

Informe UIT-R SM.2486-1

(06/2024)

Serie SM: Gestión del espectro

Utilización de drones comerciales para las tareas de comprobación técnica del espectro del UIT-R

Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de los Informes UIT-R	
(También disponible en línea en https://www.itu.int/publ/R-REP/es)	
Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias

Nota: Este Informe UIT-R fue aprobado en inglés por la Comisión de Estudio conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2024

INFORME UIT-R SM.2486-1

**Utilización de drones comerciales para las tareas
de comprobación técnica del espectro
del UIT-R**

(2021-2024)

ÍNDICE

Página

1	Introducción.....	2
2	Componentes funcionales de los sistemas de comprobación técnica basados en drones comerciales	3
2.1	El sistema de vuelo de los drones	4
2.2	Sistemas de comprobación técnica y medición radioeléctrica	4
2.3	Control de la misión radioeléctrica.....	5
2.4	Control remoto de la misión radioeléctrica	5
3	Otras consideraciones	6
3.1	Requisitos previos para el funcionamiento.....	6
3.2	Factores que inciden en la incertidumbre de la medición.....	6
3.3	Limitaciones actuales de los drones comerciales	8
3.4	Factores relacionados con la seguridad	9
4	Casos de uso y experimentos.....	11
4.1	Medición de la intensidad de campo radioeléctrico: Señal de radiodifusión de la televisión digital (TVD).....	11
4.2	Localización de una señal de satélite de enlace ascendente VSAT.....	14
4.3	Utilización de drones comerciales para la localización de emisores con diferencia en el tiempo de llegada	17
4.4	Pruebas en vuelo de las instalaciones de radionavegación aeroportuaria en tierra.....	20

NOTA – Al utilizar drones comerciales para tareas de comprobación técnica del espectro, los usuarios deben tener en cuenta que, de existir la posibilidad de penetrar voluntaria o involuntariamente en el espacio aéreo de otro país, se necesita la autorización explícita de dicho país.

Cometido

Los drones comerciales, similares a las estaciones tradicionales de comprobación técnica a bordo de aeronaves, pueden ser útiles en los procedimientos reglamentarios de comprobación técnica y medición del espectro. La comprobación técnica radioeléctrica mediante drones comerciales puede resultar adecuada en situaciones difíciles en que las mediciones y transmisiones tradicionales

efectuadas desde el suelo no puedan superar los obstáculos geográficos o garantizar la seguridad de las operaciones. En este Informe se entiende que la aplicación de drones comerciales se llevará a cabo dentro del campo visual por conducto de operaciones en tierra y en el país de las autoridades que operan dichos drones.

En este Informe se detallan los elementos comunes, las consideraciones relativas a la incertidumbre, las posibles misiones, así como casos prácticos de procedimientos de comprobación técnica y medición del espectro asistidos por drones comerciales.

Abreviaturas

3D	Tridimensional
ANT	Aeronave no tripulada
EMI	Interferencia electromagnética
GNSS	Sistema mundial de navegación por satélite
GPS	Sistema de posicionamiento mundial
GS	Pendiente de planeo
ILS	Sistema de aterrizaje por instrumentos
INS	Sistema de navegación inercial
LOC	Localizador
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
RTK	Cinemática en tiempo real
SANT	Sistema de aeronaves no tripuladas
TVD	Televisión digital
VOR	Radiofaro omnidireccional en ondas métricas
VSAT	Terminal de muy pequeña abertura

1 Introducción

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) define los sistemas de aeronaves no tripuladas (SANT), conocidos comúnmente con el nombre de aeronaves no tripuladas (ANT), como una aeronave y sus elementos asociados que se operan sin ningún piloto a bordo. Los drones comerciales forman parte de esta categoría general. Así, pueden superar limitaciones geográficas y proporcionar vuelos relativamente baratos en comparación con las aeronaves tripuladas. Los drones comerciales ofrecen posibilidades de recepción o transmisión en lugares inaccesibles mediante equipos en tierra, y en múltiples lugares en un corto período de tiempo, a semejanza de las tradicionales estaciones a bordo de aeronaves tripuladas. Dado que los sistemas tradicionales de comprobación técnica radioeléctrica fijos y móviles llevan a cabo las mediciones y transmisiones en la tierra o a una altura limitada desde el suelo, pueden experimentar una disminución de la precisión debido al entorno del lugar, como los edificios urbanos de los alrededores, las montañas, las antenas con altos ángulos de elevación y las zonas costeras.

Entre las tareas de medición y transmisión que se pueden realizar con drones comerciales están:

- las mediciones de la intensidad de campo radioeléctrico;
- las mediciones del diagrama de antena tridimensional;
- las mediciones de la cobertura radioeléctrica;

- la inspección *in situ* de estaciones de comprobación técnica radioeléctrica;
- la inspección *in situ* de estaciones de radiocomunicaciones;
- el mantenimiento y la calibración de estaciones y equipos de comprobación técnica radioeléctrica;
- la investigación de interferencias;
- la radiogoniometría de una fuente emisora;
- los estudios técnicos y científicos.

La ventaja que ofrece la comprobación técnica del espectro mediante drones es la capacidad de observar el espectro y realizar mediciones específicas de la señal o registros a una altura muy superior a la que hubiera sido posible con los sistemas de comprobación técnica desde el suelo. La altura adicional puede ser extremadamente beneficiosa en cualquiera de las aplicaciones antes señaladas. Además, el costo de compra de una plataforma de drones destinada a la comprobación técnica del espectro es muy inferior al de las plataformas móviles más básicas.

2 Componentes funcionales de los sistemas de comprobación técnica basados en drones comerciales

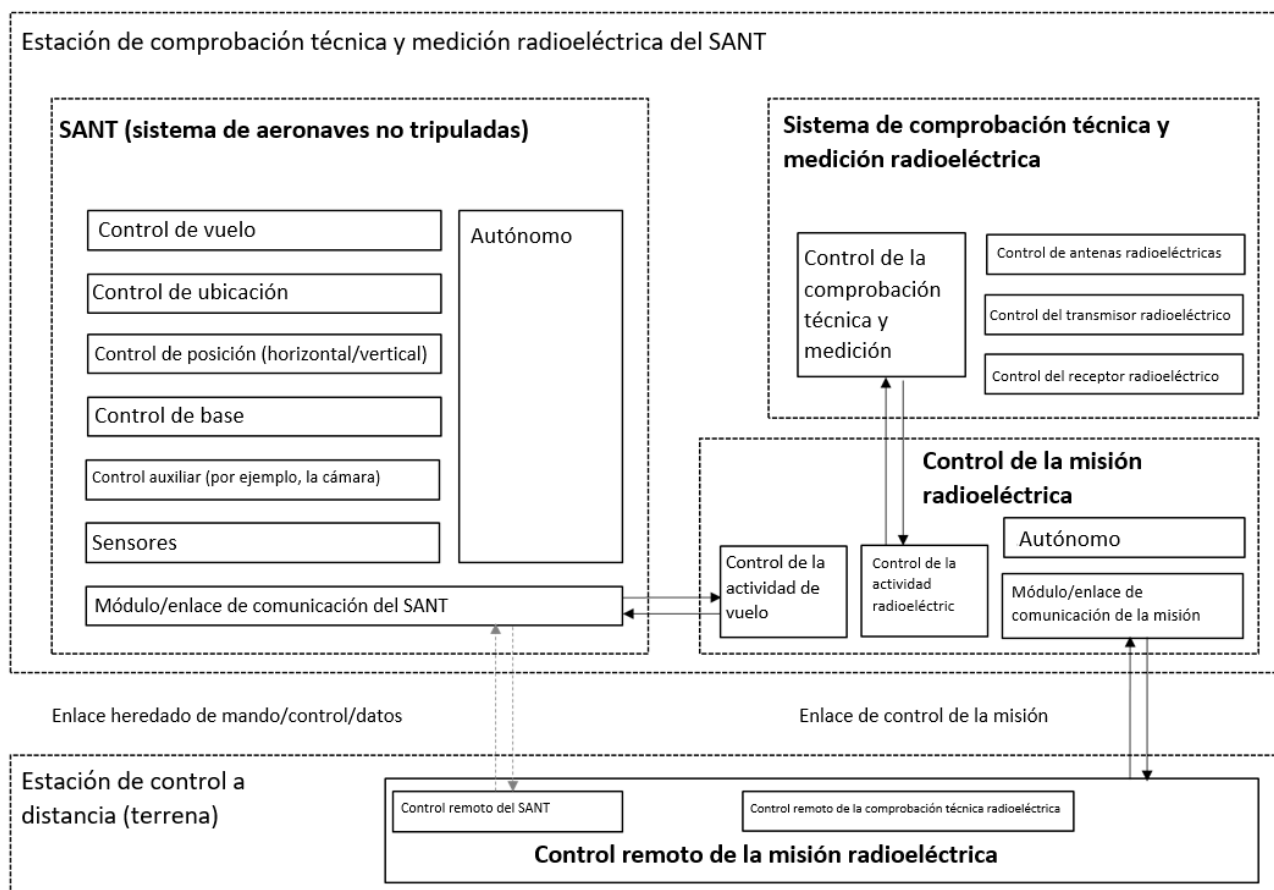
Se puede afirmar que los componentes funcionales de la comprobación técnica y medición radioeléctrica mediante drones comerciales constan de cuatro partes, indicadas en la Fig. 1, a saber:

- el sistema de vuelo de los drones;
- el sistema de comprobación técnica y medición radioeléctrica;
- el control de la misión radioeléctrica; y
- el control remoto de la misión radioeléctrica.

En la Fig. 2 se expone un ejemplo de estación de comprobación técnica radioeléctrica con drones.

FIGURA 1

**Arquitectura funcional de una estación de comprobación técnica
y medición radioeléctrica basada en drones**



2.1 El sistema de vuelo de los drones

Los drones comerciales tienen componentes de control similares a los de las aeronaves tripuladas, y las principales funciones que se necesitan para la comprobación técnica radioeléctrica en modo autónomo o manual son las siguientes:

- el control del vuelo con o sin mecanismo anticolidión;
- el control de la ubicación y la altitud;
- el control de la posición horizontal y vertical (sobrevuelo);
- el control de la base (origen).

Normalmente, los drones comerciales ofrecen la posibilidad de controlarlos completamente a distancia desde un lugar remoto, o preprogramarlos para que realicen su vuelo de manera autónoma sin intervención. La precisión de cada método de control depende de la conducta del vuelo del dron.

2.2 Sistemas de comprobación técnica y medición radioeléctrica

El sistema de comprobación técnica y medición radioeléctrica puede incluir tanto equipos para recibir y medir ondas radioeléctricas como equipos capaces de transmitir señales. Desde el punto de vista conceptual, su composición es idéntica a la de los equipos existentes de comprobación técnica y medición radioeléctrica, pero su tipo, tamaño y peso están limitados por las capacidades del dron (por ejemplo, la carga útil máxima, el consumo de energía, las dimensiones y la forma). Por ejemplo, en el tamaño de la antena o el sistema de antenas que determina la gama de frecuencias incide el tamaño del dron, y el tamaño y el peso del receptor, el generador de señales o el amplificador de potencia

están directamente limitados por las capacidades de carga útil. Además, las tareas de comprobación técnica y medición radioeléctrica que se pueden realizar dependen de la precisión del control de posición. Por ejemplo, si se utiliza el dron para medir un diagrama de antena tridimensional de campo cercano, se debe garantizar la exactitud de la ubicación y del control del mantenimiento de posición.

2.3 Control de la misión radioeléctrica

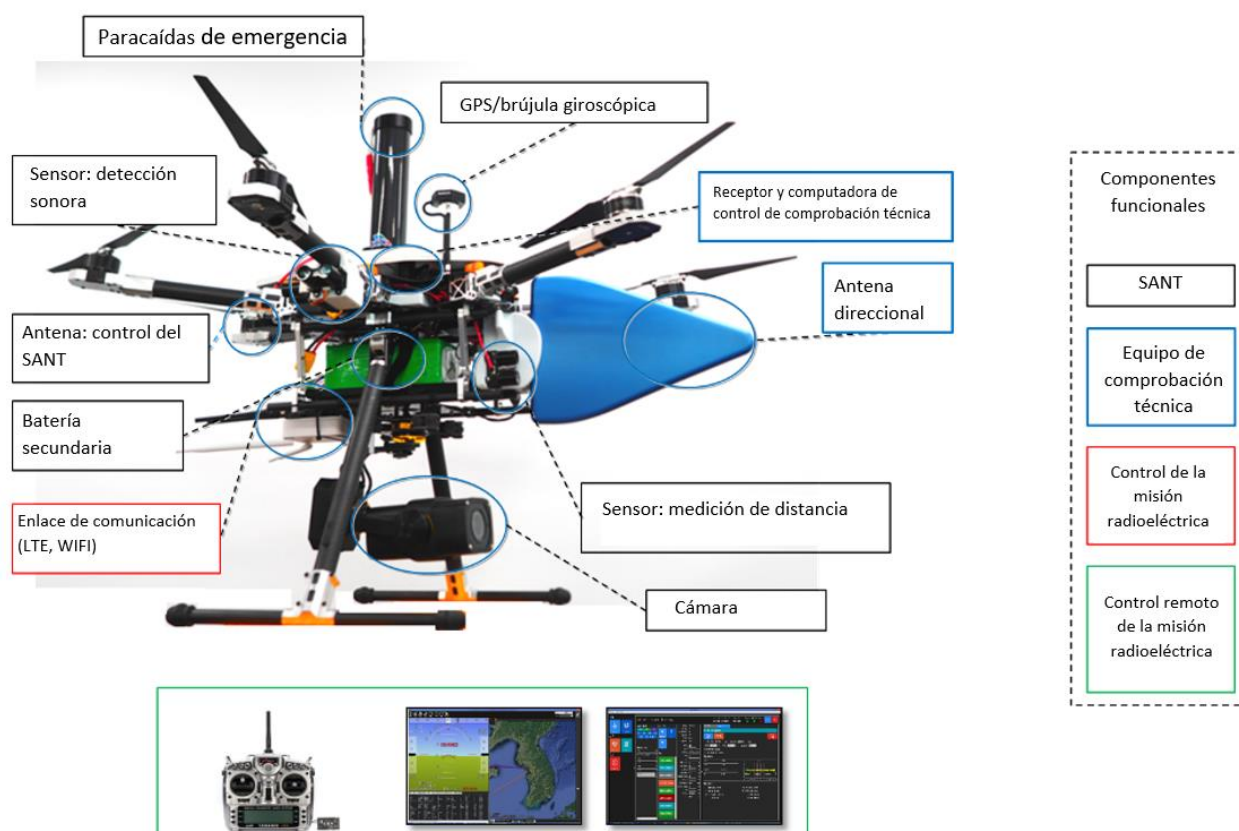
El control de la misión radioeléctrica coordina el dron y el sistema de comprobación técnica y medición radioeléctrica para llevar a cabo una o más tareas. El control de la misión radioeléctrica puede desplazar el dron hasta un lugar preciso, realizar mediciones o transmisiones radioeléctricas, recabar y transferir los resultados. El control de la misión radioeléctrica tiene un enlace de comunicación para transferir los datos de telemedida y de otro tipo a la estación de control remota (terrena) y utiliza algunos o todos los enlaces en función del modo de vuelo y la tarea de medición. En función de la situación, el dron puede utilizar enlaces de comunicación específicos heredados y las misiones relacionadas con la comprobación técnica radioeléctrica pueden llevarse a cabo a través del enlace de control de la misión.

2.4 Control remoto de la misión radioeléctrica

Las estaciones de comprobación técnica y medición radioeléctrica de drones comerciales pueden ser completamente controladas por el control remoto de la misión radioeléctrica durante el proceso de comprobación técnica radioeléctrica. El control remoto de la misión radioeléctrica se comunica con el control de la misión radioeléctrica mediante el enlace de control de la misión. El uso del enlace depende del nivel de automatización de los procedimientos de comprobación técnica y medición radioeléctrica y del modo de control del vuelo del dron.

FIGURA 2

Ejemplo de un sistema de comprobación técnica y medición radioeléctrica basada en drones



3 Otras consideraciones

3.1 Requisitos previos para el funcionamiento

3.1.1 Incidencia del tamaño, el peso y la potencia en los resultados

Dado que un dron relativamente pequeño limita el espacio de instalación, es necesario seleccionar componentes con base en su tamaño, peso y consumo de energía. Deben instalarse en una configuración que sea eficiente desde el punto de vista espacial y a su vez funcional, y que permita realizar tanto el vuelo como las operaciones de medición. A diferencia de los sistemas tradicionales de medición radioeléctrica, los componentes de RF que se pueden colocar en un dron (antenas, receptores y transmisores) pueden presentar un funcionamiento deficiente y poco ancho de banda de funcionamiento, o características limitadas. Por consiguiente, al implementar un sistema de comprobación técnica en un dron, se recomienda medir, calibrar y comprobar el funcionamiento general del sistema con todos los equipos de comprobación técnica instalados.

3.1.2 Diagramas de antenas

Aunque se utilice relativamente poco metal en los drones comerciales para que sean ligeros, hay muchas estructuras alrededor de la antena que pueden interferir en la recepción de señales. Las patas de aterrizaje, los propulsores y sus brazos, y las monturas utilizadas para la unión de equipos periféricos como las cámaras, pueden causar interferencias con la recepción de señales procedentes de ciertas direcciones. El diagrama de una antena instalada en una ANT incidirá en los resultados de la medición. Durante el vuelo, aunque la ANT se mueva constantemente, algunos sistemas pueden utilizar un reflector láser para obtener datos exactos de la posición tridimensional a fin de orientar la antena hacia la dirección correcta. Para crear un diagrama preciso de la antena de una ANT, el diagrama suele medirse en una cámara anecoica. Antes de realizar las mediciones en cámaras, deben instalarse todos los equipos necesarios para la operación (como el reflector láser) a fin de determinar el diagrama con precisión.

3.1.3 Ruido de fondo

Los drones comerciales tienen una serie de dispositivos de radiofrecuencias a bordo para:

- las funciones tradicionales de control remoto y transmisión de datos;
- los enlaces de comunicación para la misión de comprobación técnica radioeléctrica; y
- los componentes que pueden ser fuentes de interferencia electromagnética, como los motores eléctricos y las fuentes de alimentación.

Por consiguiente, los niveles de ruido pueden ser anormalmente altos en ciertas bandas de frecuencias. Tal vez sea necesario desactivar algunas de ellas para crear un entorno más propicio a la medición.

3.1.4 Normativas nacionales en materia de vuelos

Dado que existen normas nacionales que limitan las regiones de vuelo, los horarios y los controles del vuelo de cada tipo de dron (incluidos el peso y las dimensiones totales), es necesario garantizar el cumplimiento de la normativa y ponerse en contacto de antemano con la autoridad en materia de aviación civil competente, según proceda.

3.2 Factores que inciden en la incertidumbre de la medición

Como los drones no están unidos firmemente a la tierra, se intenta mantener la posición deseada utilizando varios sensores y algoritmos. Por consiguiente, toda volatilidad o movimiento repentino que se produzca durante la adquisición de la señal puede causar incertidumbre en la medición y la variación de los resultados. Por ejemplo, si se realiza una medición en el mismo lugar y en otro momento, los resultados de la medición de una señal de un solo tono pueden ser diferentes. Si bien

los drones son controlados para mantener la misma posición, en las medidas reales cabe suponer que la volatilidad del entorno de funcionamiento incidirá en la medición.

A continuación se exponen las principales fuentes de incertidumbre que contribuyen a la volatilidad de la medición.

3.2.1 Control del vuelo por un único operador

Cuando un único operador controla a distancia el dron, es muy difícil que este coordine al mismo tiempo las tareas de vuelo hasta las coordenadas deseadas y las de medición y transmisión. Si la posición del dron cambia repentinamente debido a las condiciones meteorológicas, el viento o lecturas incorrectas de la posición, es casi imposible que un único operador confirme y mantenga visualmente la posición determinada.

3.2.2 Control de la ubicación mediante un sistema mundial de navegación por satélite (GNSS)

Los drones suelen utilizar los GNSS para la navegación, como el GPS, GLONASS, Galileo y Beidou, y utilizan un sistema de navegación inercial (INS) para la precisión a corto plazo. Estas señales también pueden causar interferencias o atascos y pueden aparecer o desaparecer repentinamente en algunos entornos durante el vuelo del dron. La calidad de la recepción del GNSS puede verse afectada por la interferencia electromagnética procedente de diversos periféricos del propio dron, y por las condiciones meteorológicas como la presencia de fuertes vientos o nubes densas. Esto puede causar un sobrevuelo inestable, lo cual es un problema para la exactitud de la medición o la transmisión. Se pueden utilizar múltiples receptores GNSS o receptores multifrecuencia, así como sistemas para reducir la interferencia electromagnética a fin de mejorar la calidad de recepción de las señales de navegación y, por ende, la estabilidad de la plataforma del dron.

El GPS presenta errores de varios metros en el plano horizontal en condiciones normales, y errores en el plano vertical que son de uno a dos veces superiores a los del plano horizontal. A fin de mejorar la precisión de la posición, se puede utilizar la tecnología GPS cinemática en tiempo real como la que se utiliza para la agrimensura y, como resultado, conseguir un margen de error de varios centímetros.

3.2.3 Control de la posición horizontal y vertical (sobrevuelo) y función de base

Los drones permanecen en la posición deseada con una gran precisión pero aún pueden ser inclinados y girados, lo que puede causar importantes errores en las mediciones de campo cercano.

3.2.4 Características de las antenas de medición y transmisión

Los drones pueden estar equipados de antenas direccionales, omnidireccionales o de sistemas de antenas en función de la misión. Aunque se haya instalado una antena con un diagrama de radiación conocido, hay que comprobar el diagrama de radiación en la instalación teniendo en cuenta la influencia con el dron o los dispositivos periféricos. La altitud y el comportamiento/inclinación del dron también pueden modificarse durante la medición o transmisión, por lo que tal vez sea necesario medir el diagrama de la antena tridimensional de la banda de frecuencias objetivo. Cuando se utiliza una antena direccional, el estado de base del dron y el diagrama de la antena tienen un mayor efecto en los resultados de la medición. En general, es más importante conocer el diagrama de la antena en las misiones de campo cercano, donde la calibración adquiere mayor importancia en el caso de la reconstrucción de la fuente mediante mediciones de campo cercano y su conversión en mediciones de campo lejano.

3.2.5 Influencia del viento

Aunque la exactitud de la ubicación mejore utilizando las tecnologías cinemáticas en tiempo real o tecnologías similares, el viento puede perturbar constantemente al dron desplazándolo repentinamente de su posición. La mayoría de los drones recreativos que se venden en el mundo real no garantizan un funcionamiento seguro o estable en entornos con viento, y aparentemente se han

producido muchos accidentes debido al viento en pruebas de comprobación técnica inalámbricas mediante drones. A fin de lograr el éxito de la misión de comprobación técnica, tal vez sea necesario supervisar y registrar la velocidad del viento en cada vuelo o cada medición. Esto puede ayudar a comprender mejor los resultados de las mediciones.

3.3 Limitaciones actuales de los drones comerciales

A pesar de sus múltiples ventajas, los drones tienen muchas limitaciones de las aeronaves tradicionales.

3.3.1 Determinación de la posición, base

Hay limitaciones al control de las actitudes, ya sea por la inexactitud de la detección de los sensores, el flujo atmosférico o ambas cosas. Por ejemplo, es posible que el dron no comunique la dirección del origen real en el mismo momento en que el sensor de movimiento del dron detecta la orientación hacia el origen. Si el dron se utiliza sin ningún dispositivo adicional para compensar la rotación e inclinación, como los equipos láser, el ángulo de medición puede variar fácilmente en varios grados, dando lugar a un error de medición.

3.3.2 Dependencia de las condiciones meteorológicas

La planificación de la misión depende de las previsiones meteorológicas, pero es un factor que debe comprobarse *in situ* y el que más incide en las actividades del dron. Las temperaturas altas o bajas también pueden incidir negativamente en las baterías, los sensores, los motores y los equipos de comprobación técnica radioeléctrica. Asimismo, es difícil operar con los drones en condiciones de gran humedad, los días de niebla, lluvia o nieve, y su utilización puede verse limitada por el clima local de la zona de medición. Además, los fuertes vientos dificultan el vuelo de los drones, y pueden afectar negativamente a los resultados de la medición.

3.3.3 Períodos breves de funcionamiento

Dado que su suministro energético es limitado, los vuelos de los drones suelen durar menos de diez minutos y se necesitan baterías de repuesto y estaciones de recarga para utilizarlos de manera repetida.

3.3.4 Tamaño, peso y potencia

Los drones comerciales, que se pueden comprar fácilmente, son relativamente pequeños y ligeros, por lo que tienen grandes limitaciones respecto del peso de la carga útil, como el suministro de energía, los periféricos instalados, las antenas y los receptores de comprobación técnica radioeléctrica.

3.3.5 Riesgo de accidente

Los sistemas tienen muchas limitaciones y presentan ciertos riesgos de accidente. Durante el vuelo, los drones siempre presentan un riesgo de accidente que puede incluir lesiones a personas y daños a bienes y a los sistemas a bordo durante el funcionamiento.

3.3.6 Costo y normativa

Debido a su entorno y método de funcionamiento, los drones están sujetos a muchas limitaciones, y en vista del riesgo de accidente, es necesario evaluar su rentabilidad cuando se recurre a la comprobación técnica del espectro basada en drones con fines especiales.

3.4 Factores relacionados con la seguridad

Habida cuenta de que los drones comerciales viajan por el aire como cualquier otra aeronave, el operador competente ha de velar por la seguridad de los demás usuarios del espacio aéreo, así como de las personas y los bienes en tierra, cuando la maneje la ANT. Además, los drones equipados con sistemas de comprobación técnica radioeléctrica suponen un costo elevado para los organismos y pueden ser propensos a sufrir colisiones y generar altos costes de reparación. Por consiguiente, tal vez sea necesario instalar un sensor de detección acústica capaz de detectar y evitar las colisiones durante el vuelo, un paracaídas en caso de caída de emergencia, un enlace de comunicación de seguridad y un sistema de seguridad para el seguimiento de la posición.

Por otra parte, durante la fase de funcionamiento de la ANT, convendría tener en cuenta lo siguiente:

- para las misiones de comprobación técnica del espectro, cabe contar con un piloto, un operador encargado de la comprobación técnica y, opcionalmente, un operador encargado de observar las condiciones del entorno;
- la gestión del espacio aéreo (operaciones cerca de aeropuertos y/u otros usuarios del espacio aéreo);
- la consideración del equipo (asegurar la carga útil en la ANT);
- la selección del emplazamiento del operador de la ANT;
- las consideraciones medioambientales (meteorología, velocidad del viento, etc.);
- la redundancia de los datos (canales de reserva);
- la prevención de colisiones y la seguridad de las personas en tierra.

3.4.1 Consideraciones relativas al espacio aéreo

Para garantizar la seguridad del espacio aéreo durante los vuelos, muchos países han promulgado leyes y reglamentos de vuelo acordes a sus propias condiciones nacionales.

3.4.2 Consideraciones relativas a la carga útil del equipo

Para acoplar el equipo de comprobación técnica a la ANT, puede que el OEM deba modificar la aeronave en cuestión. En ese caso deberán tenerse en cuenta cuestiones adicionales, según se indica a continuación. Las ANT comerciales no modificados gozan de integridad estructural y siguen pautas de vuelo conocidas. Una vez añadido el equipo de comprobación técnica radioeléctrica, las pautas de vuelo de la ANT pueden cambiar. Además, es necesario adoptar medidas para proteger tanto el equipo como el entorno en que opera el dron. Algunas ANT comerciales están preparadas para soportar cargas pesadas. Si el equipo de comprobación técnica se ajusta a la capacidad de carga útil especificada por el fabricante de la ANT, la integridad estructural del sistema no se verá afectada.

FIGURA 3

Estructura de un sistema de comprobación técnica basado en una ANT



Informe SM.2486-3

3.4.3 Selección del emplazamiento del operador de la ANT

Para que la comprobación técnica y la localización de los emisores sean eficientes, los operadores deben seleccionar un emplazamiento de lanzamiento y control de la ANT desde el que sea más fácil realizar las tareas de comprobación técnica, mantener la línea de visión con el dron (de ser necesario) y garantizar la seguridad de las operaciones y las personas que puedan estar cerca. La selección del emplazamiento puede requerir también de la coordinación con las autoridades nacionales/locales, por ejemplo, en el caso de zonas de acceso limitado.

3.4.4 Redundancia de las comunicaciones

Los transceptores de enlace ascendente y descendente de las ANT suelen utilizar una banda ISM. En estas bandas exentas de licencia suelen registrarse interferencias. Por ese motivo, es importante que las ANT dispongan de controles de comunicación adaptables que les permitan, por ejemplo, cambiar de canal de frecuencia en caso de interferencia. Muchas unidades de control de ANT comerciales aplican saltos de frecuencia en el enlace ascendente para mitigar las interferencias inherentes a las bandas ISM, que son las más utilizadas para el mando y el control de drones. Si bien las bandas de frecuencias atribuidas a los servicios ISM varían en función del país y la región, las bandas de 2,4 GHz y 5,8 GHz son las más utilizadas.

La transmisión en tiempo real de datos de comprobación técnica en el enlace descendente de la ANT puede revestir una importancia crucial para algunas tareas de comprobación técnica. Además, este tipo de tareas a menudo requieren de la transmisión en directo de datos de vídeo y telemedida en el enlace descendente. De ahí que, quizás, se necesiten altas velocidades de transmisión de datos entre la ANT y la estación de control en tierra durante todo el vuelo. Para garantizar la integridad de los datos de la misión, la autonomía de vuelo de la plataforma de comprobación técnica de la ANT debería limitarse a la especificada por el fabricante de los controles de la ANT. El sistema de comprobación técnica de la ANT también debería tener la capacidad de retransmitir automáticamente los datos que no hayan sido reconocidos por la unidad de control en tierra de la ANT, los datos

destinados a la copia de seguridad y los de regreso al punto de lanzamiento en caso de fallo del enlace de comunicaciones.

3.4.5 Prevención de colisiones

Son muchos los factores que pueden provocar la colisión de una ANT. Entre los factores externos figuran las condiciones meteorológicas (vientos fuertes), las aves, las interferencias de radiofrecuencia y otros obstáculos. También existen factores que pueden prevenirse, por ejemplo, un piloto distraído o un estado de batería baja. Cuando una ANT que transporta una carga útil de comprobación técnica pesada se halla en fase de vuelo, deben realizarse todas las comprobaciones necesarias antes del vuelo para garantizar la seguridad de la ANT, de la carga útil de comprobación técnica y del personal que pueda encontrarse en la zona en que opera la ANT. Una medida de protección básica consiste en incluir alarmas sonoras y luminosas (de las que a menudo disponen las grandes ANT) para alertar a las personas en tierra del riesgo de colisión de la ANT. Las ANT comerciales disponen de funcionalidades de seguridad que imponen aterrizajes de emergencia en determinadas condiciones (por ejemplo, batería baja). Algunas plataformas de drones incluyen paracaídas que pueden desplegarse manualmente o en caso de caída vertical para proteger a los individuos en tierra y al propio dron. Estas funcionalidades también son útiles para evitar aterrizajes forzosos.

3.4.6 Consideraciones medioambientales

Los vuelos de las ANT pueden verse afectados por condiciones medioambientales como viento fuerte, lluvia y tormentas de arena. Estas condiciones también pueden sobrecargar los sistemas de control de posición, lo que se traduce en un agotamiento más rápido de las baterías que en condiciones estables. Los operadores deben considerar detenidamente las condiciones medioambientales y sus repercusiones antes de llevar a cabo misiones de comprobación técnica con ANT.

4 Casos de uso y experimentos

4.1 Medición de la intensidad de campo radioeléctrico: Señal de radiodifusión de la televisión digital (TVD)

En este apartado se expone la medición de las señales radioeléctricas para la radiodifusión terrenal desde la plataforma de una ANT y se comparan los resultados con las mediciones realizadas con un sistema tradicional fijo de comprobación técnica.

La Fig. 4 ilustra el sistema remoto de comprobación técnica radioeléctrica de una ANT.

FIGURA 4

Sistema remoto de comprobación técnica radioeléctrica de una ANT

Alcance de la comprobación técnica radioeléctrica mediante una ANT



Sistema de comprobación técnica radioeléctrica con una ANT



4.1.1 Consideraciones técnicas

Se utilizan cardanes triaxiales manuales en sistemas de estabilización diseñados para ofrecer al operador de la cámara la independencia de realizar fotografías sin trípode y sin vibraciones o movimientos de la cámara a fin de suprimir los errores de medición causados por la borrosidad durante el vuelo.

Debe prestarse especial atención a las tecnologías de reconocimiento visual para lograr una posición correcta de aterrizaje. El punto de aterrizaje programado de la ANT puede tener una variación de tres metros. Para hacer frente a este posible problema, debe supervisarse la ANT durante el proceso de aterrizaje.

En el caso de las mediciones realizadas en la banda de ondas decamétricas, el ruido radioeléctrico que pueden generar los motores de la ANT debe documentarse y medirse.

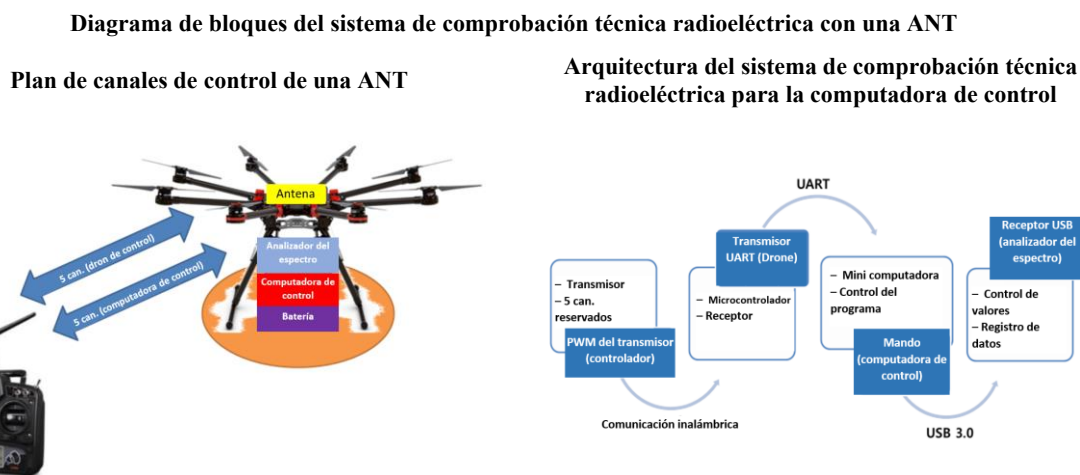
Los operadores deben tener en cuenta el tamaño, el peso, la carga útil y el tiempo de funcionamiento de la ANT, ya que en ella se transportarán los equipos de medición.

Entre los factores que se deben tener en cuenta para seleccionar los equipos de comprobación técnica que se utilizarán con la ANT están el tamaño, el peso, el suministro eléctrico y los resultados.

Cuando se selecciona una computadora de control, las especificaciones pertinentes necesarias (sistema operativo, CPU, tamaño de memoria, etc.) dependerán de los requisitos del equipo de comprobación técnica.

El equipo de comprobación técnica está controlado por los diez canales de comunicación disponibles del controlador remoto. Cinco de los canales se utilizan para controlar la ANT y los otros cinco canales son para controlar el programa de la computadora y el funcionamiento de los equipos a bordo.

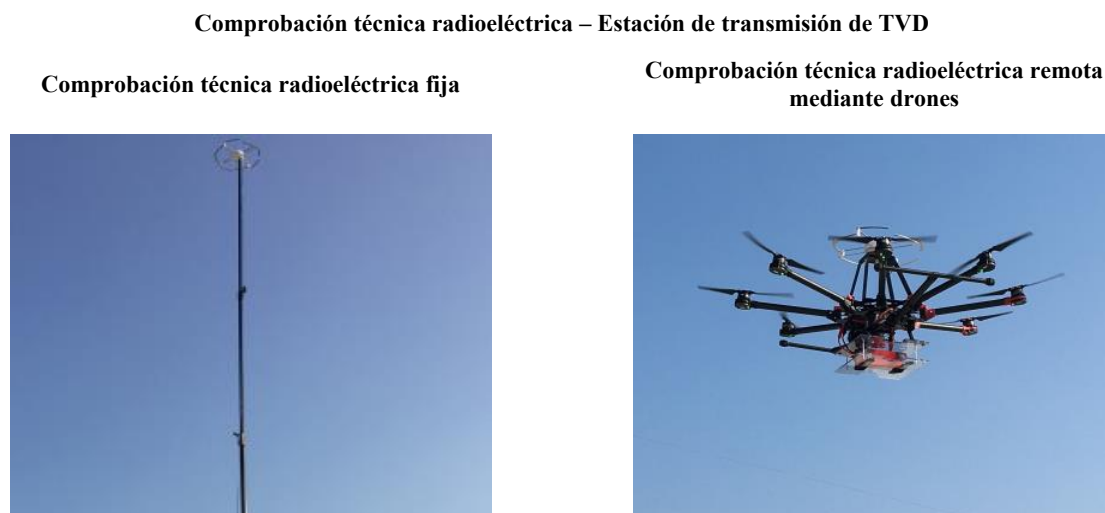
FIGURA 5



4.1.2 Experimento de medición de la señal de radiodifusión terrenal de televisión digital (TVD) mediante ANT

A continuación se expone una comparación de los resultados obtenidos en la medición para la radiodifusión de TVD entre la comprobación técnica radioeléctrica fija y la comprobación técnica remota mediante drones.

FIGURA 6



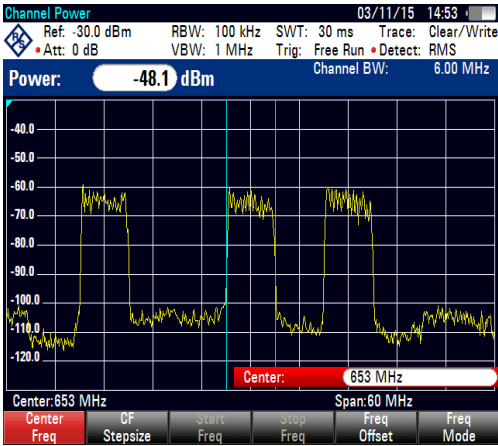
Para medir las señales de radiodifusión de televisión digital (TVD), la antena tiene una altura de 9 metros sobre el suelo. El método existente (comprobación técnica radioeléctrica fija) requiere la instalación de un mástil de antena hasta el vehículo de medición, dura más tiempo y exige un mayor presupuesto para la realización de mediciones y la obtención de resultados en un número limitado de centros de medición. Sin embargo, si se utiliza un dron en el proceso de comprobación técnica, podría llevar a cabo su labor a una altura de 9 metros en una posición estable y supervisar desde lugares a los que los vehículos de medición tendrían dificultades para acceder.

Se realizaron mediciones con ambos métodos en cinco canales de TVD que transmitían la señal desde la montaña Moak en la ciudad de Jeonju. La comparación de los resultados entre ambos métodos oscila entre 1 y 2 dB, lo cual es importante, ya que corresponde al error de medición que se registra en el método existente. La parte izquierda de la Fig. 7 muestra el espectro de medición del método

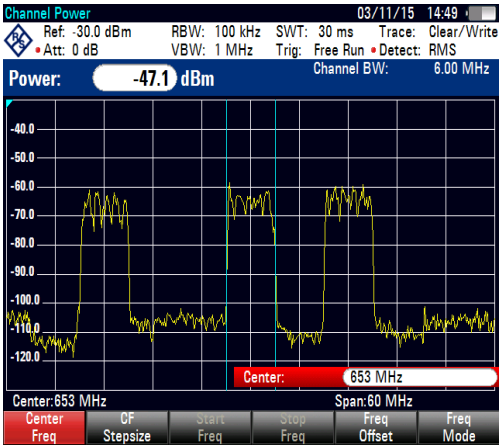
fijo de medición de ondas radioeléctricas con el mástil de antena, y la parte derecha muestra el espectro de medición radioeléctrica remota con drones. El Cuadro 1 muestra los resultados de la medición de todos los canales de radiodifusión transmitidos desde la montaña Moak. Este Informe muestra la viabilidad de la utilización de drones como sistema de comprobación técnica radioeléctrica remota, ya que el resultado de la medición obtenida con el sistema fijo tradicional de comprobación técnica radioeléctrica mediante el mástil de antena es comparable al resultado obtenido con las ANT.

FIGURA 7
Resultado de la comprobación técnica del espectro de una estación de radiodifusión terrenal de TVD

Con el sistema fijo de comprobación técnica del espectro



Con el sistema de comprobación técnica del espectro mediante drones



CUADRO 1
Detalles de la comprobación técnica del espectro de una estación de radiodifusión terrenal de TVD

Canales de TVD (montaña Moak)	Frecuencia (MHz)	Estación fija (dBm)	Con drones (dBm)	Diferencia (dB)
27	551	-46	-48	2
33	587	-51	-49	2
41	635	-48	-49	1
44	653	-48	-47	1
46	665	-47	-46	1

4.2 Localización de una señal de satélite de enlace ascendente VSAT

4.2.1 Introducción

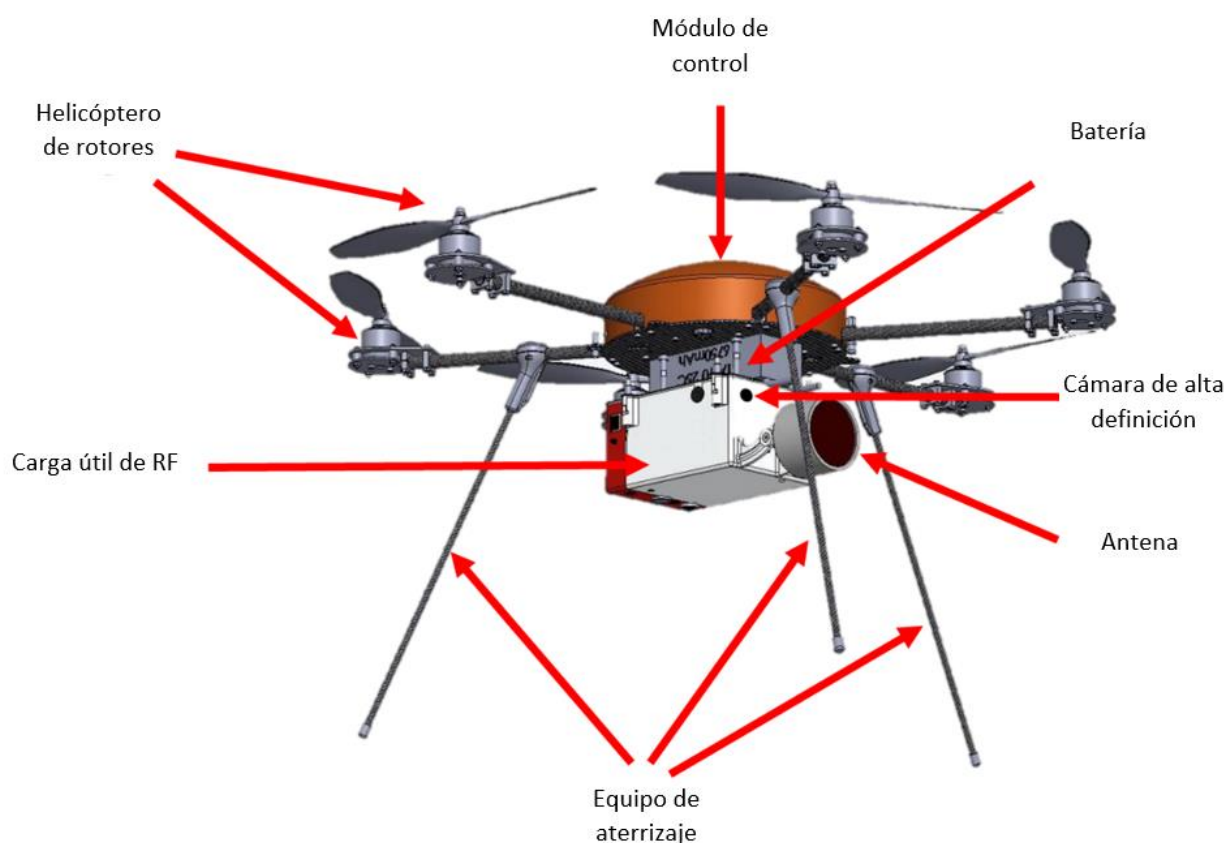
Esta sección ofrece un ejemplo de uso de la plataforma de ANT para detectar y localizar una señal de satélite de enlace ascendente VSAT.

4.2.2 Información del sistema

4.2.2.1 ANT

La plataforma ANT incluye un helicóptero de 6 rotores y un soporte para el despegue y el aterrizaje en vertical. Está equipada de una cámara de alta definición y dos cargas útiles que cubren la banda de frecuencias 2-40 GHz. La Fig. 8 muestra los componentes de la ANT.

FIGURA 8



La estación en tierra de la ANT incluye un mando, una computadora portátil, un módulo de telemetría y un anemómetro.

4.2.2.2 Sistema de comprobación técnica radioeléctrica (carga útil de RF)

La plataforma de la ANT puede controlar la banda de radiofrecuencias de 2 a 40 GHz utilizando dos cargas útiles, como se indica a continuación:

Parámetros	Carga útil de las bandas L, C, X, Ku	Carga útil de la banda Ka
Banda de frecuencias	Antena receptora en 2-18 GHz	Antena receptora en 18-40 GHz
Polarización	Polarización circular izquierda y derecha	Polarización circular izquierda y derecha

La comunicación entre la estación en tierra y la ANT se realiza mediante un enlace inalámbrico en la banda de 2,4 GHz.

4.2.2.3 Control y funcionamiento

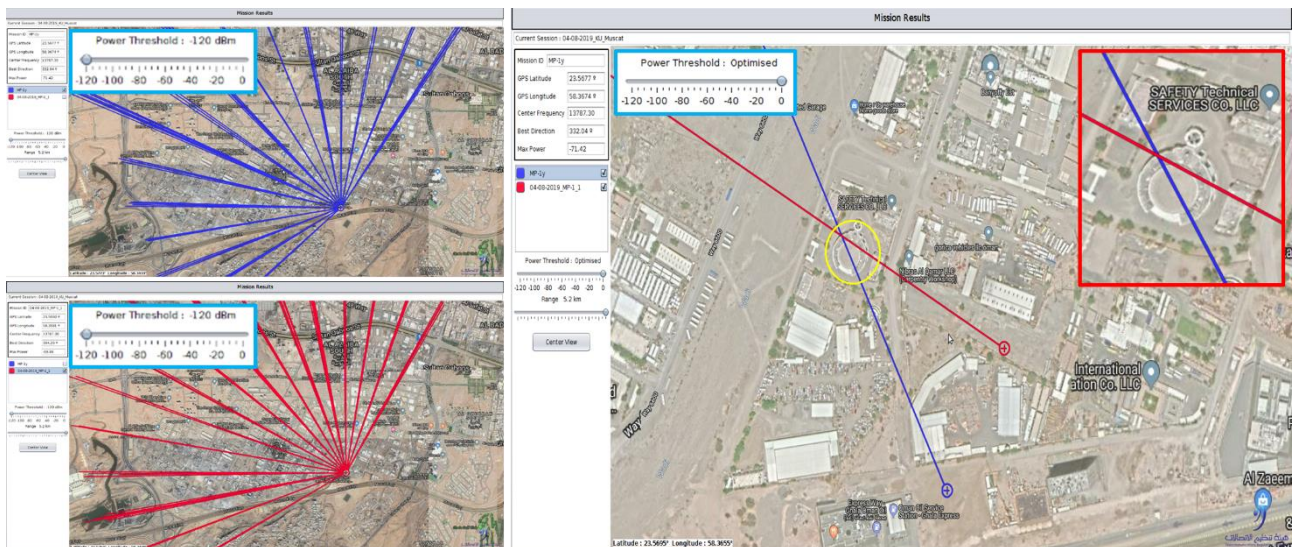
La ANT ofrece dos modos de funcionamiento: manual y automático. Puede ser controlada manualmente mediante un mando por un operador para volar en cualquier dirección deseada. Cabe asimismo la posibilidad de decidir y programar la ruta de vuelo utilizando el programa informático mediante el que se carga un plan de vuelo en la ANT. Por motivos de seguridad, la ANT está equipada de una función de aterrizaje seguro en la posición de base en caso de que se agote la batería.

4.2.3 Mediciones y resultados

Para llevar a cabo la medición, se deben tener en cuenta varios factores antes de realizar la misión en una zona extensa determinada, como la determinación del lugar de medición y los puntos de vuelo para localizar las antenas objetivo, además de la dirección de la ubicación de las supuestas antenas objetivo.

La Fig. 9 muestra los resultados de medición de la misión de la ANT. Durante la misión, la ANT midió la frecuencia objetivo desde dos puntos de medición y en los diferentes grados indicados. Mediante un sistema de medición del umbral de potencia, se pueden filtrar los resultados de la medición en el mapa para ver exclusivamente la dirección en que se recibe una potencia elevada (imagen de la izquierda). A continuación, el sistema de la ANT puede proporcionar un resultado optimizado que muestra la mejor dirección de la medición calculada con base en toda la potencia recibida desde todas las direcciones. La intersección de los resultados optimizados señalada con un círculo amarillo desde los puntos de vuelo de la medición muestra la ubicación del transmisor VSAT (imagen de la derecha).

FIGURA 9
Resultados de la medición con ANT y análisis



Con base en la medición señalada anteriormente, la cámara integrada de la ANT ayuda a localizar cualquier antena situada a gran altitud, donde se toman fotografías en cada grado para comprobar si hay una antena visible en la dirección de la máxima potencia recibida. La Fig. 10 muestra la fotografía tomada del transmisor VSAT.

FIGURA 10
Fotografías de la cámara de la ANT



4.3 Utilización de drones comerciales para la localización de emisores con diferencia en el tiempo de llegada

4.3.1 Consideraciones generales

La comprobación técnica del espectro puede incluir tareas como la exploración del espectro y la detección y localización de señales desconocidas o interferentes. La diferencia en el tiempo de llegada (TDOA) es una tecnología de localización pasiva, que alberga ciertas ventajas para la localización de emisores en las circunstancias adecuadas. Actualmente, la tecnología de los drones comerciales ha alcanzado un cierto grado de madurez, se utiliza de forma generalizada y ofrece las ventajas de un lanzamiento rápido, un control de posicionamiento preciso y una gran movilidad y seguridad. Combinando las ventajas de ambas tecnologías (TDOA y ANT), la localización de los emisores podría determinarse con precisión. Dicho esto, las ventajas y limitaciones del uso de la tecnología TDOA como método de determinación de la localización de emisores siguen las mismas cuando esta se implementa en plataformas ANT, no obstante, cabe la posibilidad de superar ciertas barreras geográficas y mejorar la observación de señales con visibilidad directa (LOS).

4.3.2 Implementación

En este caso, el sistema de comprobación técnica TDOA incluye un mínimo de tres plataformas de comprobación técnica ANT y un centro de control en tierra. Cada plataforma de comprobación técnica ANT incluye una ANT de 6 rotores equipada con un módulo de temporización GPS, una antena de comprobación técnica, un módulo de recepción de señales, un procesador, un módulo de comunicación de datos y una batería. El módulo de temporización GPS permite la adquisición sincronizada de señales a través de múltiples plataformas de comprobación técnica ANT. El módulo de recepción de señales cubre de 100 MHz a 6 GHz, con la salvedad de las frecuencias de control y comunicación con la plataforma de comprobación técnica ANT (normalmente bandas ISM de 2,4 GHz y 5,8 GHz). Para las mediciones TDOA, se puede utilizar una antena omnidireccional o direccional. No obstante, debe tenerse en cuenta la incidencia del peso y las dimensiones del elemento de antena en la plataforma de comprobación técnica ANT. Si se utiliza una antena direccional, los movimientos de rotación de la ANT pueden aprovecharse para determinar el acimut con la mejor relación señal/ruido. La carga útil de comprobación técnica del espectro pesa 2,8 kg y el tiempo máximo de vuelo con la misma es de 30 minutos. La plataforma de comprobación técnica ANT se ilustra en la Figura 11.

FIGURA 11

Diagrama de composición de la plataforma de comprobación técnica ANT

Informe SM.2486-11

El centro de control en tierra incluye un mando de control, un ordenador portátil y un módulo de comunicación de datos. El mando de control utiliza la banda ISM de 2,4 GHz para controlar el despegue, el aterrizaje y los vuelos estacionarios y ordinarios de la ANT. La plataforma de comprobación técnica ANT puede transferir datos al centro de control a través de la banda ISM de 5,8 GHz. El ordenador portátil ejecuta el *software* TDOA. El *software* TDOA recibe los datos adquiridos en relación con las series temporales y el espectro, y calcula el resultado de la localización. Las plataformas de comprobación técnica ANT utilizan el módulo de comunicación de datos para adquirir señales y transmitir datos.

4.3.3 Ejemplo de flujo de trabajo y caso de aplicación

Durante el proceso de detección de señales, las plataformas de comprobación técnica ANT se elevan y posicionan hasta lograr una condición espacial tridimensional adecuada para la comprobación técnica TDOA. El centro de control se encarga de procesar los datos y ejecutar el *software* TDOA para calcular la ubicación del transmisor objetivo y mostrar el resultado de la geolocalización. La Figura 12 ilustra el flujo de trabajo, que consta de cuatro pasos.

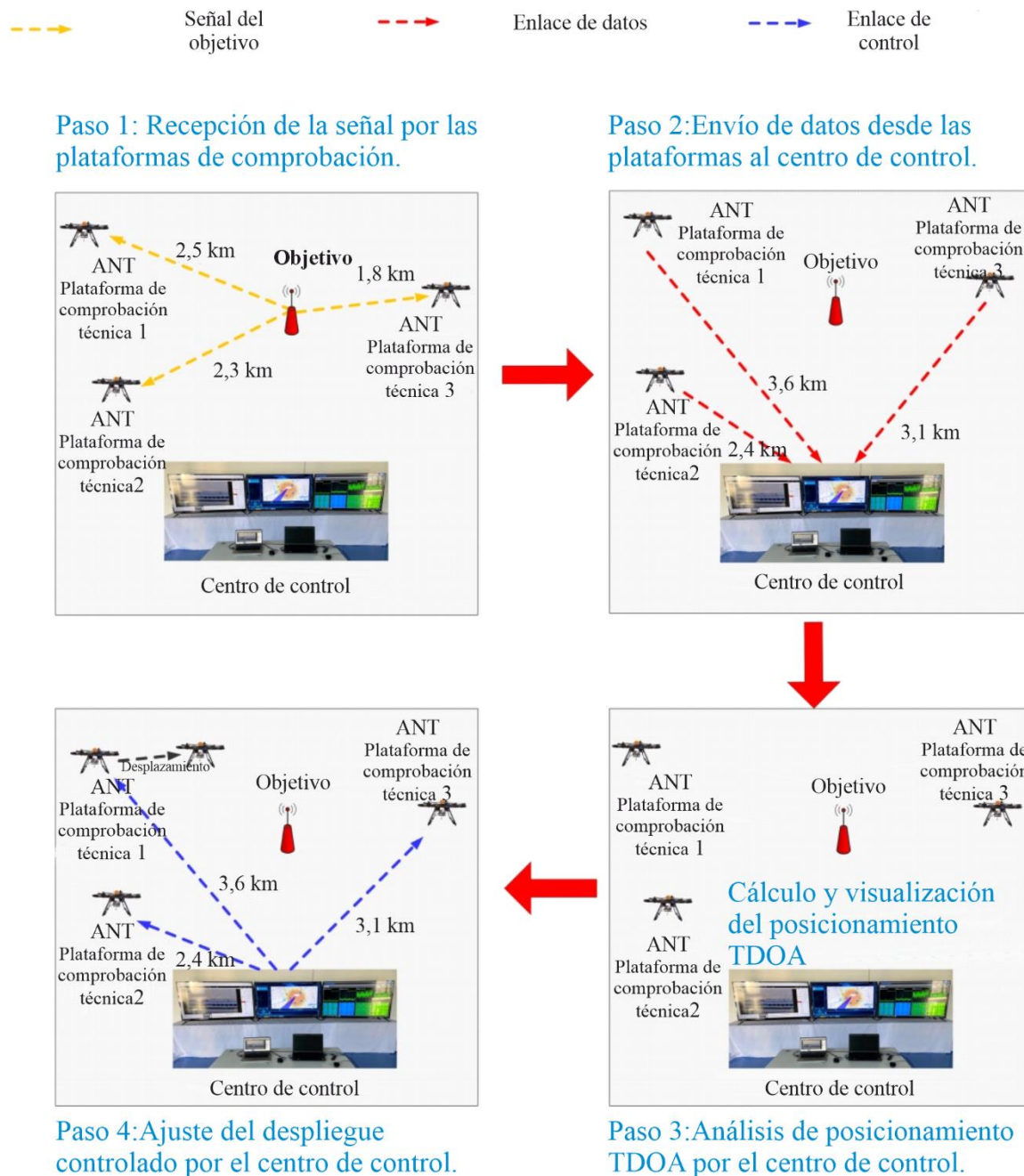
Paso 1: Se lanzan al menos tres plataformas de comprobación técnica ANT, que se despliegan en diferentes ubicaciones desde las que pueden recibir la señal radioeléctrica. Para un posicionamiento más preciso, las plataformas de comprobación técnica ANT se despliegan formando un triángulo o polígono en torno a la zona de interés. En cualquier caso, las plataformas no deberían desplegarse en línea recta.

Paso 2: Las plataformas de comprobación técnica ANT envían los datos recabados al centro de control a través del enlace de datos, incluida la hora exacta de llegada de la señal y la posición actual de las plataformas de comprobación técnica ANT.

Paso 3: El centro de control recopila los datos de al menos tres plataformas de comprobación técnica ANT y el *software* TDOA determina la posición del transmisor objetivo y muestra su ubicación estimada en el mapa.

Paso 4: Tras las mediciones TDOA iniciales, puede ser necesario ajustar la posición relativa de las plataformas de comprobación técnica ANT a fin de mejorar la geometría, la relación señal/ruido y los efectos del desvanecimiento y los trayectos múltiples. En ese caso, el centro de control enviaría nuevas ubicaciones de despliegue a cada plataforma de comprobación técnica ANT a través del enlace de datos. Una vez recibida la nueva orden de despliegue, las plataformas de comprobación técnica ANT se desplazarían a la posición especificada y volverían al Paso 1 del flujo de trabajo.

FIGURA 12

Diagrama de funcionamiento de las plataformas de comprobación técnica ANT

4.4 Pruebas en vuelo de las instalaciones de radionavegación aeroportuaria en tierra

Esta sección contiene información sobre los sistemas de comprobación técnica radioeléctrica ANT que se utilizan para inspeccionar y mantener las instalaciones de seguridad aérea en tierra, incluidos los sistemas de aterrizaje por instrumentos (ILS) y/o los radiofaros omnidireccionales en ondas métricas (VOR) de los aeropuertos.

4.4.1 Información sobre el sistema

4.4.1.1 ANT

Una ANT es un producto comercial equipado con dispositivos de medición, incluidos sistemas de posicionamiento RTK y altímetros de precisión, que le permiten obtener información de localización precisa durante sus operaciones. A continuación se indican algunas de sus especificaciones principales.

	Dimensiones totales	883,0 × 427,0 × 886,0 mm (desplegado)
	Peso/capacidad de carga útil máxima	4,91 kg (incluida la batería)/1,23 kg
	Distancia máxima de funcionamiento	8 km
	Frecuencia de funcionamiento	Control: 2,4 GHz (2 400-2 483) Video: 5,8 GHz (5 725-5 850)
	Precisión de vuelo estacionario	0,10 m vertical (con RTK) 0,10 m horizontal (con RTK)
	Resistencia máxima al viento	12 m/s
	Velocidad horizontal máxima	81 km/h
	Techo de vuelo	3 km
	Temperatura de funcionamiento	−20 a 50° C
	Tiempo máximo de vuelo	< 30 min (con carga útil)
	IMU (unidad de medición inercial)	Equipado
	Sistemas anticolidión	Visión (hacia delante, hacia abajo) IR (infrarrojos, hacia arriba/hacia abajo) Ultrasonidos (hacia abajo)

4.4.1.2 Sistema de comprobación técnica radioeléctrica

La plataforma de comprobación técnica radioeléctrica ANT está configurada para recibir señales ILS/VOR y, concretamente, dispone de una antena y un receptor único para señales en las bandas 108~118 MHz (para VOR e ILS) y 329~335 MHz (para GS). Es importante poner a prueba la antena un vez montada en la plataforma de la ANT para comprender su diagrama general.



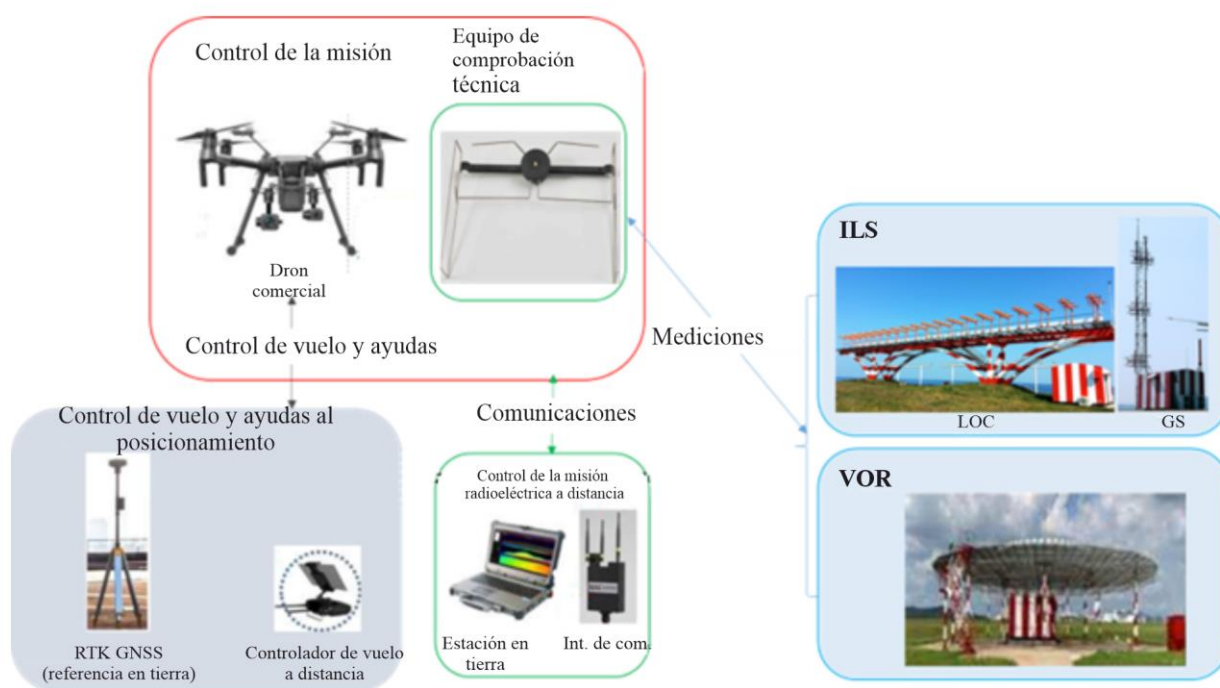
Frecuencia de funcionamiento
108~118 MHz (VOR/LOC)
329~335 MHz (GS)

4.4.1.3 Control y operaciones

La plataforma de la ANT utiliza los dispositivos instalados para medir las señales ILS/VOR en diversas ubicaciones espaciales y, a continuación, transmite los datos a la estación de control en tierra. Dada la necesidad de realizar numerosas mediciones desde los distintos ángulos de aproximación horizontal y vertical durante el proceso de aterrizaje de la aeronave, su diseño permite realizar mediciones automatizadas mediante la introducción de una trayectoria espacial predeterminada. La estación de control en tierra controla el vuelo y la posición de la ANT y realiza las mediciones de acuerdo con la información programada de la misión. En la Figura 13 se muestran brevemente los componentes necesarios para controlar la ANT, medir las señales y transmitir los resultados de las mediciones a la estación de control en tierra.

FIGURA 13

Configuración y funcionamiento del sistema



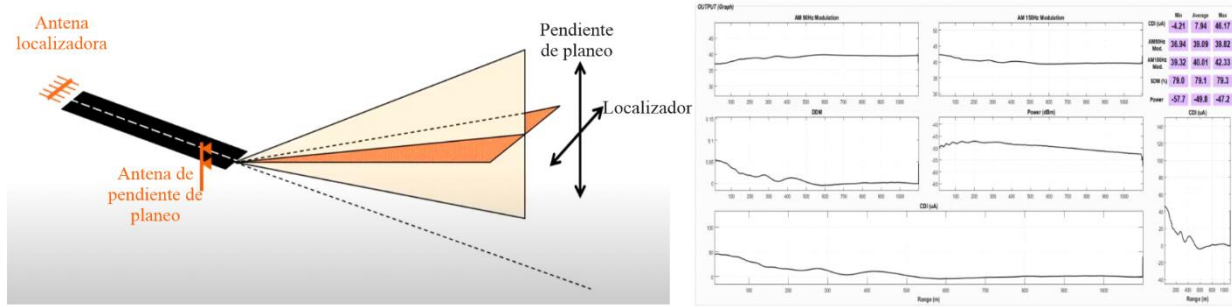
Informe SM.2486-13

4.4.2 Mediciones y resultados

4.4.2.1 ILS

El objetivo principal de las mediciones ILS es verificar que las señales recibidas en determinados ángulos horizontales (por LOC) y verticales (por GS) se ajustan a las referencias; los datos de las mediciones se proporcionan mediante análisis. A continuación se muestran los resultados de las pruebas correspondientes.

FIGURA 14
Resultado de las pruebas ILS

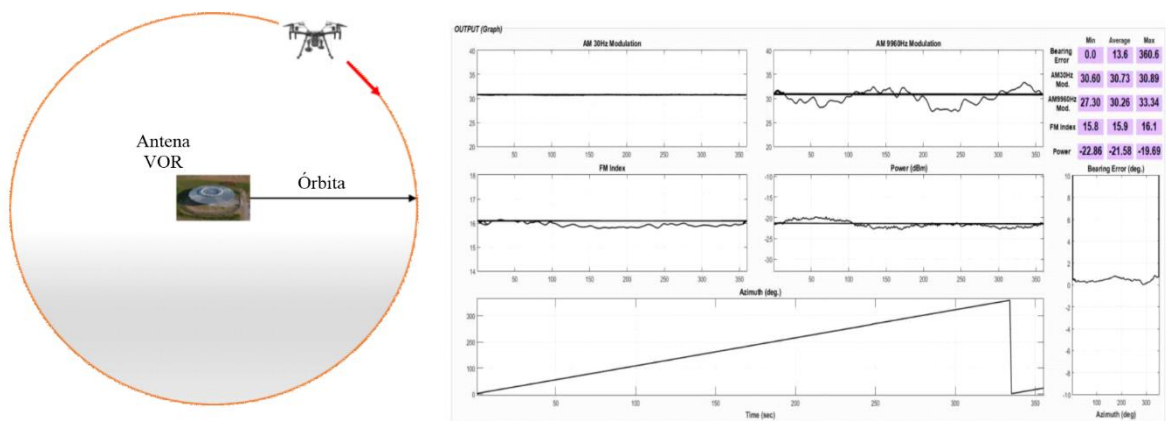


Informe SM.2486-14

4.4.2.2 VOR

El sistema VOR transmite señales de referencia omnidireccionales que permiten al equipo VOR instalado en la aeronave mostrar el rumbo hacia la ubicación del transmisor VOR durante el vuelo. Para poner a prueba el VOR, se describe una órbita circular alrededor del transmisor VOR y se registran y evalúan la distribución real y medida del error acimutal (en relación con el transmisor VOR) y la potencia de las señales recibidas.

FIGURE 15
Resultado de las pruebas VOR



Informe SM.2486-15