

Innovación en la calibración de luces indicadoras de precisión de pendiente de aproximación mediante UAS: una revisión integral

Innovation in precision approach path indicator light calibration using UAS: a comprehensive review

Ignacio Alfonso Alvarado Ortega ¹, Ing. Yuliana Martínez Martínez ²

¹ Fuerza Aérea Colombiana, Centro Tecnológico de innovación aeronáutica, Colombia.

² Fundación Tecnalia Colombia, Colombia.

Correspondencia: ignacio.alvarado@fac.mil.co

Recibido: 08 agosto 2024. Aceptado: 28 diciembre 2024. Publicado: 01 enero 2025.

Cómo citar: I. A. Alvarado Ortega y Y. Martínez Martínez, «Innovación en la calibración de luces indicadoras de precisión de pendiente de aproximación mediante UAS: una revisión integral», RCTA, vol. 1, n.º 45, pp. 170–182, ene. 2025.
Recuperado de <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/3224>

Derechos de autor 2025 Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA).
Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.



Resumen: Este artículo tiene como objetivo proporcionar un contexto general sobre las Luces Indicadoras de Precisión de Pendiente de Aproximación (P.A.P.I) y su relevancia en las operaciones aéreas. El documento se centra en la calibración de las luces P.A.P.I, destacando el uso de Sistemas de Aeronaves no Tripuladas (UAS) como una herramienta que ofrece ventajas significativas. Entre estas ventajas se encuentran la reducción de costos, mayor seguridad, rapidez y precisión en la calibración. Equipados con sensores y cámaras, los UAS permiten realizar inspecciones detalladas y precisas, incluso en condiciones difíciles. En este artículo, se evalúan ventajas, desafíos, procedimientos y tecnologías involucradas en la implementación de UAS para esta tarea, comparando métodos tradicionales con enfoques modernos basados en UAS. Los resultados muestran que el uso de UAS mejora de manera considerable la calibración de los sistemas de ayuda a la navegación aérea, representando una alternativa eficiente y segura a los métodos tradicionales. Se identifican tendencias emergentes y áreas de investigación que podrían optimizar aún más este proceso, subrayando el potencial de los UAS en la mejora continua de la seguridad y eficiencia en la aviación.

Palabras clave: aviación, UAS, GNSS, luces P.A.P.I.

Abstract: This paper aims to provide a general background on Precision Approach Slope Indicator (P.A.P.I) lights and their relevance in airborne operations. The paper focuses on the calibration of P.A.P.I. lights, highlighting the use of Unmanned Aircraft Systems (UAS) as a tool that offers significant advantages. Among these advantages are cost reduction, increased safety, speed and accuracy in calibration. Equipped with sensors and cameras, UAS allow detailed and accurate inspections, even in difficult conditions. In this article, advantages, challenges, procedures and technologies involved in the implementation of UAS for this task are evaluated, comparing traditional methods with modern UAS-based approaches. The results show that the use of UAS considerably improves the calibration of

air navigation aid systems, representing an efficient and safe alternative to traditional methods. Emerging trends and research areas are identified that could further optimize this process, highlighting the potential of UAS in the continuous improvement of aviation safety and efficiency

Keywords: aviation, UAS, GNSS, P.A.P.I. lights.

1. INTRODUCCIÓN

La navegación aérea es la ciencia que estudia los métodos y herramientas utilizados para obtener información sobre la posición y los parámetros de movimiento actuales de una aeronave. Además, se enfoca en los métodos y herramientas necesarios para la navegación, asegurando la precisión en la posición actual y la trayectoria del movimiento en el espacio aéreo, minimizando la incertidumbre [1].

En el área del Sistema de Navegación Aérea (SNA) de cada país es indispensable el mantenimiento de las instalaciones que lo soportan y su verificación operacional. Entre los componentes que contribuyen a la seguridad de las operaciones de aterrizaje, el Sistema de Iluminación de Aeropuertos (también conocido como Sistema de Iluminación de Aeródromos) es una ayuda visual esencial. Este sistema asiste a las aeronaves durante el despegue, aterrizaje y carreteo, facilitando su desplazamiento de manera eficiente y segura [2] [3].

Uno de los elementos destacados en la iluminación de aeródromos son las luces Indicadoras de Trayectoria de Aproximación de Precisión (PAPI, por sus siglas en inglés). Diseñadas para proporcionar una guía precisa a los pilotos durante el proceso de aproximación y aterrizaje, las luces PAPI definen el ángulo de inclinación óptimo, típicamente alrededor de 3 grados [4], que conecta visualmente la aeronave con la pista de aterrizaje [5]. Utilizando una formación específica de luces, este sistema dirige efectivamente a la aeronave hacia una zona de touchdown, asegurando un aterrizaje seguro y preciso [4]. La exactitud del planeo de la aeronave se indica mediante la distribución observada de las luces rojas y blancas, y la calibración debe realizarse periódicamente [6].

Durante el aterrizaje, el piloto observa las luces del aeródromo, la pista y el sistema PAPI, además de las indicaciones de los instrumentos críticos a bordo (como el indicador de velocidad aérea). Esta información permite al piloto construir una imagen mental de la situación, cubriendo el estado de la aeronave, la trayectoria de planeo y el posible punto

de aterrizaje, facilitando así un aterrizaje correcto y seguro.

En este contexto, este artículo tiene como objetivo analizar el uso de UAS para la calibración de sistemas de ayuda a la navegación aérea, específicamente luces PAPI (Precision Approach Path Indicator) y radioayudas (como ILS, VOR, DME, entre otros). Se evaluarán ventajas, desafíos, procedimientos y tecnologías involucradas en la implementación de UAS para estas tareas, comparando los métodos tradicionales con los modernos enfoques basados en UAS. Adicionalmente, se identificarán tendencias emergentes y áreas de investigación futura que podrían mejorar la eficiencia, seguridad y precisión de las calibraciones realizadas con UAS, enfatizando el potencial de los UAS en la mejora continua de la seguridad y eficiencia en la aviación.

2. LUCES INDICADORAS DE PRECISIÓN DE PENDIENTE DE APROXIMACIÓN (PAPI)

Las Luces Indicadoras de Precisión de Pendiente de Aproximación (PAPI, por sus siglas en inglés) son un dispositivo de ayuda visual para el aterrizaje, regulado por el Anexo 14 año 2016 de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) [7]. Consiste en un conjunto de cuatro luces dispuestas a un lado de las pistas de aterrizaje, generalmente al izquierdo, a una distancia de entre 300 y 450 metros del umbral de la pista. Esta disposición se debe a que el piloto se encuentra en ese lado de la aeronave, según Smith et al. [8] y Celis [9].

Los SARPS (Standards and Recommended Practices) para PAPI se adoptaron en el Anexo 14, Volumen I en 1983 para su aplicación mundial. El sistema PAPI está ahora instalado en muchos aeropuertos de todo el mundo, contribuyendo a las operaciones seguras de las aeronaves [10].

Es relevante destacar que la distancia entre las luces PAPI puede variar según el aeropuerto y el tipo de aeronave que se utilice. Además, la intensidad de las

luces puede ajustarse para adaptarse a diferentes condiciones de visibilidad, como niebla o lluvia, de acuerdo con Aviation [11].

En Colombia, conforme a la norma RAC 14 de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia de la Aerocivil [12] y en concordancia con el Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional [7], el sistema PAPI debe consistir en una barra con cuatro elementos luminosos, colocados a intervalos iguales. Esta barra suele instalarse en el lado izquierdo de la pista, a aproximadamente 300 metros del umbral de aterrizaje, salvo que sea materialmente imposible, respetando las tolerancias de instalación especificadas. Los componentes de la barra de luces deben instalarse de tal manera que, durante la aproximación, el piloto perciba una línea casi horizontal.



Fig. 1. Configuración de luces P.A.P.I.
Fuente: Imagen propia

Cada una de las luces es instalada en un ángulo ligeramente diferente (20 minutos de diferencia) y emitiendo un haz de luz de alta intensidad con un filtro que muestra la mitad superior blanca y la mitad inferior roja, según Castle [13]. El ángulo de aproximación ideal se logra cuando el piloto ve las dos luces más cercanas a la pista de color rojo y las dos más alejadas de color blanco, indicando una pendiente de aproximación adecuada. Si la aeronave está por debajo de la senda de planeo (por debajo de $2^{\circ} 30'$), se ven cuatro luces rojas, indicando una pendiente muy baja. Si está ligeramente por debajo (entre $2^{\circ} 50'$ y $2^{\circ} 30'$), el piloto verá tres luces rojas y una blanca, indicando que el avión está ligeramente bajo. Por el contrario, las desviaciones por encima de la senda de planeo se ajustan con el mismo principio.

Es posible percibir una variación de color rosado entre las transiciones de tonalidad de luz blanca a roja, debido a la combinación de colores en un rango angular corto antes de llegar a la tonalidad roja. Estas transiciones permiten al piloto ajustar su

posición para un aterrizaje adecuado, como menciona Anchatipán [14].

Las unidades del sistema PAPI deben estar diseñadas con accesorios frangibles que permitan su desplazamiento en caso de colisión con una aeronave, minimizando daños. Además, deben situarse lo más cerca posible del borde inferior de la pista y ser fácilmente rompibles en caso de impacto, asegurando su funcionalidad tanto para vuelos diurnos como nocturnos [7]. Es fundamental que estas unidades minimicen la susceptibilidad a explosiones, garantizando así una mayor seguridad en las operaciones de aterrizaje [15].

2.1. Calibración de luces PAPI

La calibración de las luces PAPI es crucial para garantizar una trayectoria de aproximación precisa y segura para los pilotos. Esto es fundamental para evitar errores durante la aproximación y reducir el riesgo de accidentes al aterrizar [16]. La calibración asegura que las luces sean visibles y accesibles, especialmente en condiciones de baja visibilidad o durante la noche, permitiendo a los pilotos ajustar su ángulo de descenso efectivamente [17]. Además, la calibración es necesaria para cumplir con las normas internacionales de la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO), que establecen estándares rigurosos para el funcionamiento y mantenimiento de estos sistemas [16]. A través de la calibración regular, se pueden detectar y corregir problemas de funcionamiento o deterioro en el sistema, lo que no solo mejora la fiabilidad y precisión de las luces PAPI, sino que también garantiza la seguridad de los vuelos al minimizar el riesgo de fallos técnicos [12].

Para asegurar que las señales de las luces sean óptimas, se deben realizar varias nivelaciones específicas. Se efectúan tres nivelaciones en el campo y una en el taller [16].



Fig. 2. Nivelaciones específicas Fuente: Barbosa, S. I. P.A.P.I. Precision Approach Path Indicator. Eletromundo

La importancia de que la aeronave ingrese con la correcta pendiente de aproximación es debido a que debe existir la suficiente distancia para el frenado de esta.

2.2. Métodos tradicionales de calibración

Los procedimientos para la verificación en vuelo y la validación de las ayudas a la navegación aérea se definen en el Documento 8071 de la OACI [18] y para la validación en vuelo de los procedimientos de navegación basada en el rendimiento (PBN) en el Documento 9906 [19] de la OACI. Estos procedimientos se aplican a los diferentes tipos de inspección de vuelo, de los cuales hay tres [20].

- **Inspección en vuelo:** de la puesta en servicio de una NAVAID o PAPI: se trata de una inspección de vuelo integral que establece la validez de las señales de radio alrededor del área de servicio. Es solo después de la puesta en marcha que el equipo obtiene la autorización de las Autoridades Aeronáuticas Nacionales para transmitir.
- **Inspección periódica de vuelo:** verificar que las señales de radio de la ayuda a la navegación se transmitan siempre de acuerdo con la normativa. Para ello, las inspecciones periódicas roban algunos de los perfiles de la inspección de puesta en marcha y comparan los resultados con los anteriores. El intervalo es generalmente de 6 meses para ILS/EMD; y 12 meses para VOR/DME y PAPI.
- **Inspección especial de vuelo:** Se requieren inspecciones especiales de vuelo a petición de mantenimiento personal o debido a la investigación de un incidente o accidente. En dicha inspección, solo se prueban los procedimientos de vuelo problemáticos. Después de cualquier modificación de una ayuda a la navegación, los períodos para las inspecciones periódicas también se acortan [20].

La inspección en vuelo de las ayudas a la navegación o al aterrizaje consiste en comparar la información de posicionamiento (azimut o emplazamiento) que emite en relación con una dirección dada, con información externa más precisa, tomada como referencia. La comprobación en vuelo la realiza una tripulación formada para este fin en una aeronave especialmente equipada con banco de inspección de vuelo [20].

Los participantes clave en esta operación aeroportuaria incluyen al controlador aéreo (ATC), quien se comunica con el piloto del avión de laboratorio mediante la frecuencia de la torre y realiza un debriefing previo al inicio de la operación. Los expertos de mantenimiento coordinan con el ingeniero de inspección de vuelo a través de radio VHF, utilizando frecuencias específicas como 130.10MHz o 134.65MHz. El ingeniero de inspección en vuelo desempeña un papel central en la operación, comunicándose con el piloto mediante un teléfono integrado en la aeronave, asegurando así la coordinación eficaz y segura durante todas las fases del proceso de inspección.

El Banco de Inspección en Vuelo es un sistema avanzado compuesto por diversos elementos clave. Incluye un sistema de seguimiento basado en GPS diferencial para una localización precisa, receptores que capturan datos de trayectoria de balizas y de la aeronave, y un sistema de adquisición modular tipo FDAU. Además, cuenta con un sistema informático con interfaz intuitiva para el procesamiento en tiempo real, junto con estaciones de trabajo portátiles y de escritorio. Todo esto se complementa con software especializado para la adquisición y procesamiento eficiente de datos durante los vuelos, facilitando inspecciones detalladas y seguras en operaciones aéreas críticas.

El método de calibración empleado actualmente en Colombia requiere herramientas específicas y un sistema de comunicación con la aeronave de calibración, sumado a que es un servicio prestado por la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (Aerocivil), cuyo costo es asumido directamente por el aeródromo, requiere más tiempo y es más costoso para el departamento de la autoridad civil. Además, si está descalibrado, el alineamiento lleva aún más tiempo [46].

Es decir que estos factores involucran un desgaste del personal, inactividad del aeródromo y consumo de recursos propios de la unidad militar aérea. Adicionalmente a los costos económicos que implica el proceso actual, es igualmente importante destacar el impacto que involucra la suspensión de las operaciones aéreas mientras se realiza este procedimiento, particularmente en unidades con alto nivel operativo, factor económico y operacional que se ve incrementado, esto obliga a tener la pista de aterrizaje inoperativa durante este tiempo de calibración, lo que supone modificar los horarios de vuelos programados, con el consiguiente inconveniente social y económico.

La correcta proyección de los haces de luz depende del proceso de calibración periódico que se realiza al sistema, según Shafer [21], tradicionalmente, la calibración se llevaba a cabo utilizando aeronaves convencionales, como monomotores, bimotores, turbohélices o a reacción, con tripulaciones de vuelo y personal especializado a bordo. Este proceso representaba un desafío significativo en términos de obtener recursos financieros para cubrir los costos operativos y de mantenimiento de la infraestructura aeronáutica y los equipos de vuelo, según Kazda et al [22].

Es importante destacar que, aunque el protocolo es repetitivo, cada procedimiento de calibración puede implicar ajustes debido a diferentes parámetros, como las condiciones topográficas y meteorológicas específicas del aeródromo. Según se señala, El correcto posicionamiento de las aeronaves en las pistas de aterrizaje necesita sistemas precisos que aseguren la seguridad operativa en diversas condiciones meteorológicas. [23], factores que pueden prolongar la suspensión de operaciones aéreas y aumentar el uso de recursos humanos y materiales. Es crucial considerar la calibración de las luces PAPI, cuyos métodos actuales, aunque funcionales, necesitan una estandarización, actualización y tecnificación para mitigar riesgos operacionales y reducir los tiempos de ejecución de estos procedimientos.

2.3. Uso de UAS en la calibración de luces PAPI

La historia de los sistemas aéreos no tripulados (UAS) se remonta a los primeros días de la aviación militar [24]. Los primeros registros de aeronaves no tripuladas se remontan al uso de globos aerostáticos para bombardear Venecia en 1849, y más tarde, durante la Guerra Civil estadounidense. Durante la Primera y Segunda Guerra Mundial, hubo varios intentos de utilizar UAS en tácticas aéreas, aunque con resultados limitados [25].

El término UAS comenzó a utilizarse más frecuentemente a partir de la década de 2000, coincidiendo con el desarrollo y la integración de sistemas complejos que acompañaban a los vehículos aéreos no tripulados.

En la actualidad, los UAS se consideran a menudo aeronaves autónomas o semiautónomas que son controladas remotamente y pueden replicar las maniobras de aeronaves pilotadas por humanos, pero sin la necesidad de un piloto físicamente presente a bordo. La mayoría de los UAS en uso hoy en día son controlados a distancia por pilotos

ubicados en tierra, ya sea como parte de un sistema human-in-the-loop (HITL) o con un piloto en control con funcionalidad autónoma limitada [26].

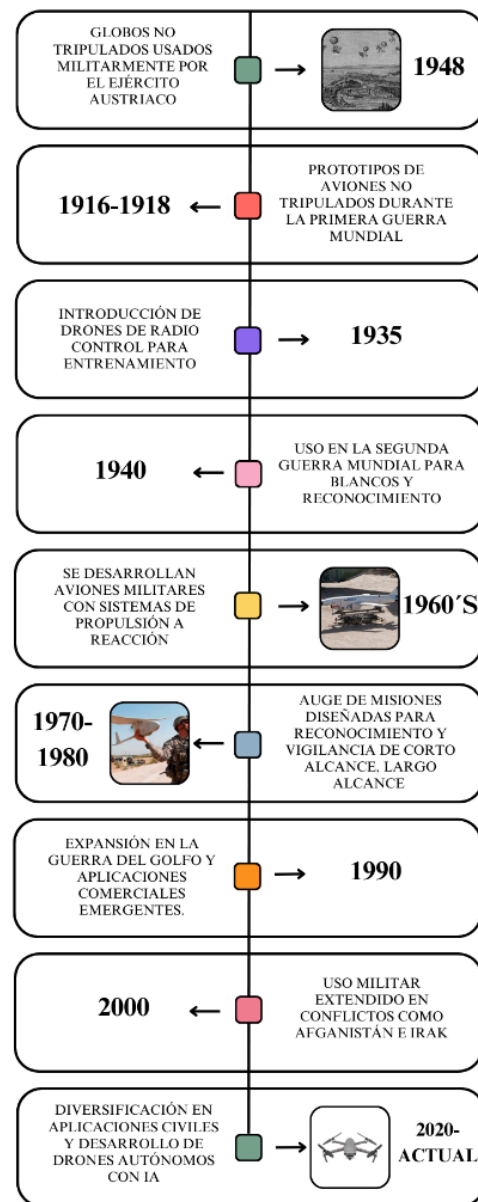


Fig. 3. Evolución UAS

Fuente: Reuter, F., & Pedenovi, A. (2019). Los UAS y sus aplicaciones a la ingeniería. Facultad deficiencias forestales, 43.- Historia de los UAS. (2016, mayo 29). El UAS. <http://eUAS.es/historia-de-los-UAS/>

En un contexto de revisión, es fundamental comprender los componentes esenciales que conforman un Sistema de Aeronave No Tripulada (UAS) y su integración funcional. Generalmente, un UAS está compuesto por varios elementos clave como se observa en la Figura 4 [20].

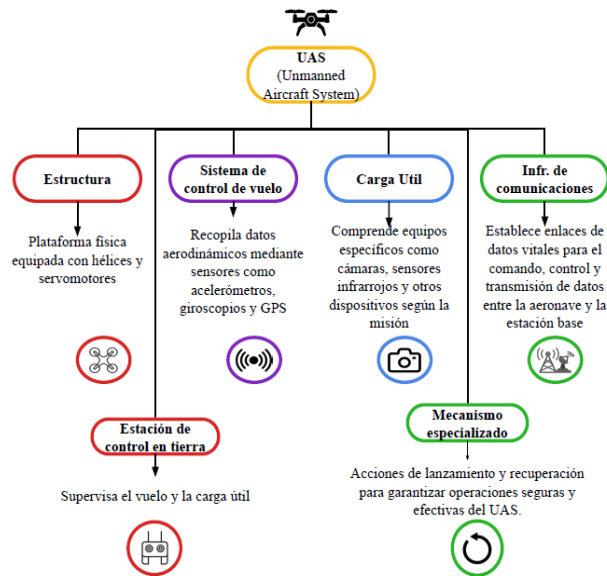


Fig. 4. Elementos de UAS

Fuente: S. Togola., Kiemde, S. M. A., & Kora, A. D. (2020). Real Time and Post-Processing Flight Inspection by UAS: A Survey. 2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 399-402. <https://doi.org/10.1109/TSP49548.2020.9163498>

En la era de la ingeniería remota y la automatización, los UAS de inspección aérea han emergido como herramientas indispensables para la evaluación y mantenimiento de una amplia gama de instalaciones y estructuras. Equipados con una variedad de sensores, cámaras y tecnologías de imágenes, estos vehículos aéreos no tripulados (UAV) son capaces de realizar inspecciones detalladas y resolver problemas en lugares remotos y de difícil acceso. Desde líneas eléctricas hasta turbinas eólicas, desde plataformas petrolíferas hasta represas, los UAS de inspección aérea están transformando la forma en que se abordan los desafíos de mantenimiento en proyectos a gran escala. Este enfoque no solo reduce los costos operativos al minimizar la necesidad de personal humano en terreno, sino que también asegura un nivel de inspección detallada que cumple con los más altos estándares de seguridad y diligencia debida [27].

Las unidades no tripuladas son dispositivos ideales para patrullar grandes áreas, por lo que pueden usarse para proteger propiedades y proteger las fronteras estatales. También podrán realizar fotografías aéreas utilizadas para geodesia, fines arqueológicos, publicitarios, etc. Con sus pequeñas dimensiones y alta maniobrabilidad pueden realizar vuelos entre obstáculos, edificios e incluso volar a habitaciones, a través de portones, ventanas y puertas abiertas. Los modelos equipados con cámaras de visión térmica y nocturna pueden

utilizarse como máquinas de prospección en operaciones de rescate, con un patrullaje diario de la zona elegida y pueden funcionar las 24 horas del día sobre las zonas boscosas [28]. Transmiten una imagen en tiempo real permitiendo una reacción inmediata de los servicios pertinentes en caso de emergencia, accidente o situación de crisis que requiera intervención [29].

Una de las principales ventajas de los UAV en comparación con los aviones tradicionales son las siguientes: un consumo de combustible mucho menor, precios mucho más bajos de diseño, fabricación, mantenimiento y operación. No requieren pilotos, generalmente son pequeños y los costos de fabricación y materiales son muy reducidos; en caso de colisión son muy resistentes, siendo los accidentes con ellos raros y sin consecuencias trágicas; pueden operar varias cosas sin piloto, sin costes, sin riesgos, con resultados superiores a los de la aviación clásica [30].

Los sistemas de aeronaves no tripuladas han demostrado ser mucho más eficientes que los métodos tradicionales, como los laboratorios de vuelo, para la inspección de los sistemas de iluminación en los aeropuertos. Además, el uso de estos sistemas disponibles en el mercado puede generar un considerable ahorro de costos a largo plazo, permitiendo una utilización más eficiente de los recursos en esta tarea. Las inspecciones realizadas con sistemas de aeronaves no tripuladas en el pequeño aeropuerto no controlado de Vysoké Mýto mostraron una precisión aceptable, confirmando la exactitud y fiabilidad de estos sistemas en la evaluación de los sistemas de iluminación aeroportuarios [28].

La utilización de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAVs) ofrece beneficios significativos en diversas áreas de las operaciones de inspección de vuelo. Estos vehículos pueden mitigar efectivamente los riesgos asociados con las aeronaves tripuladas, reduciendo costos operativos como mantenimiento, combustible y gastos generales. Al emplear UAVs, se minimiza el impacto en el tráfico aéreo durante la calibración de vuelo, mejorando así la eficiencia operativa. Además, disminuyen la carga de trabajo para el personal técnico y contribuyen a la conservación ambiental al reducir la contaminación del aire y el ruido. La integración en las verificaciones en tierra de ayudas a la navegación reduce errores humanos y del sistema, mejorando la seguridad de la aviación. Mirando hacia el futuro, existe la posibilidad de que los UAVs influyan en la evolución de los Estándares y Prácticas

Recomendadas (SARPs) de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), apoyando y ampliando su rol en las operaciones de inspección de vuelo [31].

De acuerdo con el documento 9157, un Sistema de Aeronave No Tripulada (UAS) típico incluye varios componentes esenciales: una aeronave no tripulada (UA), una estación de control o estación de piloto remoto (RPS), un enlace de datos (C2 Enlace) entre la UA y su estación de control/RPS para gestionar el vuelo, y posiblemente otros elementos como equipos de lanzamiento y recuperación, así como una unidad de procesamiento terrestre para descargar los datos de medición. Para lograr una alta precisión dimensional, se requiere una estación base cinemática en tiempo real (RTK) [15].

El uso del método UAS para la medición de los ajustes del ángulo del Sistema de Aproximación de Precisión Visual (PAPI) requiere una cámara o sensor de espectro visible validado operativamente en cuanto a la calidad de imagen total percibida [15].

La detección de la cámara debe ser equivalente a la del ojo humano, por ejemplo, en lo que respecta a la resolución angular, la capacidad dinámica de la luz y la susceptibilidad al espectro de frecuencias de los LED PAPI [32]. Así mismo, debe tener la capacidad de mantener un vuelo estacionario frente al sistema PAPI, lo que facilita las mediciones y comprobaciones. Esto mejora la precisión de las inspecciones.

Los UAS más ideales para la inspección de luces PAPI incluyen multirrotores y UAS de ala fija. Los multirrotores son perfectos por su capacidad de mantenerse estables en el aire, permitiendo llevar equipos pesados y sensores de alta precisión. Por otro lado, los UAS de ala fija son adecuados para cubrir áreas grandes gracias a su eficiencia en vuelos largos y en zonas extensas.

De acuerdo con la Patente ES2687869A1, 2023, la aeronave encargada de estas tareas puede ser un vehículo no tripulado que posea la capacidad de realizar exploraciones detalladas tanto vertical como horizontalmente. Idealmente, un UAS, conocido también como UAV por sus siglas en inglés, sería preferible debido a su manejo sencillo y su capacidad de adaptarse a diferentes tipos de vuelos necesarios. Este vehículo puede ser controlado remotamente desde tierra, ya sea por un operador humano o mediante un sistema automático, o bien puede volar de manera autónoma [33].

2.3.1. Procedimiento de calibración

En una operación estándar, el UAS se coloca al menos 300 metros frente al sistema PAPI. El escaneo vertical realizado por el UAS permite al operador medir las alturas h_1 y h_2 , que representan los límites superior e inferior de la zona de transición de rojo a blanco. Con estos datos, se puede calcular el ángulo de ajuste de la unidad lumínica utilizando una fórmula específica [15].

$$\theta = \tan^{-1} \frac{(h_1 + h_2)}{2d}$$

dónde:

h_1 , h_2 son los límites superior e inferior de la zona de transición; y d es la distancia horizontal de la UA al PAPI.

El proceso de calibración consiste en determinar el ángulo de inclinación necesario para cada unidad del sistema PAPI. Se logra identificando la altitud en la cual se pasa de la luz roja a la rosa y luego de la rosa al blanco, y obteniendo los ángulos correspondientes para estas alturas. Durante este proceso, la aeronave puede moverse en cualquier dirección para ubicar exactamente dónde se producen estas transiciones y así determinar sus posiciones precisas [33].

2.4. Aplicaciones prácticas

En la industria de la aviación, el aprovechamiento de tecnologías emergentes como los UAS se presenta como crucial. Estos sistemas no solo son más eficientes y ergonómicos, sino también económicamente viables. La implementación de estos avances no solo aseguraría una mayor precisión en la calibración de equipos como las luces PAPI, sino que también contribuiría significativamente a los objetivos estratégicos de la OACI, especialmente en términos de mejorar la seguridad operativa y la eficiencia del sistema global de navegación aérea [34].

En particular, se están introduciendo alternativas innovadoras al método tradicional de calibración, como es el caso de Canard UAS [35]. Estos UAS están diseñados específicamente para evaluar y calibrar las luces PAPI en aeropuertos. Equipados con cámaras de alta resolución y sensores especializados, estos UAS pueden evaluar la intensidad y alineación de las luces PAPI desde diversos ángulos y altitudes de manera precisa y eficiente. El proceso implica volar el UAS a lo largo de la trayectoria de aproximación de la pista,

registrando datos esenciales para asegurar la correcta configuración de las luces, lo cual es crucial para la seguridad durante las operaciones de aterrizaje y despegue [36] [37].

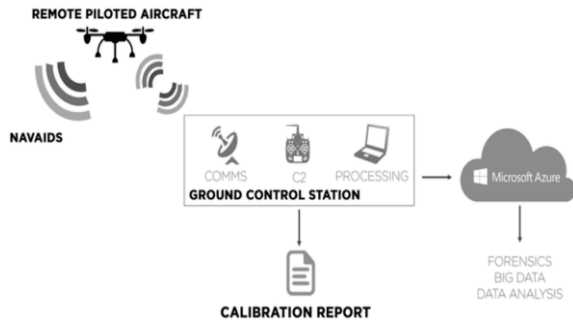


Fig. 5. Arquitectura canard UAS

Fuente: Aeriaa. (2017). *Canard UAS – Beyond a disruptive platform for safety*. Aeriaa. <https://aeriaa.com/canard-UAS-beyond-a-disruptive-platform-for-safety/>

Además de la calibración de luces PAPI, los UAS también se utilizan en la inspección de radioayudas, como se describe en el estudio de Horapong et al. (2017). Estos sistemas aéreos no tripulados permiten una validación preliminar de radioayudas para la navegación, reduciendo la necesidad de inspecciones de vuelo reales durante el mantenimiento de instalaciones en tierra. Esto no solo ahorra tiempo y costos financieros, sino que también mejora la eficiencia operativa [41].

Los beneficios de utilizar UAS (Unmanned Aerial Systems) en la inspección de instalaciones de navegación aérea también han sido destacados por Barrado et al. (2013). Comparado con las inspecciones tradicionales utilizando aeronaves tripuladas, el uso de UAS ofrece una reducción significativa en costos y la capacidad de realizar evaluaciones incluso en condiciones climáticas adversas. Este enfoque subraya el potencial de las aeronaves no tripuladas para mejorar la eficiencia y la seguridad en la inspección de instalaciones de navegación aérea, estableciéndose como una alternativa prometedora frente a los métodos convencionales [42].

El equipo de investigación de aplicaciones de UAS [43] en China ha estado desarrollando una tecnología líder y práctica de inspección de luces PAPI basada en UAS de rotor múltiple probados y una carga útil de imágenes de alta gama. Esta tecnología fue probada mediante vuelos de prueba en aeropuertos tanto en llanuras como en mesetas. Sus ventajas quedaron claramente demostradas en términos de beneficios ambientales, seguridad, economía, eficiencia y ahorro de mano de obra. Aunque aún existen áreas de mejora, la tecnología

de inspección de luces PAPI basada en UAS tiene un gran potencial para beneficiar tanto a los proveedores de servicios de inspección de vuelo como a los aeropuertos cuando se aplica correctamente.

En colaboración entre la Unidad de Control de Vuelo (CEV) del Departamento de Tecnología e Innovación (DTI) de la DSNA (Dirección de Servicios de Navegación Aérea) francesa y la Defensa Centro de Calibración (CCD), desarrollaron el método CAVOC (Calibración de Ayudas Visuales por Objetividad Colorimétrica), el cual tiene como objetivo medir el ángulo de elevación de las luces PAPI, de acuerdo con el informe [48] es un sistema de medición de fácil y rápida implementación (instalación general), permitiendo una reducción en tiempo de ocupación de la pista (tiempo necesario para instalar las 4 unidades PAPI estimado en 20 minutos) [40].

La comparación entre la calibración de luces PAPI utilizando UAS frente a los métodos tradicionales revela notables ventajas en varios aspectos críticos. Los UAS equipados con cámaras de alta resolución y sensores especializados proporcionan una precisión superior y una evaluación más consistente de la intensidad y alineación de las luces PAPI desde múltiples ángulos y altitudes. Esto no solo mejora la calidad de la calibración, sino que también aumenta la eficiencia operativa al reducir significativamente el tiempo y los costos asociados con las inspecciones. Además, la flexibilidad y accesibilidad de los UAS [38] permiten realizar estas tareas en condiciones adversas y áreas de difícil acceso, optimizando la seguridad y el cumplimiento de normativas sin interrumpir las operaciones aeroportuarias. En conjunto, la adopción de UAS para la calibración de luces PAPI representa una mejora significativa en términos de precisión, eficiencia y costos, posicionándose como una alternativa avanzada y efectiva en la gestión de instalaciones de navegación aérea [39].

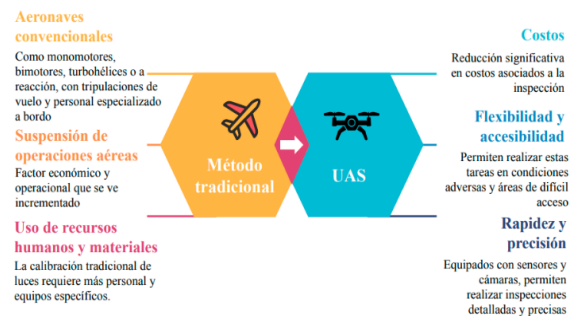


Fig. 6. Ventajas comparativas de los UAS respecto al método tradicional de calibración de luces P.A.P.I

Fuente: Elaboración propia

2.5. Normatividad

El uso de UAS como el mantenimiento y calibración de las luces PAPI es esencial para garantizar la seguridad operacional en los aeropuertos y el espacio aéreo circundante, por lo tanto, la normatividad que regula estos aspectos juega un papel fundamental.

El Reglamento de Aeronavegabilidad Civil (RAC) constituye el marco legal que regula la aeronavegabilidad de las aeronaves registradas en nuestro país, con el fin de garantizar la seguridad operacional, la integridad estructural y el correcto funcionamiento de los sistemas a bordo. La normatividad RAC 100 [45] acerca de la operación de Sistemas de Aeronaves no tripuladas (UAS) establece aspectos como la certificación de aeronavegabilidad, los requisitos técnicos para aeronaves y equipos, la gestión de riesgos y seguridad operacional, la capacitación del personal, el cumplimiento normativo y las auditorías, así como el monitoreo continuo y la mejora del sistema de seguridad operacional. Su objetivo principal es asegurar que las aeronaves cumplan con los estándares de seguridad establecidos para proteger la vida y la integridad de las personas a bordo y en tierra.

Así mismo, la Norma RACAE 210 [46], también conocida como "Requisitos para Operaciones de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS)", establece los requisitos y procedimientos para la operación segura y legal de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) en el espacio aéreo de Colombia. En resumen, esta normativa define los requisitos técnicos para la aeronave, los procedimientos de operación, la capacitación y certificación del personal, la documentación requerida, las restricciones de vuelo y las medidas de seguridad necesarias para proteger la integridad de las personas y la propiedad en tierra. Su objetivo principal es regular el uso de RPAS para garantizar la seguridad operacional y la protección del espacio aéreo colombiano.

De igual forma, la Aeronáutica Civil Colombiana establece las disposiciones para el registro y operación de los sistemas aéreos no tripulados (UAS) en Colombia mediante la resolución 4201 del 27 de diciembre de 2018 [47]. Esta resolución define los requisitos para el registro de UAS, la certificación de pilotos, las zonas de operación permitidas, las restricciones de vuelo y las sanciones por incumplimiento. También establece medidas para garantizar la seguridad operacional y la

protección de la privacidad y la seguridad pública durante el uso de UAS en el espacio aéreo colombiano.

El cumplimiento normativo de las luces PAPI (Precision Approach Path Indicator) es esencial para garantizar la seguridad y la precisión en las operaciones de aproximación y aterrizaje de aeronaves. Las luces PAPI proporcionan una guía visual crucial para los pilotos, asegurando que mantengan la trayectoria de aproximación correcta, por lo tanto, deben cumplir con estándares de seguridad operacional y de navegación aérea establecidos por las autoridades de aviación civil.

Por lo que se refiere a normatividad que regula las luces PAPI, es importante mencionar el Doc 9157 de la OACI [15], también conocido como el Aerodrome Design Manual, es una publicación de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) que proporciona directrices detalladas para el diseño y la planificación de aeródromos. En resumen, este manual aborda una amplia gama de temas relacionados con el diseño de aeródromos, incluyendo la selección del sitio, la geometría de las pistas y calles de rodaje, la iluminación, los sistemas de drenaje, las señales visuales y marcadores, la planificación del espacio aéreo circundante, y los procedimientos de seguridad operacional. El objetivo del documento es proporcionar a los planificadores, diseñadores y autoridades de aviación civil las herramientas necesarias para desarrollar y mantener aeródromos que cumplan con los estándares de seguridad y eficiencia.

El "Manual sobre ensayo de Radioayudas para la Navegación, Volumen I (Doc 8071)" [18] de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) proporciona directrices detalladas y procedimientos para realizar pruebas y ensayos de sistemas de radioayudas utilizados en la navegación aérea. Desde definiciones técnicas hasta normas generales y procedimientos específicos para ensayar diferentes tipos de radioayudas como VOR, ILS, DME y NDB, este manual aborda de manera exhaustiva todas las etapas del proceso de ensayo. Además, ofrece pautas sobre documentación y presentación de informes para garantizar la claridad y la precisión en la comunicación de los resultados. En resumen, el manual establece estándares para asegurar la precisión y confiabilidad de las radioayudas, contribuyendo así a la seguridad y eficiencia de la navegación aérea.

2.6. Desafíos técnicos

Algunos de los desafíos que puede surgir en el camino son: la posible diferencia en los cambios de color que se detectan entre la cámara y el ojo humano, puede generar sesgos en la evaluación final del PAPI. Esto nos lleva a dos direcciones más: investigar la diferencia y la forma de corregirlo, establezca una tolerancia razonable al utilizar tecnología basada en cámaras.

De igual forma, Togola et al., 2020 se refiere a los impactos ambientales de los UAS ya que la inspección aérea mediante UAS está cambiando el panorama en cuanto al consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero comparado con los combustibles tradicionales como el diésel y la gasolina. A pesar de ser una opción más limpia, los UAS no están exentos de impactos ambientales significativos. Desde la huella ambiental de las fuentes de energía utilizadas para cargarlos, que varía según la región y puede incluir desde gas natural hasta electricidad, hasta los efectos derivados de la fabricación y extracción de materiales para las baterías de iones de litio que alimentan la mayoría de los UAS civiles, cada fase del ciclo de vida de estos dispositivos tiene implicaciones ambientales importantes [20].

Los UAS eléctricos, aunque prometedores en términos de reducción de emisiones directas, enfrentan desafíos inherentes, especialmente en lo que respecta a la energía necesaria para su fabricación y funcionamiento. Las baterías de iones de litio, esenciales para la autonomía y eficiencia de vuelo de los UAS, están asociadas con la explotación de recursos naturales y un alto consumo energético durante su producción. Esto subraya la importancia de evaluar de manera integral los impactos ambientales de los UAS, no solo durante su uso activo, sino a lo largo de todo su ciclo de vida [20].

2.7. Futuras direcciones e innovaciones

Para vislumbrar un futuro donde los procedimientos de inspección sean más eficientes y sostenibles, es esencial explorar las tendencias tecnológicas emergentes y las áreas prioritarias para investigación y desarrollo. Innovaciones como los avances en sensores de alta precisión, el desarrollo de algoritmos de procesamiento de imágenes basados en inteligencia artificial, y la mejora en la autonomía y eficiencia energética de los UAS son fundamentales para optimizar la precisión y confiabilidad de las mediciones durante las

operaciones de calibración. Además, las áreas de investigación futura incluyen la integración de tecnologías de comunicación más rápidas y seguras, el diseño de sistemas robustos contra interferencias electromagnéticas, y la exploración de métodos de calibración adaptativos y automáticos que reduzcan la intervención humana y maximicen la precisión. Estos avances no solo mejoran la efectividad de las operaciones de calibración, sino que también allanan el camino para aplicaciones más amplias en campos como la agricultura de precisión, la monitorización ambiental y la gestión de infraestructuras críticas [48].

3. CONCLUSIONES

Por todo lo anterior, la calibración es necesaria para asegurar la precisión de estas luces, siguiendo estándares internacionales de la OACI. Los métodos tradicionales, como la inspección en vuelo realizada por aeronaves tripuladas, son costosos, requieren tiempo y pueden interrumpir las operaciones aeroportuarias, enfrentando desafíos debido a las condiciones meteorológicas y topográficas. En cambio, los UAS ofrecen ventajas significativas, como la reducción de costos, mayor seguridad, rapidez y precisión en la calibración. Equipados con sensores y cámaras, los UAS permiten realizar inspecciones detalladas y precisas, incluso en condiciones difíciles. Además, los UAS pueden patrullar grandes áreas, realizar fotografías aéreas y participar en operaciones de rescate. En conclusión, el uso de UAS mejora significativamente la calibración de sistemas de ayuda a la navegación aérea, representando una alternativa eficiente y segura a los métodos tradicionales, con tendencias emergentes y áreas de investigación que pueden optimizar aún más este proceso.

Es importante destacar que, aunque el procedimiento actual se encuentre en una fase básica, con la ayuda de nuevas tecnologías se puede hacer mucho más eficiente, reduciendo al mínimo la interacción con el personal. Esto permitirá realizar la calibración de una manera automatizada, no solo como un mero requisito, sino también proporcionando parámetros actualizados que reflejen el estado real de los elementos de seguridad aérea en los aeropuertos y aeródromos, independiente de su tamaño y ubicación. Además, esta automatización contribuirá a una mayor precisión y consistencia en las mediciones, optimizando los tiempos de respuesta y facilitando la identificación y corrección de posibles desviaciones en el sistema y paralelamente

minimiza el error humano. En última instancia, la integración de estas tecnologías avanzadas garantizará que las operaciones aéreas se realicen con los más altos estándares de seguridad y eficiencia, adaptándose rápidamente a los cambios y necesidades del entorno operativo.

REFERENCIAS

- [1] O. Skrypnik, Elementos de la teoría general de navegación por radio. Sistemas de navegación por radio para aeropuertos y aerovías, 2019. Disponible: https://doi.org/10.1007/978-981-13-7201-8_1.
- [2] N. I. Salsabila, "Optimalisasi Fasilitas Airfield Lighting System Sebagai Penunjang Pelayanan Navigasi Dan Keselamatan Penerbangan Di Bandar Udara Tambolaka," en *Prosiding Snitp (Seminar Nasional Inovasi Teknologi Penerbangan)*, vol. 4, 2020.
- [3] D. F. H. Wijaya, R. R. Bunahri, y M. Kona, "Perencanaan Pemasangan Medium Approach Lighting System (MALS) pada Runway 09 di Bandar Udara I Gusti Ngurah Rai—Bali," *SKY EAST: Education of Aviation Science and Technology*, vol. 1, no. 2, art. 2, 2023. Disponible: <https://doi.org/10.61510/skyeast.v1i2.17>.
- [4] K. Kustori y Z. N. F. Ningrum, "Rancangan Kontrol dan Monitoring Constant Current Regulator (CCR) pada Precision Approach Path Indicator (PAPI) Menggunakan Android Berbasis Arduino di Bandar Udara Internasional Lombok," *Jurnal Penelitian*, vol. 2, no. 2, pp. 138-147, 2017.
- [5] J. E. H. Rubio y S. Parra, "Experimental prototype for visual support in the calibration of the precision indicator lights of approach slope, for a landing track using a UAS," *Respuestas*, vol. 24, no. 1, pp. 42-49, 2019. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7134608>. [Accedido: 03-oct-2023].
- [6] G. Qingji, L. Jian, y Z. Jinning, "Algoritmo de detección de imágenes de lámpara PAPI de aeropuerto basado en características de configuración y prominencia," en *Conferencia de orientación, navegación y control IEEE CSAA de 2018 (CGNCC)*, pp. 1-5, 2018. Disponible: <https://doi.org/10.1109/GNCC42960.2018.9019174>.
- [7] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional. Informe técnico, OACI. Disponible: <http://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/anexos-oaci/anexo-14-vol-i.pdf>.
- [8] J. Smith y D. Johnson, "The Precision Approach Path Indicator PAPI," *RAE*, 1976. Disponible: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA038149>. [Accedido: 03-oct-2023].
- [9] T. B. Celis Estrada, "Ayudas luminosas para la pista de aterrizaje del nuevo Aeropuerto Internacional de Chinchero-Cusco," 2018. Disponible: <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/5757>. [Accedido: 18-nov-2023].
- [10] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), *State of Global Aviation Safety*, 2019.
- [11] "Qué son las luces 'PAPI' y 'VASI' en aeronáutica," *Aviation Group*, 28-jul-2023. Disponible: <https://www.aviationgroup.es/actualidad/luces-papi-vasi-aeronautica/>.
- [12] Aeronáutica Civil de Colombia (Aerocivil), *RAC 14: Aeródromos, Aeropuertos y Helipuertos*, 2024. Recuperado de: <https://www.aerocivil.gov.co/normatividad>.
- [13] B. Castle, *Evaluation of Precision Approach Path Indicator (PAPI)*, Federal Aviation Administration, Systems Research and Development Service, 1983. Disponible: <https://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ct82153.pdf>.
- [14] L. A. Anchatipán Navas, "Modernización, implantación de sistemas de ayudas visuales luminosas para la navegación aérea en el Aeropuerto Internacional Cotopaxi," B.S. thesis, LATA CUNGA/UTC, 2015. Disponible: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/2962>.
- [15] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), Documento ICAO 9157 Parte 4, 5th edition - *Aerodrome Design Manual*, 2021.
- [16] S. I. Barbosa, "P.A.P.I. Precision Approach Path Indicator," *Eletromundo*, sin fecha. Recuperado de: <https://www.icao.int/SAM/eDocuments/ARTICULO%20REV%20ELETROMUNDO.pdf>.
- [17] "PAPI, VASI y OLS. ¿Por qué son indispensables en los aeropuertos?," *Turama*, 27-ene-2021. Disponible: <https://www.turama.es/papi-vasi-y-ols-por-que-son-indispensables-en-los-aeropuertos>.
- [18] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), *Manual sobre la inspección de ayudas visuales para la navegación aérea (Doc 8071, AN/879, 2da ed.)*, Montreal, Canadá, 2006.
- [19] Organización de Aviación Civil Internacional

- (OACI), Manual sobre la validación en vuelo de los procedimientos de navegación basada en el rendimiento (PBN) (Doc 9906), Montreal, Canadá, 2010.
- [20] S. Togola., Kiemde, S. M. A., & Kora, A. D. (2020). Real Time and Post-Processing Flight Inspection by UAS: A Survey. 2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 399-402. <https://doi.org/10.1109/TSP49548.2020.9163498>
- [21] S. R. M. S. Shaher, Design and Development of Automation System for Precision Approach Path Indicator (PAPI) in Airfield Lighting, PhD Thesis, University of Malaya, Malasia, 2018. Disponible: <https://studentsrepo.um.edu.my/10026/>
- [22] Kazda, Antonín y Robert E. Caves. Airport design and operation. Emerald Group Publishing Limited, 2010 <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/9780080546438-022/full/h>
- [23] Fernandez Aliano, A. G. (2020). Aplicación de la técnica fotogramétrica Structure From Motion en un levantamiento topográfico mediante el uso de aeronave pilotada a distancia (RPA's). Universidad Peruana Unión. <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/3116>
- [24] L. R. Newcome, Unmanned Aviation: A Brief History of Unmanned Aerial Vehicles, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Reston, VA, USA, 2004.
- [25] C. Watts, V. G. Ambrosia, y E. A. Hinkley, "Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use," Remote Sensing, vol. 4, pp. 1671–1692, 2012.
- [26] Sigala y B. Langhals, "Applications of Unmanned Aerial Systems (UAS): A Delphi Study Projecting Future UAS Missions and Relevant Challenges," UAS, vol. 4, no. 1, art. 1, 2020. Disponible: <https://doi.org/10.3390/UAS4010008>.
- [27] "UAS: The leading companies in aerial inspection UAS revealed," Airport Technology, 08-feb-2024. Disponible: <https://www.airport-technology.com/data-insights/innovators-UAS-aerial-inspection-UAS-aerospace-and-defense/>.
- [28] M. Černý, T. Tluchoř, y M. Hamza, "Methodology for Inspecting the Correctness of the Function of Airport Lighting Systems Using a Commercially Available UAS," pp. 32-36, 2022. doi: 10.1109/NTAD57912.2022.10013542.
- [29] P. Kardasz, J. Doskocz, M. Hejduk, P. Wiejkut, y H. Zarzycki, "UAS y posibilidades de su uso," J. Civilización. Rein. ing, vol. 6, no. 3, pp. 1-7, 2016.
- [30] R. Petrescu, "Algunos aspectos de los UAS modernos," vol. 5, pp. 21-40, 2021. doi: 10.3844/JASTSP.2021.21.40.
- [31] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), UAV Solutions for NavAids Flight Inspection, en Radio Navigation Symposium, 2024. Recuperado de: https://www.icao.int/MID/Documents/2024/EUR-MID%20Radio%20Navigation%20Symposium/9.%20UAV%20Solutions%20for%20NavAids%20Flight%20Inspection_Iran.pdf.
- [32] J. Cortes, "Impacto RPAS," presentación en la conferencia de Aerocivil 2030, 2024. Recuperado de: https://www.aerocivil.gov.co/aerocivil/foro2030/Documents/10.%20Conferencia%204_Impacto%20RPAS_Jhon%20Cortes%20AIRSEAIR.pdf.
- [33] I. P. García, J. G. Valverde, J. F. D. Bejarano, y R. A. Muñoz, Procedure and device for calibration of airport approach systems through the use of unmanned spacecraft (Machine-translation by Google Translate, not legally binding), Patent ES2687869A1, 2018. Disponible: <https://patents.google.com/patent/ES2687869A1/en#patentCitations>.
- [34] "Objetivos estratégicos," sin fecha. Recuperado 07-jun-2024, de: <https://www.icao.int/about-icao/Council/Pages/ES/Strategic-Objectives.aspx>.
- [35] STAC, Measurement of PAPI unit elevation setting angle - UAS_CANARD-RTK-001 system, 2021. Disponible: <https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/en/guides/measurement-papi-unit-elevation-setting-angle-UAScanard-rtk-001-system>.
- [36] "Measurement of PAPI unit elevation setting angle—UAS_CANARD-RTK-001 system," STAC, sin fecha. Recuperado 06-jun-2024, de: <https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/en/guides/measurement-papi-unit-elevation-setting-angle-UAScanard-rtk-001-system>.
- [37] "La española Canard UAS realiza 'en tiempo récord' 50 operaciones en aeropuertos de Grecia," Infodron, sin fecha. Recuperado 12-

- jun-2024, de: <https://www.infodron.es/texto-diario/mostrar/4375905/canard-UAS-realiza-50-operaciones-inspeccion-calibracion-12-aeropuertos-grecia>.
- [38] H. J. Martin, The UK and Armed UAS: Key Considerations for the Future of the UK's Programme, British American Security Information Council, 2013.
- [39] D. Nowak, G. Kopecki, D. Kordos, y T. Rogalski, "The PAPI Lights-Based Vision System for Aircraft Automatic Control during Approach and Landing," *Aerospace*, vol. 9, no. 6, art. 6, 2022. doi: 10.3390/aerospace9060285.
- [40] Design and Development of Automation System for Precision Approach Path Indicator (PAPI) in Airfield Lighting—ProQuest, sin fecha. Recuperado 20-may-2024, de: <https://www.proquest.com/openview/a07fdf4bddb6561ba81137944af22cd1/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>.
- [41] K. Horapong, D. Chandrucka, N. Montree, y P. Buaon, "Design and use of 'UAS' to support the radio navigation aids flight inspection," en 2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC), pp. 1-6, 2017. doi: 10.1109/DASC.2017.8102114.
- [42] Barrado, J. Ramírez, M. Pérez-Batlle, E. Santamaria, X. Prats, y E. Pastor, "Remote Flight Inspection Using Unmanned Aircraft," *Journal of Aircraft*, vol. 50, no. 1, pp. 38-46, 2013. doi: 10.2514/1.C031450.
- [43] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), UAS-based PAPI Inspection Technology in China, 2021. Recuperado de: https://www.icao.int/APAC/Meetings/2021%20CNS%20SG%2025/WP24_CHN%20AI.12%20-%20UAS-based%20PAPI%20Inspection%20Technology%20in%20China.pdf.
- [44] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), GRP21 IP21: PAPI Calibration Using UAS, 2023. Recuperado de: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2023/GREPECAS21/GRP21IP21.pdf>.
- [45] Aeronáutica Civil de Colombia (Aerocivil), RAC 100: Operación de Sistemas de Aeronaves No Tripuladas (UAS), 2024.
- [46] Aeronáutica Civil de Colombia (Aerocivil), RACAE 210: Requisitos para la operación de aeronaves pilotadas por control remoto, 2020.
- [47] Aeronáutica Civil de Colombia (Aerocivil), Resolución 4201 del 27 de diciembre de 2018, 2018.
- [48] Grand View Research, Vision Positioning System Market Size, Share & Trends Analysis Report By Component (Camera, Sensors), By Type (Navigation, Object Detection & Obstacle Avoidance), By End Use (Consumer Electronics, Automotive), By Region, And Segment Forecasts, 2023-2030, 2023. Recuperado el 24-jun-2024, de: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/vision-positioning-system-market/segmentation>.
- [49] Aeriaa, "Canard UAS – Beyond a disruptive platform for safety," Aeriaa, 2017. Disponible: <https://aeriaa.com/canard-UAS-beyond-a-disruptive-platform-for-safety/>
- [50] F. Reuter y A. Pedenovi, "Los UAS y sus aplicaciones a la ingeniería," *Facultad Deficiencias Forestales*, vol. 43, 2019.