

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INVESTIGACIÓN EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y SOSTENIBILIDAD EN INDUSTRIA, TRANSPORTE, EDIFICACIÓN Y URBANISMO

TRABAJO FIN DE MASTER

REVISIÓN DEL USO DE UAV PARA LA EVALUACION DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA (FOTOGRAMETRÍA E IRT)



Estudiante: Agrasar Santiso, Kalare

Director/Directora: Millán García, José Antonio

Codirector/Codirectora: Martín Garín, Alexander

Curso: 2022-2023

Fecha: Bilbao, 20, septiembre, 2023

Índice

Lista de figuras	3
Lista de tablas	5
Tabla de acrónimos	6
Resumen (Castellano)	8
Abstract (English)	9
Laburpena (Euskara)	10
2. Contexto y justificación	11
3. Metodología	15
4. Definición de los objetivos	20
5. Memoria	21
a. Gestión energética.....	21
i. Eficiencia energética	22
b. Estado actual	23
i. Desafíos y oportunidades	24
c. Uso de drones en la ingeniería	25
i. Aplicaciones de la tecnología UAV.....	25
ii. Tipos de drones.....	27
iii. Tipos de vuelo	31
iv. Conexiones inalámbricas	32
v. Ventajas de utilizar UAV	34
vi. Programas para la planificación de vuelo	35
PIX4D Capture [18]	35
UgCS [19]	36
DJI GS Pro [20]	37
vii. Normativa UAV	37
viii. Limitaciones y consideraciones de seguridad	43
Aspectos tecnológicos	44
Capacidad humana	45
Disponibilidad de seguros.....	45
d. Métodos de inspección.....	46
e. Tecnología IRT y su aplicación en la gestión energética	50
i. Principios y funcionamiento de la tecnología IRT	50
ii. Vuelo termográfico	52
iii. Aplicaciones de la tecnología IRT.....	54
iv. Ventajas y limitaciones	55
v. Revisión de literatura de UAV con termografía	56
vi. Estudio de mercado	57
Programas de procesamiento de la termografía.....	57
Cámaras termográficas	58
f. Fotogrametría y su aplicación en la gestión energética	61
i. Principios y funcionamiento de la fotogrametría [52]	61
Proceso fotogramétrico.....	63
ii. Aplicaciones de la fotogrametría	66
iii. Ventajas y limitaciones	66
iv. Revisión de literatura de UAV con fotogrametría.....	67
v. Estudio de mercado	69
Programas de procesamiento de la fotogrametría	69
Cámaras fotogramétricas	72

vi.	Laser escáner	74
vii.	LIDAR.....	74
g.	Análisis de requisitos y metodología de inspección	76
i.	Requisitos de gestión energética en el ámbito industrial o de edificios/Criterios de evaluación	76
h.	Tendencias de líneas de investigación.....	78
i.	IoT	78
ii.	BIM.....	80
iii.	ANN.....	82
Deep Learning.....	84	
iv.	Gemelos digitales.....	85
i.	Conclusiones.....	88
i.	ODS [96]	88
ODS7	88	
ODS8	88	
ODS9	88	
ODS11	89	
ODS12	89	
ODS13	90	
ii.	Contribuciones del trabajo de fin de máster	91
6.	Referencias bibliográficas.....	92

Lista de figuras

<i>Figura 1. Gráfica elaborada por el autor de la intensidad de las emisiones de gases invernadero del consumo de energía en Europa (Fuente: EUROSTAT 2020).</i>	11
<i>Figura 2. Gráfica elaborada por el autor donde se ilustra el consumo de energía final dividida por sectores en la unión europea (Fuente: EUROSTAT 2021).</i>	12
<i>Figura 3. Gráfica elaborada por el autor donde se ilustra el consumo de energía final dividida por sectores en el estado español (Fuente: INE 2021).</i>	12
<i>Figura 4. Evolución temporal del número de publicaciones (Fuente: Elaboración propia basada en datos de Scopus).</i>	16
<i>Figura 5. Distribución geográfica de las publicaciones de 2010 a 2023 (Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Scopus y powered by Bing).</i>	17
<i>Figura 6. Ámbito disciplinario de las publicaciones (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Scopus).</i>	17
<i>Figura 7. Red de coocurrencia de palabras clave indexadas (Fuente: Elaboración del autor utilizando el software VOSviewer a partir de los datos de Scopus).</i>	18
<i>Figura 8. Red de coocurrencia de palabras clave en base a línea temporal (Fuente: Elaboración del autor utilizando el software VOSviewer a partir de los datos de Scopus).</i>	19
<i>Figura 9. Esquema clasificación de UAV.</i>	27
<i>Figura 10. UAV ala fija (WingtraOne / SenseFly eBee X).</i>	28
<i>Figura 11. Dinámica de funcionamiento gráficamente ilustrado de un dron de ala rotatoria.</i>	29
<i>Figura 12. UAV de ala rotatoria (DJI Phanton 4 Pro).</i>	30
<i>Figura 13. UAV de ala rotatoria (DJI Matrice 300 RTK).</i>	30
<i>Figura 14. UAV híbrido (Quantum Systems Tron).</i>	30
<i>Figura 15. UAV híbrido (Lattitude Engineering HQ-60).</i>	30
<i>Figura 16. Ángulos de giro considerados para un dron.</i>	32
<i>Figura 17. Captura de pantalla de la interfaz de la aplicación Pix4D Capture en la sección de ajustes y planificación de vuelo.</i>	36
<i>Figura 18. Captura de pantalla de la interfaz de la aplicación Pix4D Capture en una misión.</i>	36
<i>Figura 19. Captura de pantalla de la interfaz de la aplicación UgCS en una misión.</i>	37
<i>Figura 20. Captura de pantalla de la interfaz de la aplicación Pix4D Capture en la sección de ajustes y planificación de vuelo.</i>	37
<i>Figura 21. Prospectivas de cambio en el uso de UAV.</i>	44
<i>Figura 22. Funcionamiento termografía</i>	51
<i>Figura 23. Cámara termográfica Zenmuse XT S</i>	59
<i>Figura 24. Cámara termográfica Zenmuse H20 series</i>	60
<i>Figura 25. Cámara termográfica Zenmuse LIDAR + RGB</i>	60
<i>Figura 26. Cámara termográfica FLIR VUE PRO-640</i>	60
<i>Figura 27. Relación escala fotográfica y distancia focal de la cámara</i>	61
<i>Figura 28. Relación entre la escala de la fotografía y la de la cartografía</i>	62
<i>Figura 29. Fotografía en oblicuidad baja tomada en un terreno completamente plano</i>	62
<i>Figura 30. Relación Paralaje-Cota</i>	63
<i>Figura 31. Paralaje estereoscópica</i>	63
<i>Figura 32. Proceso fotogrametría</i>	64
<i>Figura 33. Orientación interna con cámaras digitales.</i>	64
<i>Figura 34. Transformación de coordenadas en la orientación interna</i>	65
<i>Figura 35. Toma fotográfica para una fotogrametría</i>	65
<i>Figura 36. Captura de interfaz de PIX4Dmapper del producto en 3D.</i>	70
<i>Figura 37. Logo PIX4Dmapper.</i>	70

<i>Figura 38. Logo Agisoft Metashape</i>	70
<i>Figura 39. Captura de interfaz de PIX4Dmapper del producto en 3D.</i>	70
<i>Figura 40. Logo Autodesk Recap PRO.</i>	71
<i>Figura 41. Captura de interfaz de Autodesk Recap del producto en 3D.</i>	71
<i>Figura 42. Logo DroneDeploy.</i>	71
<i>Figura 43. Captura de interfaz de DroneDeploy del producto en 3D.</i>	72
<i>Figura 44. Toma fotogramétrica de una pasada con cámara lineal</i>	72
<i>Figura 45. Toma fotogramétrica multiobjetivo matricial</i>	73
<i>Figura 46. Gráfica elaborada por el autor donde se expresan gráficamente en funcionamiento de capas neuronales en ANN.</i>	83

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Consultas utilizadas y número de publicaciones obtenidas para el tema (Fuente: Elaboración propia/Scopus).</i>	15
<i>Tabla 2. Desafíos y oportunidades actuales del uso de los UAV.</i>	24
<i>Tabla 3. Modelos populares del mercado de drones de ala fija y características</i>	28
<i>Tabla 4. Modelos populares del mercado de drones de ala rotatoria y características.</i>	29
<i>Tabla 5. Modelos populares del mercado de drones híbrido.</i>	30
<i>Tabla 6. Categoría abierta información detallada de las subcategorías y los requisitos técnicos de cada clase.</i>	40
<i>Tabla 7. Categoría específica información detallada de los escenarios y los requisitos técnicos de cada clase.</i>	41
<i>Tabla 8. Ventajas y limitaciones del uso de los UAV con cámara termográfica.</i>	55
<i>Tabla 9. Características de las cámaras termográficas del mercado.</i>	59
<i>Tabla 10. Beneficios de las cámaras matriciales y las cámaras lineales.</i>	73
<i>Tabla 11. La forma completa de las abreviaturas utilizadas en el documento</i>	6

Tabla de acrónimos

Tabla 1. La forma completa de los acrónimos utilizados en el documento

Acronimos	Forma completa
UAV	Vehículo Aéreo No Tripulado (Unmanned Aerial Vehicle)
UE	Unión Europea
GEI	Gases de Efecto Invernadero
CO ₂	Dióxido de Carbono
EPBD	Directiva de Eficiencia Energética de Edificios
NZEB	Edificio de Consumo de Energía Casi Nulo
PNIEC	Plan Nacional Integrado de Energía y Clima
IRT	Tecnología de Rayos Infrarrojos
GCS	Estación de Control en Tierra): Se utiliza en el contexto de vehículos aéreos no tripulados (UAV) y aer
SEG	Sistema de gestión energética
PAREER-CRECE	Programa de Ayudas para la Rehabilitación Energética de Edificios existentes
JESSICA-FIDAE	Instrumento de Financiamiento para el Desarrollo Urbano Sostenible Integrado - Iniciativa de Desarrollo Urbano y Empleo Local
RGB	Rojo, Verde, Azul (colores primarios utilizados en la representación de imágenes)
3D	Tres Dimensiones (refiere a objetos o representaciones tridimensionales)
2C	Control y Comunicación
3C	Control, Comunicación y Captura de Datos
4C	Control, Comunicación, Captura de Datos y Control Colaborativo
GPS	Sistema de Posicionamiento Global.
2D	Dos Dimensiones (refiere a objetos o representaciones bidimensionales)
UgCS	Software Universal de Control en Tierra (Universal Ground Control Software)
GS Pro	Ground Station Pro (software de planificación de vuelos para drones de DJI)
MTOM	Masa Total de Operación Máxima (Maximum Takeoff Mass)
AESA	Autoridad Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (puede tener otros significados según el contexto)
FCS	Sistema de Control de Vuelo (Flight Control System).
ENAIRE	Empresa Nacional de Navegación Aérea
RFID	Identificación por Radiofrecuencia
4G	Cuarta Generación de Comunicaciones Móviles (tecnología de telefonía móvil)
TLS	Escáner Láser Terrestre (Terrestrial Laser Scanning)
DIP	Procesado Digital de Imágenes (Digital Image Processing)

GPR	Radar de Penetración en el Suelo (Ground-Penetrating Radar).
P	Fotogrametría (Photogrammetry)
SfM	Fotogrametría Estructurada a partir de Imágenes (Structure from Motion)
SP	Procesamiento de Señal (Signal Processing)
CNN	Red Neuronal Convolutiva (Convolutional Neural Network).
BIM	Modelado de Información de Construcción (Building Information Modeling)
DEM	Modelo Digital de Elevación (Digital Elevation Model)
DTM	Modelo Digital de Terreno (Digital Terrain Model)
4D	Cuarta Dimensión (generalmente se refiere a la dimensión temporal en contextos de modelado)
INS	Sistema de Navegación Inercial (Inertial Navigation System)
IoT	Internet de las Cosas
HBIM	Modelado de Información del patrimonio (Heritage Building Information Modeling)
DL	Aprendizaje Profundo (Deep Learning)
ANN	Red Neuronal Artificial (Artificial Neural Network)
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference (Sensibilidad)
INS	Sensor inercial de navegación.
TMRT	Temperatura media de radiación térmica
SIG	Sistemas de información geográfica
AR	Realidad Aumentada (Augmented Reality)
DT	Gemelo Digital (Digital Twin)
O&M	Operación y mantenimiento
DRL	Aprendizaje por refuerzo profundo (Deep Reinforcement Learning)
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible

Resumen (Castellano)

El uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) son empleados cada vez más en las áreas de construcción y agricultura debido a sus beneficios como instrumento auditor. Con la preocupación actual de la demanda de energía y los problemas debido al cambio climático, la sociedad e instituciones están cada vez más interesadas en la eficiencia energética. Actualmente, se estima que el 25% de las emisiones GEI del estado español se debe al parque inmobiliario.

Hay una nueva tendencia que pretende construir edificios nuevos de energía neta cero, no obstante, no se le presta la atención necesaria a la rehabilitación de la amplia mayoría de nuestro parque inmobiliario actual. Un aspecto fundamental para la reducción del consumo de energía es mejorar la eficiencia energética de los edificios detectando deficiencias constructivas de los inmuebles actuales, como pueden ser las fugas de aire, falta de aislamiento, etc. Aun así, en los últimos años, cada vez está más presente la obligatoriedad de realizar auditorías energéticas.

El uso de nuevas tecnologías aminora los errores de procesamiento y ahorra tiempo en detecciones de insuficiencias. Esto ciertamente economiza el proceso. El método de obtención de datos manual supone un tiempo elevado y si además se dispone de una amplia extensión de estudio se dificulta aún más debido a la necesidad de contratar personal.

En este trabajo se revisan las técnicas aplicadas a la termografía y fotogrametría para conocer la disponibilidad del mercado actual y comprender la manera de estandarizar el uso de UAVs en las auditorías energéticas y por ende mejorar el consumo de energía. A su vez, se realiza un estudio de mercado de drones, sus cámaras, softwares para el procesamiento de datos, así como la normativa actual para la puesta en marcha de estos dispositivos. Se utilizarán como referencia casos de estudios de interés y el uso de estos vehículos en la obtención de datos. De igual modo, se pretende estudiar la arquitectura del diseño de una aplicación móvil para la gestión energética que está en conexión con el vehículo aéreo no tripulado.

Palabras clave: UAV, eficiencia energética, termografía infrarroja, fotogrametría

Abstract (English)

The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) is increasingly employed in the areas of construction and agriculture due to their benefits as an auditing tool. With current concerns about energy demand and climate change issues, society and institutions are increasingly interested in energy efficiency. Currently, it is estimated that 25% of the GHG emissions in Spain are due to the building stock.

There is a new trend to build new net zero energy buildings, however, not enough attention is given to the refurbishment of the vast majority of our existing building stock. A fundamental aspect of reducing energy consumption is to improve the energy efficiency of buildings by detecting constructional deficiencies in existing buildings, such as air leakage, lack of insulation, etc. Even so, in recent years, energy audits have become more and more compulsory.

The use of new technologies reduces processing errors and saves time in detecting shortcomings. This certainly economizes the process. The manual data collection method is time-consuming and if you have a large study area it is even more difficult due to the need to hire staff.

This paper reviews the techniques applied to thermography and photogrammetry to know the current market availability and to understand how to standardize the use of UAVs in energy audits and thus improve energy consumption. At the same time, a market study of drones, their cameras, software for data processing, as well as the current regulations for the implementation of these devices will be carried out. Cases of studies of interest and the use of these vehicles in data collection will be used as a reference. Similarly, the aim is to study the architecture of the design of a mobile application for energy management that is connected to the unmanned aerial vehicle.

Keywords: UAV, energy efficiency, infrared thermography, photogrammetry

Laburpena (Euskara)

Tripulaziorik gabeko aireko ibilgailuak (UAV) gero eta gehiago erabiltzen dira eraikuntzan eta nekazaritzan, auditore tresna gisa dituzten onurengatik. Gaur egun energia-eskaria eta klima-aldaketak eragindako arazoak direla eta, gizarteak eta erakundeek gero eta interes handiagoa dute energia-eraginkortasunean. Gaur egun, Espainiako BEGen emisioen% 25 higiezinaren parkeari zor zaiola kalkulatzen da.

Joera berri bat dago, zero energia garbia duten eraikin berriak eraiki nahi dituenak. Hala ere, ez zaio behar adinako arreta eskaintzen gaur egungo gure higiezinaren parkearen gehiengoak birgaitzeko. Energia-kontsumoa murrizteko funtsezko alderdi bat eraikinen eraginkortasun energetikoa hobetzea da, egungo eraikinen eraikuntza-akatsak detektatuz, hala nola aire-ihesak, isolamendurik eza eta abar. Hala ere, azken urteotan gero eta gehiago dago energia-ikuskaritzak egin beharra.

Teknologia berriak erabiltzeak prozesatze-akatsak murrizten ditu, eta urritasunak atzemateko denbora aurrezten du. Horrek, jakina, prozesua ekonomizatzen du. Eskuz datuak lortzeko metodoa luzea da, eta, gainera, asko ikasten bada, are zailagoa da, langileak kontratatatu behar direlako.

Lan honetan, termografiari eta fotogrametriari aplikatutako teknikak berrikusten dira, egungo merkatuaren erabilgarritasuna ezagutzeko eta energia-ikuskapenetan UAVen erabilera estandarizatzeko modua ulertzeko, eta, beraz, energia-kontsumoa hobetzeko. Era berean, droneen, haien ganberen, datuak prozesatzeko softwareen eta gailu horiek abian jartzeko egungo araudiaren merkatu-azterketa egiten da. Azterlan interesgarrien kasuak eta ibilgailu horien erabilera erabiliko dira datuak lortzeko. Era berean, energia kudeatzeko aplikazio mugikor baten diseinuaren arkitektura aztertu nahi da, tripulaziorik gabeko aire-ibilgailuarekin lotuta dagoena.

Gako-hitzak: UAV, eraginkortasun energetikoa, termografia, fotogrametria

2. Contexto y justificación

El incremento del consumo energético para la satisfacción de necesidades y el fomento del bienestar en la sociedad representa una gran preocupación. Durante los últimos años, ha emergido una creciente búsqueda centrada en el crecimiento sostenible dentro de ámbito energético.

El 28 de noviembre de 2019, se declaró la situación de emergencia climática y medioambiental en Europa. El 15 de enero de 2020, se ratificó el Pacto Verde Europeo en relación con el aspecto climático para lograr los objetivos de la Unión en cuanto a la energía. El 8 de octubre de 2020, en su posición inicial, solicitó que se establezca un objetivo de reducción del 60 % de todas las emisiones de gases de efecto invernadero de la Unión para 2030 y la eliminación total de las subvenciones a los combustibles fósiles en 2025 como fecha límite.

Tal y cómo se refleja, la sostenibilidad, con el propósito de mitigar el cambio climático, adquiere una relevancia fundamental para la Unión Europea (UE) [1]. El sector energético se posiciona como el responsable del 80% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En la Figura 1 **Error! Reference source not found.**, se puede contemplar la variabilidad de las emisiones de gases invernadero a lo largo del transcurso temporal, así como el consumo específico por cada sector. A pesar de una notable disminución, las cifras aún no se adecuan a los lineamientos establecidos por la Unión Europea en lo que respecta a la reducción del consumo energético. Dichos parámetros, se exponen e identifican a continuación.

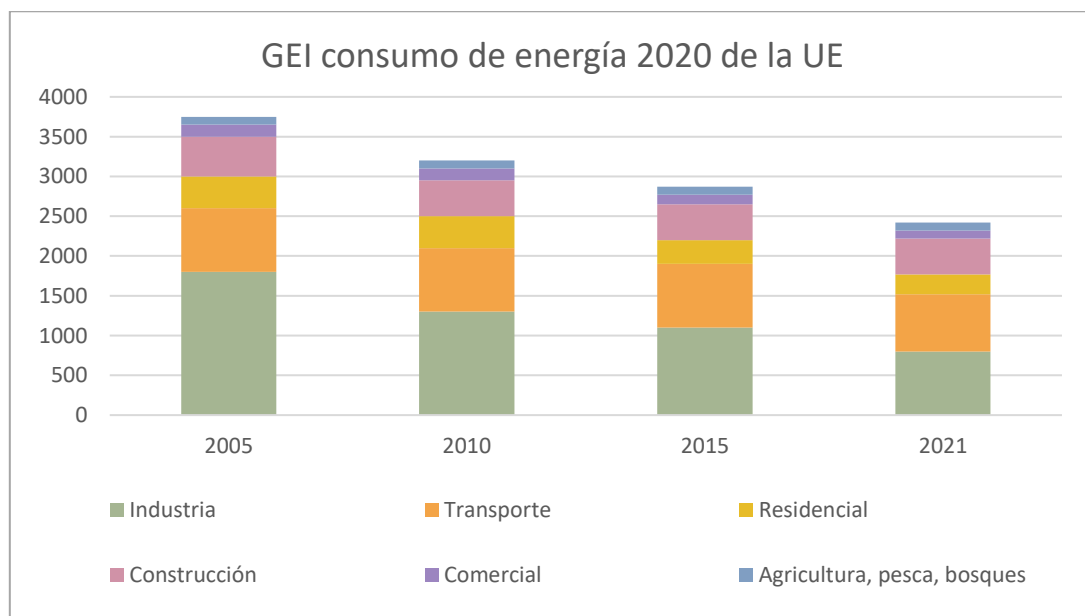


Figura 1. Gráfica elaborada por el autor de la intensidad de las emisiones de gases invernadero del consumo de energía en Europa (Fuente: EUROSTAT 2020).

Los valores de emisiones reflejados en la Figura 1 se originan en el año 2021. Se vislumbra de inmediato la variabilidad de los gases de efecto invernadero en los años

recientes. Las magnitudes expresadas se exhiben en miles de toneladas de CO₂, las cuales son liberadas con base en el sector consumidor correspondiente.

Posteriormente, en las Figura 2 y Figura 3. Gráfica elaborada por el autor donde se ilustra el consumo de energía final dividida por sectores en el estado español (Fuente: INE 2021)., se contemplan detalladamente los patrones de consumo energético de cada sector, tanto a nivel de la Unión Europea como en el ámbito nacional español. Aunque ambos elementos guarden una relación intrínseca con las emisiones, estas representaciones gráficas proporcionan una perspectiva para delinear el ámbito de acción. Su finalidad radica en la identificación de oportunidades y la orientación pertinente. Tal enfoque ayuda a la toma de decisiones fundamentadas y a la concentración en áreas propicias para el desarrollo y progreso sostenibles.

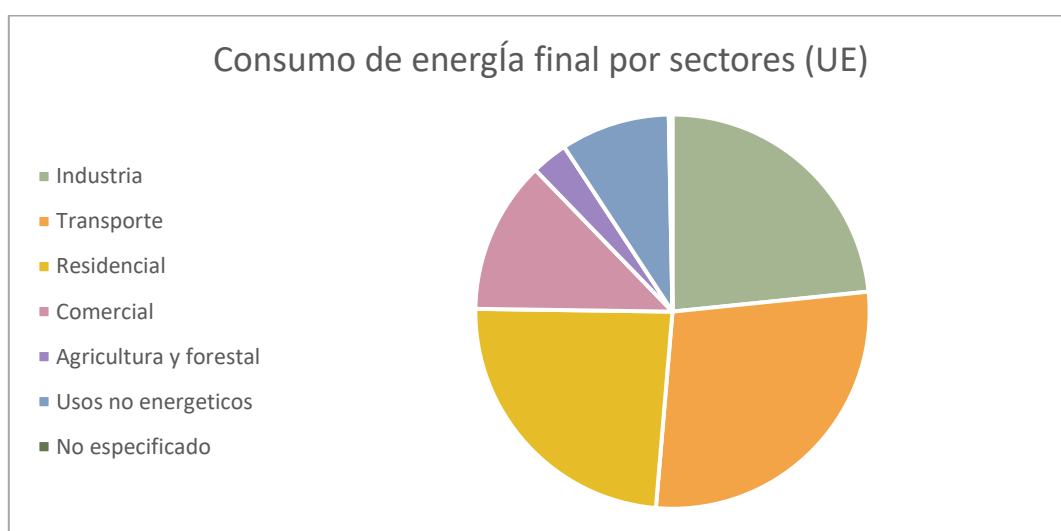


Figura 2. Gráfica elaborada por el autor donde se ilustra el consumo de energía final dividida por sectores en la unión europea (Fuente: EUROSTAT 2021).

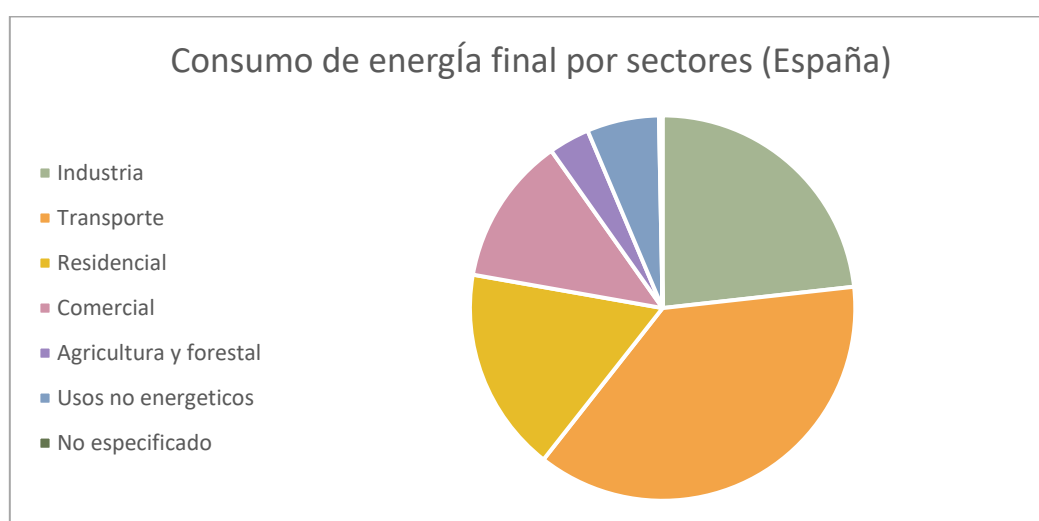


Figura 3. Gráfica elaborada por el autor donde se ilustra el consumo de energía final dividida por sectores en el estado español (Fuente: INE 2021).

Considerando los datos recopilados de las Figura 2 y Figura 3, se sintetiza que el sector de la construcción ostenta un porcentaje del 24% en el consumo final de energía, así como un 22% en las emisiones correspondientes. Por otro lado, se destina un 23.2% del consumo final de energía en la Unión Europea al sector industrial, el cual representa un 46% de las emisiones totales. En contraste, el sector del transporte abarca un 28.2% del consumo energético, y le son asociadas un 30.7% de las emisiones. En virtud de ello, se les confiere un papel estratégico en términos de ahorro energético, debido al potencial aún inexplorado que albergan [2].

Motivada por esta razón, la Comisión Europea fomenta el ahorro energético en las edificaciones mediante la directiva de edificios de eficiencia energética (EPBD), la cual incorpora el concepto de "edificios de energía casi nula" (NZEB) como un umbral mínimo de rendimiento energético a cumplir [2]. En lo que respecta al parque inmobiliario actual, se implementan diversos sistemas de información de carácter obligatorio, tales como los certificados energéticos, las inspecciones de calderas y sistemas de aire, así como la metodología de rentabilidad óptima [3].

Con el fin de fortalecer el rol de Europa como líder en la innovación industrial y la adopción de tecnologías ecológicas, se ha concebido un Plan Industrial vinculado al Pacto Verde Europeo. Este plan se basa en cuatro pilares clave: establecer reglas claras y simples, agilizar el acceso a fondos, mejorar las capacidades industriales y promover un comercio abierto para tener cadenas de suministro fuertes.

A nivel nacional en España, se definen direcciones de acción en el contexto de la evaluación ambiental estratégica del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC). Las políticas y medidas en vigor relacionadas con la energía se fundamentan en cinco dimensiones clave [4]:

1. Descarbonización.
2. Mejora de la eficiencia energética.
3. Garantía de seguridad energética.
4. Fomento del mercado interno de energía.
5. Impulso a la investigación, la innovación y la competitividad.

El PNIEC establece un enfoque estratégico que conlleva la implementación de diversas acciones. En lo que respecta al sector del transporte, basándonos en el análisis del plan establecido en 2020, se pretende fomentar el cambio modal de vehículos particulares hacia bicicletas y medios de transporte público. Se busca también renovar naturalmente las flotas, incorporar biocombustibles y biogás en el transporte, así como introducir medidas para reducir los desplazamientos mediante el uso del teletrabajo y la movilidad colaborativa (carsharing) .

En el ámbito industrial, las directrices se centran en la transición de fuentes de energía y en la mejora de la eficiencia energética.

En otro orden, en el sector residencial, el énfasis se coloca en la rehabilitación de diversos segmentos institucionales. Se planea que la climatización se base en la geotermia, aprovechando la biomasa y las placas solares para la generación de energía en sistemas de calefacción. Además, se contempla promover cambios de comportamiento en los hogares, incluyendo la sustitución de ventanas y la distribución de costos mediante el uso de válvulas termostáticas.

Teniendo presente el contexto actual incentivar la investigación, el desarrollo de tecnologías limpias y conseguir procesos más eficientes es la manera de obtener una energía más respetuosa con el medio ambiente y fomentar el ahorro económico. Por esta razón, el propósito de este proyecto de fin de máster es analizar en profundidad el empleo de drones como herramienta principal para la realización de informes energéticos. La implementación de sistemas de monitorización y reportar los indicadores de sostenibilidad tanto en industrias como en zonas residenciales, no solo permite una supervisión rigurosa, sino también posibilita el cumplimiento efectivo de los objetivos delineados por la Unión Europea. En la actualidad, los drones cuentan con una amplia gama de sensores que permiten la supervisión en tiempo real. Se tiene la intención de examinar el funcionamiento, la viabilidad y los beneficios de estas asociaciones. Es por eso por lo que este documento presenta una descripción general completa del campo de los UAV, destacando tendencias y avances en el ámbito de la gestión energética.

3. Metodología

Se opta por realizar una revisión de los dispositivos UAV para tener un enfoque multidisciplinar, se considera la mejor manera de obtener un conocimiento profundo acerca del uso de esta tecnología. Para conocer el estado de arte de los UAV se hace uso de Scopus, que es una base de datos bibliográficos y de resúmenes de literatura académica y científica gestionado por Elsevier.

Realizar un estudio de los Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV) necesita conocimientos especializados. Para un correcto uso de estos dispositivos en el ámbito energético la equitación de cámaras y sensores es primordial. Esto implica la necesidad de conocimiento de la instrumentación para poder llevar a cabo un análisis exhaustivo y conocer la aplicabilidad de los UAV. Teniendo en mente las posibilidades del objeto de estudio, el propósito principal será realizar una revisión sobre los UAV y las equitaciones de este existentes. Estos son técnicas utilizadas para inspeccionar las propiedades de materiales o componentes de un espacio y/o edificio sin comprometer su integridad. Posteriormente, se relacionará la temática con software de análisis de datos y líneas futuras de auditorías energéticas con el uso de los UAV.

Se hace uso de Scopus para acceder a información sobre investigaciones, artículos científicos, conferencias, patentes y otros documentos relacionados con la disciplina. Su amplia cobertura proporciona métricas de citas, lo que permite evaluar la importancia y el impacto de los trabajos de investigación. Por lo tanto, se utiliza para la toma de decisiones en la investigación.

El análisis bibliométrico y cienciométrico pretende identificar una panorámica completa de las publicaciones dedicadas a la aplicación de los UAV en las auditorías energéticas.

Tabla 2. Consultas utilizadas y número de publicaciones obtenidas para el tema (Fuente: Elaboración propia/Scopus).

Consulta	Número de publicaciones
TITLE-ABS-KEY "UAV" OR "energy"	3.525.759
KEY "UAV" OR "energy"	2.208.028
TITLE-ABS-KEY "UAV" OR "energy audit"	88.096
KEY "UAV" OR "energy audit"	63.471
TITTLE-ABS-KEY "UAV" OR "sensor"	12.377
TITLE-ABS-KEY "UAV" AND "energy"	7.543
KEY "UAV" AND "energy"	4.982
TITLE-ABS-KEY "UAV" OR "IRT"	82.310
TITLE-ABS-KEY "UAV" AND "IRT"	51
TITLE-ABS-KEY "UAV" OR "Photogrammetry"	92.049
TITLE-ABS-KEY "UAV" AND "Photogrammetry"	3.680
Note: TITLE-ABS-KEY = Titles, Abstracts, Keywords KEY = Keywords * = plural and singular	

Con el propósito de obtener la mayoría de información posible, se emplearán artículos que aborden la interconexión entre los Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) y su relación con la fotogrametría, la termografía infrarroja (IRT) y el ámbito energético. Se tiene en consideración los títulos, abstractos y las palabras clave de las publicaciones para poder filtrar los documentos que se analizaran, para limitarlos se hace uso de las palabras clave. Por otro lado, se utiliza “AND” en lugar de “OR” para acotar las publicaciones que se relacionen con ambos tópicos. La información extraída se divide en diferentes consultas: (i) evolución temporal de las publicaciones a lo largo del tiempo; (ii) distribución geográfica de los estudios; (iii) campos disciplinarios y (iv) palabras clave indexadas. Para un posterior análisis se recurre a múltiples aplicaciones para realizar gráficas con el fin de mejorar la comprensión visual de los datos de manera más efectiva. Con este propósito, se sirve de filtros de Scopus para agrupar la evolución temporal, la distribución geográfica y el campo disciplinario. Asimismo, se emplea el software VOSviewer para la red de coocurrencia de palabras clave.

(i) Evolución temporal de las publicaciones

Se tendrán en cuenta los documentos a partir del año 2010, hay previos a este pero la suma de ellos es insignificante comparado con las cantidades de los últimos años. Se puede observar el creciente interés, Figura 4 muestra como la cantidad de documentos de investigación relacionados con los UAV en el ámbito energético crece exponencialmente, siendo 1531 el mayor número de escritos por año, los cuales se publicaron en el año 2022.

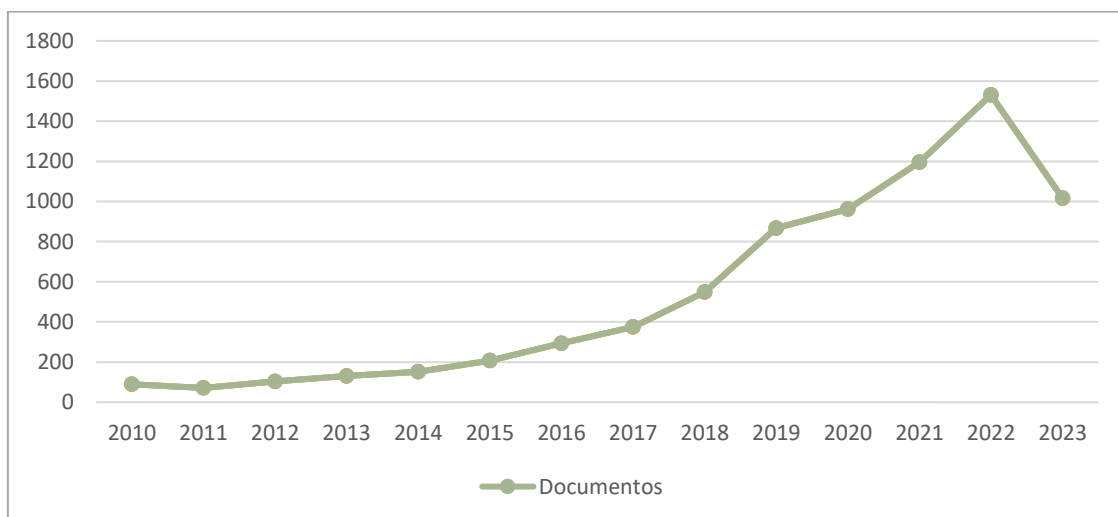


Figura 4. Evolución temporal del número de publicaciones (Fuente: Elaboración propia basada en datos de Scopus).

(ii) Distribución geográfica de los estudios

A continuación, se puede observar la distribución geográfica de los estudios a nivel mundial. La gran cantidad de publicaciones son de China, siendo este mismo el pionero con 2814 estudios, a la cual le sigue Estados Unidos con 1124. Por otro lado, en la UE la mayoría de las publicaciones pertenecen a Italia, Francia, Alemania y España. Cada uno

de estos países cuentan con aproximadamente 250 artículos. Esto demuestra que este tema se debate en todo el mundo.

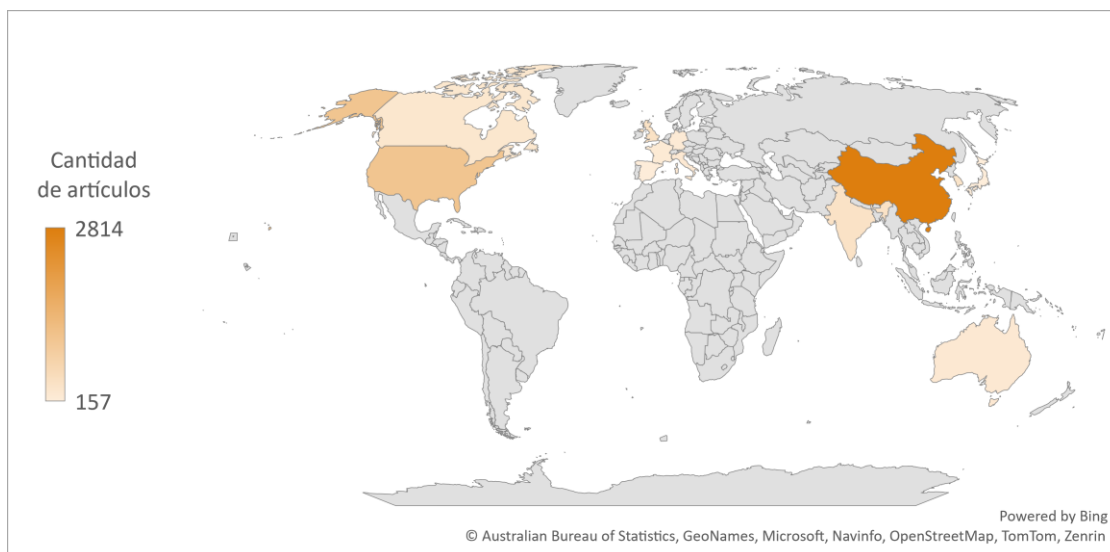


Figura 5. Distribución geográfica de las publicaciones de 2010 a 2023 (Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Scopus y powered by Bing).

(iii) Campos disciplinarios

El campo disciplinario con más sumas de publicaciones corresponde a la ingeniería, con un total de 134 publicaciones, que representan un 32.5% de todas las disciplinas. En ellas predominan la investigación en el aprendizaje automático, desarrollo de técnicas y metodologías, junto a las aplicaciones de estas. Con un 28% le sigue la ciencia de la computación con un total de 4350 estudios, al dirigirnos a los UAV muchos de los artículos se relación con análisis de conexión, control remoto y el posterior análisis digital de datos. Asimismo, muchas de las publicaciones se relacionan con la ciencia del medioambiente, matemáticas, físicas, materiales etc.

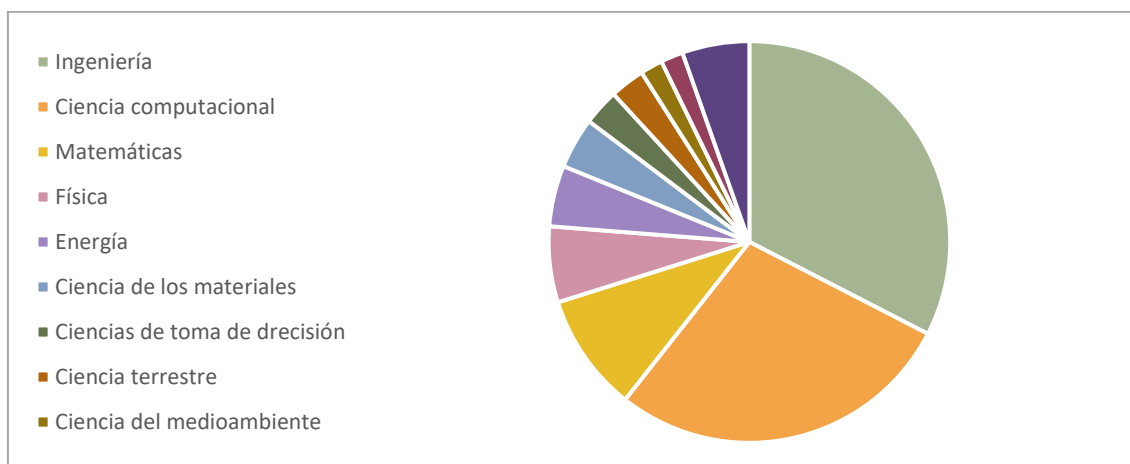


Figura 6. Ámbito disciplinario de las publicaciones (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Scopus).

(iv) Palabras clave indexadas

Figura 8. Red de coocurrencia de palabras clave en base a línea temporal (Fuente: Elaboración del autor utilizando el software VOSviewer a partir de los datos de Scopus).

Este software nos permite relacionar los drones con diferentes temáticas dependiendo de las palabras clave de las publicaciones de los últimos 13 años. Se utiliza como palabra clave “UAV” y la palabra “energía”. Además, nos permite identificar las tendencias futuras debido a la opción de la cronológica que ofrece.

Con el análisis de las interconexiones de los UAV con diferentes tecnologías. Se puede observar en la Figura 8 como por un lado se relaciona con la inspección y obtención de datos, en los cuales se mencionan diversos sensores. Estos son los documentos más antiguos. Por otro lado, se mencionan las comunicaciones de UAV, la mayoría de ellas se relacionan con conexiones inalámbricas. Sin embargo, si nos centramos en las publicaciones más recientes se relaciona con el internet de las cosas, la automatización, el Deep Learning y nuevos dispositivos portátiles que se pueden combinar. Por último, hay un tercer espacio donde se conecta con los UAV y la optimización y en esta se mencionan la simulación, inspección, problemas de los vuelos...

En consecuencia, de este análisis metodológico se definen los objetivos para conocer la metodología con la que se registró el presente documento.

4. Definición de los objetivos

El siguiente documento realiza un estudio y aplicación del proceso de toma de datos haciendo uso de vehículos aéreos no tripulados. El objetivo principal es ofrecer un compendio que indique la diversidad de la investigación sobre los vehículos aéreos no tripulados. Al ofrecer los conocimientos actuales del uso de este dispositivo en la eficiencia energética se proporciona un recurso valioso para avanzar en la tecnología y desbloquear su potencial. De forma más sistemática, a continuación, se enumeran los fines que se pretenden obtener con el siguiente estudio:

- Analizar la aplicabilidad y el funcionamiento de los dispositivos UAV. Lo que implica investigar los diferentes tipos de drones disponibles en el mercado, así como los programas, software y conexiones inalámbricas utilizadas en este contexto. Por otro lado, se debe conocer bien el proceso de auditorías.
- Recopilar distintos métodos de adquisición de datos con sus ventajas e inconvenientes para conocer cómo podrían revolucionar los métodos de obtención de datos. Se centra en la viabilidad de las técnicas con los dispositivos UAV. Se recopila exhaustivamente el método de la tecnología de termografía infrarroja y la fotogrametría.
- En base a los objetivos anteriores, con fundamentos de estudio, informar el mejor método de transmisión de datos desde un UAV. Análisis de una arquitectura de la metodología de obtención y transmisión de datos, teniendo en cuenta los requisitos funcionales, con el fin de garantizar la capacidad de gestión energética de un espacio donde se recopilen datos en tiempo real sobre el consumo de energía.
- Análisis de los más recientes métodos que persiguen la automatización del proceso de auditoría con el uso de los UAV. En tal sentido, se emprende un examen de las disciplinas relacionadas con el aprendizaje profundo, así como de las aplicaciones de gemelos digitales en el contexto de la gestión energética, complementado con la exploración de los dispositivos UAV y sus implicancias en dichos procesos.
- Para completar la investigación se pretenden indicar líneas futuras y nuevos retos que agilicen el proceso de toma de datos.

5. Memoria

UAV es la abreviatura de "Unmanned Aerial Vehicle". Es un sistema aéreo que se compone por una aeronave sin piloto, que puede ser dirigido remotamente o que sigue una ruta de vuelo preprogramada [5].

Un UAV es un conjunto de tecnologías que cumplen una tarea específica. Se identifican tres componentes elementales: la aeronave no tripulada, la estación de control terrestre y los datos de comunicación. Además de esto, se equipan con diferentes componentes dependiendo del cometido del dron. Estos pueden ser los pilotos automáticos, los sensores de imágenes y los sistemas inalámbricos. En esta comunicación, se ponen en consideración estas tecnologías que resultan interesantes para el campo energético y la monitorización [6].

En el presente estudio, se alude al término UAV para hacer referencia al conjunto de elementos que incluyen una aeronave no tripulada (UA), una estación de control terrestre (GCS) y un enlace de comunicación de datos para el comando y control de la UA (C2) desde el GCS.

a. Gestión energética

Como introducción se define que la gestión energética es la supervisión, optimización y planificación del uso de la energía en una organización, edificio, industria, transporte o cualquier otro contexto. El objetivo principal es mejorar la eficiencia energética, que lleva consigo la reducción de los costos operativos derivados del consumo energético y minimizar el impacto ambiental de la generación de esta. Se concibe como un ciclo de mejora continuo que se denomina Sistema de Gestión Energética (SEG). Este implica realizar actividades como auditorias energéticas, monitorización y medición, implementación de tecnologías eficientes, el cambio de prácticas más conscientes, una evaluación continua en función de datos recopilados y la formación de partes interesadas.

Comenzando desde el principio es de mencionar que las directrices referentes a la gestión energética y el clima en España son trazadas por la Unión Europea (UE), cuyas pautas están en consonancia con los propósitos establecidos en el Acuerdo de París. Este pacto, instaurado en 2015 con el propósito de afrontar conjunta y globalmente el desafío que representa el cambio climático, ha sido respaldado oficialmente por la UE en octubre de 2016, llevando a su ejecución en el mismo mes de 2016. Siguiendo esta trayectoria, España también confirmó su adhesión al Acuerdo en 2017, evidenciando de esta manera su renovado compromiso con las estrategias que tratan tanto la energía como el cambio climático [7].

Teniendo en mente la importancia de la gestión energética en España y que el trabajo se basa en el uso de los dispositivos UAV para mejorar esta, en los siguientes puntos se hará referencia a la mejora de la gestión energética, dentro del contexto de la

monitorización y las auditorías energéticas. A continuación, se detallará el propósito en términos de eficiencia energética en relación con el uso de drones. Se abordarán los retos y ventajas asociados con la utilización de estos dispositivos y, por último, se llevará a cabo un análisis del estado actual de estos equipos.

i. Eficiencia energética

La creación de estas nuevas tecnologías se debe al aumento actual de la demanda energética. Actualmente supone un alto consumo energético poder mantener el confort y la calidad de vida de la sociedad. Tal y como se ha mencionado el reto actual se centra en buscar un desarrollo sostenible de transformación teniendo en cuenta que los recursos existentes son finitos, se introduce la eficiencia energética con el objetivo de evitar el derroche energético. Potenciar esta es el modo más barato y eficaz de cambiar esta situación [8].

Se demanda mejorar en un 39.5% la eficiencia en el consumo de energía primaria para el año 2030. Se resaltan dos programas de apoyo para mejorar la eficiencia energética de edificios ya construidos, el Programa de Ayudas para la Rehabilitación Energética de Edificios Existentes (conocido como PAREER-CRECE) y el Fondo JESSICA-FIDAE [9], el cual proporciona financiamiento para proyectos urbanos que promueven la eficiencia energética y el uso de fuentes de energía renovable. Con el propósito de aportar a este objetivo mediante el empleo de drones, se pueden distinguir fundamentalmente dos enfoques.

En primer lugar, el dron se convierte en el principal dispositivo para realizar una auditoría energética. Esto implica que el dron recopile datos relevantes, como imágenes térmicas, imágenes visuales y datos ambientales, de la infraestructura a analizar. Posteriormente, estos datos son procesados y evaluados para identificar posibles fugas de energía, ineficiencias térmicas y otros problemas relacionados con el consumo energético. Esto permite a los especialistas tomar decisiones informadas y desarrollar estrategias de mejora. Se aplica la norma UNE-EN ISO 50001:2018 [10] para poder realizar una revisión energética de espacios, la cual especifica requisitos para implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión de la energía. La norma ofrece un enfoque sistemático y documentado para optimizar el desempeño energético. La fase de adquisición es donde los drones se podrían implementar.

En el segundo enfoque, el dron se utiliza para la monitorización constante y continua de los sistemas y equipos relacionados con el consumo de energía. El dron puede programarse para realizar vuelos regulares sobre áreas específicas, capturando datos en tiempo real. Estos datos se comparan con los valores de referencia y las tendencias históricas para identificar cambios en el rendimiento y el consumo energético. Si se detectan anomalías, se pueden tomar medidas correctivas de manera oportuna para garantizar la eficiencia energética a lo largo del tiempo. Estas acciones contribuyen a la

reducción del consumo de energía, los costos operativos y las emisiones de gases de efecto invernadero.

La longevidad global de las instalaciones y edificios implica la evaluación íntegra del ciclo de vida. Las condiciones límite reducen el rendimiento derivando a que los resultados empíricos empeoren, de aquí se debe la importancia del constante análisis de la eficiencia energética [11]. El monitoreo regular de las instalaciones implica la identificación temprana de errores originando un ahorro energético y por lo tanto consistente económico. Asimismo, con el análisis del espacio, no solo se identifican las malas prácticas sino a su vez se identifican las medidas a implementar.

b. Estado actual

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) representan un campo de investigación que abarca una amplia gama de áreas de estudio, así como numerosos subdominios, notables inversiones. La versatilidad de esta tecnología en expansión ha suscitado un creciente interés en la comunidad científica. Su historia se remonta a usos militares, se empleaban en operaciones como el envío de misiles o para la generación de trincheras durante conflictos bélicos.

A medida que avanzaba la tecnología, en la década de los 90, surgieron avances significativos que permitieron una mayor aplicabilidad de los UAV. Estos avances incluyeron la incorporación de sensores más sofisticados y el aprovechamiento de la nanotecnología, lo que condujo a la expansión de su uso en una variedad de campos aparentemente dispares.

En el contexto de las auditorías energéticas, en la última década se han logrado avances notables. Estos incluyen la capacidad de llevar a cabo inspecciones más rápidas y precisas, la creación de modelos tridimensionales detallados para edificios e infraestructuras, la implementación de monitoreo continuo para un seguimiento constante del rendimiento y la exploración de las oportunidades que ofrecen los nuevos sensores en los UAV para recopilar datos precisos y relevantes en esta área.

En la actualidad, se plantean cuestiones cruciales en relación con los UAV que reflejan la evolución de esta tecnología. La mejora de la autonomía de los UAV mediante la integración del aprendizaje automático y la inteligencia artificial en sus sistemas se encuentra entre las principales prioridades. Además, se están desarrollando sistemas avanzados para la detección y evitación de obstáculos, lo que permitirá una navegación más segura y eficiente en entornos variados.

Un área de investigación en constante crecimiento se centra en la aplicación de la inteligencia de enjambre en los vehículos aéreos no tripulados. Esto tiene como objetivo facilitar la colaboración en tareas y la implementación de algoritmos altamente eficaces, lo que podría tener aplicaciones significativas en una amplia variedad de industrias y campos.

En conclusión, los vehículos aéreos no tripulados representan una tecnología en constante evolución que abarca una amplia gama de aplicaciones y desafíos. Los avances en la autonomía, la inteligencia artificial y la colaboración entre UAV, así como las mejoras en las auditorías energéticas, prometen continuar transformando diversos sectores y contribuir al desarrollo sostenible en el futuro.

i. Desafíos y oportunidades

Estos vehículos aéreos no tripulados ofrecen una serie de oportunidades emocionantes para mejorar la gestión y el control de los recursos energéticos, así como para abordar las preocupaciones ambientales. Sin embargo, junto con estas oportunidades, también surgen desafíos que deben ser superados para aprovechar plenamente los beneficios de esta tecnología.

Tabla 3. Desafíos y oportunidades actuales del uso de los UAV.

Desafíos	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> • Privacidad y protección de la información • Claridad en regulaciones y permisos • Integración con sistemas • Seguridad (sistemas de detección, control sistemas de comunicación y capacidad humana) • Disponibilidad de seguros 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspecciones rápidas y detalladas • Mayor seguridad y reducción de riesgos • Recopilación de datos a gran escala • Acceso a lugares de difícil acceso • Monitoreo continuo y en tiempo real, que consigue detección rápida de anomalías • Optimización de mantenimientos • Versatilidad • Reducción de tiempo y costos

c. Uso de drones en la ingeniería [12]

i. Aplicaciones de la tecnología UAV

El uso de los UAV está actualmente muy extendido. En cuanto se refiera a la disciplina energética, se hace uso de drones dotados de cámaras y sensores que capturan imágenes detalladas para realizar modelos digitales de construcción, terrenos o mapas tridimensionales. Los levantamientos topográficos mencionados sirven a su vez para realizar inspecciones de infraestructuras. Los UAV permiten una inspección termográfica segura, las imágenes capturadas se pueden utilizar para la detección de daños, corrosiones u otros problemas. Asimismo, debido a la posibilidad del monitoreo constante que ofrece esta tecnología es aplicable en la supervisión, permitiendo a los trabajadores realizar seguimientos más precisos y tomar decisiones más informadas en cuanto se refiere a cambios energéticos.

Por otro lado, los drones se pueden utilizar para estudios de impacto ambiental. Se considera especialmente beneficioso en proyectos de infraestructura, como carreteras, líneas eléctricas o parques eólicos, donde se requiere un conocimiento profundo del terreno. Además, con inspecciones visuales se realiza un control de calidad de las instalaciones y sistemas, como paneles solares. A su vez, son un instrumento provechoso para la seguridad y gestión de riesgos.

La proporción de imágenes en tiempo real y datos precisos ayudan en la planificación de operaciones de emergencia. Se puede decir que los UAV son una herramienta versátil y eficiente para la ingeniería, sobre todo en áreas energéticas. Su capacidad para capturar datos y realizar tareas de inspección y monitoreo de manera rápida los convierte en una herramienta indispensable en cuanto nos referimos a la industria 4.0. A pesar de estas líneas generales de usos de los drones, se debe tener en cuenta que la aplicación depende del tipo de sensor o cámara con el que se equipe. Posteriormente, realizará un estudio del funcionamiento de estos sensores, pero por lo pronto se indican las aplicaciones que ofrecen cada uno en combinación con los UAV [13].

Aplicaciones en la región visible

Se hace uso de cámaras de fotos o sensores RGB para capturar imágenes, documentar momentos y desarrollar tecnologías que se basan en la percepción visual humana. En el contexto de cámaras de fotos, estas aplicaciones se refieren a capturar imágenes para sujetos que se quieran inmortalizar. Por otro lado, los sensores RGB son dispositivos electrónicos que registran información sobre los colores. Se hace uso para el procesamiento de imágenes, calibración de colores, detección de objetos, entre otros.

- Revisión visual o filmación: Permite el acceso a diferentes infraestructuras y edificios que sin un UAV no sería posible conocer el estado de estructuras sin poner en riesgo a los operadores. Estos dispositivos posibilitan tareas peligrosas, lentas y costosas.

- Fotogrametría/Modelado 3D: Técnica utilizada para conocer propiedades geométricas de situaciones espaciales a partir de fotografías aéreas. Mediante el procesado de imágenes, se construye estructuras tridimensionales. Resulta útil en campos como la arquitectura, la arqueología, la topografía.
- Cálculo de volúmenes: La medición de volúmenes de objetos o áreas que a través de algoritmos se obtienen mediciones precisas de volúmenes, llegando a obtener incluso áreas geográficas. Es funcional en la aplicación urbana, la agricultura de precisión y gestión del medio ambiente.

Aplicaciones en el infrarrojo reflejado

Estas aplicaciones se refieren al uso de tecnologías para analizar la radiación infrarroja reflejada por los objetos. En la región del espectro electromagnético se extiende desde 700 nm hasta 2500 nm, posterior a la región visible. Los datos de este rango del espectro ofrecen información acerca de plagas, cultivos, cuerpos de agua...

- Identificación de materiales: Detección de la presencia de materiales específicos en estructuras, sirve para inspeccionar la calidad de materiales utilizados. En la industria de la construcción es de gran utilidad, sobre todo en patrimonio cultural.
- Agricultura: Evaluación de la salud de los cultivos. La reflectancia de las plantas proporciona información sobre la clorofila, densidad de vegetación y/o otros parámetros de gran utilidad en el cultivo y tomas de decisión agrícolas, como puede ser el manejo eficiente del agua.
- Geología: Se hace uso de drones para recopilar información de afloramientos o parámetros de la superficie. Cartografía geológica, planificación de territorio, etc.

Aplicaciones en el infrarrojo térmico

Los sensores térmicos son técnicas que posibilitan cuantificar la temperatura con exactitud sin contacto físico. El infrarrojo térmico es una radiación electromagnética que se basa en la emisión de energía térmica por parte de los objetos. Los datos obtenidos se convierten en imágenes con información sobre la temperatura del material.

- Inspección de infraestructuras (eficiencia en la edificación): Al incorporar la cámara fotogramétrica al UAV, se puede conocer parámetros de cualquier punto de edificio y detectar anomalías en la temperatura, lo que puede indicar problemas como fugas de calor, aislamiento deficiente, entre otros.
- Localización de anomalías geotérmicas: Identificar diferencias composicionales en piedras del terreno, fracturas, huecos, patologías etc.
- Búsqueda y rescate: Pueden ayudar a localizar personas perdidas o en situaciones de emergencia al detectar su firma térmica, incluso en condiciones de visibilidad limitada o durante la noche.

- Inspección de paneles solares: Los drones con cámaras de infrarrojo térmico pueden detectar áreas con problemas, como células solares dañadas o conexiones defectuosas, permitiendo una identificación y reparación rápida.

ii. Tipos de drones

Es de importancia enfatizar que en este análisis se presentan los tipos de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) más frecuentes; no obstante, es imprescindible tener en cuenta que la industria de estos dispositivos se encuentra en un constante estado de evolución. Cada clase de UAV posee características y capacidades distintivas, y la elección adecuada dependerá del propósito para el cual se pretenda emplear, así como de los requisitos específicos de la misión a llevar a cabo [14].

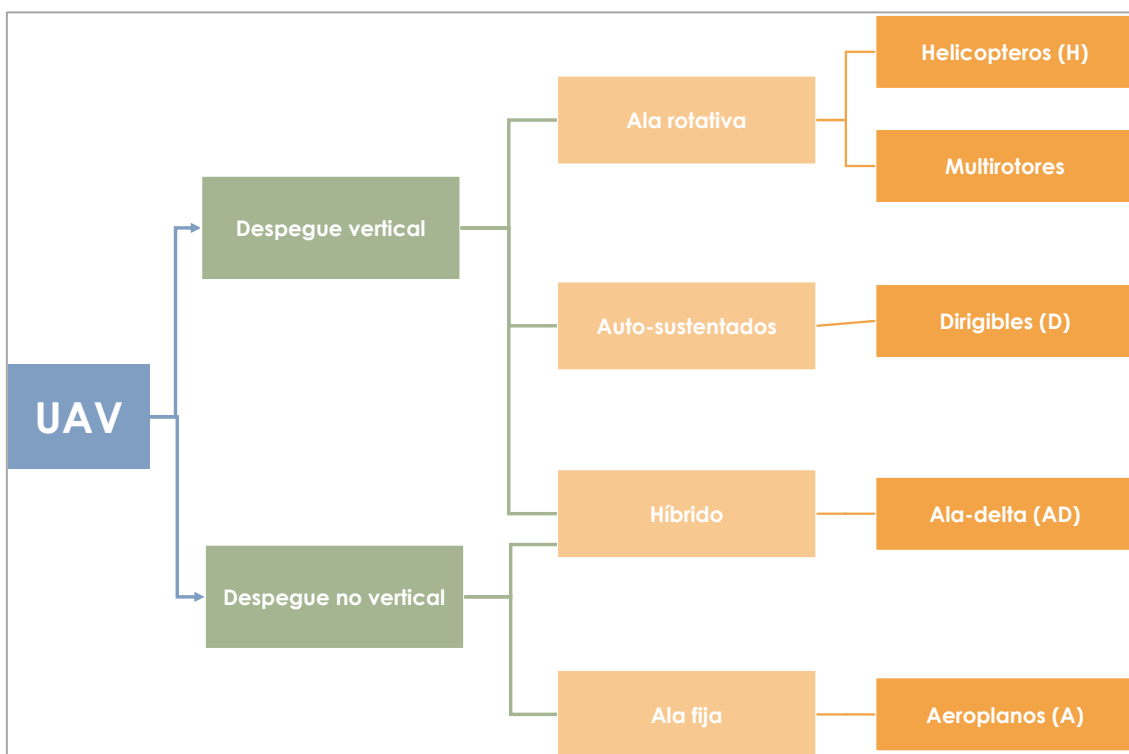


Figura 9. Esquema clasificación de UAV.

Basándose en Figura 9 se pretende ofrecer una visión comprensiva de la relevancia y el potencial de los cuatro tipos de UAV dependiendo del despegue que realicen [15].

Drones de ala fija

Estos drones tienen una configuración similar a la de un avión convencional, con alas fijas que les permiten generar sustentación. Para despegar, requiere de una pista de lanzamiento o una catapulta. Su diseño aerodinámico le proporciona una mayor estabilidad en el aire, apoyada por superficies de control como aletas y elevadores para dirigir su trayectoria y altitud. El control se lleva a cabo mediante un sistema de control remoto, y algunos modelos cuentan con sistemas automatizados o GPS para vuelos

autónomos. A diferencia de los drones de rotor, no pueden mantenerse en un punto fijo en el aire y su aterrizaje generalmente es manual, necesitando una pista adecuada.

La eficiencia y el tiempo de vuelo prolongado son ventajas de los drones de ala fija, ya que requieren menos energía para sostenerse en el aire al no depender de rotores en constante movimiento. La versatilidad de estos drones varía según su diseño y propósito, pero por lo general son drones con ligereza. Se consideran los más silenciosos, por eso su uso se extiende sobre todo en labores de vigilancia. Otra característica de los UAV con ala fija es que requieran estar en movimiento constante. Son drones destinados a mapear grandes superficies de terreno.

Tabla 4. Modelos populares del mercado de drones de ala fija y características

Modelo de drone	Uso principal	Carga útil máxima	Autonomía de vuelo	Alcance máximo
SenseFly eBee X	Fotogrametría y cartografía	500 g	90 minutos	15 km
WingtraOne	Topografía y mapeo de precisión	1,5 kg	55 minutos	40 km
Delair UAX11	Agricultura y gestión de recursos	1,4 kg	59 minutos	15 km
Parrot Dsico Pro-AG	Agricultura de precisión	500 g	45 minutos	2 km
Quantum System Trinity F90+	Inspección y mapeo de infraestructuras	1,5 kg	70 minutos	15 km



Figura 10. UAV ala fija (WingtraOne / SenseFly eBee X).

Drones de ala rotatoria

Primero, se procede a realizar un análisis de la dinámica que rige el funcionamiento. Las hélices opuestas giran en un sentido específico, mientras que las hélices ubicadas en la otra diagonal giran en sentido contrario, lo cual se lleva a cabo con el propósito de compensar el momento angular generado durante el vuelo. Este enfoque permite

mantener una dinámica estable y equilibrada en la aeronave no tripulada, garantizando su correcto desempeño durante todas las fases del vuelo. Debido a esto se caracteriza como los UAV más maniobrables.

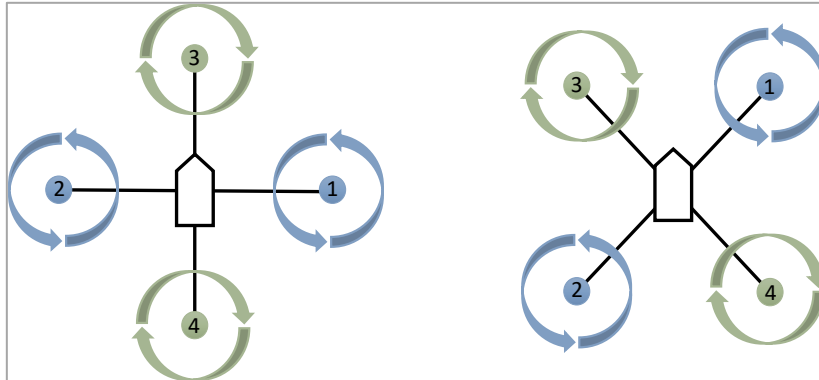


Figura 11. Dinámica de funcionamiento gráficamente ilustrado de un dron de ala rotatoria.

Tal y como se ha mencionado, los drones de ala rotatoria generan la sustentación a través de su perfil alar y de fuerzas que generan las hélices. Se clasifican dependiendo del número de rotores, los cual debido a su funcionamiento por lo general son pares:

- Drones con un rotor principal
- Drones con dos rotores en configuración coaxial
- Drones con dos rotores en configuración tándem
- Multirrotores

Su autonomía es un inconveniente, habitualmente la duración de vuelo suele ser alrededor de 20-30 minutos. Además, tienen un elevado consumo energético para poder permanecer quietos en el aire.

Tabla 5. Modelos populares del mercado de drones de ala rotatoria y características.

Modelo de dron	Uso principal	Carga útil máxima	Autonomía de vuelo	Alcance máximo
DJI Phantom 4 Pro	Fotogrametría y mapeo aéreo de alta resolución	1,4 kg	30 minutos	7 km
DJI Matrice 300 RTK	Inspección termográfica de edificios y estructuras	2,7 kg	55 minutos	15 km
Freefly Alta 8	Fotogrametría aérea de alta precisión y termografía	9 kg	20 minutos	3 km
Autel Robotics EVO II Dual	Inspección termográfica y mapeo 3D de edificios	1,6 kg	40 minutos	9 km
Yuneec Typhoon H Pro	Fotografía aérea, termografía y mapeo de edificios	1,8 g	25 minutos	1,6 km



Figura 12. UAV de ala rotatoria (DJI Phantom 4 Pro).



Figura 13. UAV de ala rotatoria (DJI Matrice 300 RTK).

Hibrido

En este tipo de UAV se combina las características de los drones de alas rotativas y alas fijas. Pueden aterrizar y despegar verticalmente, pero una vez el aire pueden cambiar a un vuelo de ala fija para tener mayor rendimiento de vuelo y autonomía. Son adecuados para misiones que requieren maniobrabilidad y a la vez una cobertura extensa.

Tabla 6. Modelos populares del mercado de drones híbrido.

Modelo de drone	Uso principal	Carga útil máxima	Autonomía de vuelo		Alcance máximo
			Aéreo	VTOL	
Quantum Systems Tron	Inspección de infraestructuras y mapeo aéreo	1,4 g	60 minutos	120 minutos	15 km
WingtraOne	Inspección termográfica de edificios y estructuras	2,7 kg	8 horas	12 horas	40 km
Delair UAX11	Fotogrametría aérea de alta precisión y termografía	9 kg	1,5 horas	5 horas	15 km



Figura 14. UAV híbrido (Quantum Systems Tron).



Figura 15. UAV híbrido (Latitude Engineering HQ-60).

Auto sustentados

Se refieren a los vehículos aéreos que son capaces de mantenerse en el aire sin depender de una propulsión continua. Para ello, el UAV utiliza un globo o una estructura inflable para la sustentación y el vuelo. Son capaces de vuelos estables y prolongados, adecuados para aplicaciones que requieren larga duración en el aire y observación desde altitudes más altas. Este tipo de UAVs son las menos utilizadas para realizar auditorías energéticas.

iii. Tipos de vuelo

Se hace referencia a los diversos modos de vuelo que un dron puede llevar a cabo en el aire. Los perfiles de vuelo se categorizan según la dirección y el propósito de movimiento del dron. Sin embargo, cuando se trata de actividades básicas para el desplazamiento del dron se clasifican como movimientos en vuelo [16].

- Ascenso: Es de perfil e implica elevar la altitud del dron cuando se necesita ganar altura. El despegue es el ascenso más complicado debido a que las hélices se desplazan el viento contra el suelo.
- Descenso: Se clasifica como movimiento perfil también, se emplea para aterrizar o reducir la altitud del dron. La velocidad debe regularse para evitar vuelques al aproximarse al suelo.
- Crucero: Significa mantener una trayectoria horizontal y rectilínea a una velocidad constante. Es la modalidad de vuelo principal y fundamental para mapear territorio.
- Estacionario: En este modo, el dron permanece en el aire sin necesidad de intervención en los controles, manteniendo su posición estática. Se deben vigilar los vientos, ya que estos pueden modificar la dirección.

Guiñada: Maniobra, la cual se denomina como "yaw" en la

- Figura 16. Consiste en rotar el dron alrededor de su eje vertical, permitiendo giros de 360° tanto a la derecha como a la izquierda. Esto sirve para cambiar la dirección del dron y orientar su parte frontal en el sentido de la dirección de avance. Es crucial para el correcto control de la posición del dron y la localización de las luces delanteras y traseras para el avance adecuado. Hay que mencionar que la simetría de algunos drones hace que sea difícil identificar las partes (frontal, lateral y trasera) si no se ubican las luces.

Alabeo: Se refiere al movimiento de inclinación lateral del dron, lo que provoca giros suaves hacia la derecha o izquierda. Este movimiento se efectúa en el eje longitudinal al dron que cruza de la punta a la cola, es más visual y representativo en los drones de ala fija. Se puede observar en la

- Figura 16 con el nombre de "roll".

Cabeceo: Implica la inclinación hacia arriba o hacia abajo del dron, es el movimiento análogo al alabeo. Lo que posibilita realizar descensos o ascensos controlados. El eje de rotación en este caso es transversal y cruza el dron de izquierda a derecha. En la

- Figura 16 se visualiza con el nombre de "pitch".

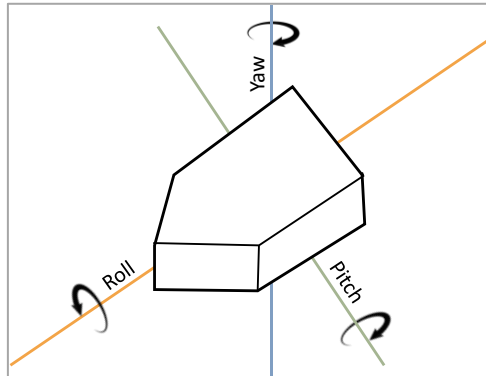


Figura 16. Ángulos de giro considerados para un dron.

En el ámbito del radiocontrol, el mecanismo para controlar un UAV se dispone de manera precisa y funcional. La palanca de "throttle", fundamental para elevar el dron en el aire, se ubica en el lado izquierdo del control remoto (guiñada). Por otro lado, el control situado en el lado derecho del dispositivo posibilita ajustar el ángulo de inclinación del dron, conocido como "pitch" (cabeceo), lo que permite modificar la dirección de la aeronave. Además, inclinando el control hacia la izquierda o derecha, se puede lograr que el dron se desplace lateralmente, esto se conoce como movimiento en ángulo "roll" (alabeo).

iv. Conexiones inalámbricas

Los drones UAV utilizan varias tecnologías de conexión inalámbrica para ofrecer distintos tipos de datos necesarios para un análisis posterior. Además, las conexiones pueden ser diferentes en cuanto a la cantidad de componentes principales que se pueden controlar o comunicar mediante la conexión.

Los drones UAV se controlan de forma remota mediante una conexión inalámbrica entre el controlador y el dron. Esta conexión puede ser a través de radiofrecuencia (RF) o tecnologías como Bluetooth o Wi-Fi [17]. También es posible la transmisión de video en tiempo real, muchos de ellos permiten a los pilotos y operadores controlar el vuelo y la captura de imágenes desde una estación terrestre. Para esta transmisión se hacen uso de Wi-Fi, 4G/5G y enlaces de radiofrecuencia específicos. A su vez, pueden utilizar conexiones inalámbricas para enviar y recibir datos importantes durante el vuelo, como información de sensores, datos de navegación y comandos de control. Por último, las conexiones inalámbricas son necesarias para transmitir los datos de telemetría, que incluyen información sobre el estado del dron, como la altitud, la velocidad, la batería restante, la posición GPS, entre otros. Estos datos permiten a los pilotos monitorear y controlar el vuelo de manera efectiva [18].

Es importante destacar que las tecnologías y protocolos específicos utilizados en las conexiones inalámbricas de los drones UAV pueden variar según el fabricante, el modelo y el propósito de uso. Además, la elección de la conexión inalámbrica puede depender de factores como el alcance requerido, la resistencia a interferencias y las regulaciones locales.

Dependiendo de la cantidad de componentes que se pueden controlar o comunicar mediante la conexión inalámbrica se incorporan los siguientes conceptos [18]:

- 2C (Control y Comunicación): Una conexión 2C permite controlar y comunicarse con el dron UAV de manera inalámbrica. Esto implica que se pueden enviar comandos de control al dron, como órdenes de despegue, aterrizaje, cambio de dirección, entre otros. También se pueden recibir datos de telemetría básica, como la altitud, la velocidad y el estado de la batería. Esta conexión generalmente se establece entre el controlador remoto y el dron.
- 3C (Control, Comunicación y Captura de Datos): Una conexión 3C permite no solo controlar y comunicarse con el dron, sino también capturar datos adicionales durante el vuelo. Además de los comandos de control y los datos de telemetría, se pueden recopilar y transmitir datos más avanzados, como imágenes, videos o información de sensores específicos. Esto implica una mayor capacidad de captura y transmisión de datos durante el vuelo, lo que permite un análisis más detallado y una toma de decisiones más precisa.
- 4C (Control, Comunicación, Captura de Datos y Control Colaborativo): Una conexión 4C incluye todas las capacidades de una conexión 3C, pero agrega la capacidad de establecer un control colaborativo entre varios drones. Esto significa que múltiples drones pueden comunicarse y coordinarse entre sí, lo que permite realizar tareas conjuntas o completar misiones más complejas. Esta capacidad es especialmente útil en aplicaciones como la vigilancia y búsqueda y rescate, donde varios drones pueden trabajar juntos para cubrir áreas más grandes o realizar tareas específicas de manera coordinada.

A medida que se avanza de 2C a 3C y 4C, se agregan capacidades adicionales, como la captura de datos más avanzados y el control colaborativo entre múltiples drones, entre otros. Por otro lado, con la evolución en la comercialización de las comunicaciones 5G y la anticipación de la próxima generación 6G, se ha llevado a cabo investigaciones significativas sobre la integración de los UAV en los sistemas de comunicación celular. Esto tiene como objetivo respaldar el control confiable de los UAV, así como las comunicaciones de carga útil relacionadas con la misión. En este contexto, los UAV pueden conectarse a las redes celulares como nuevos usuarios aéreos, aprovechando las tecnologías celulares avanzadas y la gran accesibilidad de estas redes.

La integración de los UAV en las redes celulares ofrece varias ventajas. Por un lado, permite fortalecer la supervisión y gestión legítima de los UAV, ya que estos pueden ser monitoreados y controlados más eficientemente. Además, se puede lograr una

navegación más sólida al utilizar señales celulares como complemento del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Además, los UAV pueden desempeñar roles adicionales en las comunicaciones inalámbricas al estar en el vuelo. Pueden ser implementados como estaciones base aéreas, puntos de acceso o repetidores, lo que contribuye a la mejora de las comunicaciones terrestres. Esto ha dado lugar a un nuevo paradigma conocido como comunicaciones asistidas por UAV, donde los UAV actúan como elementos clave para mejorar y extender la cobertura de las redes inalámbricas.

v. Ventajas de utilizar UAV

Los sistemas aéreos no tripulados (UAV) brindan una amplia gama de ventajas en diferentes sectores. Entre las más destacadas se encuentran su capacidad para operar de manera autónoma, su versatilidad y su accesibilidad a áreas de difícil acceso. En el ámbito energético, los drones ofrecen una perspectiva aérea que complementa y mejora los métodos convencionales de inspección.

- Rapidez y eficiencia. Estas aeronaves no tripuladas son capaces de sobrevolar extensas áreas en lapsos reducidos de tiempos en comparación con los métodos tradicionales. No solo agilizan el proceso, sino también la detección y evaluación de posibles anomalías.
- Acceso a áreas de difícil alcance. La habilidad para acceder a ubicaciones de complicado alcance se convierte en una de las características más favorables de los UAV debido a los tamaños de espacios (edificios, plantas industriales...) que se pretenden auditar. La agilidad y diseño de estos dispositivos hacen posible la accesibilidad a espacios angostos, las elevaciones significativas y el análisis de entornos peligrosos, donde el acceso humano es impracticable o peligroso.
- Captura de datos precisos. Equipados con sensores avanzados y cámaras de alta resolución, obtienen información detallada sobre infraestructuras y equipos energéticos, lo que posibilita un análisis profundo y certero.
- Inspecciones no intrusivas. A diferencia de los métodos convencionales que a menudo requieren el desmontaje de componentes o interrupciones en las operaciones, los UAV pueden llevar a cabo sus evaluaciones sin perturbar el funcionamiento normal de las instalaciones.
- Detección temprana de problemas. Al permitir inspecciones más frecuentes, los drones contribuyen a identificar posibles fallos o deterioros en una etapa incipiente, lo que a su vez facilita la implementación oportuna de medidas correctivas.
- Informe detallado. Estos dispositivos pueden generar informes completos y visuales que incluyen datos cuantitativos y visuales, lo que simplifica la toma de decisiones informadas y la comunicación con los equipos de mantenimiento y gestión.



vi. Programas para la planificación de vuelo

La planificación de vuelos es una tarea fundamental para garantizar operaciones eficientes y seguras. Los softwares disponibles en el mercado son cada vez más intuitivos, estas se enfocan en mejorar la experiencia del usuario satisfaciendo las demandas cambiantes de las industrias. Es por ello, que la elección de estos programas dependerá de la naturaleza del vuelo, se utilizará la que más se adapte a las necesidades específicas de cada misión y la que se adecue marca de dron. A continuación, se indican los programas más conocidos para planificar operaciones con drones:

PIX4D Capture [19]

Esta aplicación gratuita incluye la planificación de vuelos intuitivos, lo que permite definir áreas de interés y ajustar parámetros de vuelo como la altitud, superposición de imágenes y velocidades de vuelo de manera sencilla. Admite mapeo 2D, mapeo 3D y la inspecciones y vuelo de seguimiento. Durante la ejecución de vuelo se puede realizar un seguimiento en tiempo real y recibir actualizaciones de datos.

La aplicación está dotada de autonomía e inteligencia, con unos datos introducidos manualmente, para trazar la trayectoria de vuelo más eficiente mientras cubre la zona de interés seleccionada. Esto optimiza la eficiencia del proceso teniendo en cuenta que minimiza la superposición innecesaria de imágenes y reduce el tiempo de vuelo.

Cuenta con varias ventajas significativas. El primer beneficio es su compatibilidad con gran variedad de drones como DJI, Parrot... Lo que permite adaptarse a diversos tipos de vuelos ya que el dron depende de la misión. Otra de las utilidades asociadas es que el desarrollador PIX4D cuenta con más aplicaciones destinadas a la fotogrametría, generación de mapas como son Pix4D Mapper, Pix4D Inspect, Pix4D Fields... Esto permite transferir directamente las imágenes capturadas y crear mapas y modelos 3D de manera rápida y sin depender de otros programas.

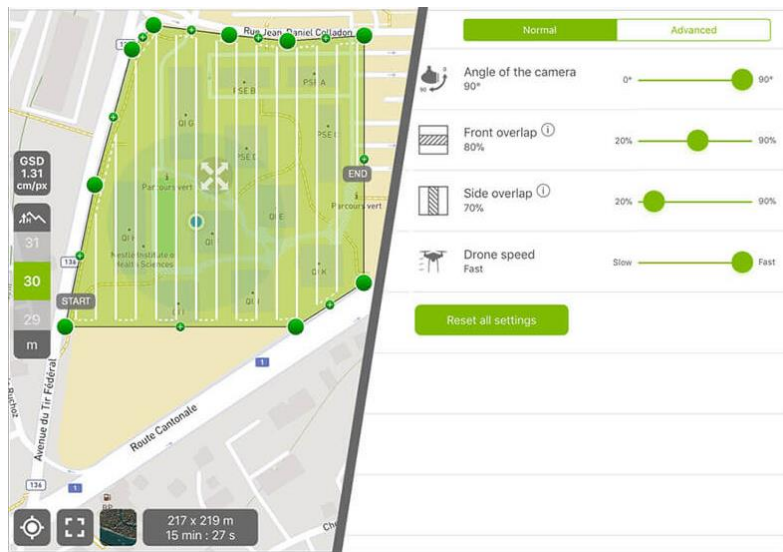


Figura 17. Captura de pantalla de la interfaz de la aplicación Pix4D Capture en la sección de ajustes y planificación de vuelo.

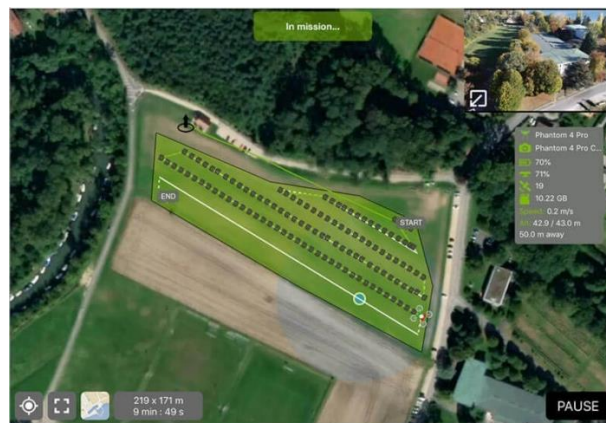


Figura 18. Captura de pantalla de la interfaz de la aplicación Pix4D Capture en una misión.

UgCS [20]

UgCS es una plataforma de control con interfaz tridimensional que permite una muy amplia variedad de drones, desde los comerciales hasta los que tienen configuración personalizadas. En términos de capacidades como aplicación para planificar vuelos de UAV se destaca como una de la más completa del mercado.

Una de sus características más sobresalientes es su capacidad para comunicarse simultáneamente con varios drones, lo que facilita la coordinación de misiones complejas y el monitoreo de múltiples aeronaves en tiempo real. Además, la aplicación permite cargar múltiples capas de mapas procedentes de diferentes proveedores, lo que mejora la precisión y la información disponible durante la planificación y ejecución de vuelos. En línea con la seguridad, UgCS ofrece la posibilidad de establecer zonas de exclusión aérea durante la planificación de vuelos, una característica que contribuye significativamente a la seguridad al prevenir intrusiones no deseadas en áreas sensibles.

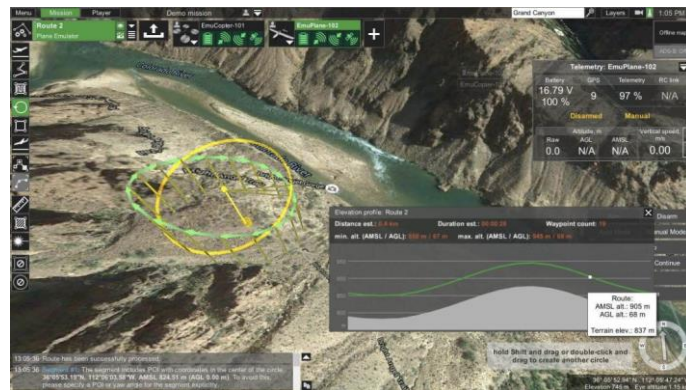


Figura 19. Captura de pantalla de la interfaz de la aplicación UgCS en una misión.

DJI GS Pro [21]

La aplicación Ground Station Pro de DJI (GS Pro), representa la aplicación diseñada en especial para los drones de la marca DJI. Es una interfaz de usuario muy sencilla, lo que permite que el uso de la aplicación y la generación de misiones sea muy rápido. A su vez, dispone de amplia gama de opciones de configuración para que se ajuste a los parámetros de los vuelos dependiendo de la necesidad de los operadores.

Una de las características principales de esta plataforma es que ofrece la capacidad de establecer intervalos de captura de imágenes. Esta personalización hace que los resultados tengan mejor calidad y que los mapas sean más precisos.

Por otro lado, cuenta con una extensión conocida como GeoFence creada para mejorar la seguridad de vuelo. Ofrece la posibilidad de excluir ciertas zonas del vuelo, resulta interesante para las misiones que deben realizarse en áreas compartidas ya que se puede evitar las interferencias en el tráfico aéreo.

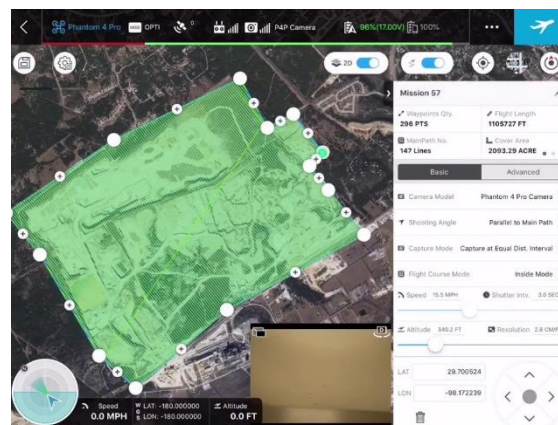


Figura 20. Captura de pantalla de la interfaz de la aplicación Pix4D Capture en la sección de ajustes y planificación de vuelo.

vii. Normativa UAV

A partir del 31 de diciembre de 2020 es de aplicación la normativa europea de UAV. Esta norma afecta a todos los drones independientemente de su uso o tamaño.

Como normativa europea aplicable a los UAS será:

1. Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 de la Comisión [22], de 24 de mayo de 2019, relativo a las normas y procedimientos aplicables a la utilización de aeronaves no tripuladas. Este incluye modificaciones:
 - a. Reglamento de Ejecución (UE) 2020/639 de la Comisión, de 12 de mayo de 2020, en lo que concierne a los escenarios estándar de operaciones ejecutadas dentro o más allá del alcance visual.
 - b. Reglamento de Ejecución (UE) 2020/746 de la Comisión, de 4 de junio de 2020, en lo que respecta al aplazamiento de las fechas de aplicación de determinadas medidas en el contexto de COVID-19.
 - c. Reglamento de Ejecución (UE) 2021/1166 de la Comisión, 15 de julio de 2021, por lo que respecta al aplazamiento de la fecha de aplicación de los escenarios estándar para las operaciones ejecutadas dentro o más allá del alcance visual.
 - d. Reglamento de Ejecución (UE) 2022/425 de la Comisión, 14 de marzo de 2022, por lo que respecta al aplazamiento de las fechas de transición para la utilización de determinados sistemas de aeronaves no tripuladas en la categoría «abierta».

Como normativa europea consolidada:

2. Reglamento delegado (UE) 2019/945 de la Comisión [23], de 12 de marzo de 2019, sobre los sistemas de aeronaves no tripuladas y los operadores de terceros países de sistemas de aeronaves no tripuladas.
 - a. Reglamento delegado (UE) 2020/1058 de la Comisión, de 27 de abril de 2020, en lo que concierne a la introducción de dos nuevas clases de sistemas de aeronaves no tripuladas.

Para una información completa, como última instancia se procede a analizar los puntos más importantes de estas leyes junto con sus respectivos cambios. Estas leyes se aplican a todas las aeronaves no tripuladas, los únicos exentos serán drones de uso militar, salvamento, policías, agentes de aduanas y control de fronteras y demás Cuerpos de Seguridad. En lo que concierne a inspecciones energéticas se deben cumplimentar todas las leyes. Por otro lado, se analizará la normativa de drones aplicada en España y la resolución de la dirección de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA).

Reglamento delegado (UE) 2019/945 de la Comisión [22]

Se compilan los requisitos y características que deben cumplir de manera obligatoria tanto los drones como los pilotos durante las operaciones. Asimismo, se incluyen los dispositivos, programas y elementos complementarios asociados al dispositivo, junto con detalles sobre seguridad y navegación que deben estar presentes en los manuales. La clase de drones existentes se clasifican dependiendo de la MTOM (Masa Máxima al Despegue):

- C0: MTOM < 250 g
- C1: MTOM < 900 g
- C2: MTOM < 4 kg
- C3: MTOM < 25 kg
- C4: MTOM < 25 kg
- C5: MTOM < 25 kg
- C6: MTOM < 25 kg

A lo largo del documento, se podrá ver las especificaciones de cada clase. Además de esta clasificación es de relevancia mencionar que se exige la integración de un nuevo sistema de emisión en tiempo real durante el vuelo. Los drones de construcción previa a la creación de la ley están exentos de cumplimentarla. La emisión del dron lleva consigo un protocolo que incluirá:

- N.º de registro del operador
- N.º de serie del UAS o dron
- Posición geográfica y altura sobre el suelo
- Dirección y velocidades
- Coordenadas del despegue

Todos los drones deberán incorporar manuales que expliquen tanto la instalación como la configuración correcta del sistema. Se incorpora esta ley con la intención de que una autoridad competente pueda identificar y realizar un seguimiento de la operación de los drones.

A su vez todos los drones deberán estar registrados y su diseño debe estar sujeto a una certificación. En diversas categorías además deberán tener un registro los operadores.

- En todas las operaciones de categoría certificada y específica.
- En categoría abierta solo los drones de más de 250 gr y aquellos que se equipen de cámaras u otros sensores.

Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 de la Comisión [23]

Se definen disposiciones detalladas para el correcto uso de aeronaves no tripuladas, donde se establecen las categorías de “abierta”, “específica” y “certificada”.

- En las operaciones clasificadas como abierta se deben de utilizar drones con masa máxima de 25 kg. El piloto a distancia mantiene el dispositivo en una altura segura para garantizar la seguridad de las personas y se prohíbe el vuelo en espacios con concentración de humanos. Durante el vuelo, el vehículo debe estar al alcance de la vista del piloto y respetara la máxima altura de 120 metros desde el punto más cercano de la superficie terrestre. No está apto para transportar mercancías peligrosas ni podrá dejar precipitar ningún material

durante el vuelo. La categoría se divide en 3 subcategorías, las cuales se analizar en la Tabla 7.

Tabla 7. Categoría abierta información detallada de las subcategorías y los requisitos técnicos de cada clase.

LIMITACIÓN SUBCATEGORÍA	REQUISITOS DE AERONAVES	REQUISITOS DE PILOTOS	REQUISITOS TÉCNICOS
A1 Se permite el sobrevuelo de personas ajenas a la operación	Construcción previa a la norma de <250 g y 19m/s	Manual de usuario del fabricante	Fuente de alimentación eléctrica.
	Clase CO (<250 g)	Manual de usuario del fabricante	Número de serie único.
	Clase C1 (<900 g y <80J con e-ID y Geo-awareness)	Manual del usuario del fabricante Curso online con examen teórico	Sistema de identificación a distancia. Sistema de geoconsciencia.
A2 Se permite el vuelo cerca de personas ajenas a la operación Distancia de seguridad (30 – 5 metros)	Clase C2 (<4 kg con low speed, e-ID y Geo-awareness)	Manual de usuario del fabricante Certificado de competencia de piloto remoto	Sistema de aviso de batería baja. Enlace de datos protegido contra el acceso no autorizado a las funciones de mando y control (C2).
A3 Operaciones en áreas donde no se espera poner en peligro a personas ajenas a la operación Manteniéndose a < 150 metros de áreas residenciales, comerciales, industriales o recreacionales	Construcción previa a la norma de <250 g y 19m/s	Lo mismo que la clase C1 en A1	Equipar luces para control de actitud y vuelo nocturno.
	Clase C2 (<4 kg con low speed, e-ID y Geo-awareness)		
	Clase C3 (<25 kg con low speed, e-ID y Geo-awareness)		
	Clase C4 (<25 kg)		

En la categoría "específica", se definen las operaciones que no siguen la normativa "abierta" debido a que presentan un riesgo de nivel intermedio. Los requisitos aplicables varían según la naturaleza de la operación, por lo tanto, es necesario contar con una

declaración operacional que esté en conformidad con el escenario, respaldada por un estudio de seguridad. Además, el piloto debe poseer el certificado denominado LUC (Certificado de Operador de Sistemas de Aeronaves Ligeras no Tripuladas), y estas operaciones solo pueden llevarse a cabo a través de asociaciones de aeromodelismo autorizadas, debido a la obligatoriedad de recibir capacitación específica. Todas estas condiciones para llevar a cabo la operación deben obtener la aprobación de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA). Para las categorías específicas, AESA ha establecido dos escenarios nacionales estándar, los cuales se analizan en Tabla 8.

Tabla 8. Categoría específica información detallada de los escenarios y los requisitos técnicos de cada clase.

ESCENARIOS NACIONALES ESTÁNDAR	REQUISITOS DE AERONAVES	REQUISITOS DE PILOTOS	REQUISITOS TÉCNICOS
<p>STS-ES-01</p> <p>Operaciones sobre una zona terrestre controlada en un entorno poblado con UAS que dispongan de identificación C5.</p>	<p>Construcción previa a la norma de <25 kg y 19m/s Modo de baja velocidad, limitador de velocidad. C5 podrá consistir en UAS C3 con un kit de accesorios.</p>	<p>Manual del usuario del fabricante Certificado de competencia de piloto remoto Contar con método de recuperador de datos y recuperación del enlace mando y control (C2)</p>	<p>Fuente de alimentación eléctrica. Número de serie único. Sistema de identificación a distancia. Sistema de geoconsciencia. Sistema de aviso de batería baja. Luces para control de actitud y vuelo nocturno.</p>
<p>STS-ES-02</p> <p>Operaciones con observadores del espacio aéreo sobre una zona terrestre en entorno poco poblado que dispongan de la identificación de clase C6.</p>	<p>Construcción previa a la norma de <25 kg y una velocidad máxima de vuelo de 50 m/s Información clara sobre la altura de la UAV</p>	<p>Manual de usuario del fabricante Certificado de competencia de piloto remoto. Contar con método de recuperador de datos y recuperación del enlace mando y control (C2)</p>	<p>Enlace de datos protegido contra el acceso no autorizado a las funciones de mando y control (C2). Fuente de alimentación eléctrica. Número de serie único. Sistema de identificación a distancia. Sistema de geoconsciencia.</p>

			Sistema de aviso de batería baja. Luces para control de actitud y vuelo nocturno.
--	--	--	--

- En la categoría “certificada” se engloban las operaciones con un riesgo alto, se establece el requerimiento de la certificación del UAS por EASA, la certificación del operador y la licencia del piloto a distancia. Se clasifican en esta categoría aquellos vuelos que impliquen volar sobre concentraciones de personas, con AUS que son destinados a transporte de mercancía peligrosa. El paquete normativo que regula la categoría certificada está en proceso de desarrollo por parte de la institución europea.

Normativa de drones en España 2021 [24]

Las disposiciones de la Unión Europea tienen validez en el territorio de España. Durante el año 2021, se emitió un reciente Real Decreto que establece y moderniza las reglas vigentes en el país con relación al reglamento europeo. La autorización oficial de piloto estará en uso para las fuerzas de seguridad (FCS); en cambio, para otros pilotos, será necesario obtener al menos un certificado que confirme habilidades y autorice la operación de drones en distintas categorías.

Por lo tanto, para el uso de drones dentro de la categoría abierta es de obligatoriedad superar el correspondiente examen en AESA que podría pertenecer al Nivel 1 o 2. Para la categoría específica, será necesario superar el examen de AESA. Asimismo, con la nueva normativa no hay distinción de vuelo profesional o recreativo, lo que significa que las consideraciones son igual para cualquier persona que pretenda realizar un vuelo con dron.

A continuación, se muestran las limitaciones que se deberán de tener en cuenta para un adecuado vuelo legal:

- El dron tiene que estar al alcance visual del piloto.
- Los vuelos deben de tener una altura máxima de 120 m en vuelo.
- Se prohíbe volar en un mínimo de 8 km de cualquier aeropuerto, aeródromo o espacio aéreo controlado.
- El seguro de responsabilidad civil no es obligatorio, pero si recomendable, debido a que los daños causados serán de responsabilidad del piloto.
- Los drones deberán ser identificados con una placa fijada a la estructura, el cual indicara el nombre del fabricante, modelo, número de series y datos de contacto del conductor.
- Las emisoras también deberán llevar placa identificativa.



El registro en AESA es obligatorio y es válido durante 5 años, este se reconoce en todos los países miembros de AESA. En caso de estar exento del registro se considera un dron de uso lúdico.

Como se señala en la sección previa (Reglamento de Ejecución 2019/947), las categorías recién establecidas para las operaciones se basan en el nivel de riesgo de la operación, el cual se ha adoptado de manera equivalente del RE-2019/947 al contexto del uso de drones en España.

1. Categoría abierta, para vuelos sin necesidad de autorización debido al bajo riesgo que presentan.
2. Categoría específica, para vuelos de riesgo medio, en caso de ser escenario estándar no se necesita declaración, en caso contrario con autorización.
3. Categoría certificada, para operación de riesgo alto con la obligatoriedad de un régimen regulatorio.

Por lo tanto, se necesita autorización de AESA en caso de que la categoría específica no corresponda a un escenario estándar y en todos los vuelos de categoría certificada.

Para concluir, es relevante destacar la presencia de un sitio web desarrollado por el Ministerio de Fomento para los ciudadanos españoles, denominado ENAIRE Drones. Este portal tiene como finalidad informar sobre las áreas donde es permitido volar drones conforme a la nueva regulación. Además, proporciona los conocimientos necesarios para operar un dron de manera segura, sin importar si es por recreación, motivos profesionales o experimentales. Asimismo, se dispone de una aplicación específica llamada ENAIRE, que presenta un cuestionario para determinar el tipo de dron y el propósito del vuelo. Dicho cuestionario debe completarse previo a cada vuelo. De esta manera, se facilita la obtención de información adaptada a cada situación y se refuerzan los límites operativos que reglan la actividad de vuelo. Otro punto de interés en esta aplicación es que con el cuestionario previo crea un mapa intuitivo en base a los datos introducidos por el responsable del vuelo. En él, se cuenta con la opción de planificar una ruta de vuelo, medir las distancias a recorrer e identificar zonas para conocer el estado del espacio aéreo, lo que hace que el vuelo sea más seguro y el piloto este informado del espacio.

viii. Limitaciones y consideraciones de seguridad

El desafío en cuanto a la seguridad se centra en prevenir incidentes que puedan afectar a la población, en la integración adecuada de las aeronaves no tripuladas en el espacio aéreo y en la mitigación del empleo indebido de estos dispositivos en actividades ilícitas. Para ello hoy en día hace falta la garantía de un uso ético de los dispositivos y se deben de tomar en cuenta diversos factores humanos, de regulación y tecnológicos.

Aspectos tecnológicos

En primer lugar, es necesario mejorar los sistemas de detección y control. Las tecnologías en desarrollo deben ser capaces de garantizar vuelos automáticos sin riesgo de colisión con otras aeronaves u objetos en el aire. Los modelos preliminares disponibles en el mercado se diseñan para UAS de mayores dimensiones. En la actualidad, la tecnología georreferenciada se emplea, lo cual involucra la delimitación virtual de áreas restringidas. Se implementa software que utiliza el GPS (Sistema de Posicionamiento Global) o la tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID) para rastrear la ubicación de un dron, y este emite alertas en caso de exceder los límites establecidos.

La seguridad prima aún más cuando se trata de vuelos donde el dron no está al alcance de la vista del piloto, por ello estos dispositivos deben de contar con comunicación de radiofrecuencia que no pueda ser interrumpido. La comunicación más utilizada en la actualidad es vía satélite. Por otro lado, se contempla el uso de redes de comunicación celular que son más avanzadas, como puede ser el 4G. Estos ofrecen mayor exactitud, velocidad y menor latencia (tiempo requerido para establecer una conexión).

Las investigaciones actuales se deben de guiar a garantizar un uso más seguro y eficiente de los UAV. El aprendizaje necesario mencionado se relaciona con la ciberseguridad, así como con la mejora de la capacidad de las baterías y la capacidad de carga útil. Se espera que los cambios tecnológicos más notables en el ámbito de los drones se enfoquen en mejorar su capacidad de procesamiento para permitir vuelos autónomos. Asimismo, se dirigirán hacia el avance de sistemas de control de tráfico aéreo que faciliten una convivencia segura en el espacio aéreo junto con aeronaves tripuladas.

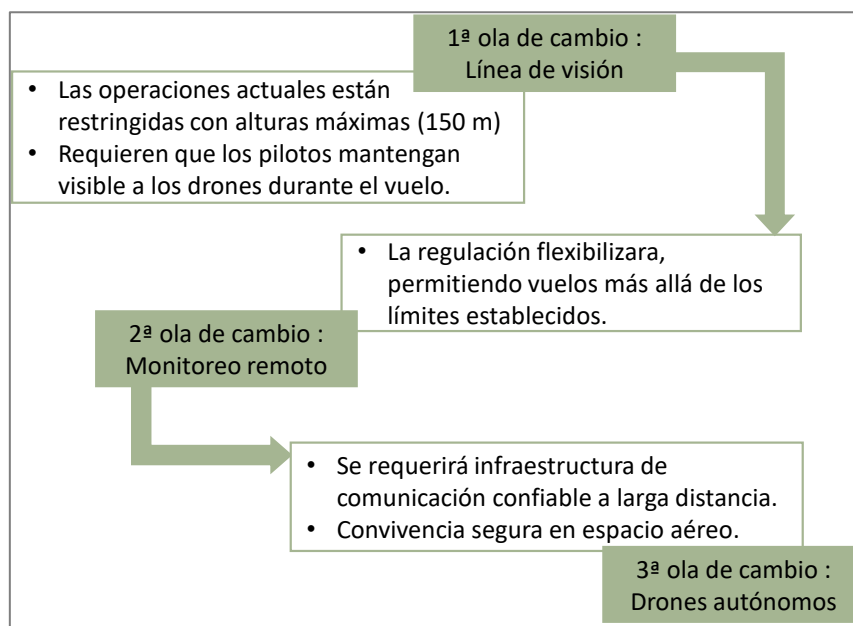


Figura 21. Prospectivas de cambio en el uso de UAV.



Capacidad humana

La seguridad durante el vuelo y la protección de las personas que no están involucradas en él están en cierta medida vinculadas a la habilidad del operador que controla el dron. La adquisición de certificaciones por parte del piloto es un requisito necesario según el modelo de dron que se esté utilizando.

Disponibilidad de seguros

Para amparar a terceros en situaciones de accidente los seguros de responsabilidad civil son obligatorias. Actualmente se carece de seguros especializados que están diseñados en exclusividad para los UAV, lo cual dificulta su adopción generalizada. Asimismo, la información en el análisis de riesgos es insuficiente y esto hace que las coberturas del mercado sean económicamente cantidades muy elevadas. Esta problemática se agrava por la preocupación de las autoridades de que, en caso de un accidente grave, las pólizas existentes no puedan cubrir la totalidad de los daños.

Se calcula que la implementación de una regulación sólida que establezca directrices claras y garantice la aplicación de las normativas legales sería esencial para generar confianza en las empresas de seguros. Esta normativa, al mismo tiempo que reduciría los riesgos asociados al uso de drones, también podría resultar en una notable disminución de los costos de las pólizas, dado que estarían directamente relacionados con el nivel real de riesgo en la operación de estos dispositivos. Por tanto, una regulación adecuada no solo proporcionaría seguridad en el ámbito de los seguros, sino que se vuelve vital para el avance del sector.

Por lo tanto, la seguridad de los vuelos de los UAV requiere avances en tecnología, concientización social y una normativa clara y adaptable a los avances técnicos. Es previsible que, a medida que las tecnologías evolucionen, la sociedad esté más abierta a su implementación. Al mismo tiempo, cuando las operaciones sean lo suficientemente seguras y la sociedad esté familiarizada con y respete las regulaciones vigentes, estas podrían volverse más maleables. Uno de los desafíos radica en que gran parte de las inversiones destinadas a mejorar la tecnología, que conduce a operaciones más seguras, necesitan la certeza brindada por la regulación.

d. Métodos de inspección

Actualmente se cuenta con una gama amplia de métodos aplicables a la inspección de edificios, espacios industriales, terrenos ambientales etc. La recolección de muestras con dimensiones comúnmente utilizadas en los edificios para la caracterización de componentes no siempre es lo más indicado. En muchos casos, ciertos aspectos de los edificios requieren de un examen exhaustivo para un correcto análisis energético.

El uso de nuevas tecnologías de inspección aminora la damnificación de la construcción a la vez que ofrece rapidez y exactitud [25]. Los métodos de inspección acoplados a los drones permiten obtener datos en tiempo real y la aplicabilidad de estos aumenta en consonancia a los sensores sumados al dispositivo. A su misma vez, el UAV masifica las ventajas de los sensores, haciéndolos más competitivos, eficientes, rápidos y válidos para zonas no accesibles. En consideración a lo mencionado, se debe seguir proporcionando un marco de diferentes y nuevas técnicas no destructivas aplicables en el desarrollo del diagnóstico de los edificios. Estos retos se deben afrontar con investigación científica y tecnología de vanguardia y la innovación en este campo.

En la actualidad, se hace uso de diferentes métodos, ya sea individualmente o en conjunto con otros, para examinar el objeto de estudio. En las siguientes secciones se resumen las cámaras, los sensores y métodos de inspección principales que pueden ser utilizados con los drones.

- **Escáner Laser Terrestre (TLS)**

Es una técnica que captura con precisión una densa nube de puntos de la geometría de estudio. Se realizan mediante varias posiciones de escaneo para realizar levantamientos de monumentos. Funciona con la emisión de laser a diferentes puntos de la geometría, se miden las distancias y ángulos desde los puntos de la estructura al dispositivo láser para posteriormente extraer coordenadas 3D con referencia a la estación. La nube de puntos es una especie de cuadrícula que con un procesamiento de datos genera un modelo geométrico en 3D [26].

Basándose en las diversas técnicas de TLS por lo general se utiliza para detectar las distorsiones angulares de los elementos estructurales a partir de la medición de sus deformaciones verticales.

- **Procesado Digital de Imágenes (DIP)**

El Procesado Digital de Imágenes (DIP) es marco de procesamiento de información y aplicación que se ocupa de registrar tópicos con parámetros que sirven para extraer información relevante, realizar análisis, conocer que diferentes técnicas aplicar para obtener resultados deseados, monitorización del estado de conservación, entregan mapas particulares, crear mapas temáticos para labores de remodelación, etc.

El Procesado Digital de Imágenes desempeña un papel esencial en la evaluación y conservación de edificios, proporcionando información valiosa, análisis detallados y herramientas de visualización para el estudio, documentación y preservación de espacios. La mayoría de los siguientes métodos de ensayo no destructivos hacen uso de DIP cuando se trata de procesar los datos obtenidos mediante ellos.

Los datos recogidos se introducirán en un sistema informático que calculará índices, los georreferenciará (correlación con la posición geográfica de los puntos desde los que se recogieron los datos) y generará mapas de ayuda y riesgo, facilitando su interpretación. El seguimiento de los recursos y del estado de los edificios se realiza con sensores sin contacto, vinculando la adquisición automática de datos con las coordenadas GPS (georreferenciación de los datos) y procesándolos en el SIG (Sistema de Información Geográfica) para crear archivos.

- **Análisis cartográfico del subsuelo mediante Radar de Penetración en el Suelo (GPR)**

El objetivo de esta tecnología es investigar en profundidad las estructuras, hace uso de ondas electromagnéticas. Su aplicación es muy habitual en investigaciones de sitios de patrimonio cultural para evaluación estructural. Como en los edificios históricos la perforación no es una opción de análisis, este método permite la evaluación de la morfología de paredes y techos. A su vez, es posibilita la identificación de humedades distinguiendo el nivel de ascenso capilar y áreas secas.

De igual manera, el método de GPR hace posible la deducción del posicionamiento y geometría de grietas que se encuentren en las estructuras. La identificación de estas irregularidades se debe a la forma de la onda que genera la tecnología GPR, dependiendo de la intensidad con un análisis de los resultados se puede conocer el tiempo de propagación de los vacíos. Si se proporciona suficiente resolución se distinguen los límites irregulares de la heterogeneidad de materiales de los edificios históricos. El transmisor y receptor se ubican en superficies que se pretenden estudiar, el contacto no es necesario, por lo que es el más utilizado en casos de delicadeza [26].

- **Fotogrametría (P)**

La fotogrametría establece dimensiones y ubicación de diferentes objetos de estudio que se encuentran en un área específica. Para la resolución de un modelo preciso es necesario generar una intersección de diversas fotografías. A su vez, se puede obtener resultados con fotografías y un modelo digital del terreno. La fotogrametría permite generar resultados sin ningún tipo de contacto físico con el elemento estructural.

Esta técnica no destructiva es aplicable en diversas áreas como la cartografía, la arquitectura, la arqueología, la topografía, la producción de cintas animadas, como pueden ser las películas o los videojuegos. De igual forma, se hace uso de la

fotogrametría para realizar modelos 3D de objetos y entornos para realidad virtual y aumentada [27].

Actualmente la inteligencia computacional no está totalmente automatizada. Sin embargo, la fotogrametría está empezando a utilizarse junto a la visión por computadora mediante la incorporación de algoritmos de estructura de movimiento (SfM) para proporcionar modelos 3D.

Cada vez nos encontramos con más tecnología de acceso libre. Las herramientas de software disponibles para la reconstrucción de modelos 3D a partir de fotografías permiten que de manera rápida y realista se pueda recrear virtualmente la realidad de diferentes edificios, espacios y artefactos. Las imágenes necesarias para estas aplicaciones automatizadas se pueden obtener personalmente mediante diferentes dispositivos como puede ser un dron, pero también se dispone de una gran cantidad de imágenes de alta calidad en línea [1].

- **Estereofotogrametría (SP)**

La estereofotogrametría es una técnica similar a la fotogrametría. La principal diferencia está en su precisión. Al igual que la anterior técnica utiliza imágenes bidimensionales, pero la información tridimensional se deriva de imágenes estéreo, lo que permite obtener mediciones tridimensionales con más detalle. El rostro humano fue el primer ejemplo de una geometría compleja producida en 3D con el uso de la estereofotogrametría [28].

Esta tecnología se ha investigado con diferentes metodologías y ha podido rastrear puntos característicos y mapas tridimensionales en tiempo real [29, 30]. Estos enfoques resultan muy innovadores en términos de tiempo y capacidad de reproducción. Permiten la adquisición de entornos en 3D con mucha precisión en un segundo, lo que muestra un increíble potencial para ser aplicado en inspecciones aéreas que exijan rapidez. Se combinan con dispositivos como los vehículos aéreos no tripulados para poder obtener los datos de hasta los puntos más altos de edificios.

- **Termografía Infrarroja (IRT)**

Las cámaras termográficas son muy utilizadas como método no destructivo, son unos dispositivos que producen imágenes de la distribución térmica de superficies. Los datos que utiliza un proceso termográfico son la temperatura/humedad relativa atmosférica, la temperatura de reflexión y el factor de la emisividad de espacio analizado [31]. Esto ocurre debido a que el flujo de calor radiante está influido por los materiales y el entorno que rodea al componente estructural.

Las cámaras de termografía infrarroja conocidas por las siglas IRT, enfocan por la óptica en el sensor la radiación emitida del objeto de estudio, la respuesta de esta señal es una imagen digital con diferentes colores. Es decir, la cámara identifica energía electromagnética irradiada y la convierte en una señal electrónica. Cada uno de estos

tonos de la imagen digital obtenida representa la distribución de temperatura del objeto [32].

En la etapa de adquisición de datos, hay dos tipos de enfoque posibles. Puede ser IRT activa, cuando se emplea sobre la estructura de estudio una estimulación externa artificial, la cual genera un flujo de calor interno. Por otro lado, puede ser pasiva que simplemente se diferencia por la ausencia de esta fuente externa, se basa en la radiación emitida por la estructura [31].

La diferencia de temperaturas de las imágenes obtenidas ayuda a identificar diferentes anomalías térmicas. Estos aparecen como reflejo de grietas, humedades, fugas de calor o cualquier problemática [31]. Además, se puede llegar a cuantificar la gravedad del problema con un análisis más detallado de las imágenes, para saber cuándo reaccionar y que cambios ayudaran en mayor medida a mejorar la eficiencia energética. La cámara termográfica es sencilla y a la vez muy eficaz [33].

Si bien es posible emplear estos sensores y cámaras en sistemas aéreos no tripulados (UAV), es importante señalar que su implementación en auditorías se ha visto limitada debido a regulaciones restrictivas. Uno de los casos más prominentes recae en la combinación de la fotogrametría y la termografía infrarroja (IRT) con los UAV, que, debido a su utilidad, se convierte como una de las opciones más comunes. Por ende, el análisis de estas tecnologías se abordará en los puntos subsiguientes.

e. Tecnología IRT y su aplicación en la gestión energética

i. Principios y funcionamiento de la tecnología IRT

La revolución tecnológica que se ha logrado en las últimas décadas trajo consigo nuevas tecnologías que han mejorado y acelerado las técnicas de adquisición de datos espaciales para generar modelos precisos de información constructiva. Para una evaluación precisa que implique la cuantificación de fachadas o la localización de defectos térmicos, es necesario contar con información sobre la temperatura superficial.

La termografía implica capturar una imagen utilizando una tecnología de medición que permite visualizar la radiación de calor en la superficie de los objetos mediante el uso de una cámara termográfica. Cada objeto que tenga una temperatura por encima del cero absoluto emite radiación infrarroja, que es invisible para el ojo humano. La cámara termográfica mide la radiación de onda larga en el campo de visión y usa los resultados para calcular la temperatura del objeto medio.

La medición termográfica es una interacción entre tres actores: el operador, el sistema observado y el entorno, donde se producen intercambios térmicos a través de los diferentes modos de transferencia de calor (radiación, convección y conducción) y la generación de fuentes de calor de diversas naturalezas. Para realizar un diagnóstico termográfico de calidad, es necesario contar con información sobre las características de la cámara, la composición del sistema observado y el entorno, así como conocimientos básicos sobre transferencia de calor.

La termografía puede ser activa o pasiva. En la termografía pasiva, la detección de perfiles de temperatura anormales señala posibles problemas, y un elemento fundamental es la diferencia de temperatura en relación con un punto de referencia, comúnmente conocido como valor delta (ΔT). El valor de este delta es clave para identificar anomalías y detectar errores en la construcción [34]. En otras palabras, el objeto bajo estudio genera un modelo de temperatura característico, aunque con una leve variación en comparación con su temperatura de funcionamiento normal, lo cual indica un comportamiento atípico (defecto/fallo).

Se denomina termografía activa cuando el operador realiza una estimulación en el sistema observado para inducir un flujo de calor interno. Se obtienen parámetros mediante un análisis comparativo de los estados antes y después de la estimulación. Las técnicas de estimulación son diversas, pero las más comunes utilizan fotones. Un defecto interno afecta al flujo calorífico produciendo un contraste término en la superficie que es detectable con la cámara termográfica.

El enfoque de adquisición de datos en IRT predominante depende del objetivo que se tenga en cada ocasión. El IRT pasivo es más utilizado en el análisis de humedad, hotspots,

puentes térmicos, entre otros. Por otro lado, el IRT activo es más común en análisis de fisuración, para calcular la difusividad térmica, conductividad, etc [35].

Los datos obtenidos generan una representación visual coloreada (imagen térmica), que revela la disposición de las temperaturas en la superficie del objeto. Cada punto de temperatura en la superficie del objeto se representa mediante un píxel en la imagen térmica resultante. El procesamiento de esta imagen virtual implica tener en cuenta tanto la emisividad (ϵ) característica de la superficie del objeto como la temperatura reflejada. Estos dos factores son ajustables de manera manual utilizando la cámara termográfica.



Figura 22. Funcionamiento termografía

Las inspecciones termográficas emplean imágenes térmicas para representar el mapa de temperatura de un objeto. En el ámbito de auditorías, se utiliza la termografía tanto de manera cualitativa como cuantitativa.

La aproximación cualitativa (IRT) permite identificar los puntos más calientes y fríos del objeto en comparación con su entorno, lo que ayuda a detectar anomalías térmicas y evaluar su ubicación y extensión. En cuanto a la termografía cuantitativa (QIRT), es una técnica que combina el uso de cámaras térmicas y el procesamiento de imágenes para ofrecer información numérica más precisa sobre las propiedades térmicas de un objeto, así como una correlación espacial-temporal para una evaluación más profunda. Las interpretaciones están basadas sobre modelos realistas [36, 37]

La técnica IRT comienza con la invención de la primera cámara en los 90. A pesar de su larga historia hoy se continúan proponiendo mejoras en los resultados de esta herramienta y ampliando sus campos de aplicaciones.

La investigación actual en el campo de la termografía con el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) se centra en la evaluación de la precisión y estabilidad de la monitorización mediante infrarrojo térmico realizada por estos dispositivos. Asimismo, se realizan análisis para medir la radiación térmica en espacios urbanos, específicamente a través del parámetro conocido como temperatura media de radiación térmica (TMRT), el cual a menudo se combina con simulación computacional. Además, se ha observado

una proliferación de publicaciones relacionadas con la aplicación de la termografía infrarroja en el ámbito del patrimonio cultural, especialmente en lo que respecta al análisis de grietas [38, 39], defectos subsuperficiales [40] y la localización de estructuras enterradas dentro de sitios patrimoniales [41, 42].

En investigaciones más recientes, se ha introducido la utilización del aprendizaje profundo como un enfoque para lograr una detección rápida y una identificación automática. Paralelamente, se ha desarrollado una plataforma con capacidad para simular escapes en tuberías y pendientes bajo condiciones del mundo real. Sin embargo, manteniendo la línea de investigación previamente mencionada, el énfasis principal recae en la búsqueda de un método altamente automatizado y confiable para la inspección y cuantificación del rendimiento térmico. El objetivo último es establecer un protocolo sólido para llevar a cabo una evaluación térmica cuantitativa utilizando UAV e infrarrojo térmico (IRT).

ii. Vuelo termográfico

Al considerar el funcionamiento de un vuelo de dron equipado con una cámara termográfica, se desglosa diferentes pasos y características claves que permiten conocer el proceso para obtener y analizar los datos térmicos contextualizados. Se debe entender desde la planificación inicial del vuelo hasta la interpretación de los resultados. Cada etapa y cualidad de la cámara juega un papel en la eficacia y confiabilidad del proceso y el conjunto del instrumento.

El primer paso es la preparación y planificación de la ruta del vuelo. La ruta del dron se debe establecer antes de realizar el vuelo, para ello es necesario conocer los puntos de interés, la altitud de vuelo, la velocidad y los parámetros relacionados con el espacio como pueden ser las condiciones climáticas y la regulación del área. Actualmente la mayoría de los drones tienen programas para automatizar los vuelos, los cuales se indican en el apartado Programas para la planificación de vuelo. También en el apartado Normativa UAV se explica la existencia de una aplicación conocida como ENAIRE, que sirve para conocer la normativa del UAV que se utilizara. Debido a esto, se simplifica el procedimiento y solo es necesario considerar un número reducido de cálculos y datos que deben ser ingresados para obtener un plan de vuelo preciso y adquirir la información y las imágenes requeridas.

El siguiente paso involucraría la inspección del dron y el equipo. Hay que asegurar correctamente la cámara termográfica al UAV según las instrucciones del fabricante. A su vez, se deberá calibrar la cámara termográfica para garantizar la precisión de las mediciones de temperatura. Esto incluye la adaptación de variables como la emisividad y la temperatura reflejada para corregir posibles inexactitudes.

Todos los objetos emiten radiación infrarroja, lo que implica la emanación de calor, y a medida que aumenta la temperatura del cuerpo esta será más intensa. La longitud de onda de esta forma de energía oscila entre limitadas micras hasta miles de micras. Estas

ondas son más largas y hace que se sitúen fuera del rango perceptible por ojo humano (abarca de 450 a 750 nanómetros). Las cámaras térmicas tienen la capacidad de detectar esta radiación. Se ha mencionado previamente que estas se deben de calibrar, las cámaras térmicas utilizadas en drones suelen ser ajustadas en el intervalo de 8 a 14 micras para operar en el espectro infrarrojo térmico. Estos dispositivos tienen la capacidad de detectar variaciones desde décimas de grado hasta un grado Celsius, lo que subraya la importancia de la precisión.

El siguiente paso es el vuelo del dron, se debe despegar sobre una superficie segura y plana. El vuelo debe ser controlado en todo momento y se puede monitorear la transmisión de video desde la cámara termográfica. La captura de imágenes se activa según las necesidades y en los puntos de interés para el vuelo para obtener imágenes más detalladas. Los sensores tienen la capacidad de detectar diferencias de apenas unas décimas de grado Celsius, aunque el procesamiento de imágenes es más desafiante que el de las imágenes del espectro visible. Mientras que las cámaras RGB pueden lograr resoluciones de más de 20 megapíxeles, en el caso de las cámaras térmicas es común que no superen un megapíxel. Las resoluciones habituales tienden a ser alrededor de 640x512 píxeles. Si se toma en cuenta la presencia de superposición entre imágenes es necesaria para crear ortofotografía, las exigencias de captura serán más específicas en la termografía. Se requerirán altitudes de vuelo más bajas para alcanzar la misma resolución espacial (GSD) y para mantener el mismo nivel de superposición, será necesario tomar capturas mucho más frecuentes.

Por último, el aterrizaje, el cual deberá ser en una ubicación segura y suave. Lo próximo es descargar los datos y utilizar un software adecuada para el análisis de imágenes termográficas. La búsqueda de patrones, anomalías o áreas problemáticas recae en mano de profesionales. Actualmente, se desarrollan diversos métodos de detección remota y nuevas aplicaciones que facilitan el análisis energético del objeto estudiado. Estos se estudian en el apartado

Tendencias de líneas de investigación.

iii. Aplicaciones de la tecnología IRT

Debido a la capacidad de capturar imágenes térmicas desde el aire los sectores de uso son muy diversos. Los más destacados son la construcción y rehabilitación, la inspección industrial, salvamento, inspección de paneles solares y la agricultura. A continuación, se busca analizar las principales condiciones que pueden ser identificadas mediante la aplicación de la termografía en los ámbitos que son relevantes para este proyecto.

En el ámbito de la construcción y la rehabilitación, en caso de que haya defectos de construcción, es posible emplear la termografía infrarroja para su detección. Esta técnica permite identificar irregularidades, localizarlas y llevar a cabo diversas evaluaciones relacionadas con el calor y la insuficiencia energética. Debido al elevado valor económico de la climatización de los edificios existe la necesidad de reducir las pérdidas de calor. La termografía infrarroja permite identificar lo siguiente:

- Localización de filtraciones de aire
- Presencia de humedad en áreas interiores y/o en las fachadas
- El estado del aislamiento
- Evaluación de puentes térmicos
- Fugas de agua y/o aire en conductos
- Puntos donde se produce transferencia térmica no deseada
- Desprendimientos de recubrimientos

En inspección industrial, es posible examinar con las cámaras termográficas una variedad de dispositivos y maquinarias. En relación con el proceso global de la producción, resulta viable evaluar la totalidad de la instalación fabril, esto es debido a que los cambios en propiedades físicas causan variaciones perceptibles en los patrones de energía infrarroja. Por lo tanto, se pueden identificar y analizar diversos aspectos:

- Fenómenos como corrosiones
- Estudio del estado de válvulas
- Grietas y fugas de vapor
- Obstrucciones y aislamiento de tuberías
- Verificación del nivel de tanques (líquidos y graneles)
- Detección de tuberías subterráneas
- Perdidas térmicas y de vacío
- Estudio de hornos

Tanto en el ámbito de la construcción como en la inspección industrial, resulta beneficioso emplear cámaras termográficas incorporadas en vehículos aéreos no tripulados (UAV) debido a la extensión de los espacios involucrados, lo que requeriría una cantidad considerable de tiempo si se realizara mediante personal humano. Las zonas más elevadas de los edificios y la considerable escala de las instalaciones fabriles

imponen la necesidad de un dispositivo que permita agilizar los procesos. No obstante, la evaluación de paneles solares ha emergido como un campo particularmente demandante de esta tecnología. El mantenimiento adecuado de estas instalaciones adquiere gran importancia debido a la reducción en la generación de energía que podría resultar de posibles defectos. Por consiguiente, es precisamente en el ámbito de la inspección de paneles solares donde esta tecnología encuentra su principal aplicación y demanda.

Los paneles solares están compuestos por un considerable conjunto de celdas elaboradas a partir de diversos materiales, cada uno con la capacidad de producir electricidad a partir de la radiación solar. Factores como un ensamblaje incorrecto, la exposición a las inclemencias del clima, la vida útil de los materiales utilizados y problemas en el cableado que las acompañan, pueden colaborar en el deterioro de estas celdas. Este mal desempeño resulta en un funcionamiento deficiente del panel en su conjunto, lo que conlleva una disminución significativa en la generación de electricidad. Es aquí donde la utilidad de los UAV equipados con cámaras termográficas se hace evidente en este tipo de inspecciones.

iv. Ventajas y limitaciones

A continuación, se estudian las ventajas y los inconvenientes de la combinación de los drones con la cámara termográfica. Muchas de ellas son comunes a las ventajas que ofrece los drones, los cuales se han mencionado con anterioridad.

Se procede a un realizar análisis de las ventajas y los posibles inconvenientes que emergen de la combinación de los drones con la cámara termográfica. Es pertinente destacar que muchas de estas se alinean con las ventajas previamente mencionadas asociadas a los drones, pero se reforzaran sus atributos y funcionalidades.

Tabla 9. Ventajas y limitaciones del uso de los UAV con cámara termográfica.

VENTAJAS	LIMITACIONES
<ul style="list-style-type: none"> • Acceso a áreas de difícil alcance, al no necesitar de contacto físico y disponer de dron se puede alcanzar cualquier tipo de espacios. • Vigilancia y monitoreo remoto en tiempo real. • No analiza la luz visible sino la radiación infrarroja, lo que permite el uso en condiciones de poca luz. • Identificación de anomalías térmicas. • Dispone de imagen normal (RGB) o una imagen infrarroja. Permitiendo la valoración de datos inmediatamente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Condiciones climatológicas en la captación de imágenes. • Problemas de privacidad y seguridad. • Sensibilidad a la luz, lo que puede resultar obtener imágenes de baja calidad o con ruido. • Rango dinámico limitado, se pueden presentar dificultades para capturar detalles en escenas donde hay áreas oscuras y brillantes.

v. Revisión de literatura de UAV con termografía

Los primeros experimentos realizados con UAV fueron de nuestro termofísico con la intención de explorar extensos territorios no accesibles. Mavromatidis et al. [43] equipan el vehículo aéreo con una cámara de infrarrojos con pulsos activos para obtener datos térmicos que no son adquiribles con pulsación pasiva desde la superficie. Al cabo de un año, Krawczyk et al. [44] desarrollan un análisis para evaluar el consumo de energía de edificios utilizando la termografía infrarroja en UAV. En lo que respecta a los resultados, se identifican insuficiencias en la resolución espacial. Se identifica como ámbito de desarrollo el comportamiento asintótico y la escasa adaptabilidad de los vehículos aéreos a la hora de operar en diversas condiciones meteorológicas y altas turbulencias. La eficacia en cuanto a la detección de problemas como pérdidas térmicas, fugas de aislamiento etc. es óptima. Sin embargo, es necesario la mejora técnica de los resultados para una correcta mejora de rendimiento energético en la edificación.

No obstante, se enfocó al desarrollo de nuevos puertos de conectividad y opciones adicionales de alimentación para brindar soporte a los sensores y mejorar el software de control. Los cambios específicos en características como la resolución, que fue el enfoque inicial, se evolucionó a una tendencia hacia la creación de productos que generen demanda en el mercado [45]. Esto implica hacer referencia a las capacidades tecnológicas existentes y llevar a cabo una mayor parametrización de los procesos, lo que permite una visión más completa de los mismos a través de la validación de experiencias replicadas. Además, se generó la necesidad de crear metodologías estandarizadas para facilitar el trabajo presentado.

A raíz de un estudio, OMAR, T et al. [46] adoptan nuevas herramientas de imágenes y enfoques basados en IA para datos térmicos infrarrojos, con el objetivo de lograr una automatización completa del proceso de análisis y una toma de decisiones mejorada. Su estudio explora la posibilidad de utilizar mediciones de temperatura infrarroja tomadas desde un vehículo aéreo no tripulado (UAV) para detectar la segregación del subsuelo en cubiertas de puentes de hormigón.

Siguiendo la línea de la estandarización, Waqar Akram et al. [47] investiga la termografía y el posterior procesamiento de imágenes infrarrojas para automatizar la detección de defectos en paneles solares destinadas a la vivienda. Realizan experimentos en módulos fotovoltaicos defectuosos y en funcionamiento normal. Presentan un esquema de procesamiento de imágenes aplicable en diferentes casos que ofrece una mejor visualización de los defectos.

Por otro lado, K. Hossain et al. [48] propone utilizar imágenes térmicas tomadas por drones para detectar fugas de energía en tuberías subterráneas de sistemas de calefacción urbana, como parte de su enfoque en nuevas tecnologías y automatización. Para identificar posibles fugas, se utiliza un algoritmo de extracción de regiones en tierra. Luego, se aplican una red neuronal convolucional (CNN) y ocho clasificadores de

aprendizaje automático convencionales a estas regiones para determinar si son fugas o no.

Liu et al. [49] lleva a cabo un estudio utilizando el aprendizaje profundo y la termografía infrarroja para detectar y clasificar la gravedad de las grietas en pavimento asfáltico, con el objetivo de investigar nuevos patrones de segregación y automatizar este proceso. Utilizan un sistema de vehículo aéreo no tripulado equipado con un método de medición térmica infrarroja (IRT) para recopilar datos. Mediante el uso de modelos de red neuronal convolucional (CNN), logran un rendimiento satisfactorio en la detección de grietas, pero se observan errores en la clasificación. Se concluye que es necesario investigar más tipos de grietas para evaluar mejor el desempeño del aprendizaje profundo.

Estos resultados demuestran que el aprendizaje profundo, especialmente las redes neuronales convolucionales (CNN), se están convirtiendo en una herramienta poderosa para la automatización de este proceso. Con la necesidad de regularizar y la llegada de mejores tecnologías, se busca mejorar las prestaciones, incluyendo la resistencia, la inteligencia computacional y la flexibilidad de los sistemas UAV, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética de manera más rápida, limpia y económica.

vi. Estudio de mercado

Programas de procesamiento de la termografía

Para aprovechar al máximo la tecnología existen varios programas especializados en el procesamiento de imágenes termográficas. La introducción de estos ha revolucionado la forma en que se interpretan y utilizan la información térmica, al ofrecer herramientas avanzadas de visualización, se ha mejorado la detección de anomalías, la toma de decisiones y la resolución de problemas en entornos donde el calor es un factor crítico. Se analizan algunos de los programas líderes en el mercado. A pesar de que la mayoría sean privadas, se proporciona ejemplos de solución de código abierto. Es importante tener en cuenta que los softwares se seleccionan en base a las necesidades específicas que se tengan, algunos están más orientados a la industria, mientras otros se centran en la investigación o la medicina.

- **Flir Thermal Studio:** Permite la visualización, análisis y generación de informes detallados sobre las imágenes capturadas. Con FLIR Thermal Studio, los usuarios pueden identificar patrones térmicos, detectar anomalías y obtener una comprensión más profunda de la distribución del calor en diferentes objetos y entornos. Ofrece una extensión conocida como Flir Tools. El cual proporciona herramientas de medición y marcado para identificar áreas problemáticas en las imágenes, facilitando la interpretación de los datos termográficos [50].
- **Software de análisis IRBIS[®] 3:** Permite el procesamiento y análisis de imágenes térmicas en diversas aplicaciones industriales, de investigación y en el campo de la medicina. Ofrece herramientas avanzadas para el análisis de datos, la

calibración y el etiquetado de puntos calientes o fríos en las imágenes. Es una opción versátil para diversas necesidades termográficas y se adapta a una amplia gama de industrias [51].

- **MATLAB con Toolbox de Procesamiento de Imágenes:** MATLAB es un entorno de programación que incluye funciones para el procesamiento de imágenes. Esta extensión proporciona una amplia gama de funciones para trabajar con imágenes digitales. Se pueden realizar operaciones como el filtrado, mejora de contraste, corrección de distorsiones, fusión de imágenes, transformaciones geométricas... [52]
- **OpenCV:** Solución de código abierto que ofrece diversas funciones para el procesamiento y análisis de imágenes termográficas. Incluye herramientas para el procesamiento de imágenes térmicas y la detección de objetos basada en características térmicas. Es particularmente útil en aplicaciones médicas y de investigación.
- **Thermacam Researcher:** Permite análisis detallados y cuantitativos de imágenes termográficas, incluyendo mediciones precisas y análisis de tendencias a largo tiempo. Se pueden generar informes personalizados, realizar análisis de frecuencia y espectrales, facilita la identificación de áreas de interés con técnicas de segmentación... Pertenece al grupo FLIR.

Cámaras termográficas

Previo al análisis de tipos de cámaras y las características más representativas de estas, se debe mencionar que la aplicabilidad en drones está limitado a ciertas tipologías. Los drones de ala rotatoria son las más adecuadas. Teniendo en cuenta los mencionados en el apartado Tipos de drones se analizarán los ejemplos que son compatibles con los drones mencionados, estas cámaras se pueden utilizar en otros tipos también, pero se opta ofrecer ejemplo que estén alineados con el documento por seguir respetar la cohesión [53].

A continuación, para poder entender el funcionamiento de estos dispositivos se analizarán las características principales de las cámaras termográficas:

- **Núcleo radiométrico:** Las cámaras que cuenten con radiometría son capaces de medir la temperatura en puntos individuales, es decir, se conoce información acerca del grado térmico en cada píxel. Este núcleo resulta interesante e imprescindible si se trata de inspecciones industriales que necesiten precisión, ya que son necesarios los análisis cuantitativos precisos. Sin embargo, en caso de salvamento o vigilancia solo será importante contar con la imagen térmica, por lo tanto, el núcleo radiométrico pierde interés.
- **Lente:** La lente, junto con la altitud, es el componente que marca la cantidad de terreno, denominado como FOV (de las siglas Field of View). Si se debe de analizar terrenos de gran magnitud se deberán de tener lentes que abarquen mucho para evitar menos pasadas. A la hora de realizar inspecciones


industriales, al ser espacios cerrados puede interesas un FOV más pequeño para centrarse en los componentes.

- Resolución: Está en consonancia con el punto anterior debido a que la elección de lente y altura de vuelo definirá en parte la resolución. Si la resolución no es suficiente, se deberá de reducir la altura de vuelo. Puede ser resolución térmica o espacial. La resolución térmica indica la menor diferencia de temperatura que la cámara puede detectar. Cuanto mayor sea, la detección será más precisa debido a que las variaciones de temperatura serán más pequeñas. Por otro lado, la resolución espacial, que se refiere a la capacidad del acamara para distinguir pequeños detalles en la imagen. Las imágenes más nítidas se consiguen con mayor resolución espacial.
- Sensibilidad y rango de temperatura: Dependiendo del rango de temperatura establecido en la cámara, se define la sensibilidad de esta. La capacidad de detección de pequeñas diferencias de temperatura establece la sensibilidad de esta. Cuando están diseñadas para rangos específicos suele ser más sensible.

Algunas cámaras pueden tener características especiales como la capacidad de fusionar imágenes térmicas con imágenes visuales, medir la humedad relativa, o incluir funciones de análisis y generación de informes.

La elección de una cámara termográfica dependerá de las aplicaciones específicas, los requisitos de medición y las características deseadas para tus necesidades particulares. A continuación, se indican algunas cámaras con más relevancia en el mercado teniendo en cuenta la aplicabilidad de esta en cuanto nos referimos a los drones. Tal y como se menciona se indicarán las cámaras termográficas que son aplicables a los drones de ala rotatoria que se han mencionado [54].

Tabla 10. Características de las cámaras termográficas del mercado.

CÁMARA	CARACTERÍSTICAS	DRON APLICABLE	IMAGEN
Zenmuse XT S	Foco del objetivo: 19 mm Zoom digital: 1x, 2x, 4x Resolución de imagen: 640x512 (Vídeo a 25 Hz) Formato de imagen: JPEG Distancia entre pixeles: 17 m Sensibilidad (NETD) < 40mK a f/0.1 Rango de escena: 40 a 150°C de alta y 100 a 550°C a baja ganancia	Matrice 300 RTK	 <i>Figura 23. Cámara termográfica Zenmuse XT S</i>

<p>Zenmuse H20 series</p>	<p>Foco del objetivo: 13.5 mm Zoom digital: 1x, 2x, 4x, 8x Resolución de imagen: 640x512 (Vídeo a 30 Hz) Formato de imagen: R-JPEG (16 bits) Distancia entre pixeles: 12 m Sensibilidad (NETD) < 50mK a f/0.1 Banda espectral 8-14 m</p>	<p>DJI Matrice 300 RTK</p>	 <p><i>Figura 24. Cámara termográfica Zenmuse H20 series</i></p>
<p>Zenmuse LIDAR +RGB</p>	<p>Su sensor LIDAR captura hasta 2 km² de nubes de punto. Reconstrucción 3D con precisión centimétrica. Foco del objetivo: 24 mm Retornos máximos admitidos 3 Campo de visión: Patrón de escaneo repetitivo (70,4ºx77, 2º) Patrón de escaneo no repetitivo (70,4ºx4º)</p>	<p>Matrice 300 RTK</p>	 <p><i>Figura 25. Cámara termográfica Zenmuse LIDAR + RGB</i></p>
<p>FLIR VUE PRO-640</p>	<p>Foco del objetivo: 19 mm Zoom digital: 1x, 5x, 10x Resolución de imagen: 640x512 (Vídeo a 30 Hz) Formato de imagen: JPEG Sensibilidad (NETD) < 60mK a f/0.1 Rango de escena: -20°C a 50°C Peso: 3,25 – 4 oz (según configuración)</p>	<p>DJI Phantom</p>	<p><i>Figura 26. Cámara termográfica FLIR VUE PRO-640</i></p> 

f. Fotogrametría y su aplicación en la gestión energética

i. Principios y funcionamiento de la fotogrametría [55]

Cómo se ha mencionado anteriormente, la fotogrametría es una técnica no destructiva que utiliza imágenes de ubicaciones seleccionadas para obtener dimensiones y posiciones de objetos en el espacio. Se realiza a partir de intersecciones de fotografías y del modelo digital del terreno.

Se reconocen tres formas de realizar la fotogrametría. Por un parte la fotogrametría analógica, el cual utiliza modelos matemáticos. La fotogrametría analítica, su objetivo es emplear los modelos matemáticos a elementos físicos. Por último, la fotogrametría digital, la más actual y utilizada, se hace uso de programas informáticos para sustituir la imagen analógica por la digital. En cuanto a la toma de fotografías, la obtención de datos puede ser o bien aérea (con cámara en el aire) o terrestre (con cámara portátil sobre un trípode) [56].

Primeramente, se realiza una introducción a los elementos fundamentales de la fotogrametría para posteriormente conocer el proceso. Se debe tener en cuenta la distancia focal, esta equivale al espacio entre el centro óptico y el plano focal que es donde se captura la imagen, a su vez en combinación con la escala fotográfica nos dará a conocer la altura desde donde se realiza la obtención de la imagen. Esto es crucial para poder respetar las medidas reales en el levantamiento digital. Basándose en la Figura 27 y la Figura 28 entre escala fotográfica y altura de vuelo se da con la siguiente ecuación [57]:

$$H = c \cdot m_b$$

$$H_0 = H_c + H \rightarrow M_b = \frac{1}{m_b} = \frac{c}{H - H_c}$$

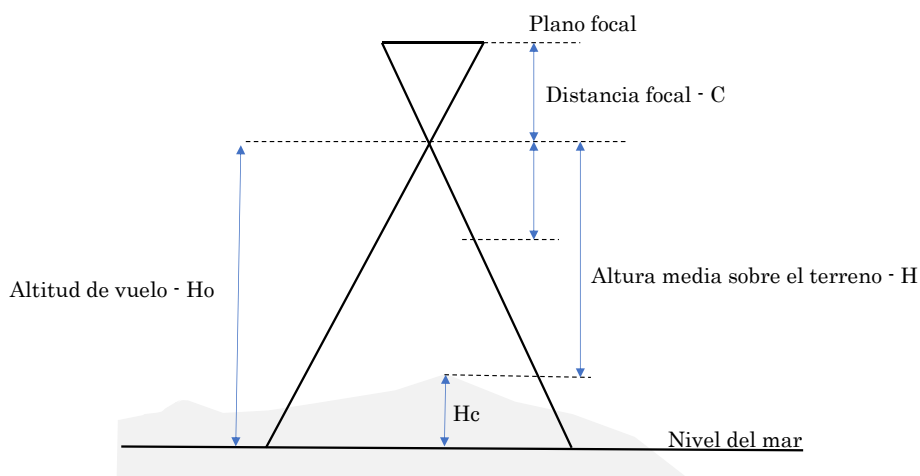


Figura 27. Relación escala fotográfica y distancia focal de la cámara

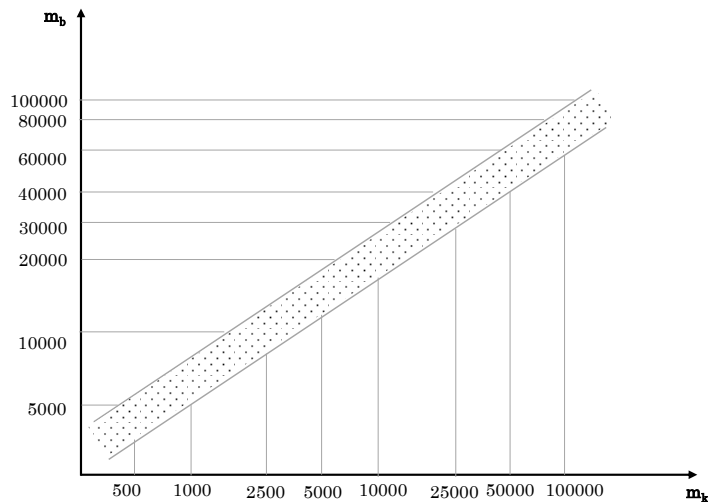


Figura 28. Relación entre la escala de la fotografía y la de la cartografía

Donde, H es la altura media sobre el terreno y H_0 es el dato de altímetro, es decir la altitud de vuelo en relación con el nivel del mar. Con la altitud del relieve se conocería el valor de H_c . El caso estudiado trata de una fotografía vertical, la proyección es central. Sin embargo, en la mayoría de los casos la fotografía no se obtiene verticalmente, es decir, el eje óptico no es perpendicular al suelo. Esto suele suceder debido a las distorsiones de la lente. Para fotografías oblicuas la escala varía con la magnitud y la orientación angular con la inclinación (línea nadir).

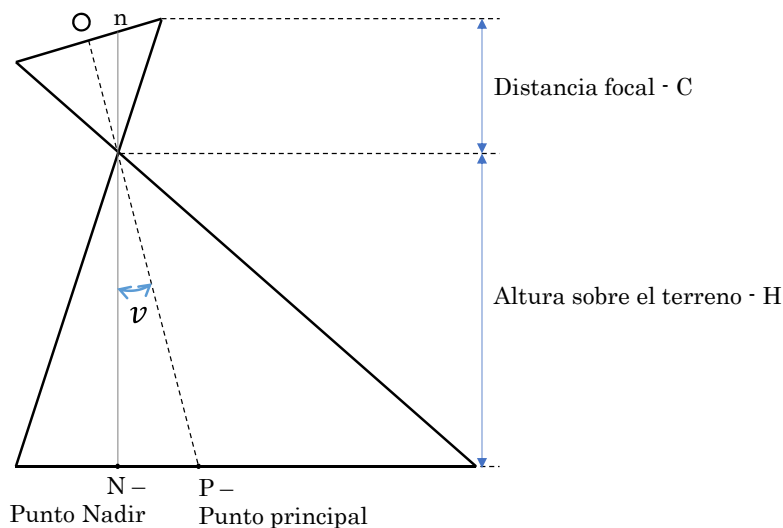


Figura 29. Fotografía en oblicuidad baja tomada en un terreno completamente plano

La fotogrametría se apoya en la estereoscopia, que se basa en la habilidad humana para reconocer las características en relieve. Se utilizan dos imágenes tomadas desde diferentes puntos de vista para lograr la percepción de profundidad. Por otro lado, el concepto de paralaje estereoscópico se refiere al cambio de posición de un punto en dos fotografías debido al desplazamiento de la cámara durante la captura.

La altura relativa de cada punto con respecto a un plano de referencia se puede determinar mediante la relación entre la paralaje y la altura. Esta relación está directamente relacionada con la elevación de un punto en comparación con el nivel de referencia y será mayor para alturas más elevadas que para alturas más bajas, siempre y cuando el ángulo de visión se mantenga constante [58].

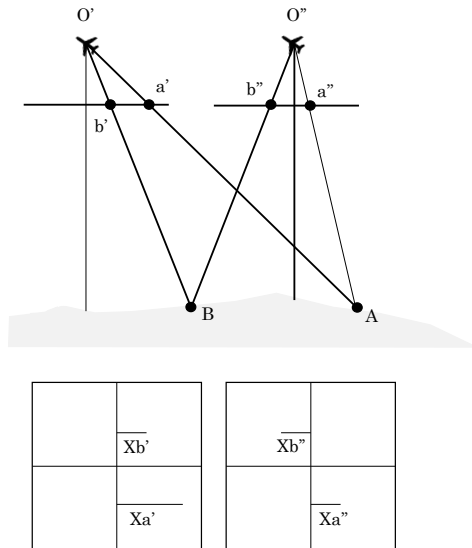


Figura 31. Paralaje estereoscópica

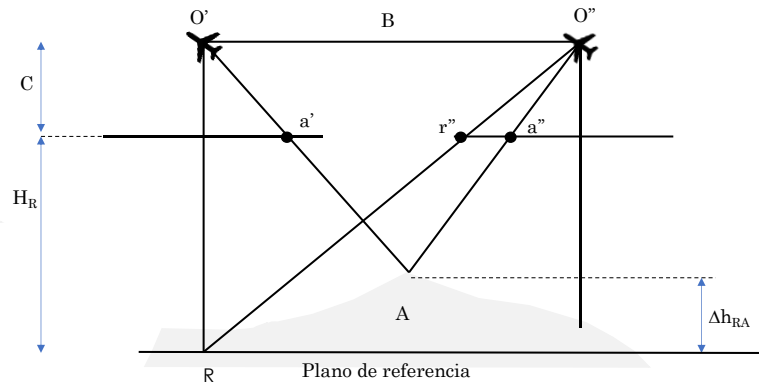


Figura 30. Relación Paralaje-Cota

Proceso fotogramétrico

En cuanto al proceso fotogramétrico, se divide en fases consecutivas que llevan consigo la producción cartográfica. Una vez se haya realizado la toma fotográfica y se introduce las coordenadas tridimensionales del espacio se dan diferentes productos como los planos cartográficos, elevaciones de modelos digitales, ortofotos, entre otros.

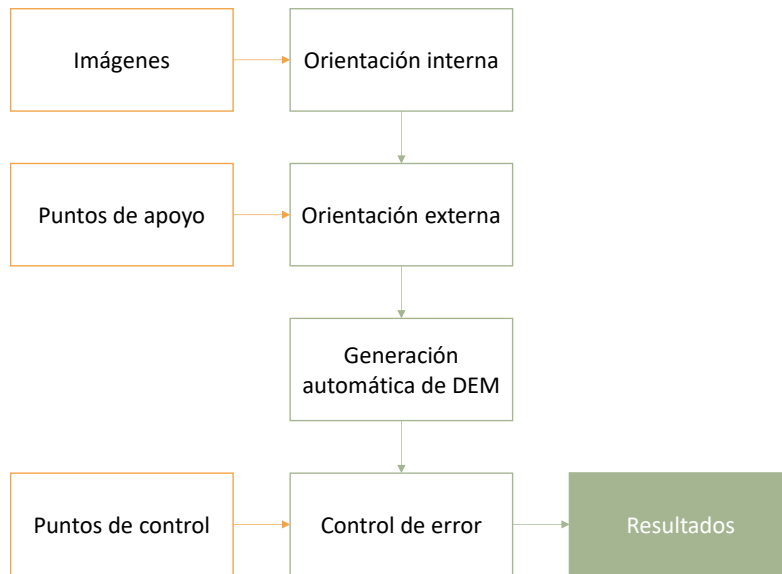


Figura 32. Proceso fotogrametría

Los parámetros necesarios para definir la geometría de los caminos ópticos se determinan mediante las orientaciones interna y externa de la cámara.

La orientación interna incluye la distancia focal, la posición del punto principal en el sistema de coordenadas de la imagen y los parámetros de distorsión radial de la lente. El punto principal se encuentra en el centro de la imagen y coincide con el origen del sistema de coordenadas. La orientación interna se reduce a establecer la ubicación del punto principal en relación con el centro de la imagen digital (Figura 33). Implica la conversión del sistema de coordenadas píxel (fila, columna) al sistema de coordenadas de la cámara, expresado en milímetros en un sistema cartesiano [57]. Por lo tanto, en este caso, no se utilizan marcas fiduciales, lo que permite un proceso completamente automático. Los parámetros de calibración de la cámara son los únicos que se deben determinar. En la Figura 34 se puede observar un PPA donde tendrá un valor positivo de “y” y negativo en “x”.

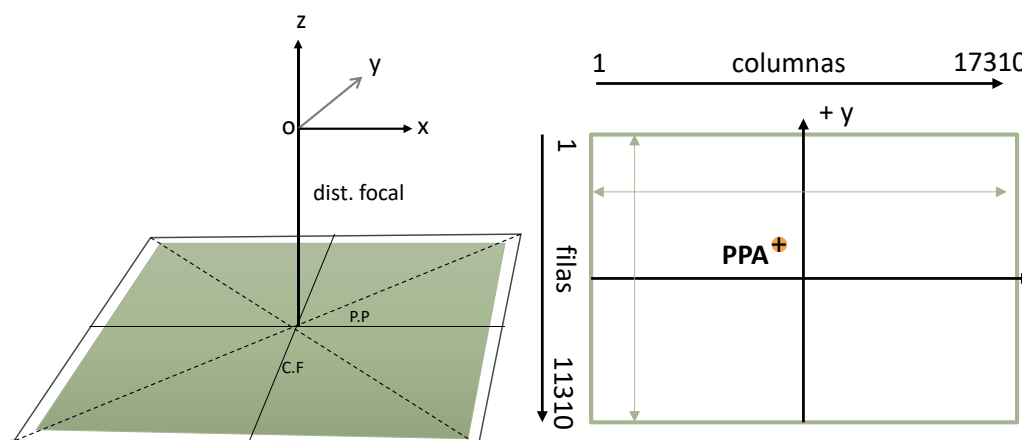


Figura 33. Orientación interna con cámaras digitales.

Figura 34. Transformación de coordenadas en la orientación interna

La fase de orientación relativa consiste en la conexión geométrica de las imágenes estereoscópicas con el fin de crear un modelo estereoscópico. Este proceso implica la identificación de puntos correspondientes en cada imagen y la posterior reconstrucción de los rayos para crear el modelo. La reconstrucción de los rayos se guía por el principio de coplanaridad, que demanda los dos centros de proyección, los puntos coincidentes en las imágenes y el punto en el terreno estén todos en el mismo plano. La orientación absoluta implica nivelar, escalar y posicionar el modelo en su ubicación real en el espacio.

El levantamiento 3D se realiza a través de Structure from Motion (SfM). El proceso de SfM se compone de dos etapas. La estimación de la estructura, donde se identifican los puntos 3D en la escena y se determina sus espacios espaciales. Por segundo, etapa de estimación del movimiento de la cámara, se calcula la posición y la orientación relativa de las cámaras extremas en las características visuales y las correspondencias encontradas entre las imágenes. SfM es apto con cualquier tipo de cámara, pero las cámaras réflex de objetivo único son los más adecuados.

El funcionamiento del software fotogramétrico ha aumentado de complejidad a lo largo de los años. Inicialmente, para la fotogrametría aérea, se usaron modelos estereográficos (a partir de 2 fotografías) orientados a la cartografía fundamentalmente. Actualmente es posible y es deseable usar más de dos fotografías para reconocer un mismo patrón y modelar incluso el terreno. Para cada punto que se va a modelar o que debe ser detectado mediante los algoritmos de reconocimiento de patrones deberán existir al menos 2 cámaras (en el sentido de posicionamiento/toma fotográfica) que lo interceptan.

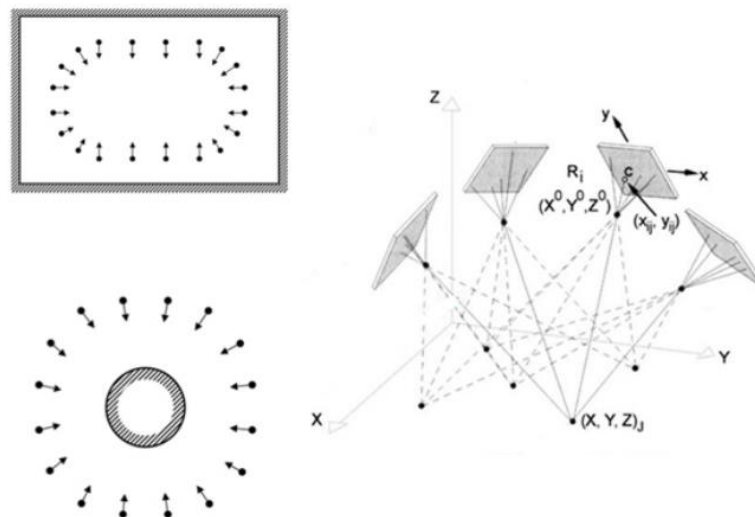


Figura 35. Toma fotográfica para una fotogrametría

ii. Aplicaciones de la fotogrametría

Como se menciona con anterioridad, la fotogrametría ofrece una amplia gama de aplicaciones. En particular, el enfoque principal se centra en la creación de modelos digitales de elevación (DEM) y modelos de terreno digital (DTM) con gran precisión. Estos modelos, que incluyen curvas de nivel y perfiles detallados, desempeñan un papel esencial en la planificación urbana, la gestión de recursos naturales y la evaluación de riesgos geológicos. Además, permiten la obtención de ortofotografías que, cuando se integran con sistemas de información geográfica, proporcionan información valiosa, como coordenadas, distancias, áreas y volúmenes.

Por otro lado, en el campo de la arquitectura, la fotogrametría desempeña un papel trascendental al documentar sitios arqueológicos, inspeccionar patrimonios de la humanidad y facilitar la planificación de proyectos de construcción. La captura de datos en 3D y la creación de modelos BIM (Building Information Modeling) se han convertido en aplicaciones comunes y altamente efectivas.

En el sector minero, se hace uso de esta tecnología para calcular volúmenes de materiales extraídos o depositados en canteras. Esto no solo contribuye a una gestión más eficiente de los recursos, sino que también optimiza las operaciones en este sector.

La aplicación de la fotogrametría no se detiene aquí. En el ámbito de la infraestructura, los drones equipados con cámaras fotogramétricas tienen la capacidad de acceder a lugares peligrosos y de difícil acceso, lo que les permite inspeccionar de manera eficiente carreteras, puentes, líneas eléctricas etc. Esta capacidad resulta fundamental para la detección temprana de daños y problemas de mantenimiento que requieren atención inmediata. Asimismo, encuentra su aplicación en la monitorización, permitiendo un seguimiento preciso del progreso de los proyectos. Esto abarca desde el control de calidad hasta la verificación de la ubicación de activos, y facilita la gestión del cronograma de manera eficiente y precisa.

iii. Ventajas y limitaciones

La combinación de UAV y fotogrametría ofrece una herramienta poderosa para la recopilación de datos geoespaciales, pero es importante tenerlos en cuenta ventajas y limitaciones al planificar y llevar a cabo proyectos. Por lo tanto, a continuación, se procede a analizar estas.

VENTAJAS	LIMITACIONES
<ul style="list-style-type: none"> • Seguridad frente a la topografía tradicional. Debido a las alturas que debían ascender los topógrafos y los esfuerzos que supone medir las cotas y plasmarlo. • Los UAV ofrecen una velocidad y eficiencia que permiten capturar 	<ul style="list-style-type: none"> • El tiempo de vuelo es una desventaja, debido a que las baterías no están preparadas para el tiempo que requiere un vuelo fotogramétrico. • La distancia de vuelo es una desventaja, las regulaciones definen distancias marcadas. El dron debe

<p>millones de puntos, en contraste con el método manual que solo analizaba un número limitado de puntos por día. Esto conduce a la obtención de Modelos Digitales de Elevación (MDE) más realistas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se agrega valor disponiendo de documentos gráficos con un registro histórico, permite comparaciones visuales para evaluar las variaciones a lo largo del tiempo. • Reducción de gastos por disminución de tiempo. La obtención de puntos por avión conllevaba un mes de trabajo frente a días del dron. • Dispone de imagen normal (RGB) o una imagen infrarroja. Permitiendo la valoración de datos inmediatamente. 	<p>estar al alcance visual del que lo controla.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Asimismo, en relación con el punto anterior hay una máxima altura autorizada, la distancia de la elevación más alta posible es de 120 m. Por lo tanto, no siempre se puede adaptar a todos los proyectos.
---	---

iv. Revisión de literatura de UAV con fotogrametría

En el año 2011, Remondino et al. [59] revisaron los sensores ópticos y técnicas de modelado 3D actuales, mostrando ejemplos de mediciones en edificios y objetos para generar modelos 3D.

Dos años después, Roca et al. [60] propuso el uso de una plataforma UAV con un sensor Kinect para adquirir datos geométricos de áreas inaccesibles desde una plataforma terrestre. Como el modelo generado presenta limitaciones debido al sensor, la nube de puntos generada no es uniforme. Es por ello por lo que se sugiere montar diferentes sensores en la plataforma para obtener mejores resultados. Se debe centrar en el análisis del rendimiento de diferentes sensores en la plataforma para encontrar la configuración óptima del sistema. Estos estudios son importantes para analizar el balance energético de edificios y detectar condiciones de manera económica y confiable en grandes superficies.

En ese mismo año, Siebert & Teizer [61] presentó un enfoque para evaluar el rendimiento de los sistemas UAV. Este documento describe los componentes de hardware y presenta una nueva herramienta de software de planificación de rutas de vuelo para misiones de prueba automatizadas. Muestran cómo capturar una imagen georreferenciada tomada por una cámara conectada a un dron. Los resultados indican mejoras en comparación con estudios anteriores, aunque se deben considerar limitaciones como la duración de la batería. Posteriormente, se mencionarán los trabajos futuros de estudios de casos similares que se utilicen en los entornos de trabajo

más hostiles y estén equipados con varios sensores adicionales, como telémetros e infrarrojos, lo cual complementa este trabajo realizado.

Aicardi et al. [62] realizaron un artículo con la intención de evaluar la posibilidad de adquirir y procesar imágenes oblicuas para la reconstrucción 3D de un edificio histórico, obtenidas mediante UAV y cámaras digitales commercial off-the-shelf (COTS) tradicionales para la realización de levantamientos arquitectónicos de alto nivel de detalle. Esta es una herramienta muy eficaz para inspeccionar objetos que se caracterizan por una accesibilidad limitada, necesidad de detalle y rapidez en la fase de adquisición, y presupuestos a menudo reducidos. Las herramientas de software utilizadas son capaces de realizar el producto adecuado de forma bastante similar, aunque con algunas ligeras diferencias en los resultados, incluido el software libre y de código abierto.

Para realizar una comparativa con las tecnologías del mercado Inzerillo et al., [63] presentó un estudio de reconstrucción 3D basada en imágenes utilizando conjuntos de datos tradicionales y de UAV para el análisis de deterioro del pavimento de las carreteras. Se utilizó la técnica Structure from Motion (SfM) para analizar las relaciones geométricas entre las características visuales detectadas en las imágenes. Se observó que el modelo 3D obtenido de UAV era menos preciso, concluyendo que los resultados de UAV-SfM son útiles para comprender las condiciones generales del estado y una actuación inmediata. Para una mejora específica, es necesario realizar un análisis más detallado.

Freimuth & König [64] investigan una aplicación que mejora las tareas de inspección al combinar BIM y Dronecode. La novedad es un sistema que maximiza el grado de automatización para controlar las tareas de inspección de los UAV, eliminando la necesidad de crear manualmente rutas de vuelo, lo que aumenta la eficiencia de las inspecciones. El análisis de la geometría BIM georreferenciada ha demostrado ser un método confiable para la navegación en espacios confinados, como los sitios de construcción. Sin embargo, los investigadores sugieren integrar un método de navegación GPS para tener en cuenta las características específicas de cada ubicación, ya que las distancias a las estructuras pueden variar.

Dado que la distancia es una barrera, se plantea la posibilidad de calcular el volumen de navegación teniendo en cuenta la altura de las fachadas y la oclusión del cielo en futuras versiones de la solución de planificación de misiones. Se sugiere la integración de métodos autónomos avanzados para evitar obstáculos de manera activa. Estos avances en la tecnología permiten lograr un flujo de trabajo fotogramétrico muy útil en los campos de la arquitectura y la ingeniería.

Andaru et al. [65] descubrieron que para crear una nube de puntos 3D completa del edificio, se puede hacer uso de un algoritmo iterativo (ICP) para fusionar los datos de la nube de puntos generada a través de la tecnología de escaneo láser terrestre (TLS) y

UAV con fotogrametría e integrarlos en un sistema de referencia haciendo más eficiente este método. Se hizo uso de una tecnología llamada Unity 3D para la representación.

Rizo-Maestre et al. [66] presenta como novedad un punto de vista opuesto a otros, desde dentro del objeto hacia fuera. Esta metodología, basada en el uso de drones, integra la captura del terreno, la generación de mallas 3D y la superposición de la realidad ambiental con el diseño arquitectónico mediante el uso de técnicas de modelado, como el Building Information Modeling (BIM).

En otro estudio realizado por Zhao et al. [67] se propone un modelo de monitoreo de presas de emergencia utilizando vehículos aéreos no tripulados (UAV) y un modelo tridimensional (3D) de la presa con textura real del entorno e información de escala. Se llevó a cabo un estudio en una presa a pequeña escala para detectar daños mediante la comparación de las nubes de puntos antes y después de la destrucción. El método es eficiente y económico, y los resultados demuestran que los UAV básicos y de bajo costo pueden generar modelos adecuados para el monitoreo de la salud de construcciones. Teniendo en cuenta los costos económicos y la inversión de tiempo del método propuesto, es adecuado para un uso generalizado. Se pretende integrar algoritmos de reconocimiento para identificar automáticamente los defectos existentes en el modelo de presa.

En una de las últimas publicaciones Ali et al. [68] presenta el desarrollo de un método de detección de daños basado en visión casi en tiempo real que utiliza una red neuronal convolucionales (CNN) como red base combinado con un UAV autónomo para la detección automática de estructurales. Como estudio se hizo uso de una estructura de con los defectos de grietas, corrosión y pernos sueltos.

Como conclusión, se deben realizar más investigaciones para continuar mejorando la precisión a fin de realizar la detección de daños en tiempo real en un sistema de puente a gran escala. Desarrollar datos de entrenamiento optimizados para la detección de daños de alto rendimiento es un gran desafío utilizando UAV pequeños y rentables.

v. Estudio de mercado

Programas de procesamiento de la fotogrametría

Cada vez más, en el entorno tecnológico actual, se observa una creciente interconexión entre diversas tecnologías y programas informáticos con el objetivo de potenciar los resultados. En este contexto, se recopilan soluciones comerciales líderes como alternativas de código abierto que permiten tridimensionales digitalmente espacios con imágenes obtenidas desde un dron, a su vez muchos son capaz de combinar datos termográficos para obtener resultados más detallados. Por lo tanto, se exploran aplicaciones utilizados para la generación de modelos 3D [69, 70].

- **Pix4DMapper:** La extensión mapper es parte de PIX4D mencionado anteriormente en planificación de vuelos. Se utiliza para procesar imágenes de aéreas y crear

modelos 3D, ortomosaicos y otros productos cartográficos de alta precisión. Trabaja con imágenes capturadas desde drones con diferentes ángulos y altitudes. Está automatizado para procesar imágenes y crear modelos 3D. Genera modelos DEM y DTM. Se integra con cámaras termográficas, multispectrales y otros sensores para obtener información adicional en aplicaciones específicas. La parte positiva es que el programa está directamente conectado al dron que obtiene las imágenes [71]

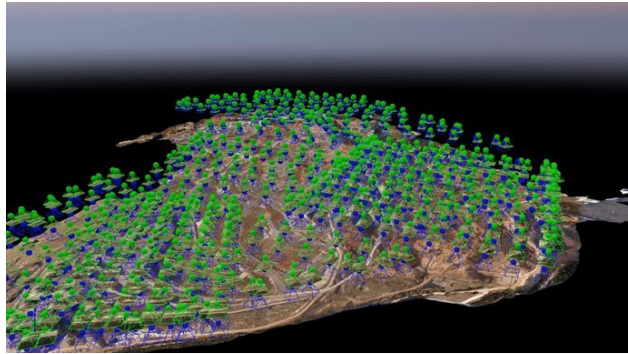


Figura 36. Captura de interfaz de PIX4Dmapper del producto en 3D.

Figura 37. Logo PIX4Dmapper.

- **Agisoft Metashape 3D:** Aplicación utilizada en la creación de sistemas de información geográfica, desarrollo de videojuegos, producción de efectos visuales y en la preservación de la documentación relacionada con el patrimonio cultural. Con la carga de las imágenes el software reconoce y organiza estas en función de los metadatos (fecha, hora, ubicación...) y extrae puntos de control para correlacionar las imágenes y generan una nube de puntos que contiene información de la posición tridimensional del espacio. Así se construye el modelo 3D y se texturiza para mejorar la visualización. Ofrece herramientas avanzadas para lograr resultados precisos. Además del estándar con un aporte económico cuenta con características profesionales como modelar escenas dinámicas, modela 4D para escenas dinámicas, etc. [72]



Figura 38. Logo Agisoft Metashape

Figura 39. Captura de interfaz de PIX4Dmapper del producto en 3D.

- Autodesk ReCap:** ReCap desarrollado por Autodesk, se integra en flujos de trabajo que involucran varias herramientas. De esta manera, exportar los resultados en forma de nube de puntos para su uso en programas de CAD y BIM (Revit) es posible. El software ofrece dos modos fundamentales: fotogrametría aérea y fotogrametría de corto alcance. Además de procesar imágenes, es capaz de trabajar con escaneos láser y alinearlos con proyectos basados en fotografías para crear modelos tridimensionales. La creación es automática, pero permite realizar selecciones manuales para mejorar el resultado [73].



Figura 40. Logo Autodesk Recap PRO.

Figura 41. Captura de interfaz de Autodesk Recap del producto en 3D.

- DroneDeploy:** Automatiza el proceso de vuelo, simplificando la captura de imágenes desde el aire. Este sistema procesa automáticamente las imágenes adquiridas mediante visión por computadora para generar mapas en 3D/2D, modelos y más. Incluye una aplicación que permite seleccionar el área a virtualizar y luego programa un vuelo sobre esa área, capturando imágenes en intervalos predefinidos. Las imágenes se geolocalizan para crear mapas precisos. Durante el vuelo, se puede monitorear en tiempo real desde la aplicación, y al finalizar el vuelo, las imágenes se cargan en el sitio web de DroneDeploy. Su principal ventaja radica en la creación instantánea de mapas en vivo a medida que se sobrevuela el área, lo que facilita la visualización inmediata de datos. Se caracteriza por ofrecer resultados instantáneos, mapas móviles, rapidez y por la colaboración, ya que se comparte mapas con clientes, colaboradores, analistas, etc. [74]

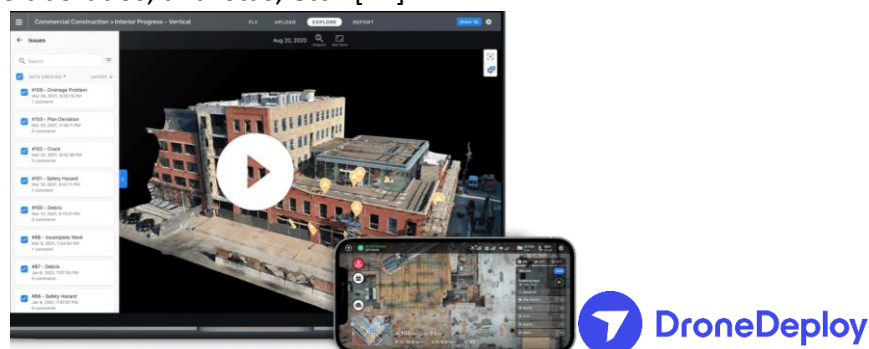


Figura 42. Logo DroneDeploy.

Figura 43. Captura de interfaz de DroneDeploy del producto en 3D.

Cámaras fotogramétricas

Para la fotogrametría se hace uso de cámaras métricas, calibradas y con una geometría que produzca resultados óptimos. En este apartado, se exploran las características de las diferentes cámaras fotogramétricas que se destacan y diferencian por la precisión, versatilidad y capacidades. Esta revisión proporcionará una visión general de algunas de las cámaras más relevantes en el campo de la fotogrametría. Hay que mencionar que dentro de las cámaras explicadas existen diversos modelos que ofrecen características únicas que se adaptan a diversas necesidades, desde cartografía y topografía hasta inspección industrial y modelado arquitectónico.

En un principio, los vuelos se llevaban a cabo utilizando cámaras aéreas analógicas, pero en la actualidad estas cámaras se consideran obsoletas. Estas cámaras funcionaban con carretes y posteriormente las imágenes se digitalizaban mediante escáneres. En la actualidad, se emplean cámaras digitales que reemplazan el plano focal con un sensor compuesto por diminutas células que registran la imagen. Se reconocen como sensores digitales aerotransportados, estos pretenden tener un gran ángulo de campo y anchura de barrido, alta resolución y precisión, capacidad de proporcionar imágenes multiespectrales y capacidad de elaborar imágenes estereoscópicas. Esta evolución en la tecnología ha dado lugar a dos tipos de cámaras según su método de colocación [55].

- **Cámaras lineales:** Las cámaras lineales funcionan capturando una única línea de datos de imagen a la vez mientras se desplazan a lo largo de la escena o el objeto que se está fotografiando. Cuenta con tres series de 12,000 sensores cada una, dispuestas de manera paralela pero orientadas en direcciones diversas: una hacia el frente, otra hacia el nadir y la última hacia la parte posterior en relación con la dirección de vuelo. Lo que se consigue, es que en una pasada de la cámara haciendo uso de un UAV se consigan tres bandas continuas de imágenes compuestas por cada línea, como se puede observar en la Figura 44. Cuando se realiza una captura vertical, la generación de ortofotos es más precisa, ya que no se producen desplazamientos en la imagen. Sin embargo, para lograr esta precisión, se requiere un sistema de posicionamiento e inercia que proporcione las coordenadas de cada línea, ya que los cálculos se vuelven más complejos debido a que cada línea tiene su propio punto de proyección.

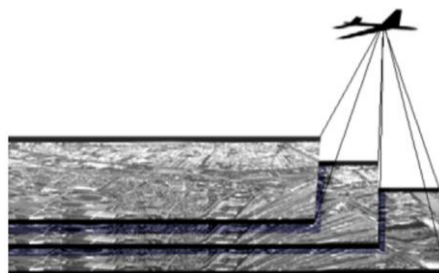


Figura 44. Toma fotogramétrica de una pasada con cámara lineal

- Cámaras matriciales:** Las cámaras matriciales están equipadas con sensores que varían en elementos, con opciones comunes de 3Kx2K y 4Kx4K píxeles, aunque también existen otras configuraciones. Durante el vuelo, es posible añadir sistemas GPS e INS a estos sensores, aunque no son esenciales como en el caso anterior, ya que la geometría de captura se asemeja a la de una cámara analógica. Estas cámaras utilizan múltiples objetivos en su plano focal, generando imágenes parciales que luego se combinan en una imagen completa durante el proceso de postprocesamiento.

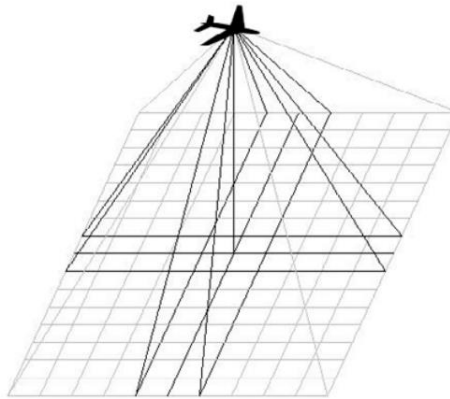


Figura 45. Toma fotogramétrica multiobjetivo matricial

La elección entre una cámara lineal y una cámara matricial depende en gran medida de la aplicación específica y los requisitos de captura de imágenes. Ambos tipos de cámaras tienen sus ventajas y desventajas, y lo que puede ser "mejor" varía según el contexto. A continuación, se indican cuando es preferible utilizar la cámara matricial y cuando la cámara lineal.

Tabla 11. Beneficios de las cámaras matriciales y las cámaras lineales.

MATRICIAL	LÍNEAL
<ul style="list-style-type: none"> Más resolución en la captura de imágenes 2D, capturan imágenes completas en un solo instante. Mayor versatilidad, mejores capturas con poca luz O grabación de video de mayor calidad, tiene amplia variedad de aplicaciones. Imágenes a color, información de color en cada píxel. No necesitan sistemas de GPS. 	<ul style="list-style-type: none"> Alta velocidad de captura, en la inspección rápida de objetos. Escaneo de objetos largos, especialmente efectivas en líneas de producción. Precisión en mediciones debido a su estructura lineal, ideal para cuando se necesite medir con precisión distancias o dimensiones. Menor consumo de energía, menos datos por imagen. Por lo general requieren menos recursos computacionales. Dependiente del sistema GPS.

- | | |
|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none">• Registro continuo de todo el terreno desde tres puntos de vista. |
|--|--|

vi. Laser escáner

Tal y como se ha mencionado en el apartado de Métodos de inspección el láser escáner es un sensor activo que captura una densa nube de puntos que representa la geometría de estudio. Se logra mediante múltiples escaneos desde diferentes posiciones para levantar monumentos u otras estructuras. Realiza un barrido del área establecido por un software. En este proceso, se utiliza un láser para emitir haces hacia varios puntos de la estructura, midiendo distancias y ángulos desde esos puntos hasta el dispositivo láser. Posteriormente, se extraen coordenadas tridimensionales en relación con una estación de referencia. La nube de puntos de coordenadas x,y,z resultante se asemeja a una cuadrícula y, mediante el procesamiento de datos, se crea un modelo geométrico en 3D.

La elección de los sensores depende de la altura de la estructura examinada. La tecnología de fase tiene un alcance limitado, pero ofrece resultados más nítidos, mientras que los escáneres basados en pulsos tienen un mayor alcance, pero ofrecen resoluciones menos precisas. El resultado final obtenido con la tecnología de nivelación láser es similar a lo que se logra con la fotogrametría digital.

Se caracteriza por una elevada precisión de +/- 2 mm de margen de error y se puede trabajar en condiciones climatológicas adversas, incluso sin luz. En comparación de métodos tradicionales presenta mucha rapidez, pero la calidad varía en base al tiempo y al rango de vuelta. Horizontalmente cubre todo el espacio, sin embargo, verticalmente se limita a 320º, es por ello por lo que si se requieren detalles se debe de variar la posición. Por lo tanto, la planificación previa de las posiciones de escaneado es una desventaja de este método. A la vez que el coste alto para la adquisición de equipos y software con el tiempo de inversión en formación que conlleva.

En cuanto a la elección de la técnica se deben de tener en cuenta muchos aspectos. Para lograr resultados óptimos, es beneficioso combinar esta técnica con la fotogrametría. Esto conduce a la obtención de una gran cantidad de datos, como información topográfica, mediciones de volúmenes y, además, la inclusión de texturas capturadas a través de la fotogrametría mejora significativamente la calidad del objeto digitalizado. La fotogrametría resulta más apropiada cuando se necesita adquirir datos de áreas extensas y funciona de manera eficiente en lugares con superficies reflectantes. Por otro lado, el escáner láser muestra un mejor rendimiento en superficies que son lisas y metálicas. Es esencial considerar el tipo de superficie que se está estudiando y encontrar un equilibrio entre el uso de recursos, el tiempo invertido y la obtención de productos con la calidad necesaria.

vii. LIDAR

Esta técnica involucra la creación de una representación en forma de nube de puntos del terreno, la cual es adquirida a través de un escáner láser. Un sistema LIDAR emite

pulsos de luz que inciden en la superficie del suelo y en objetos elevados. Los pulsos reflejados se transforman en señales eléctricas y se analizan utilizando un dispositivo de registro de información. Este registro captura la posición en coordenadas (x, y) y la altitud en coordenada (z) en intervalos predefinidos. Los datos resultantes se traducen en una densa malla de puntos.

Para realizar el escaneado, se basa en dos movimientos: uno longitudinal marcado por la trayectoria del UAV y otro movimiento transversal logrado mediante un espejo móvil que desvía la luz emitida por el escáner. El sistema LIDAR tiene la capacidad de obtener:

- Dos ecos por cada pulso emitido, lo que permite archivar datos a diferentes altitudes. Esto significa que, si el UAV vuela sobre un edificio, el primer eco recogerá la señal del punto más alto, mientras que el último registrará la superficie terrestre.
- La intensidad reflejada, lo cual puede resultar muy útil.

Para determinar la ubicación de la nube de puntos, es esencial conocer constantemente la posición del sensor y el ángulo del espejo durante todo el proceso. El sistema utiliza tecnología de GPS diferencial y un sensor inercial de navegación (INS). Esta tecnología se emplea en sistemas de información geográfica (SIG).

Los productos típicos generados suelen ser modelos de contornos o elevaciones para ortofotos. Para lograrlos, es necesario realizar un posprocesamiento de los datos inicialmente capturados. Debido a la alta densidad de puntos, se requieren pocas interpolaciones para una representación precisa del terreno, aunque esto puede resultar en una apariencia algo difuminada. En el caso de productos en 3D, también se recomienda el posprocesamiento en la generación de ortofotos digitales, aunque los requisitos son menos estrictos que para la generación de contornos. Es importante revisar los datos para detectar errores significativos. Los edificios modelados con datos LIDAR se ajustarán a su posición real y se eliminarán las distorsiones radiales causadas por inclinaciones de los edificios. La precisión de los datos obtenidos mediante la técnica LIDAR depende de varios factores:

- La altura de vuelo.
- El diámetro del rayo láser.
- La frecuencia de vuelo.
- La calidad de los datos GPS/IMU.
- Los procedimientos de post procesamiento.

g. Análisis de requisitos y metodología de inspección

i. Requisitos de gestión energética en el ámbito industrial o de edificios/Criterios de evaluación

Los requisitos de gestión energética en el ámbito industrial o de edificios, así como los criterios de evaluación, varían según la normativa y los estándares específicos de cada país o región. Sin embargo, puedo proporcionarte una descripción general de los requisitos y criterios comunes que a menudo se aplican en la gestión energética industrial y de edificios:

Requisitos de Gestión Energética en el Ámbito Industrial

- **Política de Energía:** La organización debe establecer una política de energía que defina sus objetivos y compromisos en materia de gestión energética.
- **Planificación Energética:** Se debe desarrollar un plan de gestión energética que incluya metas, objetivos, acciones específicas y un calendario para mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo.
- **Identificación de Aspectos Energéticos:** Identificar y evaluar todos los aspectos energéticos relacionados con las operaciones industriales, como el uso de maquinaria, sistemas de iluminación, sistemas de calefacción y refrigeración, etc.
- **Medición y Registro:** Implementar sistemas de medición y registro de datos energéticos para monitorear el consumo y el desempeño energético.
- **Auditorías Energéticas:** Realizar auditorías energéticas periódicas para identificar oportunidades de mejora en la eficiencia energética.
- **Formación y Concienciación:** Proporcionar formación y concienciación a los empleados sobre la importancia de la gestión energética y cómo contribuir a la eficiencia.
- **Gestión de la Energía en Proyectos:** Integrar la gestión de la energía en la planificación y ejecución de proyectos industriales.
- **Seguimiento y Revisión:** Realizar seguimiento y revisiones periódicas para evaluar el progreso hacia los objetivos de gestión energética y ajustar las estrategias si es necesario.

Criterios de Evaluación en el Ámbito Industrial

- **Consumo Energético:** Evaluar el consumo energético total y compararlo con los objetivos de reducción de consumo.
- **Indicadores de Desempeño Energético:** Utilizar indicadores de desempeño energético para medir la eficiencia energética en operaciones específicas, como la producción o la iluminación.
- **Cumplimiento Normativo:** Verificar el cumplimiento de las normativas y regulaciones energéticas aplicables.

- Resultados de Auditorías Energéticas: Evaluar los resultados y las recomendaciones de las auditorías energéticas y tomar medidas en consecuencia.
- Participación de los Empleados: Evaluar la participación y el compromiso de los empleados en la gestión energética.

Requisitos de Gestión Energética en el Ámbito de Edificios:

- Eficiencia Energética en Diseño y Construcción: Incorporar prácticas de diseño y construcción sostenibles que minimicen el consumo de energía de los edificios.
- Sistemas de Control y Automatización: Implementar sistemas de control y automatización para optimizar el uso de la energía en iluminación, climatización y otros sistemas.
- Aislamiento y Ventilación: Mejorar el aislamiento térmico y la ventilación para reducir la pérdida de energía.
- Uso de Energías Renovables: Integrar fuentes de energía renovable, como paneles solares o energía eólica, cuando sea posible.
- Gestión de la Energía en Operación: Establecer procedimientos para la gestión eficiente de la energía durante la operación de los edificios.

Criterios de Evaluación en el Ámbito de Edificios:

- Consumo Energético: Evaluar el consumo energético anual y compararlo con las metas de eficiencia energética.
- Calificación Energética: Utilizar sistemas de calificación energética para evaluar y clasificar el desempeño energético de los edificios.
- Emisiones de Gases de Efecto Invernadero: Evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el uso de energía en el edificio.
- Costos Energéticos: Analizar los costos energéticos y buscar oportunidades para reducirlos.
- Confort Térmico y Ambiental: Evaluar el confort térmico y ambiental de los ocupantes del edificio.

Es importante destacar que estos requisitos y criterios pueden variar según la región y las regulaciones locales. La implementación efectiva de la gestión energética puede llevarse a cabo siguiendo estándares reconocidos internacionalmente, como ISO 50001 para la gestión energética del transporte u industria o LEED (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental) en caso de edificios sostenibles.

h. Tendencias de líneas de investigación

La industria y el sector de la construcción están actualmente inmersos en un proceso de constante evolución hacia la digitalización. Este proceso se ha visto impulsado por una amplia gama de tecnologías que han posibilitado la automatización, integración y digitalización de todos los aspectos relacionados con el ciclo completo de vida de proyectos de construcción e industrialización. Estas tecnologías de vanguardia han catalizado una transformación profunda y significativa en la gestión energética, contribuyendo así a elevar el nivel de calidad en la toma de decisiones en estos campos.

Es importante subrayar que este proceso de digitalización también ha tenido un impacto fundamental en la incorporación y uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV). La integración de UAV en la industria y el sector de la construcción se ha vuelto cada vez más relevante debido a sus innegables ventajas en áreas como inspecciones aéreas, mapeo y supervisión de proyectos, entre otras aplicaciones. La sinergia entre la digitalización y la incorporación de UAV está impulsando aún más la transformación en la industria y la construcción. En el próximo análisis, exploraremos las perspectivas futuras de los UAV y cómo estos dispositivos seguirán desempeñando un papel esencial en la optimización y mejora de la eficiencia en estos sectores en constante evolución.

i. IoT

La convergencia de los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV) y la Internet de las Cosas (IoT) se presenta como una tendencia futura que promete revolucionar numerosos campos. Esta unión potencia la recopilación de datos en tiempo real, permitiendo un monitoreo y análisis más eficaz en diversas aplicaciones, desde la gestión de emergencias hasta la optimización de operaciones industriales.

Si se considera la aplicación del análisis de big data ofrecido por la IoT y su integración con los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV), se consigue la capacidad de procesar datos de sensores a gran escala, rastrear patrones de comportamiento y gestionar comunicaciones en tiempo real. En particular, la analítica de big data de IoT puede proporcionar estimaciones inmediatas acerca de la demanda del objeto de estudio y estrategias para optimizar las funciones de esta, lo cual es esencial en la toma de decisiones instantáneas.

La posibilidad de llevar a cabo estas tareas en línea acelera la toma de decisiones y facilita una respuesta más rápida y efectiva en situaciones críticas. Se ha reconocido que los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV) con capacidad de movilidad y flexibilidad controlables representan una solución prometedora para mejorar la comunicación en situaciones de emergencia. Los UAV pueden ser empleados como dispositivos de almacenamiento en caché, relés o estaciones base gracias a su alta agilidad. No tan solo en emergencias, sino a la vez la conjunción de UAV e IoT permite supervisar en tiempo real activos como vehículos, maquinaria industrial y equipos, lo que contribuye a prevenir problemas de mantenimiento y a reducir el tiempo de inactividad. Lo que

conlleva, mayor seguridad, reducción de costos y aumento de la eficiencia por toma de decisiones más informada en una variedad de aplicaciones.

En el contexto de una investigación, se llevan a cabo la elaboración de diversas metodologías que tiene como objetivo diseñar estructuras para sistemas de supervisión en instalaciones industriales mediante la integración de UAV e IoT [75]. Asimismo, se desarrollan modelos y enfoques para evaluar la confiabilidad de estos sistemas de monitoreo, con la premisa de que sean aplicables en ubicaciones altamente confiables. Es importante destacar que, aunque se han logrado avances significativos en este campo, subsisten desafíos considerables. Uno de los principales desafíos es la limitación de la energía a bordo de los drones, lo que restringe su capacidad de operación de larga duración. Por lo tanto, se hace imperativo explorar y desarrollar soluciones más aplicables en situaciones prácticas, con el objetivo de superar estas limitaciones y aprovechar plenamente el potencial.

La máxima ventaja en todo este contexto radica en la capacidad para obtener una cantidad óptima de datos. Esto implica maximizar en conjunto el volumen total de información recopilada por los UAV, reducir al mínimo el tiempo necesario para que los UAV se desplacen y recojan datos de los dispositivos programados, y al mismo tiempo, minimizar el consumo total de energía de los UAV mediante una optimización conjunta de sus posiciones. Esta sinergia entre la maximización de datos, la eficiencia en la recopilación y el uso eficaz de la energía es el núcleo de lo que hace que esta tecnología UAV-IoT sea tan poderosa y prometedora en una amplia gama de aplicaciones [76].

Los resultados obtenidos de las simulaciones validan la efectividad y ventajas del enfoque de optimización multiobjetivo [77]. Para mejorar la robustez estadística en un artículo, se llevan a cabo simulaciones en serie que abarcan diversas variables, tales como diferentes distribuciones de dispositivos, diversas posiciones iniciales de los UAV y órdenes de magnitud variados para las tres funciones. Como conclusión, se plantea que en trabajos futuros será importante considerar condiciones más realistas para someter aún más a pruebas de desempeño y superioridad.

Sin embargo, tal y cómo se menciona anteriormente debido a las limitadas fuentes de energía que cuenta a bordo los drones se encuentran con el desafío de la conservación de energía. Esto implica la necesidad de protocolos de comunicación energéticamente eficientes. Las investigaciones se centran en la programación de recursos y la planificación de trayectorias de UAV, debido a las limitaciones de computación, almacenamiento y capacidad de la batería, los dispositivos IoT no pueden procesar todas las tareas localmente por sí solos y necesitan descargar algunas tareas a servidores perimetrales que normalmente se implementan en estaciones base.

A su vez en estos escenarios, lograr la seguridad es crucial pero difícil, sobre todo para las aplicaciones en tiempo real, en las que existe un claro compromiso entre seguridad y latencia. Dado que los dispositivos periféricos disponen de recursos limitados, pueden

ser vulnerables a ataques contra la seguridad. Por tanto, es vital emplear soluciones de seguridad ligeras pero eficaces [78].

La integración de UAV e IoT representa una revolución en la obtención de datos. Al aprovechar el análisis de big data de la IoT y la agilidad de los UAV, se pueden maximizar los datos recopilados, minimizar el tiempo empleado en la recolección de información y reducir el consumo de energía de los UAV a través de una cuidadosa optimización de su posición. Esta sinergia se traduce en una toma de decisiones más informada, mayor eficiencia y seguridad en una amplia gama de aplicaciones.

Sin embargo, existen desafíos por superar, como la conservación de energía en UAV y dispositivos IoT, así como la seguridad en escenarios en tiempo real con recursos limitados. A medida que avanzamos en esta emocionante tendencia, la investigación continúa, centrándose en protocolos de comunicación eficientes y soluciones de seguridad ligeras pero efectivas para garantizar que la convergencia de UAV e IoT alcance su máximo potencial en el futuro.

ii. BIM

El modelado de información para la construcción, conocido con el acrónimo BIM, es una tecnología digital que se aplica en la construcción para gestionar, crear y hacer uso de información. La combinación con datos obtenidos con UAV, permite presentar el estado de proyecto de forma completa y actualizada.

El BIM fue propuesto en la década de los 90 con fines de diseño, pero no se ha generalizado hasta la década de 2010. Contiene información tanto geométrica como semántica sobre los componentes del edificio, proporcionando una representación paramétrica de las características espaciales y funcionales. Esto significa que crea un modelo 3D completo con información paramétrica sobre la geometría del edificio, su forma, materiales, equipamiento, energía y rendimiento estructural, así como especificaciones sobre funcionamiento, mantenimiento, gestión, estimación de costes y plazos.

La interoperabilidad de BIM con los métodos de análisis de energía se considera prometedor, pero dependiendo de la herramienta con la que se trabaje se considera baja. Se puede deber por las dificultades que surgen en la extracción de datos, por discrepancias en los archivos o pérdidas de datos en el intercambio de herramientas. Mejorar esta combinación puede traer muchos beneficios en cuanto a la eficiencia energética [79].

La fusión de datos obtenidos con la fotogrametría y la cámara termográfica permitiría ser implementados con los modelos térmicos BIM para aumentar potencialmente la precisión de las evaluaciones energéticas de edificios, permitiendo a su vez una mayor escalabilidad y calibración de estos. La integración de SIG revolucionaría el análisis energético, el nivel de detalle BIM con las propiedades del entorno construido ayuda a

crear modelos altamente precisos ya que el rendimiento está influenciado por la dinámica del ambiente, como la convección de aire, radiación solar y etc [80]. Por otro lado, con la inteligencia artificial mediante el gemelo digital, es posible elaborar programas de mantenimiento con detección remota del modelo de estudio. En la actualidad, esta información se puede guardar en modelos de Construcción Virtual (BIM) [79, 81].

Las primeras investigaciones se basaron en construir modelos virtuales usando software de gráficos y mejorar con uso de BIM para elementos en concreto [82]. Sin embargo, las investigaciones actuales se guían de forma que toda la información de construcción se centre en la reconstrucción digital del espacio existente en BIM. En un estudio de edificios, industrias o espacios establece la posibilidad de integrar diversas investigaciones para crear un archivo digital basado en 3D de información histórica energética, medioambiental, y de planificación de la ciudad. Sobre todo, se considera de gran utilidad si hablamos de ahorro energético que suponen el análisis de los edificios históricos. La técnica de modelado de información de construcción cuando se destina a estudiar edificios históricos se le conoce con el acrónimo de HBIM, apareció debido a Maurice Murphy [83]. En el caso de esta descripción es de interés este modelado paramétrico basado en documentación de materiales históricos, como documentos históricos, referencias bibliográficas, fotografías y dibujos. HBIM va más allá de los gráficos debido a que mediante la semantización de elementos mejora la reconstrucción virtual. La combinación de la automatización de SfM con métodos fotogramétricos para mejorar la precisión. Las técnicas NDT (fotogrametría, escaneo laser, IRT) se combinan con el internet de las cosas para conseguir levantamientos arquitectónicos en modelo BIM 3D [84].

En un trabajo [85] se propone y valida una metodología para obtener un modelo 3D HBIM de estructuras de madera degradadas en base a los datos obtenidos mediante ensayos no destructivos. Esta metodología permite realizar un análisis de la salud de la estructura y representa la geometría con alto detalle. Realizar un plan de acción es la finalidad de muchos estudios relacionados con HBIM. Los resultados obtenidos demuestran el potencial de esta metodología para automatizar el modelado de estructuras similares en el futuro. Además, [86] se ha propuesto la creación de una plataforma de visualización integrada para democratizar el acceso al patrimonio cultural al representar el modelo HBIM en Autodesk Revit 2020 y publicarlo en un sitio web.

En un artículo, relacionado con los transportes, se hizo uso de la combinación de BIM con UAV, se llevó a cabo la planificación de la operación de excavadoras [87]. Emplearon una estrategia que combinó datos de una nube de puntos obtenida a través de UAV con información de Modelado de Información de Construcción (BIM) para revisar y planificar la operación de excavadoras. Este enfoque permitió reducir la necesidad de modificar el diseño original debido a posibles errores y, además, contribuyó a la creación de un sistema automatizado de planificación para el movimiento de tierras en el lugar de

construcción. Por otro lado, un grupo de investigadores desarrollaron [88] un método automatizado que se basó en el análisis de productividad para el transporte mediante grúas por cable. Utilizaron la reconstrucción tridimensional (3D) de un modelo de cangilón de grúa mediante UAV y superpusieron esta información en una escena realista utilizando Realidad Aumentada (AR) para el entrenamiento de modelos basados en visión en un sitio de construcción.

Otro de los puntos más relevantes es buscar la introducción de un enfoque orientado a lograr vuelos completamente autónomos para la recolección de datos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV). Este enfoque se basa en la creación de mapas respaldados por BIM (Modelado de Información de Construcción) [89].

En un estudio, la aplicación de esta técnica se ha comprobado exitosamente a través de simulaciones realizadas en un entorno virtual y un simulador MATLAB. Los resultados indican que las estrategias propuestas generan trayectorias seguras y altamente eficientes en términos de consumo de energía. Esto no solo reduce considerablemente el tiempo necesario para llevar a cabo las exploraciones, sino que también garantiza una precisión en la cobertura del escaneo [90].

Cuando nos referimos al sector industrial, la automatización del proceso de obtención de datos es de gran relevancia, ya que conlleva importantes ahorros de tiempo y recursos. Además, la capacidad de generar rutas eficientes y de alta calidad mediante UAV puede tener diversas aplicaciones en áreas donde la precisión y la velocidad son esenciales.

En un estudio se introdujo un método de inspección de seguridad que combina UAV y BIM dinámico para proyectos de ingeniería civil, como rascacielos, presas de agua y pavimento para desvíos de agua [91]. El proceso general incluye la recopilación de datos, la creación dinámica de modelos BIM y la sincronización de la navegación de video entre el UAV y el modelo BIM en tiempo real. Este método se aplica a proyectos de desvío de agua. La incorporación de BIM dinámico permite a los responsables de tomar decisiones comprender mejor los riesgos y las situaciones anómalas detectadas en los videos aéreos del UAV en un entorno virtual con información adicional.

La técnica de modelado de información de construcción va en dirección a la automatización de procesos y asequibilidad para así ofrecer beneficios clave como eficiencia, reducción de errores, ahorro de costos, aumento de la productividad, escalabilidad, seguimiento y control mejorados.

iii. ANN

Las redes neuronales artificiales, conocidos con el acrónimo ANN, son modelos computacionales inspirados en el funcionamiento del cerebro humano, que consisten en redes interconectadas de nodos que procesan y transmiten información. Estas redes son capaces de aprender patrones y relaciones complejas a partir de los datos de

entrada, lo que las convierte en herramientas poderosas para el análisis y la toma de decisiones basadas en datos.

En el contexto de los ensayos no destructivos, las ANN se utilizan para procesar y analizar los datos recopilados durante las pruebas y evaluaciones no destructivas de materiales, componentes o estructuras. Por ejemplo, las ANN pueden ser entrenadas para reconocer anomalías en los datos de inspección, lo que facilita la detección y el diagnóstico de posibles problemas. También pueden ayudar a automatizar y agilizar el proceso de análisis de datos, lo que reduce el tiempo y los recursos requeridos para realizar evaluaciones no destructivas.

Las redes neuronales artificiales cuentan con elementos distintos de procesamiento, estas se conocen como neuronas. Funcionan en paralelo y las funciones dependen de las neuronas que se encuentran en la “capa oculta”. La red cuenta con capas de neurona de entrada con otras capas correspondiente a cada valor de entrada dónde se encuentran las capas ocultas, y posteriormente una neurona para cada salida. Las capas ocultas se deben de optimizar mediante diferentes técnicas, como puede ser el método de golpe y prueba para que sepan cómo actuar ante una información, suelen funcionar con funciones de suma y activación. Un conjunto de entrenamiento es un grupo de patrones de entrada y salida combinados que se utilizan para entrenar la red, de aquí la automatización de identificar defectos [92].

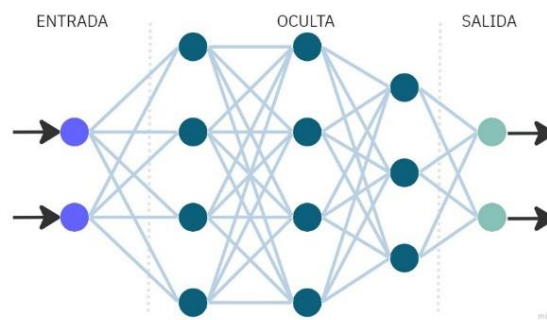


Figura 46. Gráfica elaborada por el autor donde se expresan gráficamente en funcionamiento de capas neuronales en ANN.

Los estudios más recientes en aprendizaje profundo (DL) han combinado diferentes métodos NDT con redes neuronales para detectar y segmentar defectos en elementos de materiales compuestos. Sin embargo, en el ámbito de la herencia cultural, la mayoría de los algoritmos de procesamiento de datos no estaban automatizados, lo que podía llevar a subjetividad por parte del técnico. Para abordar esto, [93] implementa ANN con termografía activa para detectar y segmentar automáticamente defectos y áreas de defectos en marqueterías y objetos artísticos. Por otro lado, [94] en otro estudio se hace uso de escaneo láser y ANN para determinar deformaciones en estructuras patrimoniales con alta precisión.

También se han aplicado redes neuronales artificiales (ANN) al método de microhistoria fotográfica (HFM) para reducir el tiempo de medición, con resultados prometedores. Sin embargo, hay una escasez de estudios sobre la aplicación de HFM en la construcción patrimonial, principalmente debido a la falta de palabras clave adecuadas en la definición de los trabajos científicos. Por otro lado, [95] hace uso de archivos históricos para crear modelos 3D de patrimonio arquitectónico perdido, el cual se recopila en redes neuronales para utilizar como información para posteriores proyectos.

En resumen, se están explorando y aplicando diversas técnicas de aprendizaje profundo en combinación con termografía, HFM, fotogrametría y otras tecnologías para la detección, segmentación y monitoreo de defectos en el contexto de la eficiencia energética.

Deep Learning

Es importante mencionar que las Redes Neuronales Artificiales (ANN) son un componente esencial en el campo del Aprendizaje Profundo (Deep Learning). El Aprendizaje Profundo se enfoca en el entrenamiento de modelos de ANN, lo que les permite aprender y representar de manera jerárquica características cada vez más abstractas a partir de datos de entrada. En este análisis de ANN, hacemos referencia al enfoque de Aprendizaje Profundo.

Por lo tanto, la aplicación del Aprendizaje Profundo en datos provenientes de múltiples sensores para la detección y clasificación de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) se considera un área de investigación en crecimiento. Las diferentes señales recopiladas por una variedad de sensores tienen el potencial de proporcionar una acumulación significativa de conocimiento en lugar de depender de señales individuales. Los estudios científicos presentados en esta sección respaldan la importancia y la necesidad de aplicar el Aprendizaje Profundo en el contexto de la fusión de datos provenientes de múltiples sensores. La diversidad de los datos generados por estos sensores plantea desafíos al momento de crear representaciones conjuntas que aprovechen las relaciones inherentes entre ellos. El Aprendizaje de Múltiples Sensores emplea diversas técnicas con el fin de abordar eficazmente esta diversidad de representaciones de datos [96].

En varios artículos se introducen enfoques para la detección automática de UAV. Estos enfoques proponen modelos de detección más intuitivos y rentables, ya que pueden clasificar y diagnosticar múltiples componentes utilizando un solo dispositivo de inspección, en contraposición al enfoque de inspección convencional [97, 98]. Esta tecnología propuesta tiene el potencial de mejorar la seguridad mediante la detección rápida de fallos. Estos avances se desarrollan no solo con el propósito de aumentar la eficiencia y la velocidad de inspección, sino también para reducir los riesgos y la exposición a peligros para los trabajadores. En uno de los casos, se utiliza un sensor infrarrojo y un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV) para identificar componentes



defectuosos, y este método se aplica específicamente en el diagnóstico de fallos en centrales nucleares, lo cual es especialmente crítico debido al peligro de radiación involucrado. Sin embargo, en un contexto más amplio, se espera que esta tecnología pueda aplicarse en diversas industrias que involucren múltiples componentes [99].

iv. Gemelos digitales

La tecnología de Gemelos Digitales se utiliza para mejorar la eficiencia en la gestión energética, enfocándose en la operación y mantenimiento de edificaciones e industrias. Además, se emplea en la navegación de drones para reducir tiempo y energía en misiones de exploración. Esta tecnología es versátil y tiene aplicaciones en diversos sectores.

La implementación de la tecnología de Gemelos Digitales en la gestión energética se utiliza con el objetivo de mejorar la eficiencia energética en el sector durante la fase de O&M. Mediante los modelos digitales tridimensionales, se busca emular edificaciones para examinar su comportamiento en tiempo real. Para ello, el enfoque se centra en optimizar la operación y mantenimiento de edificios ya existentes, continuando así con investigaciones anteriores y modelos desarrollados mediante la utilización BIM y su implementación en gemelos digitales a través por ejemplo de plataformas como Autodesk Tandem, que son de código abierto. Es de mencionar que la integración de gemelos digitales se consigue principalmente de una representación digital obtenida con la tecnología de la fotogrametría. Esta combinación se logra capturando imágenes de alta resolución utilizando cámaras fotogramétricas montadas en Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV).

A su vez, para la obtención de información en tiempo real, será fundamental seguir la línea de investigación basada en el uso de sensorica IoT que permita el desarrollo de soluciones escalables, de bajo coste y transferibles tanto a la sociedad en general como al sector industrial. Cabe destacar que para la generación de modelos geométricos fieles a las edificaciones a analizar será fundamental el desarrollo de levantamientos arquitectónicos precisos. Para ello se hará uso de técnicas y soluciones de captura masiva de nubes de puntos a través de la tecnología de fotogrametría SfM y láser escáner tridimensional que permitirán nutrir los modelos BIM con información de calidad.

No tan solo para la creación de objetos, otra aplicación de los gemelos digitales es la navegación inteligente de vehículos aéreos no tripulados [100]. El objetivo es minimizar el tiempo y la energía de planificación de visitas a objetivos móviles. Se puede desarrollar un Aprendizaje por Refuerzo Profundo (DRL) para permitir que el dron aprenda el patrón de movilidad de los objetivos y construya su estrategia de escaneo de menor energía en consecuencia. Un artículo, realiza una política de modelo DRL propuesta mediante simulación. Luego, para superar la fase de exploración de DRL que requiere mucho tiempo, desarrollamos un entorno Digital Twin (DT) de simulador basado en física 3D,

que se puede utilizar para entrenar al agente DRL de manera eficiente. Para trabajos futuros, se consideran varios drones para reducir el tiempo total de la misión y mejoraremos la solución admitiendo altitud y velocidad variables de los drones para que la solución sea más práctica.

En el estudio realizado por Pairet en 2019, se abordó el tema de las instalaciones robotizadas autónomas con capacidades de mantenimiento en la industria energética. En un contexto similar de promover vuelos más autónomos y eficientes, se presentó un enfoque que involucra gemelos digitales, donde se desarrolló un marco para tres sistemas autónomos, incluyendo dispositivos UAV, en una plataforma marina de gemelos digitales. El propósito de esta plataforma era entrenar y evaluar la colaboración entre humanos y robots, y los resultados obtenidos resultaron ser de gran relevancia [101].

Por otro lado, en un estudio realizado en el año 2018, se llevó a cabo una investigación centrada en la eficiencia energética de los robots industriales (IR) con el objetivo de contribuir a la protección del medio ambiente y a la reducción de costos. En su artículo, se propuso un método de modelado energético de IR basado en gemelos digitales, que incluye un modelo de robot virtual en 3D, datos de gemelos digitales y un modelo basado en ontología para mapear el modelo virtual al mundo físico realizado con un UAV. Los resultados de la validación del estudio de caso demostraron que este enfoque de modelado basado en gemelos digitales fue eficaz para predecir el consumo de energía de los robots industriales de manera precisa y eficiente [102]. El avance en la utilización de gemelos digitales en la investigación y desarrollo de sistemas autónomos en diversas industrias representa un hito significativo en la búsqueda de soluciones innovadoras y eficientes. Esta tecnología permite simular una amplia variedad de condiciones y escenarios frente al objeto de estudio, permitiendo un análisis de cómo estos sistemas reaccionan ante estímulos externos. Además de poder evaluar los posibles retornos de inversión que podrían derivarse de la implementación de cambios en una industria determinada. Al proporcionar un entorno virtual de prueba y simulación, los gemelos digitales permiten a las organizaciones comprender mejor el impacto económico y operativo de las decisiones estratégicas. Esta versatilidad convierte a los gemelos digitales en una herramienta sumamente poderosa, aplicable no solo en la industria energética, como se mencionó previamente, sino en una amplia gama de sectores industriales.

En resumen, la implementación de la tecnología de Gemelos Digitales está desencadenando una transformación significativa en la gestión energética y más allá. Al emular edificios y sistemas en un entorno virtual tridimensional, estos gemelos permiten optimizar operaciones y tomar decisiones más informadas en tiempo real. Además, su utilidad se extiende a la navegación de vehículos aéreos no tripulados, donde minimizan el consumo de energía y mejoran la eficiencia en misiones de exploración. En última instancia, los Gemelos Digitales están allanando el camino hacia

soluciones más inteligentes y eficaces en una amplia gama de campos, desde la energía hasta la exploración y otros ámbitos.

i. Conclusiones

i. ODS [103]

ODS7. Energía asequible y no contaminante

Durante un extenso período de tiempo, los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas han desempeñado un papel dominante en la generación de electricidad, sin embargo, la combustión de combustibles con un alto contenido de carbono resulta en la emisión de grandes volúmenes de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático y causan daños al bienestar de la población y al medio ambiente. Además, el consumo global de electricidad está experimentando un rápido aumento. Ofrecer la oportunidad de aumentar servicios de energía sostenible, acelerando la introducción de nuevas tecnologías al mercado es una forma de adoptar prácticas de ahorro de electricidad.

Al llevar a cabo una auditoría energética y mejorar la eficiencia energética de un espacio, se contribuye a un uso más eficiente de la energía, lo que puede ayudar a reducir el consumo de energía y promover fuentes de energía más limpias y sostenibles.

ODS8. Trabajo decente y creciente económico

La generación de empleo productivo y mejorar las condiciones laborales dignas para todos es la forma de fomentar el desarrollo económico continuo. La eliminación de la pobreza solo puede lograrse con trabajos seguros y bien remunerados. La persistente ausencia de empleos de calidad, la insuficiente inversión y la escasa demanda están socavando el acuerdo social fundamental que subyace en las sociedades democráticas: que todos deberíamos disfrutar de los beneficios del avance.

La industria de drones y la auditoría energética pueden crear empleo local, especialmente en áreas rurales o en desarrollo. La capacitación y el empleo en estas áreas pueden contribuir a reducir la pobreza al proporcionar fuentes de ingresos adicionales. Aún más, la realización de auditorías ha llegado a poner en riesgo la salud de los técnicos debido a que debían de acceder a zonas de gran altura y zonas reducidos de espacio. A su vez, conlleva muchas horas de trabajo la captación de toda el área a trabajar manualmente.

ODS9. Industria, innovación e infraestructura

Construir infraestructuras resistentes, impulsar la industrialización inclusiva y sostenible, así como fomentar la innovación se convierten en una necesidad urgente en vista de los cambios rápidos en la economía global y el aumento de las disparidades económicas. El crecimiento económico sostenible debe enfocarse en dos aspectos clave: brindar oportunidades equitativas para todas las personas y respaldarse en la innovación y en infraestructuras capaces de resistir desafíos. El crecimiento económico, el progreso social y la lucha contra el cambio climático dependen en gran medida de la

inversión en infraestructuras sólidas, el desarrollo industrial sostenible y el avance tecnológico.

El uso de UAV en la evaluación y gestión de la eficiencia energética en edificios e infraestructuras, demuestra la aplicación de tecnología avanzada para abordar desafíos relacionados con la eficiencia energética. Esto puede incluir la identificación de oportunidades para actualizar sistemas de energía y reducir el consumo de recursos, contribuyendo así a una infraestructura más sostenible y eficiente. Al identificar áreas donde se pueden hacer mejoras en la eficiencia energética reduce el consumo de recursos energéticos y ayuda a mitigar el cambio climático. Además de que implica el desarrollo de habilidades y capacidades en el uso de tecnologías avanzadas. Esto fomenta la formación de profesionales y técnicos. La combinación de UAV y auditorías energéticas impulsa la innovación, permitiendo una evaluación más precisa y detallada en diversas aplicaciones, desde edificios comerciales hasta plantas industriales.

ODS11. Ciudades y comunidades sostenibles

El objetivo numero once trata de alcanzar la meta de que las ciudades y áreas habitadas sean mas accesibles, seguras, capaces de resistir desafíos y perdurables desde el punto de vista ambiental. Dado que muchas áreas urbanas albergan grandes poblaciones y están ubicadas en lugares propensos al cambio climático, es esencial fortalecer la capacidad de las ciudades para resistir y recuperarse de estos eventos cotidianos. Esto se vuelve crítico para prevenir pérdidas en términos humanos, sociales y económicos.

Los UAV pueden realizar inspecciones ambientales en áreas urbanas, como la calidad del aire, la gestión de residuos y el seguimiento de áreas verdes. Esta información es crucial para promover un entorno urbano más limpio y saludable. El punto más destacable es que la utilización de UAV en proyectos de mapeo comunitario y participación ciudadana puede empoderar a las comunidades locales en la toma de decisiones sobre el desarrollo de sus áreas, promoviendo la inclusión y la sostenibilidad. Con esta tecnología se pueden recopilar datos geoespaciales, imágenes aéreas y modelos 3D de áreas urbanas para una gestión eficiente de los recursos en ciudades contribuyendo a un desarrollo más sostenible.

ODS12. Producción y consumo responsable

Asegurar practicas de consumo y producción sostenibles es de lo que trata el objetivo numero doce. Se beneficia el bienestar personal, pero incrementa la necesidad de recursos naturales, que ya son escasos. Si no se toman medidas que modifiquen el consumo de la sociedad y la manera de producción se provocara un perjuicio duradero en el entorno natural.

Los UAV proporcionan datos de consumo de espacios energéticamente mejorables. El aspecto de conocer los puntos energéticamente negativos de una ciudad, edificio o una fábrica industrial va directamente acompañado a mejorar el espacio para consumir lo



necesario en la actividad evitando así un derroche energético innecesario. Contribuir con este objetivo es la finalidad del uso de los UAV en la evaluación de la gestión energética. Esto promueve prácticas de producción y consumo responsables al reducir el consumo de energía en áreas urbanas. Los UAV en este campo podrían aportar muchos más beneficios como puede ser el consumo responsable de recursos naturales ya que son aplicables en agricultura sostenible y a la prevención de desperdicio de alimentos, pero en este caso no está relacionado con el aspecto energético trabajado durante el documento.

ODS13. Acción por el clima

Para cumplir este objetivo es esencial tomar acciones inmediatas para enfrentar el cambio climático y sus consecuencias. Esto se justifica debido a que el cambio climático es resultado de la actividad humana y representa una amenaza tanto para nuestro modo de vida como para el futuro del planeta. Abordar este desafío nos permitirá edificar un mundo sostenible para toda la humanidad. Sin embargo, es crucial actuar sin demora.

Los UAV permiten la inspección y el monitoreo eficiente de instalaciones energéticas, como parques eólicos y plantas solares, lo que facilita la identificación de posibles mejoras en la generación de energía y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, pueden mapear áreas propensas a desastres naturales relacionados con el clima, como inundaciones y sequías, lo que ayuda en la planificación y gestión de recursos energéticos en contextos climáticos cambiantes. Asimismo, el uso de UAV para la evaluación de la eficiencia energética en edificios y la monitorización de la calidad del aire puede impulsar una transición hacia fuentes de energía más limpias y promover prácticas energéticas sostenibles, contribuyendo así al ODS 13 al abordar el cambio climático desde la perspectiva de la energía.

ii. Contribuciones del trabajo de fin de máster

Este trabajo ofrece un análisis exhaustivo sobre la evolución de los Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) en los últimos años. Se adentra en diversas áreas de investigación, sugiere posibles direcciones futuras, explora el avance en el control de estos dispositivos, y examina las arquitecturas tanto de hardware como de software que los sustentan. Además, pone un énfasis particular en el contexto de la eficiencia energética, resaltando la importancia de la fotogrametría y la termografía infrarroja para optimizar la gestión de la energía.

Este estudio enfatiza la relevancia de los avances tecnológicos en este campo, incluyendo la integración de tecnologías punteras como la inteligencia artificial, las comunicaciones y el Internet de las cosas (IoT). Asimismo, explora diversas técnicas de control, desde las tradicionales hasta las más avanzadas, junto con la elección adecuada de aplicaciones relacionadas con la energía.

El informe proporciona un conocimiento profundo sobre los elementos básicos de los UAV como herramienta auditora, tanto de hardware como de software, esenciales para el funcionamiento de los UAV. Esto abarca desde controladores de vuelo hasta sensores infrarrojos, cámaras fotogramétricas y sistemas de comunicación. También se analizan las múltiples aplicaciones de estos dispositivos y los desafíos cruciales que enfrentan, además de examinar tendencias relevantes en proyectos de desarrollo de software.

En última instancia, se presenta como un recurso inestimable para investigadores, desarrolladores y profesionales que deseen mantenerse al tanto de los avances en la tecnología de los UAV, con una atención específica en su aplicación en la gestión de la energía. Ofrece una visión completa de los aspectos esenciales del desarrollo de los UAV, identifica áreas potenciales para futuras innovaciones y aborda cuestiones centrales en este campo en constante evolución. En conjunto, este artículo realiza una contribución significativa a la literatura científica sobre los UAV y proporciona una guía valiosa para futuras investigaciones y desarrollos en este dinámico sector.

6. Referencias bibliográficas

- [1] LÓPEZ, F. J., Pedro M. Leronés, José Llamas, Jaime Gómez-García-Bermejo and Eduardo Zalama. , "A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM)" 2, 2018, doi:10.3390/mti2020021
- [2] COMMISSION, E., Research Centre Joint, S. Tsemekidi-Tzeiranaki, et al. , "Analysis of the annual reports 2020 under the Energy Efficiency Directive : summary report", *Publications Office*,2021, doi:10.2760/180952
- [3] Anonymous , "Chapter 3 - From Efficient to Sustainable and Zero Energy Consumption Buildings", *Butterworth-Heinemann*,pp.75-205, 2019, doi:10.1016/B978-0-12-812817-6.00038-3
- [4] GONZÁLEZ-EGUINO, M., Iñaki Arto, Alejandro Rodríguez-Zúñiga, et al. , "ANÁLISIS DE IMPACTO DEL PLAN NACIONAL INTEGRADO DE ENERGÍA Y CLIMA (PNIEC) 2021-2030 DE ESPAÑA ()", *Fundación de las Cajas de Ahorros*,pp.9-204, Jan 01,2020,
- [5] JAIN, K., Kourosh Khoshelham, Xuan Zhu and Anuj Tiwari. , "Proceedings of UASG 2019: Unmanned Aerial System in Geomatics", *Springer Nature*, 51, 2020,
- [6] COLOMINA, I. and P. Molina. , "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review" 92, pp.79-97, 2014, doi:10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013
- [7] FERNÁNDEZ-REYES, R. , "El Acuerdo de París y el cambio transformacional", *FUHEM Ecosocial*,2016,
- [8] REY MARTÍNEZ FRANCISCO JAVIER. , "Eficiencia energética en edificios : certificación y auditorías energéticas", *Thomson*,.2006,
- [9] IDAE INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE ENERGÍA. , "Ayudas en materia energética."26/07/2023,
- [10] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN. , "Sistemas de gestión de la energía. Requisitos con orientación para su uso. (ISO 50001:2018)."Agosto2018,
- [11] TROI, A., Zeno Bastian, Camilla Colla, et al. , "Energy efficiency solutions for historic buildings. A handbook. [ebook]"2014, doi:10.13140/RG.2.1.2558.9206
- [12] LILIANA ESTRADA GALINDO. , "Nomenclatura y clasificación"
- [13] CABRERA PEÑA, J. M., L. E. Trejo Medina, Ricardo Aguasca-Colomo and Blas José Galván González. , "Revisión tecnológica, normativa y aplicaciones de los UAV en la ingeniería (parte 2)"2016,

- [14] BARRIENTOS, A., J. Del Cerro, P. Gutiérrez, R. San Martín, A. Martínez and C. Rossi. , "Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones" 2007,
- [15] ABBAS, N., Zeshan Abbas, Xiaodong Liu, Saad S. Khan, Eric D. Foster and Stephen Larkin. , "A Survey: Future Smart Cities Based on Advance Control of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)" 13, 2023, doi:10.3390/app13179881
- [16] BUSTAMANTE ALARCON, J. M. , "Diseño y construcción de un avión VTOL en configuración Ducted-Fan y Tilt-Rotor", *Tesis (MC)--Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Programa ...*, 2018,
- [17] GU, X. and Guoan Zhang. , "A survey on UAV-assisted wireless communications: Recent advances and future trends" 208, pp.44-78, 2023, doi:10.1016/j.comcom.2023.05.013
- [18] SHAHZADI, R., Mudassar Ali, Humayun Zubair Khan and Muhammad Naeem. , "UAV assisted 5G and beyond wireless networks: A survey", *Elsevier*, 189, pp.103114, 2021,
- [19] 2023 PIX4D SA. , "PIX4D"
- [20] SPH ENGINEERING. , "UgCS"
- [21] 2023 DJI. , "DJI GS Pro "
- [22] EUROPEA, L. C. , "L00045-00071"
- [23] EUROPEA, L. C. , "II"
- [24] AESA (AGENCIA ESTATAL DE SEGURIDAD AEREA). , "Drones"
- [25] BOSILJKOV, V., Mojmir Uranjek, Roko Žarnić and Violeta Bokan-Bosiljkov. , "An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures" 11, pp.239-249, 2010, doi:10.1016/j.culher.2009.11.007
- [26] PALLARÉS, F. J., Michele Betti, Gianni Bartoli and Luis Pallarés. , "Structural health monitoring (SHM) and Nondestructive testing (NDT) of slender masonry structures: A practical review" 297, pp.123768, 2021, doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123768
- [27] AL-RUZOUQ, R., Saleh Abu Dabous, M. Talha Junaid and Fatma Hosny. , "Nondestructive deformation measurements and crack assessment of concrete structure using close-range photogrammetry" 18, pp.101058, 2023, doi:10.1016/j.rineng.2023.101058

- [28] KRUTIKOVA, O., Aleksandrs Sisojevs and Mihails Kovalovs. , "Creation of a Depth Map from Stereo Images of Faces for 3D Model Reconstruction" 104, pp.452-459, 2017, doi:10.1016/j.procs.2017.01.159
- [29] FU, K., Yijiang Xie, Hailong Jing and Jiangping Zhu. , "Fast spatial–temporal stereo matching for 3D face reconstruction under speckle pattern projection", *Elsevier*, 85, pp.36-45, 2019,
- [30] PIRE, T., Thomas Fischer, Gastón Castro, Pablo De Cristóforis, Javier Civera and Julio Jacobo Berlles. , "S-PTAM: Stereo parallel tracking and mapping", *Elsevier*, 93, pp.27-42, 2017,
- [31] KYLILI, A., Paris A. Fokaides, Petros Christou and Soteris A. Kalogirou. , "Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review" 134, pp.531-549, 2014, doi:10.1016/j.apenergy.2014.08.005
- [32] HERRAIZ, Á H., Alberto Pliego Marugán and Fausto Pedro García Márquez. , "Chapter 7 - A review on condition monitoring system for solar plants based on thermography", *Butterworth-Heinemann*, pp.103-118, 2020, doi:10.1016/B978-0-08-101094-5.00007-1
- [33] IBARRA-CASTANEDO, C., José Ricardo Tarpani and Xavier PV Maldague. , "Nondestructive testing with thermography", *IOP Publishing*, 34, pp.S91, 2013,
- [34] Anonymous , "EN 13187 : thermal performance of buildings : qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes : infrared method (ISO 6781:1983 modified).", *CEN*,.1998,
- [35] GARRIDO, I., S. Lagüela, R. Otero and P. Arias. , "Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: A review—data acquisition procedures" 111, pp.103481, 2020, doi:10.1016/j.infrared.2020.103481
- [36] TEJEDOR, B., E. Lucchi, D. Bienvenido-Huertas and I. Nardi. , "Non-destructive techniques (NDT) for the diagnosis of heritage buildings: Traditional procedures and futures perspectives" 263, 2022, doi:10.1016/j.enbuild.2022.112029
- [37] CADELANO, G., P. Bison, A. Bortolin, et al. , "Monitoring of historical frescoes by timed infrared imaging analysis" 23, pp.102-108, 2015, doi:10.1515/oere-2015-0012
- [38] BISEGNA, F., Dario Ambrosini, Domenica Paoletti, Stefano Sfarra and Franco Gugliermetti. , "A qualitative method for combining thermal imprints to emerging weak points of ancient wall structures by passive infrared thermography – A case study" 15, pp.199-202, 2014, doi:10.1016/j.culher.2013.03.006

- [39] SFARRA, S., Y. Yao, H. Zhang, et al. , "Precious walls built in indoor environments inspected numerically and experimentally within long-wave infrared (LWIR) and radio regions" 137, pp.1083-1111, 2019, doi:10.1007/s10973-019-08005-1
- [40] SFARRA, S., Clemente Ibarra-Castanedo, Mariagrazia Tortora, et al. , "Diagnostics of wall paintings: A smart and reliable approach" 18, pp.229-241, 2016, doi:10.1016/j.culher.2015.07.011
- [41] CARLOMAGNO, G. M., Rosa Di Maio, Maurizio Fedi and Carosena Meola. , "Integration of infrared thermography and high-frequency electromagnetic methods in archaeological surveys" 8, pp.S93, 2011, doi:10.1088/1742-2132/8/3/S09
- [42] PUENTE, I., Mercedes Solla, Susana Lagüela and Javier Sanjurjo-Pinto. , "Reconstructing the Roman Site "Aquis Querquennis" (Bande, Spain) from GPR, T-LiDAR and IRT Data Fusion" 10, 2018, doi:10.3390/rs10030379
- [43] MAVROMATIDIS, L. E., J. L. Dauvergne, R. Saleri and J. C. Batsale. , "First experiments for the diagnosis and thermophysical sampling using impulse IR thermography from Unmanned Aerial Vehicle (UAV)"pp.1-8, 2014,
- [44] KRAWCZYK, J. M., Anna M. Mazur, Tomasz Sasin and A. W. Stokłosa. , "Infrared building inspection with unmanned aerial vehicles"2015,
- [45] RAKHA, T. and Alice Gorodetsky. , "Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones", *Elsevier*, 93, pp.252-264, 2018,
- [46] OMAR, T. and Moncef L. Nehdi. , "Remote sensing of concrete bridge decks using unmanned aerial vehicle infrared thermography" 83, pp.360-371, 2017, doi:10.1016/j.autcon.2017.06.024
- [47] WAQAR AKRAM, M., Guiqiang Li, Yi Jin, et al. , "Improved outdoor thermography and processing of infrared images for defect detection in PV modules" 190, pp.549-560, 2019, doi:10.1016/j.solener.2019.08.061
- [48] HOSSAIN, K., Frederik Villebro and Søren Forchhammer. , "UAV image analysis for leakage detection in district heating systems using machine learning" 140, pp.158-164, 2020, doi:10.1016/j.patrec.2020.05.024
- [49] LIU, Z., Z. Gao, J. Hao, C. Liu, H. Li and X. Dai. , "Analysis of AC 500kV XLPE Submarine Cable Insulation Laboratory Aging Condition Based on Frequency Domain Dielectric Spectroscopy"pp.250-253, 2019, doi:10.1109/EIC43217.2019.9046531
- [50] TELEDYNE FLIR. , "FLIR "

- [51] INFRATEC GMBH INFRAROTSENSORIK UND MESSTECHNIK. , "InfraTec"
- [52] THE MATHWORKS, I. , "MathWorks"
- [53] MIQUEL HERNÁNDEZ, E. , "Cámaras termográficas (IR térmico)"2020,
- [54] DJI. , "DJI"
- [55] QUIRÓS ROSADO, E. , "Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil", *Universidad de Extremadura*,2015,
- [56] SANCHO GÓMEZ-ZURDO, R., David Galán Martín, Beatriz González-Rodrigo, Miguel Marchamalo Sacristán and Rubén Martínez Marín. , "Aplicación de la fotogrametría con drones al control deformacional de estructuras y terreno" 73, pp.e379, 2021, doi:10.3989/ic.77867
- [57] ABER, J. S., Irene Marzolff, Johannes B. Ries and Susan E. W. Aber. , "Chapter 3 - Principles of Photogrammetry", *Academic Press*, pp.19-38, 2019, doi:10.1016/B978-0-12-812942-5.00003-3
- [58] QUIRÓS ROSADO, E. M. , "Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil", *Universidad de Extremadura, Servicio de Publicaciones*,2014,
- [59] REMONDINO, F. , "Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning" 3, pp.1138, 2011, doi:10.3390/rs3061104
- [60] ROCA, D., S. Lagüela, L. Díaz-Vilariño, J. Armesto and P. Arias. , "Low-cost aerial unit for outdoor inspection of building façades" 36, pp.128-135, 2013, doi:10.1016/j.autcon.2013.08.020
- [61] SIEBERT, S. and Jochen Teizer. , "Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system" 41, pp.1-14, 2014, doi:10.1016/j.autcon.2014.01.004
- [62] AICARDI, I., Filiberto Chiabrandò, Nives Grasso, Andrea Maria Lingua, Francesca Noardo and A. Spanò. , "UAV PHOTOGRAMMETRY WITH OBLIQUE IMAGES: FIRST ANALYSIS ON DATA ACQUISITION AND PROCESSING." 41, 2016,
- [63] INZERILLO, L., Gaetano Di Mino and Ronald Roberts. , "Image-based 3D reconstruction using traditional and UAV datasets for analysis of road pavement distress" 96, pp.457-469, 2018, doi:10.1016/j.autcon.2018.10.010
- [64] FREIMUTH, H. and Markus König. , "Planning and executing construction inspections with unmanned aerial vehicles" 96, pp.540-553, 2018, doi:10.1016/j.autcon.2018.10.016

- [65] ANDARU, R., B. K. Cahyono, G. Riyadi, G. R. Ramadhan and S. Tuntas. , "THE COMBINATION OF TERRESTRIAL LIDAR AND UAV PHOTOGRAMMETRY FOR INTERACTIVE ARCHITECTURAL HERITAGE VISUALIZATION USING UNITY 3D GAME ENGINE."2019,
- [66] RIZO-MAESTRE, C., Ángel González-Avilés, Antonio Galiano-Garrigós, María Dolores Andújar-Montoya and Juan Antonio Puchol-García. , "UAV BIM: Incorporation of photogrammetric techniques in architectural projects with building information modeling versus classical work processes", *MDPI*, 12, pp.2329, 2020,
- [67] ZHAO, S., Fei Kang, Junjie Li and Chuanbo Ma. , "Structural health monitoring and inspection of dams based on UAV photogrammetry with image 3D reconstruction" 130, pp.103832, 2021, doi:10.1016/j.autcon.2021.103832
- [68] ALI, R., Dongho Kang, Gahyun Suh and Young-Jin Cha. , "Real-time multiple damage mapping using autonomous UAV and deep faster region-based neural networks for GPS-denied structures" 130, pp.103831, 2021, doi:10.1016/j.autcon.2021.103831
- [69] MONGE VILLANUEVA, G. A. , "Análisis comparativo de modelos digitales de terreno generados mediante fotogrametría con vehículo aéreo no tripulado y topografía tradicional en obras viales. Huancayo, 2018", *Universidad Alas Peruanas*,2018,
- [70] RODRIGUEZ GARCÍA, M. E. , "Comparación entre los software pix4d y agisoft metashape de los productos fotogramétricos de la estación del metropolitano plaza de flores e intersección de sus vías Barranco-Lima, 2021", *Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión*,2022,
- [71] PIX4D. , "PIX4Dmapper"
- [72] METASHAPE, A. , "2.0 Intelligent Photogrammetry"
- [73] AUTODESK. , "Autodesk Recap"
- [74] DRONDEPLOY. , "DrondeDeploy"
- [75] PAN, Z., Chen Xie, Heng Wang, Yimin Wei and Daoxing Guo. , "Blind Turbo Equalization of Short CPM Bursts for UAV-Aided Internet of Things" 22, 2022, doi:10.3390/s22176508
- [76] BANERJEE, A., Abu Sufian, Ashutosh Srivastava, Sachin Kumar Gupta, Saru Kumari and Sachin Kumar. , "An energy and time-saving task scheduling algorithm for UAV-IoT collaborative system" 101, pp.104875, 2023, doi:10.1016/j.micpro.2023.104875

- [77] LIU, L., Aimin Wang, Geng Sun and Jiahui Li. , "Maximizing data gathering and energy efficiency in UAV-assisted IoT: A multi-objective optimization approach" 235, pp.109986, 2023, doi:10.1016/j.comnet.2023.109986
- [78] E. T. MICHAELIDIS, K. Maliatsos, D. N. Skoutas, D. Vouyioukas and C. Skianis. , "Secure UAV-Aided Mobile Edge Computing for IoT: A Review" 10, pp.86353-86383, 2022, doi:10.1109/ACCESS.2022.3199408
- [79] PEREIRA, V., José Santos, Fernanda Leite and Patrícia Escórcio. , "Using BIM to improve building energy efficiency – A scientometric and systematic review" 250, pp.111292, 2021, doi:10.1016/j.enbuild.2021.111292
- [80] MAZZARELLA, L. , "Energy retrofit of historic and existing buildings. The legislative and regulatory point of view" 95, pp.23-31, 2015, doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.073
- [81] HANAFI, M. H., Gan Gek Sing, Shardy Abdullah and Radzi Ismail. , "Organisational readiness of building information modelling implementation: architectural practices" 78, 2016,
- [82] CURSI, S., Davide Simeone and Ilaria Toldo. , "A semantic web approach for built heritage representation", *Springer*, pp.383-401, 2015,
- [83] MURPHY, M., Eugene McGovern and Sara Pavia. , "Historic building information modelling (HBIM)", *Emerald Group Publishing Limited*, 27, pp.311-327, 2009,
- [84] DELEGOU, E. T., Georgia Mourgi, Elisavet Tsilimantou, Charalabos Ioannidis and Antonia Moropoulou. , "A multidisciplinary approach for historic buildings diagnosis: The case study of the Kaisariani monastery", *MDPI*, 2, pp.1211-1232, 2019,
- [85] SANTOS, D., Manuel Cabaleiro, Hélder S. Sousa and Jorge M. Branco. , "Apparent and resistant section parametric modelling of timber structures in HBIM" 49, pp.103990, 2022, doi:10.1016/j.jobe.2022.103990
- [86] ROCHA, J. and Ana Tomé. , "Multidisciplinary and accessibility in heritage representation in HBIM Casa de Santa Maria (Cascais) – A case study" 23, pp.e00203, 2021, doi:10.1016/j.daach.2021.e00203
- [87] TAN, Y., Geng Li, Ruying Cai, Jun Ma and Mingzhu Wang. , "Mapping and modelling defect data from UAV captured images to BIM for building external wall inspection" 139, pp.104284, 2022, doi:10.1016/j.autcon.2022.104284
- [88] WANG, D., Xiaoling Wang, Bingyu Ren, et al. , "Vision-based productivity analysis of cable crane transportation using augmented reality–based synthetic image", *American Society of Civil Engineers*, 36, pp.04021030, 2022,

[89] SONG, C., Zhengyi Chen, Kai Wang, Han Luo and Jack C. P. Cheng. , "BIM-supported scan and flight planning for fully autonomous LiDAR-carrying UAVs" 142, pp.104533, 2022, doi:10.1016/j.autcon.2022.104533

[90] SONG, C., Zhengyi Chen, Kai Wang, Han Luo and Jack C. P. Cheng. , "BIM-supported scan and flight planning for fully autonomous LiDAR-carrying UAVs" 142, pp.104533, 2022, doi:10.1016/j.autcon.2022.104533

[91] LIU, D., Junjie Chen, Dongjie Hu and Zhao Zhang. , "Dynamic BIM-augmented UAV safety inspection for water diversion project" 108, pp.163-177, 2019, doi:10.1016/j.compind.2019.03.004

[92] KUMAR, R., R. K. Aggarwal and J. D. Sharma. , "Energy analysis of a building using artificial neural network: A review" 65, pp.352-358, 2013, doi:10.1016/j.enbuild.2013.06.007

[93] GARRIDO, I., Jorge Erazo-Aux, Susana Lagüela, et al. , "Introduction of Deep Learning in Thermographic Monitoring of Cultural Heritage and Improvement by Automatic Thermogram Pre-Processing Algorithms" 21, 2021, doi:10.3390/s21030750

[94] WOJTKOWSKA, M., Michal Kedzierski and Paulina Delis. , "Validation of terrestrial laser scanning and artificial intelligence for measuring deformations of cultural heritage structures" 167, pp.108291, 2021, doi:10.1016/j.measurement.2020.108291

[95] CONDORELLI, F., Fulvio Rinaudo, Francesco Salvatore and Stefano Tagliaventi. , "A Neural Networks Approach to Detecting Lost Heritage in Historical Video" 9, 2020, doi:10.3390/ijgi9050297

[96] SAMARAS, S., Eleni Diamantidou, Dimitrios Ataloglou, et al. , "Deep Learning on Multi Sensor Data for Counter UAV Applications—A Systematic Review" 19, 2019, doi:10.3390/s19224837

[97] BEHERA, T. K., Sambit Bakshi and Pankaj Kumar Sa. , "A Lightweight Deep Learning Architecture for Vegetation Segmentation using UAV-captured Aerial Images" 37, pp.100841, 2023, doi:10.1016/j.suscom.2022.100841

[98] ALBANESE, A., Matteo Nardello and Davide Brunelli. , "Low-power deep learning edge computing platform for resource constrained lightweight compact UAVs" 34, pp.100725, 2022, doi:10.1016/j.suscom.2022.100725

[99] JAE JIN, I., Do Yeong Lim and In Cheol Bang. , "Development of fault diagnosis for nuclear power plant using deep learning and infrared sensor equipped UAV" 181, pp.109577, 2023, doi:10.1016/j.anucene.2022.109577

[100] SOLIMAN, A., Abdulla Al-Ali, Amr Mohamed, et al. , "AI-based UAV navigation framework with digital twin technology for mobile target visitation" 123, pp.106318, 2023, doi:10.1016/j.engappai.2023.106318

[101] AL-RBEAWI, S. , "A Review of Modern Approaches of Digitalization in Oil and Gas Industry" 11, pp.100098, 2023, doi:10.1016/j.upstre.2023.100098

[102] SLEITI, A. K., Jayanta S. Kapat and Ladislav Vesely. , "Digital twin in energy industry: Proposed robust digital twin for power plant and other complex capital-intensive large engineering systems" 8, pp.3704-3726, 2022, doi:10.1016/j.egyr.2022.02.305

[103] NACIONES UNIDAS. , "Edición especial 2023 Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible"