamente que se aborte haciendo que el dron (1) regrese a la posición de partida y aterrice. Además de este regreso automatizado a la maniobra de partida, se permite que el piloto humano anule las órdenes del OBC del dron (1) en cualquier punto, tomando el control manual del dron (1) y haciendo que aterrice con el radiomando.

La figura 5 muestra un diagrama de flujo de los diferentes comportamientos de control mencionados anteriormente para maniobrar el dron (1).

Tras la inicialización de la inspección divulgada anteriormente, se configura previamente un esquema de los puntos de referencia de navegación principales según la posición y las dimensiones principales del aerogenerador (10), así como las distancias de inspección de pala deseadas en la sección más estrecha de la pala (11, 11'), es decir la punta, y en la sección más ancha de la pala (11, 11'), es decir la línea de cuerda de sección transversal más larga en las carcacas. Estos puntos de referencia establecen las ubicaciones inicial y objetivo para cada trayectoria que va a realizarse durante una inspección completa del aerogenerador, correspondiendo los puntos de referencia primero y último a los puntos de referencia posteriores al despegue y anteriores al aterrizaje mencionados anteriormente. Se definen un total de 24 puntos de referencia para las fases de inspección de pala, correspondientes a los puntos de referencia delante de los extremos de punta y raíz de la pala para cada uno de los cuatro lados, es decir borde anterior/de ataque, borde posterior/de salida y carcacas inferior/superior de cada una de las tres palas (11, 11'). Adicionalmente, se aplican factores de margen de seguridad a la altura de góndola (n_H) y la longitud de pala (b_L) para obtener estimaciones conservadoras y garantizar que la altitud de la góndola y la longitud de la pala se salvan para evitar colisiones. Teniendo esto en cuenta, los puntos de referencia de inspección de pala se definen radialmente alrededor del eje de rotación de la góndola (13). La distancia desde dicho eje hasta los puntos de referencia de inspección de raíz es igual al diámetro (n_D) de la góndola (13), mientras que la distancia desde el eje hasta los puntos de referencia de inspección de punta es igual a la longitud de pala (b_L). Ambas distancias radiales se modifican mediante los factores de margen de seguridad mencionados anteriormente. Se define un punto de referencia de control de góndola adicional P_N , a una distancia preconfigurada d_N desde la góndola (13) y alineado con su eje como la ubicación de entrada/salida que ha de visitarse antes/después de las fases de inspección de pala. La suposición inicial es que el eje de la góndola está perfectamente alineado con el rumbo de despegue del dron (1). Los 8 puntos de referencia correspondientes a las fases de inspección de cada una de las tres de palas (11, 11') obedecen varias condiciones de posicionamiento relativo que los configuran como las esquinas de un prisma trapezoidal, con rombos como caras inferior/superior paralelas. Estos rombos son desiguales pero sus diagonales se alinean entre sí, siendo una de ellas paralela al plano que contiene los ejes basales de tres palas (11, 11') y siendo la otra diagonal perpendicular al mismo. En la configuración en la que la góndola (13) está frenada, esto implica que una de las diagonales se alinea con la línea de cuerda de las palas, lo que vincula los bordes de ataque y de salida de cada sección transversal, mientras que la otra es perpendicular a la misma. La suposición inicial es que la capa superior de todos los prismas es un cuadrado con diagonales iguales al doble de la distancia de inspección deseada en la punta, d_T , de las palas (11, 11'). Por otro lado, su cara de base tiene una diagonal menor con esa misma longitud y una diagonal mayor con una longitud del doble de la distancia de inspección deseada en la raíz, d_R , de las carcacas (11, 11') de pala. Las coordenadas de todos estos puntos de referencia son susceptibles de modificaciones en vuelo para tener en cuenta las dimensiones/posición reales del aerogenerador (10) o errores de sensor acumulados. Sin embargo, cuando se modifica uno de esos puntos de referencia, la corrección se propaga al resto satisfaciendo un conjunto de suposiciones:

- Se realizan correcciones cartesianas, tanto horizontales como de altitud, del punto de referencia de control de góndola P_N igualmente para todos los puntos de referencia de inspección de pala, es decir, la diferencia en altitud o posición horizontal se aplica a todos los puntos de referencia como traslación pura.

- Se propagan las correcciones de rumbo en el punto de referencia de control de góndola P_N a todos los puntos de referencia de inspección de pala como rotación de la diferencia en ángulo de rumbo alrededor del eje vertical que atraviesa la estimación de posición de mástil corregida es decir, una vez que se han aplicado las correcciones cartesianas.

5 - Sólo se propagan las correcciones de la normal en puntos de referencia de inspección de pala dentro de su cara de prisma inferior/superior correspondiente, manteniendo desacopladas las modificaciones de ambos rombos. Esta propagación puede producirse de una de dos maneras:

10 i) Si el punto de referencia modificado es el primero que ha de visitarse en su cara de prisma inferior/superior correspondiente, la diferencia en sus coordenadas cartesianas se aplica como traslación pura al resto de puntos de referencia pertenecientes a la misma cara de prisma.

15 ii) Si se ha visitado previamente otro punto de referencia en la misma cara de prisma superior/inferior, se propaga la corrección de modo que se mantenga el rombo definido por los últimos dos puntos de referencia visitados y el rumbo de ambas diagonales de rombo. Estos valores conocidos determinan la longitud del lado de rombo y los vectores unitarios y semiángulos internos de sus diagonales de esquina primera/segunda, de modo que pueden corregirse sus esquinas tercera y cuarta.

20 - Se propagan las correcciones radiales en la cara de punta de cualquier prisma directamente como traslaciones puras iguales al resto de puntos de referencia pertenecientes a la misma cara de punta. Para la pala (11) vertical, esta traslación sólo afecta a la coordenada de altitud, mientras que para palas (11') oblicuas, también afecta a las coordenadas horizontales según el ángulo de rumbo de la góndola (13) y el ángulo de inclinación de pala correspondiente: aproximadamente ± 120 grados con respecto al sentido hacia arriba o aproximadamente ± 30 grados con respecto al plano horizontal.

Las transiciones entre estos puntos de referencia pueden realizarse aplicando los siguientes tipos de trayectorias:

25 - Trayecto recto: el punto de referencia inicial (P_S) y el punto de referencia final (P_F) se unen mediante una línea recta y tienen rumbos idénticos, de modo que se mantiene constante a lo largo de toda la maniobra. Las coordenadas cartesianas lineales varían de manera lineal con un parámetro de interpolación t_S según los valores de coordenadas iniciales y finales, tal como se muestra en la ecuación 1:

$$x(t_S) = x_S + (x_F - x_S)t_S \quad t_S \in [0,1]$$

$$y(t_S) = y_S + (y_F - y_S)t_S \quad t_S \in [0,1]$$

$$z(t_S) = z_S + (z_F - z_S)t_S \quad t_S \in [0,1]$$

30 $\theta(t_S) = \theta_S = \theta_F \quad t_S \in [0,1]$

ecuación 1

35 - Viraje: la maniobra se divide en tres etapas, en las que cualquier variación de rumbo se concentra en un único giro puntual, ejecutado entre dos traslaciones puramente laterales con rumbos constantes que cubren la distancia entre los puntos de referencia objetivo inicial y final. Esto da como resultado una trayectoria recta inicial desde el punto de referencia inicial (P_S) hasta un primer punto de referencia intermedio (P_{C1}), un giro puntual entre P_{C1} y un segundo punto de referencia intermedio (P_{C2}) y una trayectoria recta final desde P_{C2} hasta el punto de referencia final (P_F), tal como se describe mediante la ecuación 2 y se ilustra mediante la figura 6.

$$P_S \rightarrow P_{C1} : [x_S + (x_{C1} - x_S)t_C, y_S + (y_{C1} - y_S)t_C, z_S = z_{C1}, \theta_S = \theta_{C1}], \quad t_C \in [0,1]$$

$$P_{C1} \rightarrow P_{C2} : [x_{C1} = x_{C2}, y_{C1} = y_{C2}, z_{C1} = z_{C2}, \theta_{C1} + t_\theta(\theta_{C2} - \theta_{C1})], \quad t_\theta \in [0,1]$$

40 $P_{C2} \rightarrow P_F : [x_{C2} + (x_F - x_{C2})t_C, y_{C2} + (y_F - y_{C2})t_C, z_{C2} = z_F, \theta_{C2} = \theta_F], \quad t_C \in [0,1]$

ecuación 2

45 - Giro orbital: se ejecuta la maniobra como un rumbo continuo, uniformemente variable con el que se traslada lateralmente el dron (1), siguiendo un arco que atraviesa los puntos de referencia objetivo inicial y final con su centro de curvatura en la intersección de las direcciones de rumbo inicial y final del dron (1). La trayectoria resultante se define por la intersección ($[x_R, y_R]$) de las líneas definidas por las coordenadas horizontales y los ángulos de rumbo del punto de referencia inicial (P_S) y el punto de referencia final (P_F) y la distancia desde cualquiera de estos puntos de referencia (P_S, P_F) hasta dicha intersección ($[x_R, y_R]$), siguiendo la ecuación 3 tal como se muestra mediante la figura 7.

$$\theta(t_R) = \theta_S + (\theta_F - \theta_S)t_R \quad t_R \in [0,1]$$

50 $x(t_R) = x_R - \sqrt{(x_R - x_S)^2 + (y_R - y_S)^2} \cos(\theta(t_R)) \quad t_R \in [0,1]$

$$y(t_R) = y_R - \sqrt{(x_R - x_S)^2 + (y_R - y_S)^2} \quad \text{sen}(\theta(t_R)) \quad t_R \in [0,1]$$

$$z(t_R) = z_S = z_F \quad t_R \in [0,1]$$

ecuación 3

Las trayectorias generadas previamente determinadas por los puntos de referencia descritos anteriormente son válidas para una inspección satisfactoria únicamente en el caso de tener un perfecto conocimiento en todo momento de todas las dimensiones del aerogenerador (10), posiciones de las palas (11, 11') y ubicación GPS del dron (1). Puesto que estas no son suposiciones alcanzables, es necesario realizar una gama de ajustes de trayectoria según las detecciones de objeto descritas y el rastreo del aerogenerador mediante LiDAR, para corregir cualquier error o incertidumbre en los datos mencionados anteriormente. La naturaleza y el propósito de estos ajustes es:

5

10

15

- Encontrar la alineación correcta con el eje de la góndola (13), es decir el rumbo normal al plano formado por las tres palas (11, 11'), con el fin de barrer a lo largo de las carcassas y los bordes de pala de manera tan perpendicular como sea posible y poder ubicar de manera exacta cualquier daño detectado. Cuando se usan giros orbitales, el ajuste es independiente de la ubicación de despegue con relación a la góndola (13), puesto que bastará con un único giro continuo para alcanzar la ubicación correcta. Sin embargo, en el caso de virajes, tal como se describió anteriormente, la maniobra de ajuste puede implicar:

- o No realizar ningún giro si se despega por delante de la góndola (13).
- o Realizar un giro si se despega de manera lateral a la góndola (13).
- o Realizar dos giros si se despega desde detrás de la góndola (13).

20

- Encontrar la altura correcta de la góndola (13), es decir la altitud a la que convergen las dos palas (11') inferiores y el mástil (12) tal como se detectan mediante LiDAR, con el fin de evitar colisiones cuando se navega en las proximidades del saliente trasero de la góndola o sin alcanzar la raíz de las palas en la filmación de inspección. Esto puede implicar:

25

- o Alargar el ascenso inicial, elevando gradualmente la ubicación objetivo en una cantidad fija, en aquellos casos en los que no se ha producido la detección de la góndola (13) mediante LiDAR cuando se alcanza la altitud estimada inicialmente.
- o Acortar el ascenso inicial, poniendo fin de manera instantánea a la maniobra, en aquellos casos en los que ya se ha producido la detección mediante LiDAR antes de alcanzarse la altitud estimada inicialmente.

30

- Encontrar la ubicación correcta de la punta de las palas (11, 11') mediante LiDAR, es decir en el caso 3D se detecta la punta, en el caso 2D, la posición es aquella en la que ya no se detecta la pala inspeccionada, con el fin de garantizar que se capta la punta de las palas (11, 11') en la filmación de inspección. Esto puede implicar:

35

- o Alargar el barrido a lo largo de la pala (11, 11'), aumentando gradualmente la distancia desde el inicio de la maniobra hasta la ubicación objetivo en una cantidad fija, en aquellos casos en los que no se ha producido la detección de punta mediante LiDAR cuando se alcanza el objetivo estimado inicialmente.
- o Acortar el barrido a lo largo de la pala (11, 11'), poniendo fin de manera instantánea a la maniobra, en aquellos casos en los que ya se ha producido la detección mediante LiDAR de la punta antes de alcanzarse el objetivo estimado inicialmente .

40

- Mantener centradas las palas y a la distancia de inspección deseada (d_i) con el fin de obtener una cobertura total y filmación enfocada para una inspección de daños completa. La distancia deseada desde la pala (11, 11') puede calcularse según diferentes criterios:

45

- o Distancia constante, en la que la pala (11, 11') se mantiene a la misma distancia independientemente de la altitud y el lado en inspección, como en la ecuación 4. Esto es ideal para cámaras con un campo de enfoque poco profundo y casos en los que la ocupación de imagen de la pala (11, 11') no es crítica. En la ecuación 4: los símbolos 'b', 's' y 'e' indican el identificador de la pala, el lado y extremo inspeccionados, respectivamente. Los símbolos 'A', 'L', 'E' y 'U' indican los diferentes lados de una pala: borde anterior (de ataque), carcasa inferior, borde de salida y carcasa superior respectivamente.

$$d_i(b, s, e, x, y, z) = d_T = d_R, \quad \forall s \in \{A, L, E, U\}$$

ecuación 4

50

- o Ocupación de imagen constante, en la que la porción de la imagen ocupada por la pala (11, 11') se mantiene según la anchura de la pala detectada mediante LiDAR y las características de la cámara con que está equipado el dron (1). Esto es ideal para maximizar la cantidad de detalle obtenido en las secciones más estrechas, es decir la punta de pala desde los bordes, mientras que todavía se obtiene una visión total de las secciones más anchas,

es decir la raíz de pala desde las carcasas.

o Distancia interpolada, en la que la distancia se mantiene constante en los bordes de la pala (11, 11') debido a su anchura aproximadamente constante pero se interpola de manera lineal con la razón de la distancia desde la ubicación actual hasta la raíz de la pala (11, 11') que se inspecciona por la longitud total r_R de la pala (11, 11'), calculándose $r_R(b, s, x, y, z)$ usando la ecuación 5. Las ecuaciones resultantes, mostradas en la ecuación 6, son una simplificación útil del criterio de ocupación de imagen constante mostrado anteriormente, que no garantiza una ocupación constante pero mantiene la mayor parte de sus beneficios sin necesidad de calcular explícitamente la ocupación de imagen de la pala (11, 11').

$$r_R(b, s, x, y, z) = \frac{\sqrt{(x - x_{bsR})^2 + (y - y_{bsR})^2 + (z - z_{bsR})^2}}{\sqrt{(x_{bsT} - x_{bsR})^2 + (y_{bsT} - y_{bsR})^2 + (z_{bsT} - z_{bsR})^2}}$$

ecuación 5

$$d_i(b, s, e, x, y, z) = d_T, \quad \forall s \in \{A, E\} \quad \forall z \in \left[z_{b\left(\frac{A}{E}\right)R}, z_{b\left(\frac{A}{E}\right)T} \right]$$

$$d_i(b, s, e, x, y, z) = d_T + r_R\left(b, \frac{L}{U}, x, y, z\right) \cdot (d_r - d_T), \quad \forall s \in \{L, U\} \quad \forall z \in \left[z_{b\left(\frac{L}{U}\right)R}, z_{b\left(\frac{L}{U}\right)T} \right]$$

ecuación 6

Una vez que se obtiene la posición deseada según detecciones de objetos mediante LiDAR y rastreo de aerogeneradores, se usa para corregir la trayectoria seguida por el dron (1) usado uno o más de tres tipos diferentes de ajustes:

- Reactivo: Se usa la posición deseada ajustada para actualizar el objetivo inmediato del dron (1), ya sea el objetivo final de la maniobra o un objetivo intermedio de la trayectoria, mientras se continúa la ejecución de la maniobra. Esto garantiza el ajuste reactivo continuo para el dron (1) para ajustarse suavemente a cualquier cambio en la trayectoria deseada tan pronto como lo detecta el LiDAR, tal como se representa mediante trayectorias en línea continua en las figuras 8A-8C. Solamente si la magnitud del/de los error(es) de posición del dron (1) supera umbrales predefinidos, el ajuste reactivo detendrá el avance de la maniobra, creando un objetivo de ajuste *ad-hoc*, hasta que el/los error(es) se devuelven dentro de niveles aceptables y se reanuda la maniobra, tal como se muestra mediante las trayectorias en línea discontinua en las figuras 8A-8C. Estos umbrales garantizarán que:

o La pala (11) no está demasiado cerca, es decir el error entre la distancia de inspección deseada (d_i) y la distancia real $\Delta d = d - d_i$, a la pala (11) es menor que un umbral negativo configurable (d_c), para impedir el riesgo de colisión y garantizar que la imagen está enfocada, tal como se observa en la figura 8A.

o La pala (11) no está demasiado lejos, es decir el error de distancia es mayor que un umbral positivo configurable (d_f), con el fin de garantizar que la imagen está enfocada e impedir una desviación excesiva de la trayectoria deseada, tal como se muestra mediante la figura 8B.

o La pala (11) está dentro del campo de visión de la cámara, es decir que el ángulo máximo de la pala detectado por el LiDAR (θ_M) es menor en valor absoluto que un umbral configurable (θ_O), de modo que ambos bordes están dentro de la imagen captada, como en la figura 8C. Esto se logra haciendo que dicho umbral sea más pequeño que o igual a la mitad del campo de visión horizontal de la cámara con que está equipado el dron (1). Estas clases de ajustes reactivos son una gran prioridad de la estrategia de navegación, puesto que es necesaria una captura de filmación completa en la totalidad del conjunto de trayectorias de barrido de todas las palas para permitir una detección total de daños.

- Predictivo: Si la posición deseada actual del dron (1) no es el objetivo final de la maniobra, sino un objetivo intermedio de la trayectoria, el ajuste puede extrapolarse para ajustar el objetivo final de la maniobra en consecuencia. La extrapolación depende del tipo de maniobra, sus características y su punto de referencia inicial. Este tipo de ajuste pretende minimizar la magnitud de los ajustes reactivos y la probabilidad de superar umbrales de detención de maniobra en la parte restante de la maniobra, haciendo por tanto que la trayectoria sea más suave y más eficaz.

- Corrector: Cuando se alcanza el objetivo final de una maniobra de inspección, se realizan maniobras de ajuste específicas para mejorar la ubicación del punto de referencia correspondiente. Una vez que se completa la maniobra de ajuste, entonces se propaga de manera incremental a los puntos de referencia que aún han de visitarse. Este tipo de ajustes tienen un doble fin:

o Hacer que las ubicaciones inicial y objetivo de las maniobras restantes sean tan exactas como sea posible, con el fin de minimizar la frecuencia y magnitud de ajustes reactivos/predictivos.

o Garantizar que áreas de especial interés, es decir las raíces y puntas de las palas (11, 11'), se captan por la filmación de la inspección con extensión y cuidado destacados.

5 Todos los ajustes y planificación de trayectoria descritos se gestionan y calculan por el OBC del dron (1). Esto se realiza según los datos de configuración y órdenes de control remoto de anulación recibidos desde la interfaz de usuario, es decir tableta/ordenador portátil y radiomando, y datos de sensor proporcionados por la cámara/sensor de LiDAR y el piloto automático. La trayectoria y ajustes resultantes se envían entonces como órdenes de posición/velocidad al piloto automático, que los traduce en las señales de control apropiadas para accionar los motores para el dron (1) para realizar el movimiento deseado de manera estabilizada. Dichas órdenes transmitidas desde el OBC al piloto automático pueden ser de dos tipos diferentes:

10 o Órdenes de posición objetivo intermedia transmitidas al piloto automático, que luego ordena que el dron (1) alcanza la posición deseada. Esto sólo es adecuado para pilotos automáticos que pueden realizar un control de posición interno. En este caso, el objetivo del piloto automático corresponde a la ubicación de trayectoria intermedia que debe alcanzar el dron (1) para avanzar hacia el objetivo final mientras rastrea de manera eficaz la trayectoria.

15 o Órdenes de velocidad lineal y angular transmitidas al piloto automático, que controla a su vez la posición de vuelo del dron (1) para lograr las velocidades deseadas de modo estabilizado. En este caso, las posiciones objetivo intermedias del caso anterior no se transmiten directamente, sino que más bien se usan de manera interna por el OBC para calcular el error de posición del dron (1) y calcular las velocidades deseadas requeridas para corregirlo y alcanzar de manera suave esa ubicación deseada. Este tipo de órdenes centraliza los cálculos de velocidad y rastreo de trayectoria en el OBC, reduciendo la dependencia del tipo específico de piloto automático usado y mejorando el control sobre el comportamiento y rendimiento del dron (1).

20 Todos los flujos y conexiones de datos entre los diferentes componentes del sistema global mencionado anteriormente se representan en la figura 9.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de navegación autónoma para rastrear objetos de una turbina eólica, comprendiendo el procedimiento:

- calibrar un sensor de visión artificial y un sensor LiDAR proporcionado en un dron (1),

5 - detectar tanto mediante visión artificial calibrada como mediante sensores LiDAR al menos un objeto a rastrear por el dron (1), siendo el objeto detectado una góndola (13) que comprende tres palas (11, 11'), teniendo cada una de las tres palas (11, 11') cuatro lados;

10 - medir mediante el sensor LiDAR un conjunto de características de la góndola (13) detectada, comprendiendo el conjunto de características medidas el diámetro (n_D) de la góndola (13) y la longitud de la pala (b_L) de las palas (11, 11');

- estimar una posición relativa del dron (1) con respecto a la góndola (13) detectada;

el procedimiento **caracterizado porque** comprende además:

- ordenar al dron (1) que alcance un punto de referencia objetivo que pertenece a un conjunto de puntos de referencia que determinan una trayectoria que comprende:

15 - un punto de referencia de la góndola que está alineado con el eje de la góndola (13) a una distancia preconfigurada de la góndola (13), y

20 - ocho puntos de referencia de inspección de palas para cada una de las tres palas (11, 11'), siendo los puntos de referencia de inspección de ocho palas cuatro puntos de referencia de inspección de raíz y cuatro puntos de referencia de inspección de punta, correspondiendo cada punto de referencia de inspección de raíz a un punto de referencia de inspección en la raíz de las palas (11, 11') para cada uno de los cuatro lados y correspondiendo cada uno de los puntos de referencia de inspección de punta a un punto de referencia de inspección en la punta de las palas (11, 11') para cada uno de los cuatro lados, y estando los ocho puntos de referencia de inspección de pala configurados como esquinas de un prisma trapezoidal, con rombos como caras inferiores y superiores paralelas, siendo la cara superior de todos los prismas un cuadrado con diagonales iguales al doble de una distancia de inspección en la punta de las palas (11, 11'), teniendo la cara inferior una diagonal menor con la misma longitud y una diagonal mayor con una longitud de dos veces la distancia de inspección en la raíz de las palas (11, 11'), en el que los ocho puntos de referencia de inspección de pala se definen radialmente alrededor del eje de rotación de la góndola (13) manteniendo una distancia desde el eje de rotación hasta cada punto de referencia de inspección de raíz igual al diámetro medido (n_D) y manteniendo una distancia desde el eje de rotación hasta cada punto de referencia de inspección de punta igual a la longitud de la pala (b_L) medida;

- una vez que se ha alcanzado el punto de referencia objetivo por el dron (1), ajustar la trayectoria redefiniendo un punto de referencia objetivo siguiente de entre el conjunto de puntos de referencia para mantener el objeto detectado centrado en el sensor de visión artificial.

35 2. El procedimiento según la reivindicación 2, en el que ajustar la trayectoria comprende correcciones cartesianas, tanto horizontales como de altitud, del punto de referencia de control de góndola y realizadas igualmente para todos los puntos de referencia de inspección de pala como traslación.

40 3. El procedimiento según la reivindicación 2, en el que ajustar la trayectoria comprende, una vez que se han aplicado las correcciones cartesianas, correcciones de rumbo del punto de referencia de control de góndola y propagadas a todos los puntos de referencia de inspección de pala como rotación de la diferencia en el ángulo de rumbo alrededor del eje vertical de la góndola (13).

4. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1-3, en el que ajustar la trayectoria comprende correcciones de la normal en puntos de referencia de inspección de pala que se propagan solamente dentro de sus caras de prisma inferior y superior correspondientes.

45 5. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1-4, en el que redefinir el punto de referencia objetivo siguiente se basa en:

- detectar mediante el sensor LiDAR la alineación con el eje de la góndola (13),

- detectar mediante el sensor LiDAR la altura de la góndola (13),

- detectar mediante el sensor LiDAR la ubicación de la punta de cada pala (11, 11'),

50 - definir una distancia de inspección relativa basándose en la distancia de inspección en la punta de las palas (11, 11') y la distancia de inspección en la raíz de las palas (11, 11').

6. Un dron (1) para rastrear objetos, que comprende al menos un sensor LiDAR y un sensor de visión artificial, **caracterizado porque** comprende además un ordenador de a bordo configurado para realizar el procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1-5.
- 5 7. Un producto de programa informático que comprende medios de código de programa que, cuando se cargan en un ordenador de a bordo de un dron (1), hacen que dichos medios de código de programa ejecuten el procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1-5.

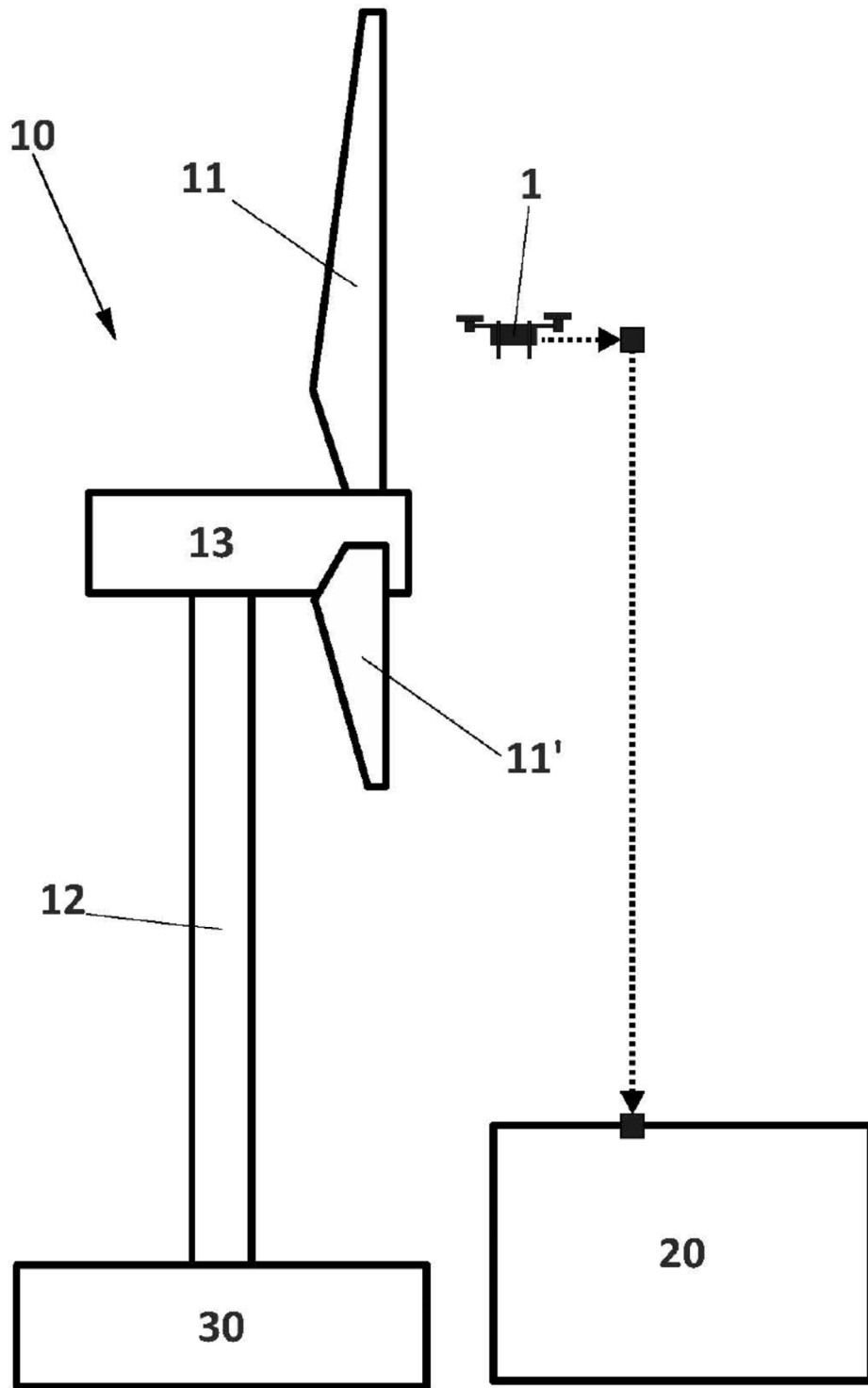


FIG. 1

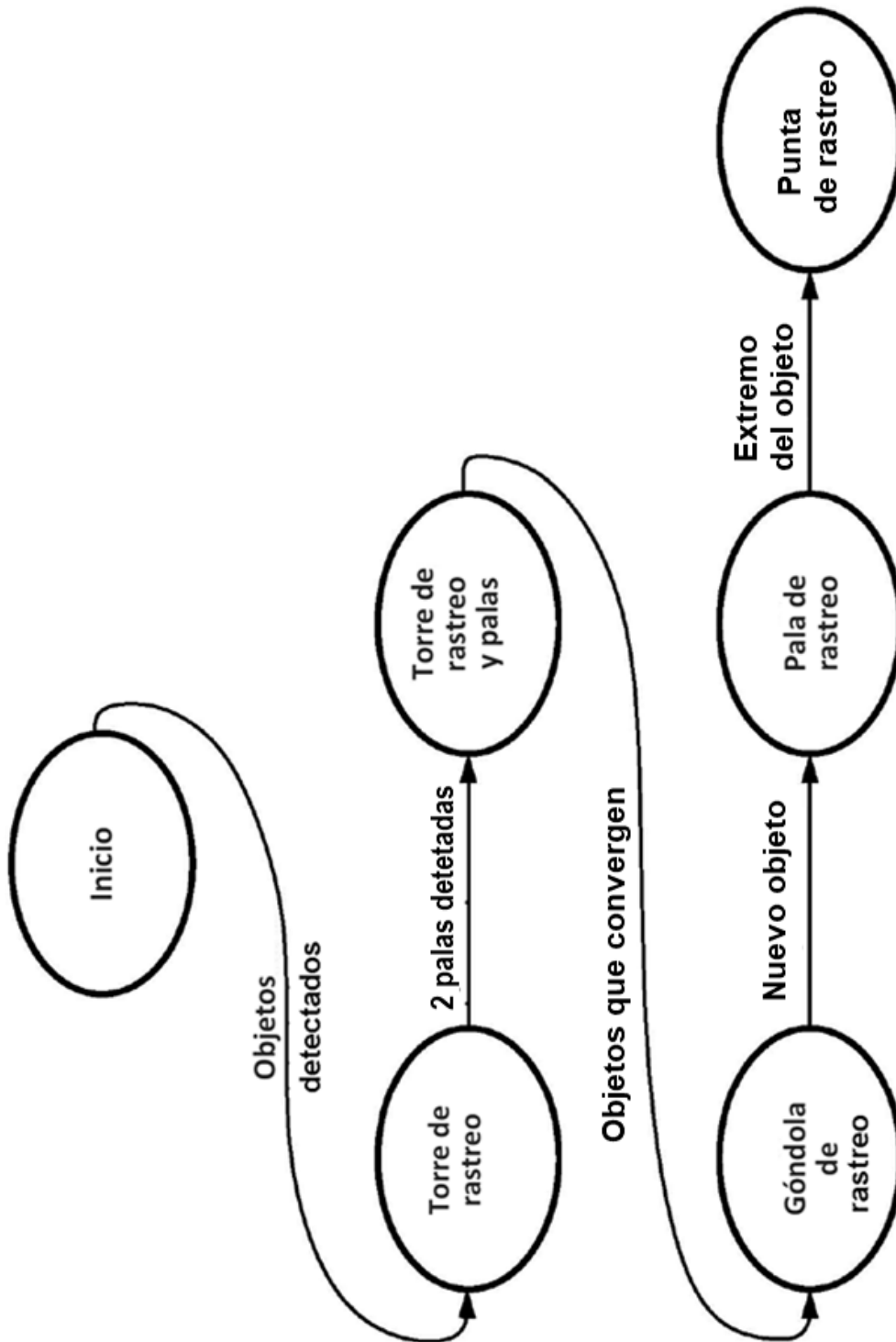


FIG. 2

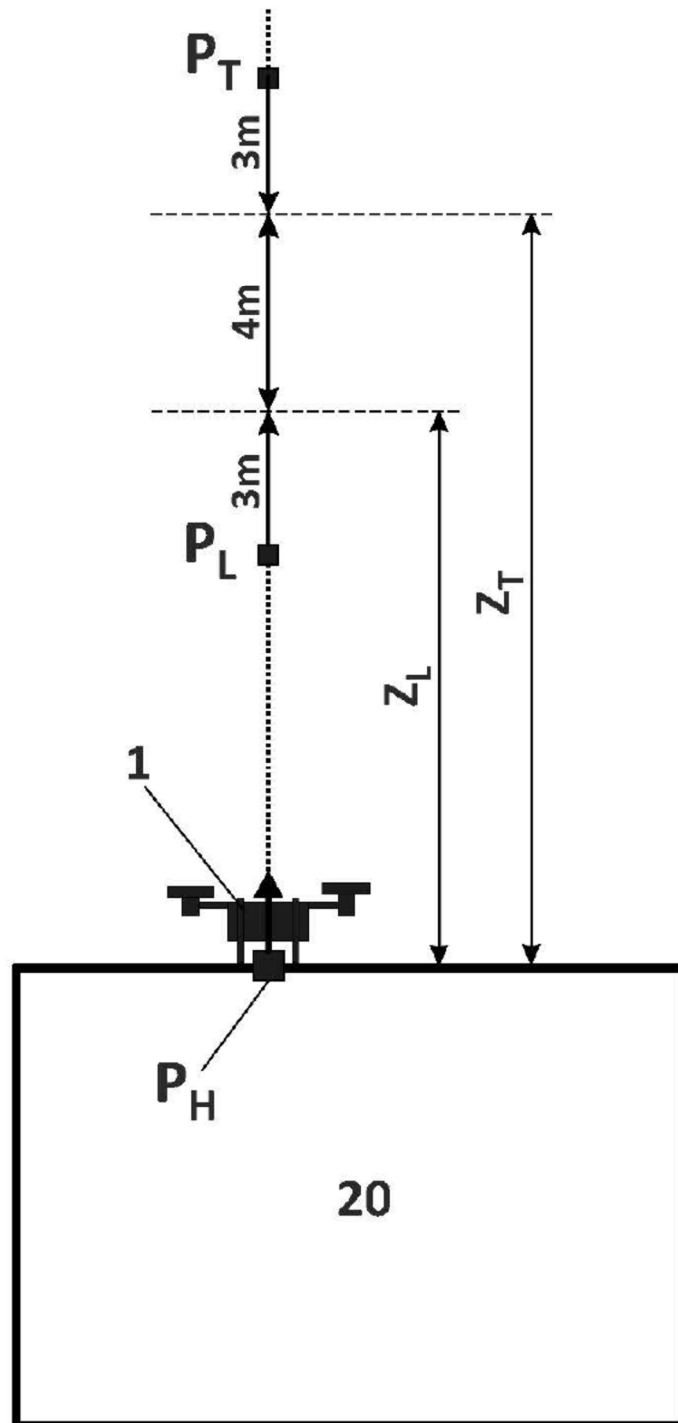


FIG. 3

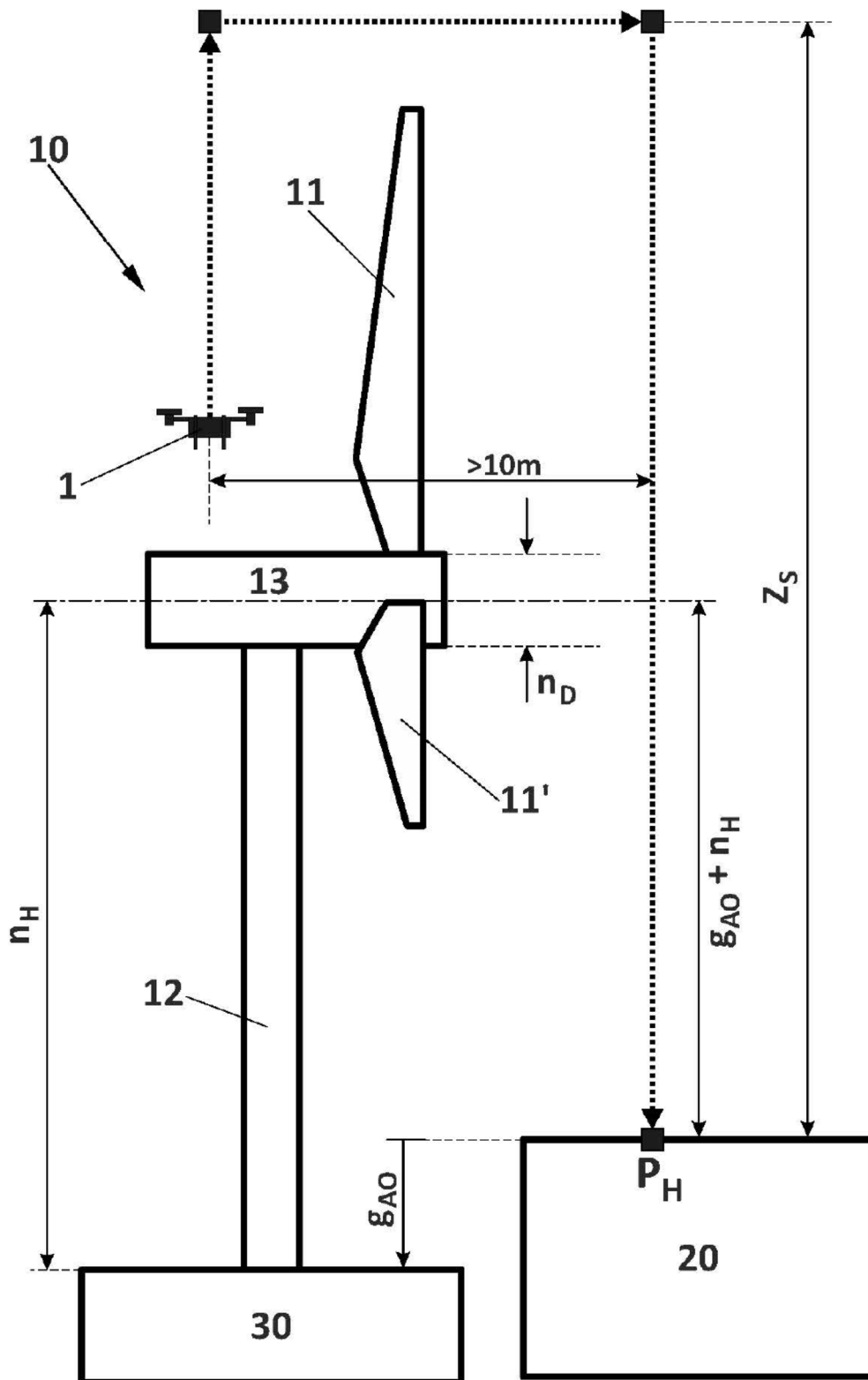


FIG. 4

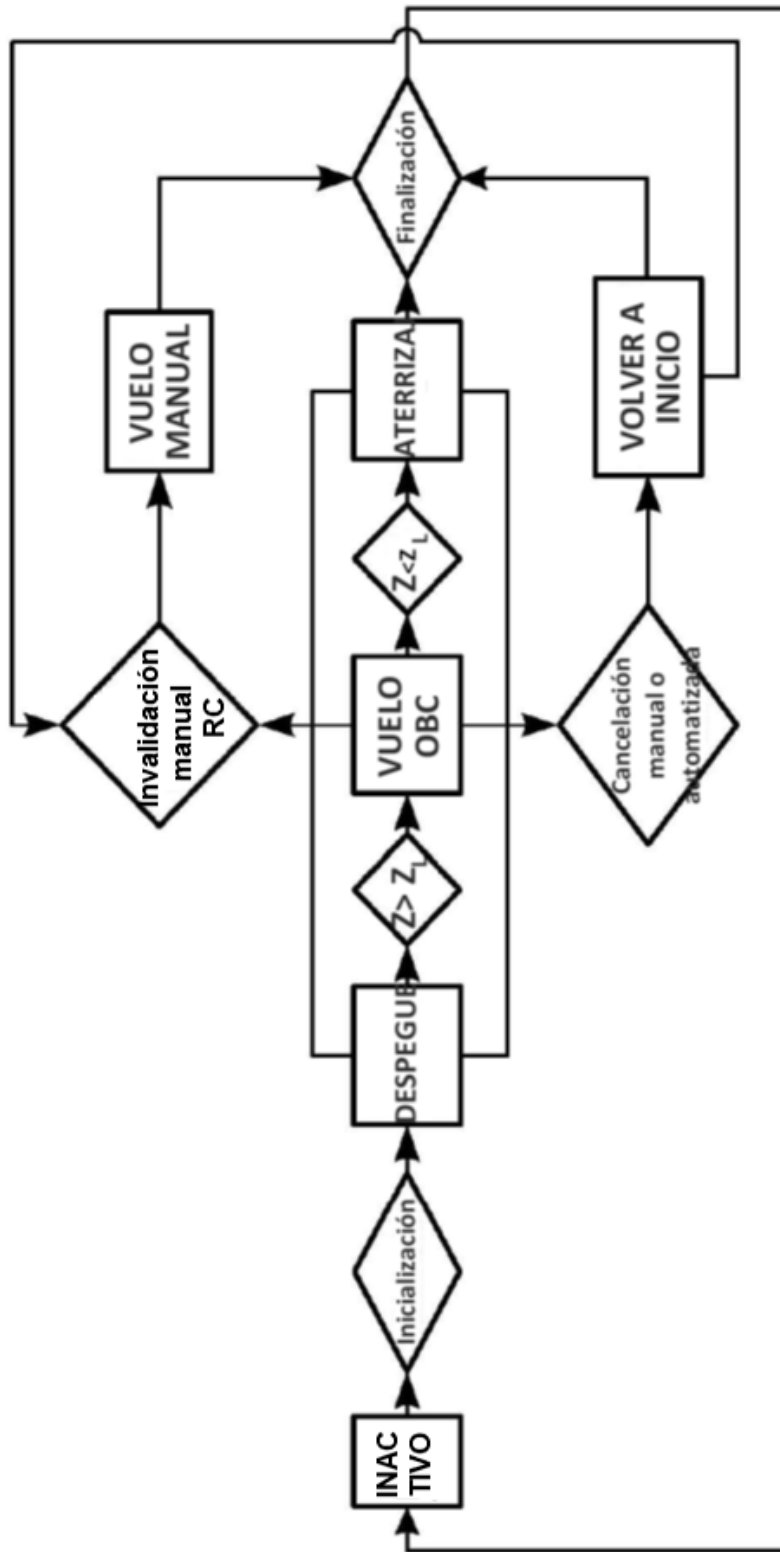


FIG. 5

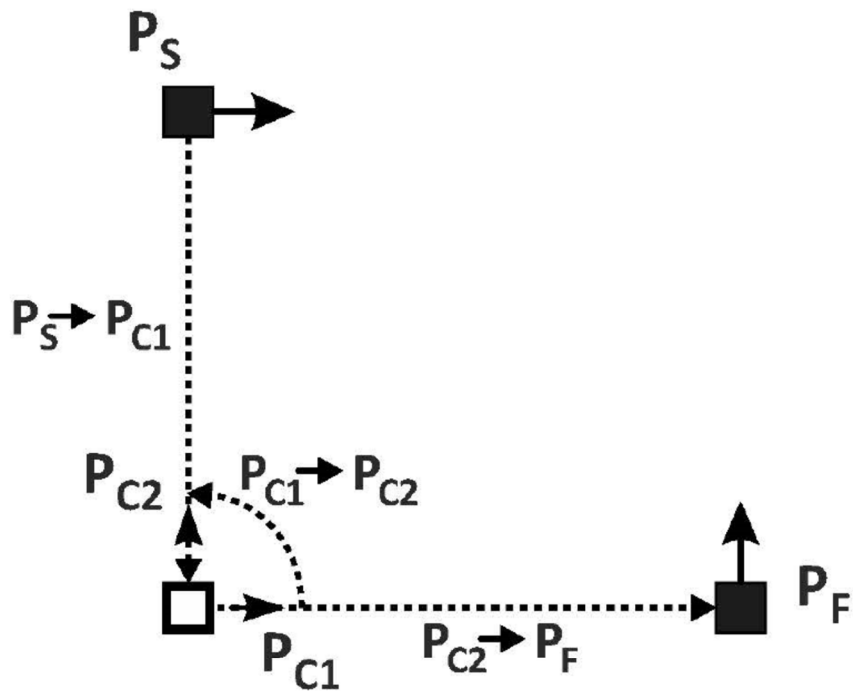


FIG. 6

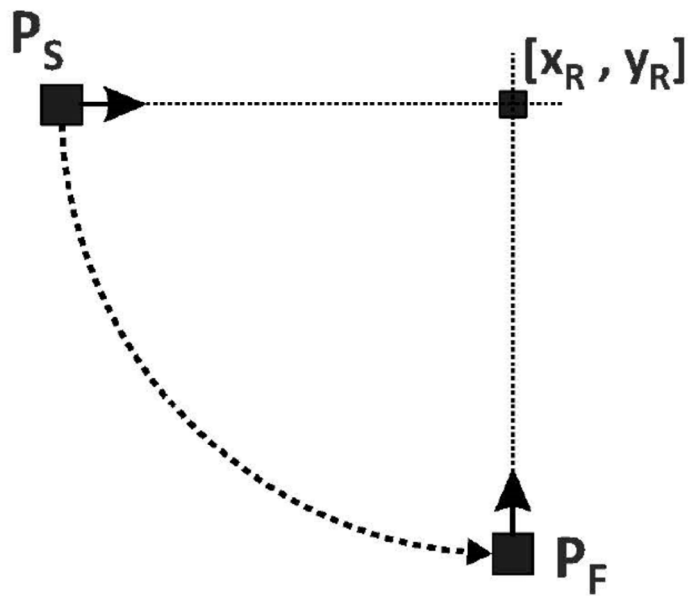


FIG. 7

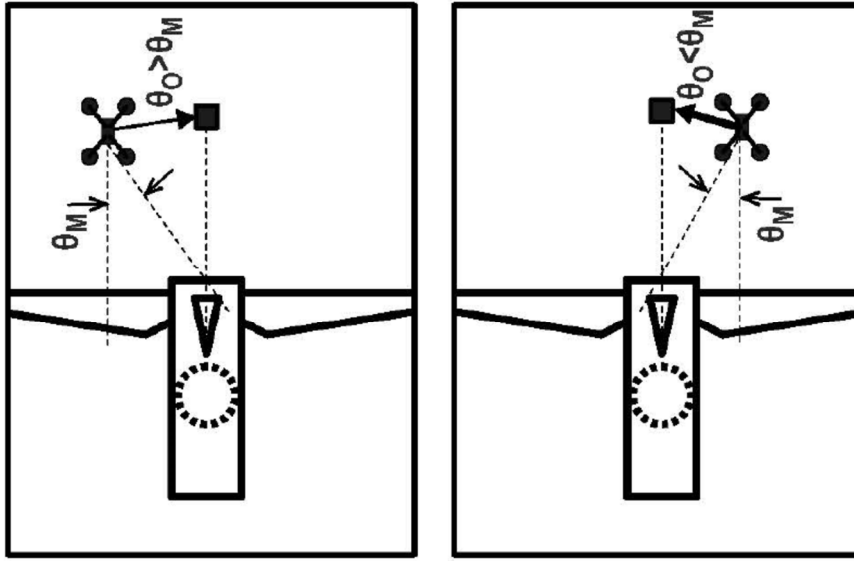


FIG. 8C

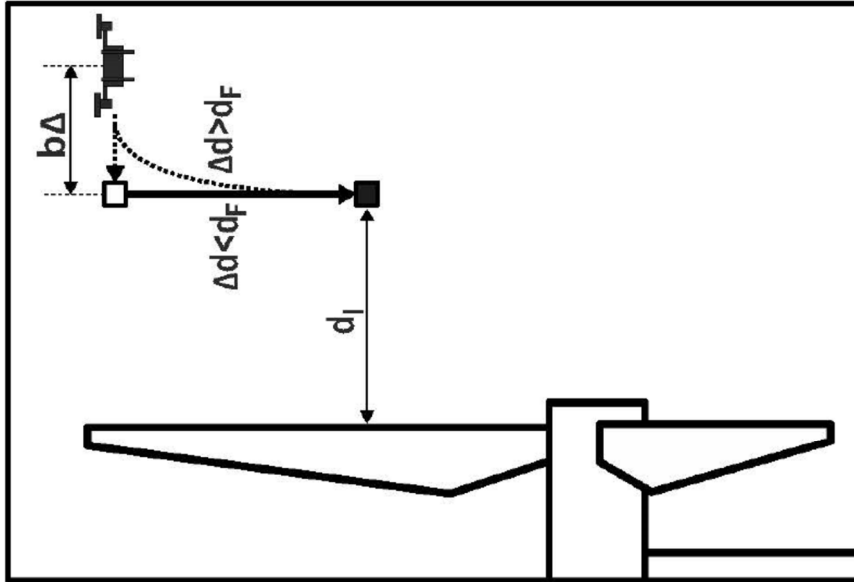


FIG. 8B

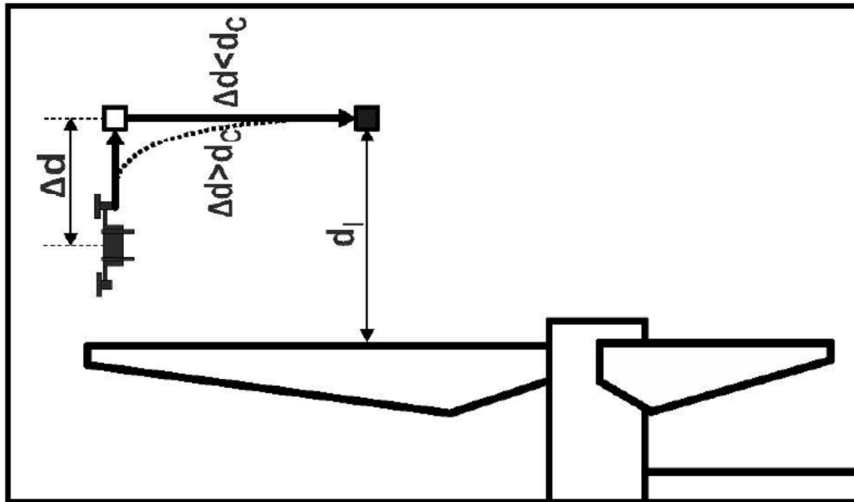


FIG. 8A

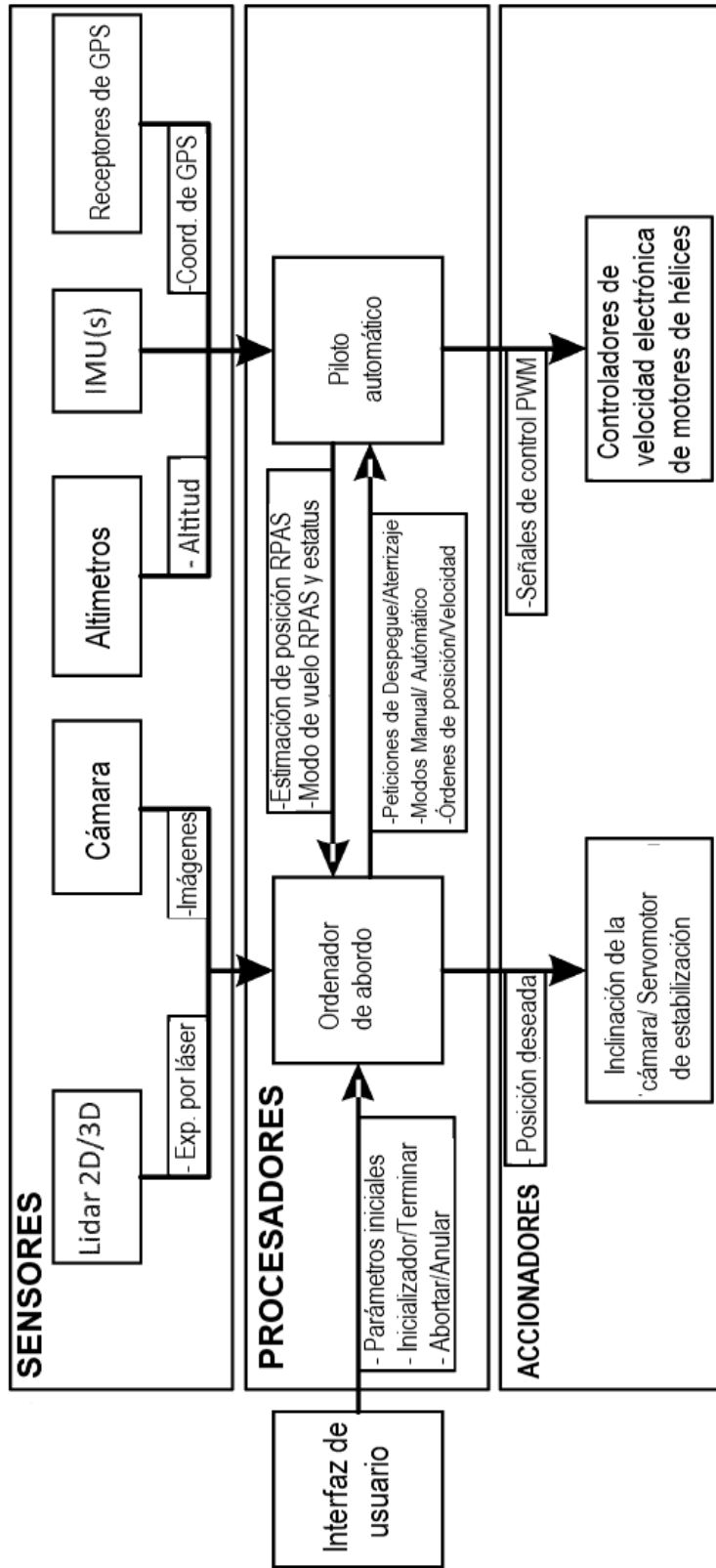


FIG. 9