

UNIVERSIDAD EAN

**IMPLEMENTACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA AÉREA CON DRONES EN LA
INSPECCIÓN DE GRANJAS SOLARES**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA EN ENERGÍAS**

NOMBRE DE LOS AUTORES:

**JOHAN SEBASTIAN ULLOA AYALA
JUAN SEBASTIAN CASTELLANOS BENAVIDES
MANUEL FERNANDO MONTAÑO GÓMEZ**

BOGOTÁ, 2021

Problema de Investigación

Se ha identificado que, en los parques solares de generación eléctrica, que cuentan con un número mayor a 1000 paneles solares, y que tienen una extensión de territorio mayor a 5 hectáreas, la detección de fallas en el sistema o en la infraestructura es compleja para el personal técnico, que tiene que desplazarse para identificar dichas fallas, y proporcionar una solución en el menor tiempo posible. Lo cual no es viable por la dimensión del terreno o por la complejidad de la falla.

Un monitoreo realizado por un técnico conlleva grandes retos a la hora de llevarlo a cabo, y demanda en promedio de 20 a 30 minutos realizar la inspección de cada panel, dicho tiempo puede aumentar o disminuir dependiendo la ubicación de los paneles. Aspectos como la altura de los paneles, y la disposición de los mismos hacen que llevar a cabo este proceso sea mucho más tedioso y en ocasiones peligroso para el personal. Tiempo que es vital para la generación de energía eléctrica, ocasionando pérdidas que se ven reflejadas económicamente.

¿Cuáles son los factores que hacen de los drones junto con las cámaras térmicas, una herramienta confiable que podría mejorar la detección y prevención de fallas en los paneles solares, que conforman las instalaciones de generación de energía solar en Colombia?

Objetivo general

Investigar sobre la viabilidad y confiabilidad de un sistema Dron-Cámara térmica, para la detección y prevención de fallas en los paneles solares de las instalaciones de generación de energía solar en Colombia, con el fin de incentivar el uso de esta tecnología y establecer este método de inspección a nivel nacional, por medio de recolección de datos de estudios anteriormente realizados, y de un posible estudio de simulación de fallas térmicas de un panel solar en una instalación de prueba.

Objetivos específicos

- Definir los aspectos de la problemática actual en la inspección de paneles fotovoltaicos
- Encontrar e identificar la tecnología actual, con que se contaría para el desarrollo de la investigación.
- Analizar costos y viabilidad de la implementación en una instalación ya existente.
- Determinar el progreso que supone el uso de drones en la inspección y termografía aérea de los paneles fotovoltaicos.

Justificación

La presente investigación sobre la utilidad de los drones junto con las cámaras térmicas en granjas de generación eléctrica es motivada por el hecho de crear una solución tecnológica, en un campo que está en constante desarrollo, y por ende presenta cada día nuevos retos, tanto operativos como técnicos. Es por esto que se plantea este estudio sobre la incidencia de un barrido de la instalación de generación, por medio de un sistema conformado por drones y cámaras térmicas, el cual permitirá al parque generador de energía obtener una mayor eficacia y rapidez, al momento de detectar fallas en el sistema. Abarcando una mayor cantidad de terreno en menos tiempo, evitando desplazamientos y riesgos innecesarios por parte del personal técnico y operativo, al momento de solucionar las fallas presentadas, obteniendo datos relevantes sobre el estado actual de la instalación. Esto se verá reflejado en una mayor producción de energía limpia, debido a la disminución de tiempos de inoperatividad, e incidirá en la economía del parque de generación eléctrica.

Los métodos de generación energética convencionales suponen grandes emisiones de dióxido de carbono, y son grandes contribuidores de la contaminación producida por el hombre. Las barreras existentes en el mercado, y los altos costos de producción de los paneles solares, representan un gran reto para la construcción y establecimiento de granjas fotovoltaicas, que contribuyan al sistema interconectado de un país.

Un servicio basado en un monitoreo ágil y eficaz, que disminuya los problemas que afectan la producción de energía, supone una reducción en los costos de reparaciones tardías, y baja la

probabilidad de daños irreversibles, contribuyendo a la reducción de altos costos de producción, que dichas afectaciones representan en el balance económico de la planta generadora.

Para este proyecto es necesario tener en cuenta varios aspectos técnicos, pasando por el personal necesario, equipos y los permisos requeridos para llevarlo a cabo, en este caso en Colombia. Para ello se requiere personal certificado en vuelo de drones, regulación aérea, y conocimientos en termografía aérea. Dicho certificado debe tramitarse mediante un curso en una escuela autorizada por la aeronáutica civil. Un dron que cumpla con estándares de vuelo y especificaciones técnicas propicias para la labor, con aproximadamente un alcance mínimo de 50 metros de altura y un alcance perimetral viable para un barrido más amplio del terreno.

A nivel comercial se encuentra gran variedad de tipos de drones. En este caso nos enfocaremos, en un tipo de dron que cuente con las características de vuelo pertinentes, como los son la georreferenciación, y que sea adaptable para termografía aérea. En donde la adaptación con cámara termográfica es indispensable, ya que nos brinda una mayor precisión, para el análisis de imágenes e identificación de puntos calientes. El sistema de georreferenciación es vital para la planeación del vuelo y establecer los puntos de vuelo.

Los requisitos para pruebas, documentación y mantenimiento deben seguirse según la norma estándar IEC TS 62446-3 que *“define la inspección termográfica (infrarroja) en exteriores de módulos y plantas fotovoltaicas en funcionamiento. Esta inspección respalda el mantenimiento preventivo para la protección contra incendios, la disponibilidad del sistema para la producción de energía y la inspección de la calidad de los módulos fotovoltaicos”* (International Electrotechnical Commission, 2017); así mismo se debe contar con una mínima irradiación solar

que supere los 600 w/m², para que el estudio con la cámara termográfica sea correcto, y se pueda realizar sin inconvenientes por la diferencia de temperatura.

Parte de los puntos físicos y/o ambientales para tener en cuenta, es que no puede existir reflejo del sol, esto quiere decir que, para tener una buena toma de datos, se debe hacer en horas donde el sol no incida y rebote en un ángulo (90°) sobre la cámara termográfica, (comúnmente de alta resolución) ya que eso afecta la toma de las temperaturas, y nos daría una lectura errónea, lo recomendable para la inspección, es que el rango de ángulos debe estar entre los 60° y los 85°. Se dijo anteriormente que se busca abarcar una mayor cantidad de terreno en menos tiempo, según algunos datos un dron con una sola carga (tienen una duración de aproximadamente 30 a 35 minutos) puede sobrevolar e inspeccionar durante 15 minutos por cada MW instalado.

(Rentadrone, 2020)

Lo anterior se debe acompañar de un software que nos permita realizar una compilación de los datos tomados, para así permitir llevar a cabo un análisis profundo, y tomar las decisiones correctivas y preventivas según sea el caso, para de esta forma otorgar una vida útil más extensa a los paneles fotovoltaicos que son un elemento indispensable de generación.

Tabla de contenido

1	Marco de referencia.....	11
1.1	Drones.....	11
1.1.1	Definición.....	11
1.1.2	Historia.....	12
1.1.3	Tipos de dron.....	14
1.1.4	Método de control.....	17
1.1.5	Grado de complejidad.....	18
1.2	Termodinámica.....	19
1.2.1	Calor.....	19
1.2.2	Temperatura.....	19
1.2.3	Conducción del calor.....	20
1.2.4	Conducción.....	20
1.2.5	Convección.....	20
1.2.6	Radiación.....	21
1.2.7	Radiación Térmica.....	21
1.2.8	Radiación electromagnética.....	22
1.3	Termografía.....	23
1.3.1	Definición.....	23
1.3.2	Termografía en la industria.....	23
1.3.3	Termografía aérea.....	24
1.4	Cámaras térmicas.....	25
1.4.1	Tipos de cámaras térmicas.....	25
1.4.2	De acuerdo con su tecnología.....	26
1.4.3	De acuerdo con su uso.....	27
1.5	Energía Solar.....	30
1.5.1	Panel solar.....	30
1.5.2	Parques solares.....	30
1.6	Radiometría.....	30
1.7	Mantenimiento e inspección de parques fotovoltaicos en la actualidad.....	31
1.8	Utilización de drones y radiometría en la industria.....	33
1.8.1	Aislamiento húmedo de techos.....	33
1.8.2	Aplicación de la termografía en examen de equipos eléctricos.....	34

1.8.3	Sistema de detección automática de módulos fotovoltaicos deteriorados mediante dron con cámara térmica.....	35
1.9	Radiometría en la industria.....	36
1.10	Utilización de drones como solución integrada.....	37
1.10.1	Etapas vuelo.....	37
1.11	Estándares y reglamentación de vuelo de un dron en Colombia	38
2	Análisis de restricciones.....	40
2.1	Ambientales:.....	40
2.1.1	Emisividad:.....	41
2.1.2	Angulo de posición del lente con la superficie:.....	41
2.1.3	Irradiancia:.....	41
2.1.4	Humedad relativa:.....	41
2.1.5	Velocidad del viento:.....	41
2.1.6	Nubosidad:.....	42
2.1.7	Temperatura del aire atmosférico:.....	42
2.2	Sociales:.....	42
2.3	Capacidad de fabricación:	43
2.4	Aspectos técnicos	44
2.4.1	Lente de la cámara térmica:	44
2.4.2	Refrigeradas:.....	44
2.4.3	No refrigeradas:	44
2.4.4	Cámaras refrigeradas vs no refrigeradas:.....	45
2.4.5	Campo de visión (FOV):	45
2.4.6	Campo de visión instantáneo (iFOV):	45
2.4.7	Distancia de muestreo en tierra (GSD):	46
2.4.8	Masa máxima de despegue:	46
2.4.9	Altura de vuelo:.....	47
2.4.10	Velocidad de vuelo:.....	47
2.4.11	Sensibilidad térmica (NEDT):	47
2.4.12	Superposición o traslape (overlap):.....	48
2.4.13	Software:.....	48
2.5	Éticas:.....	49
2.6	Salud y seguridad:	49
2.7	Políticas:	50
2.7.1	Restricciones Nacionales.....	50

2.8	Generación de posibles soluciones.....	54
2.9	Selección de la mejor alternativa y Especificaciones de ingeniería para la solución	57
2.10	Dimensionamiento de los componentes	62
2.10.1	Drone Matrice 200.....	63
2.10.2	Cámara Zenmuse XT2.....	67
2.11	Análisis de costos del diseño.....	70

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1 Quadcopter Nota. Primer helicóptero multirotopuladao.....	13
Ilustración 2 Modelo X-8	14
Ilustración 3 Dron de ala fija	15
Ilustración 4 Dron de ala rotatoria.....	16
Ilustración 5 Dron VTOL	16
Ilustración 6 Dron de aleteo.....	17
Ilustración 7 Espectro de la radiación electromagnética Nota. La región visible es sólo una pequeña parte del espectro total.	22
Ilustración 8	27
Ilustración 9	28
Ilustración 10	29
Ilustración 11	29
Ilustración 12	40
Ilustración 13 Condiciones ambientales de operación según IEC TS 62446-3.....	42
Ilustración 14	56
Ilustración 15	57
Ilustración 16 Características equipos utilizados.....	59
Ilustración 17 Montaje experimental etapa 2	61
Ilustración 18 Drone Matrice 200	63
Ilustración 19 Camara Zenmuse XT2 en dron y sola.	67

Índice de tablas

Tabla 1 Clasificación tipo de fallas.....	32
Tabla 2 Especificaciones técnicas del dron.....	63
Tabla 3 Especificaciones técnicas de la batería del dron.	65
Tabla 4 Especificaciones técnicas del control remoto del dron.	66
Tabla 5 Especificaciones del cardán.	67
Tabla 6 Especificaciones técnicas de la cámara térmica.....	68
Tabla 7 Especificaciones técnicas Cámara visual (normal).	69
Tabla 8 Costos elementos.....	70
Tabla 9 Costos Nacionalización.....	70
Tabla 10 Tabla de costos y cobros.	71

MARCO TEÓRICO

El uso de drones a nivel comercial se mostró ante el mundo como un pasatiempo con gran desarrollo tecnológico, pero ha sido de vital importancia para el desarrollo global, principalmente en su fase de invención en el ámbito bélico, para tiempo después trascender al ámbito industrial-comercial, donde se ha encaminado a desarrollarse y extenderse a pasos acelerados en los últimos años. Con la incorporación de nuevas tecnologías adaptables, que complementan su funcionalidad en distintas áreas. No obstante, para comprender la complementariedad con otras tecnologías, y visualizar mejor la aplicación de estos dispositivos de vuelo en diferentes campos como la agricultura, infraestructura, salud, mensajería, y en especial en el campo de la energía, o más específicamente en los parques de generación de energía solar, es necesario entender conceptos clave del tema de estudio, como lo son termodinámica, radiometría, termografía y energía solar, entre otros conceptos que rodean la temática de estudio.

1 Marco de referencia

1.1 Drones.

1.1.1 Definición.

“Dron” o “Drone” en inglés, es un vehículo aéreo no tripulado (UAV) o también conocido como aeronave operada a distancia (ROA), está compuesto de una parte eléctrica, electrónica, hélices, y una parte mecánica, con un respectivo chasis en su mayoría en fibra de carbono, capaz alojar y proteger estos componentes. Puede realizar todo tipo de maniobras aéreas sin un piloto a bordo. Este piloto permanece en tierra maniobrando el vehículo aéreo por medio de un mando a distancia o por medio de inteligencia artificial. Aun no pueden transportar

grandes cargas, pero cuanta con una gran cantidad de accesorios como cámaras y sensores que complementan su utilidad. (Barrio Andrés, 2018)

1.1.2 Historia.

La búsqueda de artefacto perfecto de ataque se remonta a 1849 cuando los Austriacos en medio de un conflicto, deciden optar por atacar a su contrincante por medio de globos con explosivos, activados por medio de un pulso electromagnético. En medio de la Primera Guerra Mundial el Profesor Archibald Low, contratado por la recién inaugurado Ministerio de Aire británico, en busca de una defensa contra los alemanes decide crear una aeronave dirigida por ondas radiales, para derribar aeronaves enemigas. Estos dos desarrollos tecnológicos contaron con un factor común, el cuál fue el fracaso en ambos casos, pero marcarían un hito en la historia de las pequeñas aeronaves no tripuladas, ya que sería un inicio remoto de esta tecnología. (Haluani, 2014)

Fue hasta 1920 que apareció el primer helicóptero multirotor tripulado (quadcopter), creado por el ejército de EE. UU., usaba rotores para su sustentación aérea, pero logro volar hasta 1922 sin alcanzar una gran altura (5 metros) y visualizando más dificultades de vuelo que estabilidad, encontrando como su mayor enemigo el vuelo lateral. El proyecto no tuvo el éxito esperado por tanto fue cancelado por el ejército estadounidense. Esto declino el desarrollo aéreo en cuanto a aeronaves no convencionales con más de dos rotores hasta mediados de los años 40s. Con el inicio de la Segunda Guerra Mundial se da apertura a un sinfín de desarrollos armamentísticos aéreos no tripulados, que a hoy funcionan en versiones más avanzadas y con ayuda del desarrollo de la inteligencia artificial. (Norris, 2014)

En 1990 hace su aparición en Japón un sistema a pequeña escala que recibió el nombre de Gyco Saucer, era controlado por radio sin un piloto a bordo y contaba con giroscopios mecánicos para su estabilidad y motores eléctricos, contaba con aproximadamente 3 minutos de vuelo, pero este no fue muy reconocido ya que no contó con una buena fuerza de comercialización a nivel mundial. (Norris, 2014)



Ilustración 1 Quadcopter Nota. Primer helicóptero multirotor tripulado

. Fuente: Tomada de <https://www-accessengineeringlibrary-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/content/book/9780071822282/chapter/chapter1>

Ha mediados de la década del 2000, llega lo que se podría catalogar como el gran auge del dron moderno, ya que la compañía Draganfly Innovations Inc. lanza al mercado el Draganflyer que contó con desarrollo tecnológico de punta y más capacidades funcionales. (Norris, 2014)



Ilustración 2 Modelo X-8

Fuente: Tomado de <https://www-accessengineeringlibrary-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/content/book/9780071822282/chapter/chapter1>

Esta década del 2000 es la incursión de los drones en los ataques de las guerras de medio oriente comandadas por el ejército estadounidense y la CIA, en donde se comienza a implementar el dron no solo como agente de seguimiento, sino también como agente ejecutante de milicianos, y se empieza a enmarcar un camino de avances, y mejoras tecnológicas, como en técnicas de vuelo y asociaciones con otras tecnologías, para en el caso de la guerra ser más efectivos a la hora de realizar un operativo, y finalizando las guerras abriéndose a nuevos campos de funcionalidad en el ámbito recreativo y ahora en múltiples industrias. (Rogers, 2018)

1.1.3 Tipos de dron

Su clasificación viene dada en sus características técnicas requeridas para cada aplicación.

1.1.3.1 Clasificación Técnica

Los drones pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de sustentación, al método de control, la masa máxima de despegue, su grado de complejidad, por su tamaño, alcance y altitud. (Barrio Andres, 2018, pág. 37)

1.1.3.2 Tipo de sustentación

- **Dron de ala fija:** Es de aspecto similar a un avión, el modelo de ala volante es el más destacado, ya que es el más usada en drones comerciales, es proporcional a un avión convencional, tiene una gran autonomía y velocidad de vuelo, y requiere pista de aterrizaje. (Barrio Andres, 2018, pág. 38)



Ilustración 3 Dron de ala fija

Fuente: Tomado de Barrio Andrés, M. (Dir.). (2018). Derecho de los drones. Wolters Kluwer España. <https://elibro-net.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/es/ereader/bibliotecaean/107194?page=38>

- **Dron de ala rotatoria:** La sencillez y la versatilidad hacen de este dron uno de los más utilizados, ya que al contar con una sustentación muy estable gracias al sistema de motores con el que cuentan, sean en su mayoría de 2 a 4 rotores con hélices (helicópteros, tricópteros, quadrópteros, hexacópteros y octocópteros) tiene una gran maniobrabilidad y se ajusta para el ingreso a lugares de difícil acceso. (Barrio Andres, 2018, pág. 38)



Ilustración 4 Dron de ala rotatoria

Fuente: Tomado de Barrio Andrés, M. (Dir.). (2018). *Derecho de los drones*. Wolters Kluwer España. <https://elibro-net.biblioteca.universidadean.edu.co/es/ereader/bibliotecaean/107194?page=38>

- **Dron VTOL (Vertical Take-Off and Landing)** Tiene las características de despegue y aterrizaje de un dron de ala rotatoria, y es capaz de volar como un dron de ala fija. (Barrio Andres, 2018)



Ilustración 5 Dron VTOL

Fuente: Tomado de Barrio Andrés, M. (Dir.). (2018). *Derecho de los drones*. Wolters Kluwer España. <https://elibro-net.biblioteca.universidadean.edu.co/es/ereader/bibliotecaean/107194?page=39>

- **Dron de Aleteo:** Es un modelo inspirado en la naturalidad del movimiento de los pájaros o insectos voladores. (Barrio Andres, 2018)



Ilustración 6 Dron de aleteo

Fuente: Tomado de Barrio Andrés, M. (Dir.). (2018). Derecho de los drones. Wolters Kluwer España. <https://elibro-net.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/es/ereader/bibliotecaean/107194?page=39>

1.1.4 Método de control

1.1.4.1 Dron autónomo

El dron es totalmente autónomo en su vuelo, tiene una previa configuración de vuelo y cuenta con sensores sofisticados para llevarlo a cabo. (Barrio Andrés, 2018)

1.1.4.2 Dron monitorizado

El dron es maniobrado por un piloto en tierra, el piloto comanda el plan de vuelo en su totalidad y suministra la información de vuelo y de control. (Barrio Andres, 2018)

1.1.4.3 Dron supervisado

Cuenta con una supervisión y maniobra de vuelo por parte del piloto en tierra, pero también el dron puede realizar movimientos de vuelo según lo requiera. (Barrio Andres, 2018)

1.1.4.4 Dron Controlado Remotamente

El dron es controlado directamente por el piloto en tierra, enviando órdenes directas sin pasar por un sistema asistido de vuelo. (Barrio Andres, 2018)

1.1.4.5 Masa máxima de Despegue (MTOW)

Se tiene en cuenta el peso de la estructura del dron, su capacidad de combustible, el peso de sus componentes y la capacidad de carga al momento del despegue. (Barrio Andres, 2018)

Se destacan 4 subcategorías:

- Drones de hasta 250 gr de MTOW (aeronaves de juguete)
- Drones de hasta 2kg de MTOW (Operaciones más allá del alcance visual del piloto requieren autorización administrativa)
- Drones con una MTOW superior 25 kg de uso civil (requieren autorización administrativa)
- Drones cuya MTOW excede los 50 kg (en el campo civil no es de aplicación real, salvo excepciones) (Barrio Andres, 2018, pág. 40)

Es de importancia recalcar que la energía de impacto asociada al MTOW para causar daño a una persona es de 66 Julios, a partir de esta cantidad de energía cinética se pueden causar daños letales. (Barrio Andres, 2018)

1.1.5 Grado de complejidad

- Se contempla por medio del grado de complejidad creciente en los drones y su medio de control.
- Drones teledirigidos a distancia visual sin ruta preprogramada.
- Drones equipados con un ordenador a bordo preprogramado que no cuenta con funciones de inteligencia o sistemas autónomos.
- Drones equipados con ciertas funciones autónomas

- Sistema GPS y estaciones de control para la navegación aérea. (Barrio Andres, 2018, pág. 40)

1.2 Termodinámica.

La termodinámica nace de la necesidad de describir los principios de funcionamiento de la maquina a vapor, relacionando el trabajo producido con el calor suministrado, surgiendo como el estudio de la energía y su transformación en distintas manifestaciones como el calor. (Smith, Van Ness, Abbott, & Swihart, 2020)

1.2.1 Calor

Energía en tránsito o Energía térmica en tránsito entre dos cuerpos, que están a diferentes temperaturas. El efecto de calor se debe al intercambio entre un cuerpo caliente que tiende a enfriarse cuando está en contacto con un cuerpo frío, mientras que un cuerpo frío tiende a calentarse. Transferencia de energía(calor) del objeto caliente al frío. (Smith, Van Ness, Abbott, & Swihart, 2020)

1.2.2 Temperatura

Medición de energía cinética, determinada por las vibraciones promedio de las moléculas sobre la materia. Es la percepción de calor y frio, teniendo como base una escala determinada previamente (Celsius, Fahrenheit), escala establecida en grados, donde se toma como base el punto de congelación del agua para determinar un estado frío, y el punto de ebullición del agua para determinar algo caliente. (Smith, Van Ness, Abbott, & Swihart, 2020)

1.2.3 Conducción del calor

“La energía calorífica se transmite desde las zonas de alta temperatura a las de baja temperatura, en un proceso que va acompañado de un cambio de entropía hasta que se alcanza, si es posible, el estado de equilibrio térmico caracterizado por una distribución uniforme de temperaturas.” (Domingo, A., 2011. Apuntes de Transmisión del Calor.)

Esta transmisión de calor se da por tres mecanismos básicos la conducción, la convección y la radiación, pero para efectos académicos de este trabajo nos centraremos únicamente en los dos primeros

1.2.4 Conducción

La conducción de calor o también llamada transmisión de energía calorífica se transmite de un cuerpo con mayor temperatura a uno de menor temperatura, este proceso se da mediante el contacto directo de dos cuerpos, esto se da debido a los choques o acoplamientos entre las moléculas del sistema. (Domingo, A., 2011. Apuntes de Transmisión del Calor.)

1.2.5 Convección

“La energía calorífica se transmite por el movimiento físico de moléculas “calientes” de las zonas de alta temperatura a las zonas de baja temperatura y viceversa, equilibrándose las temperaturas.” (Domingo, A., 2011. Apuntes de Transmisión del Calor.)

Este tipo de transmisión se da únicamente por medio de materiales, la evaporación del agua o fluidos y es el movimiento del fluido lo que transporta el calor. “Cuando en un fluido que se

encuentra en un campo gravitatorio hay regiones de distinta densidad, siendo las zonas más densas por más frías las que se encuentran en la parte superior, éstas se mueven hacia las zonas de menor densidad que se encuentran en la parte inferior (más caliente) desplazando el fluido que allí se encuentra.” (Domingo, A., 2011. Apuntes de Transmisión del Calor.)

1.2.6 Radiación

“En la transmisión del calor por radiación un cuerpo cede parte de su energía interna a través de la emisión de ondas electromagnéticas (que viajan a la velocidad de la luz y no necesitan de un medio material para su propagación). Al absorberse estas ondas electromagnéticas por otros sólidos, su energía pasa de nuevo a un movimiento térmico de las moléculas y, por tanto, a un aumento de temperatura.

Así, el proceso de intercambio de energía por radiación es un proceso de absorción y emisión posterior de energía en forma de fotones por parte de los átomos y moléculas de una sustancia.” (Domingo, A., 2011. Apuntes de Transmisión del Calor.)

Este tipo de transmisión se diferencia de las demás ya que no necesita una diferencia de temperaturas entre los cuerpos, no necesita un contacto directo si no de un medio para transmitirse mediante ondas electromagnéticas.

1.2.7 Radiación Térmica

La radiación térmica o radiación electromagnética es la radiación emitida por un cuerpo debido a su temperatura, la forma de irradiar dicho calor es mediante ondas electromagnéticas.

“Cuando un cuerpo se calienta, emite radiación electromagnética de una longitud de onda λ que se encuentra típicamente comprendida en el rango de longitudes de onda de 0,1 a $100\mu\text{m}$, a la que se denomina radiación térmica. Lo que denominamos radiación visible es una porción muy estrecha del espectro y de la radiación térmica, que se extiende aproximadamente desde $0,35\mu\text{m}$ hasta $0,75\mu\text{m}$.” (Domingo, A., 2011. Apuntes de Transmisión del Calor.)

1.2.8 Radiación electromagnética

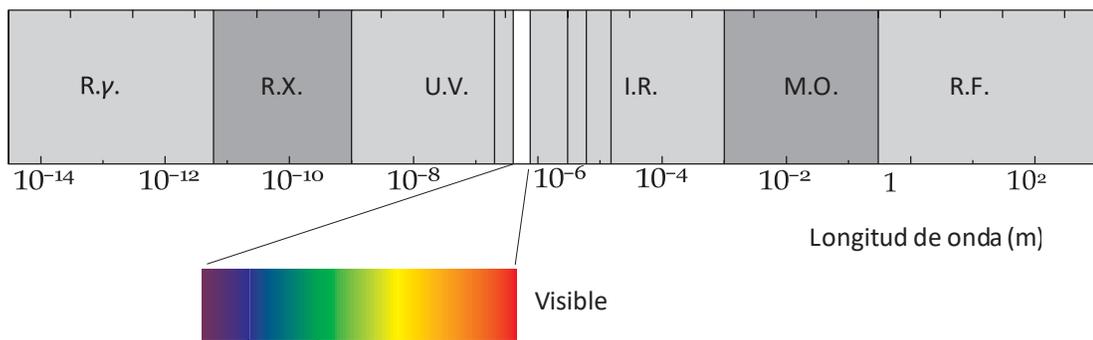


Ilustración 7 Espectro de la radiación electromagnética. Nota. La región visible es sólo una pequeña parte del espectro total.

Tomado de (Domingo, A., 2011. Apuntes de Transmisión del Calor.)

“La radiación electromagnética consiste en una perturbación armónica de los campos eléctrico y magnético que se propaga por el espacio. La radiación electromagnética se caracteriza bien por su longitud de onda λ , bien por su frecuencia de oscilación ν , relacionadas ambas por la expresión $\nu = c/\lambda$.” (Domingo, A., 2011. Apuntes de Transmisión del Calor.)

La energía o radiación térmicas se propaga en forma de campos electromagnéticos constituidos por ondas, estas ondas se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro, dichas ondas se propagan a la velocidad de la luz, dicha radiación puede manifestarse de diferentes maneras como ondas de radio, microondas, luz visible entre otras. Para efectos de este trabajo nos centraremos en la radiación electromagnética que emite un cuerpo al tener una temperatura mayor a los cero grados Celsius.

1.3 Termografía.

1.3.1 Definición

La termografía infrarroja es una técnica que detecta la radiación infrarroja mediante cámaras termográficas que muestran un diferencial de temperatura superficial en los cuerpos, y la hace visible a nuestros ojos, lo que permite la visualización de principios científicos fundamentales, que de otra manera sería imposible (IGNACIO FERNANDO, 2016). Y así evidenciar diferentes fenómenos en los distintos elementos o cuerpos a observar ya así poder realizar un mejor análisis del comportamiento de estos.

1.3.2 Termografía en la industria

La termografía es una moderna tecnología que utiliza cámaras que miden y toman imágenes de la radiación infrarroja emitida por los cuerpos sin necesidad de que haya luz visible. Como esta radiación es función de la temperatura de la superficie del cuerpo, la cámara permite el cálculo y visualización de dicha temperatura.

La termografía ha convertido en una tecnología clave y asequible con múltiples aplicaciones en numerosos campos profesionales (IGNACIO FERNANDO, 2016).

Se ha utilizado en la medicina como dolores musculares de algún deportista y con eso hallar la anomalía que causa la lesión, en las instalaciones industriales y en los edificios como hallar la infiltración que es cauda normalmente de fugas en las tuberías o evaluar grietas en fachadas (Freitas J. G, 2014), en el ámbito de las energías se le da un uso para observar y analizar fallas en equipos en procesos de eficiencia energética, evaluar estructuras como en los parques solares e incluso en parques eólicos y con esto recolectando información para una toma de decisión correcta, aplicando eso en cualquier área profesional.

1.3.3 Termografía aérea

La termografía aérea a base de drones, los cuales debe ser operador por personal capacitado y certificado con sus debidas licencias de pilotaje emitidas por la entidad encargada en cada país, permite revisar en zonas de difícil acceso diferente tipo de construcciones, enfocado hacia el proceso energético se pueden establecer trabajos de revisión, inspección y supervisión de líneas de alta tensión, granjas eólicas y parque solares, donde se tiene por objetivo estableciendo un “sistema capaz de proporcionar análisis y medición de distribuciones térmicas, utilizando radiación infrarroja emitida por objetos” (Wallysson Klaus Pires Barros, 2018) reduciendo notablemente: los tiempos de revisión de los equipos, tiempo de respuesta y tiempos de disponibilidad; así como los costos de mantenimiento y porcentajes de error en la toma y análisis de datos.

Poniendo en consideración los requerimientos del mundo actual, en donde se busca incrementar el uso de energías renovables contamos con un aumento de desarrollo de parques solares, se requiere implementar procesos óptimos de mantenimiento los cuales sean capaces “(...) de detectar, identificar y cuantificar la gravedad de los defectos que aparecen en los

módulos fotovoltaicos (...)” (Gallardo-Saavedra, 2019). Propósito que se logrará con el uso de la termografía aérea.

1.4 Cámaras térmicas

Las cámaras térmicas o termográficas son un dispositivo que miden la temperatura y ofrecen una imagen térmica de los objetos, basándose en las emisiones de radiación infrarroja, la cual se debe a la temperatura del objeto. Dicha radiación es emitida por cualquier cuerpo que tenga una temperatura mayor a los -273.15 grados Kelvin o cero Celsius.

Estas cámaras térmicas en un comienzo fueron inventadas para satisfacer necesidades en el ámbito militar para tareas específicas, en la actualidad estas cámaras son utilizadas para variedad de tareas, su uso más común es para la seguridad.

1.4.1 Tipos de cámaras térmicas

Las cámaras termográficas son muy relevantes en el campo del control de temperatura industrial, tienen múltiples aplicaciones y una constante evolución de las mismas, haciendo que sean ampliamente utilizadas en diferentes sectores, como lo dice el ingeniero Claudio Prado en uno de sus artículos sobre cámaras térmicas en la revista de negocios de seguridad, se pueden clasificar por su tecnología y por el tipo de uso que se les pueden dar. (Prado, I., 2011. Tecnología rnda Cámaras térmicas aplicadas a la seguridad.)

1.4.2 De acuerdo con su tecnología

1.4.2.1 Refrigeradas

Se trata de equipos que tienen un sensor generador de imágenes de radiación térmica que se encuentra en una unidad sellada al vacío y está integrado a un refrigerador que opera a temperaturas muy bajas, este proceso es conocido como enfriamiento criogénico.

Su campo de aplicación es el sector militar y de policía, alta seguridad, procesos de fabricación muy especializados en la industria automotriz y en procesos térmico-químicos.

1.4.2.2 No refrigeradas

Estos equipos usan un sensor micro bolómetro que no requiere enfriamiento, fabricado con óxido de vanadio, estos son mucho más fáciles de fabricar y su costo es menor, pero no tienen la misma sensibilidad térmica que los equipos refrigerados, por lo que no son prácticos para usos en largas distancias ni con aplicaciones que requieren niveles de detalle especial.

Su aplicación está en la detección de variaciones de calor en distancias cortas, son muy usadas en el sector industrial para el diagnóstico de partes mecánicas y circuitos eléctricos y para la medición de temperatura corporal para personas en corta distancia.

1.4.2.3 Cámaras refrigeradas vs no refrigeradas

Para aplicaciones con mayores demandas, los detectores enfriados son los adecuados. Pueden reaccionar más rápidamente a los cambios en nivel del IR (temperatura), siendo su tiempo de respuesta de 1 microsegundo. Debido a esta característica, estas cámaras pueden utilizarse para registrar eventos térmicos transitorios.” (Prado, I., 2011. Tecnología rmds Cámaras térmicas aplicadas a la seguridad)

La desventaja de las cámaras enfriadas es su alto costo, tanto de producción como de mantenimiento. El proceso de enfriado implica consumo de energía, lo cual da como resultado un mayor consumo total comparado con un equipo no refrigerado. Por otro lado, la cámara requiere de un tiempo antes de entrar en servicio luego de conectarse.

A pesar de su mayor costo y tamaño, las cámaras enfriadas generan una imagen de calidad superior que las no enfriadas. Una figura de mérito de la cámara térmica es la mínima diferencia de temperatura que puede detectar en un objeto

1.4.3 De acuerdo con su uso

1.4.3.1 Cámaras Compactas

Las cámaras termográficas compactas de la serie Optris Xi fusionan un pirómetro robusto y compacto con una moderna cámara IR. Estas cámaras miden la temperatura en miles de puntos de manera independiente, a la vez que visualizan la imagen térmica.



Ilustración 8

Tomado de (Prado, I., 2011. Tecnología rmds Cámaras térmicas aplicadas a la seguridad)

1.4.3.2 Cámaras LWIR

Las cámaras térmicas LWIR operan en el rango de frecuencia de 8-14 μm y frecuencias de muestreo de hasta 128Hz permiten medir temperaturas exactas. Son de fácil integración con redes y sistemas de automatización.

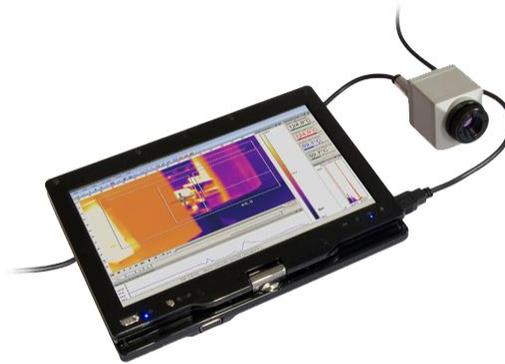


Ilustración 9

Tomado de (Prado, I., 2011. Tecnología rmds Cámaras térmicas aplicadas a la seguridad)

1.4.3.3 Cámaras NIR

Las cámaras termográficas NIR con longitud de onda corta permiten la medición sin contacto en superficies a altas temperaturas. Estas cámaras térmicas son utilizadas para monitorización y control de temperatura en diferentes aplicaciones industriales como procesos de fabricación de metal, metal fundido o aplicaciones láser.



Ilustración 10

Tomado de (Prado, I., 2011. Tecnología rmds Cámaras térmicas aplicadas a la seguridad)

1.4.3.4 Cámaras Biespectrales

Las cámaras termográficas biespectrales, equipadas con tecnología bi-espectral, permiten la combinación entre una imagen real y otra térmica de forma sincronizada, generando imágenes y videos termográficos en tiempo real.



Ilustración 11

Tomado de (Prado, I., 2011. Tecnología rmds Cámaras térmicas aplicadas a la seguridad)

1.5 Energía Solar

1.5.1 Panel solar

Hablar de energías renovables implica implementar maneras de utilizar recursos cíclicos con el fin de obtener energía en versión de electricidad, referirse a este tema conlleva a utilizar el sol, el viento, el agua como alternativa a las fuentes tradicionales, “los paneles solares son una de las opciones más estudiadas debido a su excelente rendimiento en condiciones de radiación solar uniforme.” (Jhon Edwin Vera, 2014) Aun cuando se puedan presentar condiciones difíciles por su almacenamiento y materiales de elaboración para su eficiencia, tema en el cual se ha mejorado con el pasar del tiempo.

1.5.2 Parques solares

Los parques solares se han convertido en un punto de referencia de la optimización del recurso renovable, se han ido desarrollando distintos sistemas de generación con este recurso como plantas solares, plantas para almacenamiento térmico y como sistema de calefacción, permitiendo el acceso de electricidad a muchas zonas remotas del mundo y ayudando a los países en el proceso de diversificación de la matriz energética.

1.6 Radiometría

“La radiometría es el campo de la ciencia y de la ingeniería relacionado con la medición de la radiación electromagnética, más específicamente, la medición de la energía de radiación electromagnética no coherente. Su campo abarca todas las longitudes de onda del espectro electromagnético (frecuencias entre 3×10^{11} y 3×10^{16} Hz o longitudes de onda de entre 0,01 y 1000 micrómetros), al contrario que la fotometría que solo se ocupa de la parte visible del espectro, la que puede percibir el ojo humano.

Describe la transferencia de energía (o energía por unidad de tiempo, potencia) desde una fuente a un detector, admitiendo la validez del modelo geométrico de trayectorias y la conservación de la energía a lo largo de un tubo de rayos.” (Gómez González, P., 2006. GUÍA BÁSICA DE CONCEPTOS DE RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA.)

1.7 Mantenimiento e inspección de parques fotovoltaicos en la actualidad

El mantenimiento y la inspección son fichas claves en el correcto funcionamiento de los parques fotovoltaicos. Antes que todo debemos saber y tener presentes las fallas principales de los elementos a inspeccionar que son los paneles.

Las fallas más comunes en las celdas solares son la decoloración de la celda, la degradación de del anti reflejante, la formación de puntos calientes, la introducción de humedad, la delaminación, la corrosión de las uniones, las microfracturas, las fallas por manufactura, (Delgadillo et al., 2019) la suciedad o sobras, problemas con el diodo bypass y degradación.

También podemos clasificar las fallas según como dice la norma IEC TS 62446-3 y se puede clasificar en la siguiente tabla 1:

Tabla 1 Clasificación tipo de fallas

Clase de anomalía (CoA)	1 (No hay anomalías)	2 (Anormalidad térmica)	3 (Anormalidad térmica que pone en riesgo la seguridad)
Acciones recomendadas	Ninguna acción inminente.	Comprobación de la causa, en caso de que sea necesario, corrección de esta anomalía en un plazo razonable.	Interrupción inmediata de la operación, verificando la causa y la rectificación en un plazo razonable.

Fuente: <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/50038/3560902038085UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ya teniendo claro los diferentes aspectos que se deben mirar y como se pueden clasificar los defectos o anomalías que se tengan el sistema, se procede a realizar el mantenimiento que permite verificar a tiempo las posibles fallas que se presente en los equipos que lo conforman, tales como: inversores, paneles solares, protecciones, conexiones, estructuras de soporte, sistema de control, baterías, conexión a la red, entre otros. Por otra parte la inspección consiste en realizar un levantamiento de la granja solar para verificar los factores “tales como: identificar y evaluar la curva de operación de los paneles según la radiación recibida, medir voltaje y corriente de salida del sistema según sus conexiones en serie y paralelo, realizar conexiones para corriente directa o corriente alterna, entre otras” (Rúa-Ramírez et al., 2021). Toda esta información termina siendo parte de una base de datos con el fin de tomar decisiones correctivas en caso de necesitarlo para la mejora de la instalación.

Actualmente, el método más extendido para la detección de fallos es la termografía, ya que las pérdidas se producen, generalmente, a través de un incremento de temperatura que puede ser

detectada mediante una cámara termográfica de mano operada por el personal de mantenimiento (Segovia Ramirez et al., 2018).

1.8 Utilización de drones y radiometría en la industria

Como se había mencionado con anterioridad, el uso de cámaras termográficas en la industria tiene bastantes aplicaciones y son usadas para detectar principalmente problemas y daños causados físicos causados por el paso del tiempo

1.8.1 Aislamiento húmedo de techos

En la industria de la construcción el aislamiento de la estructura externa de un inmueble o edificio es vital, ya que la filtración de la humedad causada por la lluvia puede crear focos de condensación o zonas de humedad y conllevar a malestares para los habitantes de dicha construcción, además de conllevar problemas estructurales al inmueble que pueden acarrear grandes consecuencias, para ellos se ha optado por realizar un chequeo de estas áreas con cámaras térmicas, permitiendo observar patrones térmicos, debido a que la radiación del sol calienta las zonas donde se carece de material aislante y produce focos de calor.

Cuando las construcciones son de gran envergadura o las zonas de aislamiento esta situadas en los techos de las instalaciones la industria ha optado por la utilización de drones que junto con una cámara térmica toman las imágenes para posteriormente ser estudiadas. Normalmente dicha tarea es realizada por una cuadrilla de trabajo que junto con pistolas térmicas se dirigen al lugar para realizar la evaluación, dicha tarea es bastante tediosa ya que por lo general debe ser realizada en la noche y el riesgo que supone subir a estos lugares es alto y el tiempo que conlleva igual.

La implementación de drones equipados con cámaras térmicas hace de la inspección una tarea más simple que conlleva un menor tiempo, con la información captada un equipo lee los resultados y procede a aplicar la capa de aislamiento donde es necesario. (Zhang, J., Jung, J., Sohn, G., Cohen, M., 2015, Thermal infrared inspection of roof insulation using unmanned aerial vehicles)

1.8.2 Aplicación de la termografía en examen de equipos eléctricos

El uso de cámaras térmicas o termográficas en el ámbito de la energía eléctrica es comúnmente utilizado para el monitoreo de equipos de potencia elevada, que regularmente se encuentran en zonas de difícil acceso o tomar mediciones de los mismos conlleven un peligro para el personal, en especial en transformadores o resistencias térmicas, debido a que dichos equipos en su normal operación manejan tensiones elevadas y tienden a sobrecalentarse, lo que puede ocasionar errores en el funcionamiento o producir accidentes.

Algunos de los errores presentados en los transformadores de potencia solo son visibles cuando el equipo se encuentra en funcionamiento, el monitoreo de dichos equipos nos permite observar el sobrecalentamiento o por el contrario las partes frías dentro de los equipos, lo que supone un mal funcionamiento de este, permitiendo realizar una corrección oportuna y evitando así accidentes o pérdidas monetarias. (C. Szafron Wroclaw University of Technology)

1.8.3 Sistema de detección automática de módulos fotovoltaicos deteriorados mediante dron con cámara térmica

El correcto funcionamiento y la detección de fallas en paneles solares que constituyen granjas fotovoltaicas de gran área es uno de los aspectos más importantes y tediosos de este tipo de sistemas generadores de energía, existen varios factores que pueden afectar el correcto funcionamiento de los paneles solares y hasta conllevar pérdidas en la producción energética dada la conexión de los paneles, para ello es necesario realizar regularmente una supervisión exhaustiva de cada uno de los paneles instalados, factores como la suciedad, la estructura y hasta la ubicación del panel pueden conllevar pérdidas en la producción.

Para ello en la industria se ha implementado la idea de realizar dichos controles mediante drones equipados con cámaras térmicas que permitan evidenciar estos errores para ser solucionados en el menor tiempo posible de manera eficaz sin generar un mayor traumatismo, normalmente dichos controles son realizados por un operario que junto a una pistola térmica debe acercarse a cada uno de los paneles para tomar una medición de los mismo, lo que hace que este sea un proceso exhausto, que tome bastante tiempo realizarlo y que sea una actividad de alto riesgo, debido a la ubicación donde los paneles son instalados.

Para ello el dron junto con la cámara térmica realiza un paneo sobre los paneles solares instalados, tomando así una serie de imágenes que luego serán analizadas para detectar anomalías y que posteriormente serán solucionadas por el equipo de mantenimiento.

1.9 Radiometría en la industria

Obtención de imágenes térmicas y termo electrónicas mediante Radiometría Fototérmica Infrarroja.

Cuando a un cuerpo absorbente se le hace incidir una radiación monocromática o policromática modulada, se produce un cambio también modulado de la temperatura de su superficie, como resultado del proceso de absorción de radiación y la conversión no radiativa de energía. Esta energía emitida por el cuerpo puede ser observada a través de la emisión de radiación de cuerpo negro de la superficie y del bulto (radiación de Planck). Midiendo las variaciones de emisión de cuerpo negro es posible obtener información sobre el espectro de absorción, propiedades físicas (térmicas y electrónicas) entre otras.

Para obtener una imagen radio térmica de alta definición, es necesario tener un haz de estas dimensiones, lo que permite usar un modelo radiométrico tridimensional que tiene en cuenta que la región de generación de la señal sea mucho menor que la longitud de difusión de portadores. La señal obtenida posee dos canales de salida: la amplitud y la fase, lo que permite obtener imágenes térmicas y termo electrónicas (multicanal)." (Gómez González, P., 2006. GUÍA BÁSICA DE CONCEPTOS DE RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA.)

Basados en el anterior trabajo podemos evidenciar que la radiometría fototérmica infrarroja en el dominio de la frecuencia es utilizada en la industria para determinar de manera visual los parámetros termoeléctricos, establecer una metrología para la obtención de imágenes térmicas para realizar una inspección de elementos semiconductores alojados en equipos sin necesidad de un contacto directo. Además de permitir identificar dislocaciones y densidades bajas de

defectos en materiales metálicos que pueden conllevar problemas al momento de instalar o de operar un equipo.

1.10 Utilización de drones como solución integrada

1.10.1 Etapas vuelo

1.10.1.1 Procedimiento de la termografía aérea

(Sánchez G José U, 2020) plantea en su trabajo “Inspección basada en Termografía Aérea para Plantas Fotovoltaicas situadas en Techos” que el proceso para realizar la inspección aérea de paneles solares debe depender o se debe dividir en 3 etapas, las cuales llamo pre-mapeo, mapeo y post mapeo.

1.10.1.2 Pre-mapeo

En esta etapa se debe contactar al cliente y tener todos los aspectos básicos e información técnica del lugar donde se va a realizar la inspección, plano, ficha técnica de los módulos y el archivo KMZ del lugar, lo segundo que se debe hacer es averiguar donde se va a realizar la inspección, si es una zona poblada o no y tramitar todos los permisos necesarios, luego de ello se debe contactar con una estación meteorológica cercana al lugar para indagar las condiciones ambientales, en caso de que no se encuentren estaciones cercanas se deben llevar los elementos para hacer una evaluación in situ para verificar que se cumplan las condiciones, se debe planear las rutas de vuelo y el plan de acción para llevar una inspección eficiente y por último se debe realizar un Check List de las acciones a realizar durante la inspección y los elementos necesarios para realizarla.

1.10.1.3 Mapeo

Durante la inspección se debe realizar la verificación de los aspectos técnicos entregados por el cliente con anterioridad, se debe realizar la vista de la planta y proceder a realizar la configuración tanto de la cámara como de la aeronave, luego de esto se deben programar las rutas de la aeronave y por ultimo al terminar el vuelo y la toma de las imágenes se debe realizar una validación de las imágenes para descartar falsos positivos, comparando la imagen visual con la IR o por mediciones adicionales de las curvas IV a módulos.

1.10.1.4 Post mapeo

Al realizar el análisis de los resultados obtenidos se deben identificar los módulos que sean sospechosos o tengan lecturas diferentes, para ello se realizara un análisis cuantitativo y cualitativo detallando el ΔT de los módulos sospechosos y el área de la temperatura anormal en el módulo, realizar un diagnóstico con las imágenes térmicas y las imágenes tomadas en la inspección, curvas IV y la estimación de perdida de potencia y rendimiento.

Realizar un informe donde se ubiquen los módulos sospechosos o con daños en un plano con la descripción de las fallas encontradas y la gravedad, para que el cliente pueda realizar las correcciones o cambios necesarios.

1.11 Estándares y reglamentación de vuelo de un dron en Colombia

En Colombia, la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil – UAEAC o Aerocivil es la autoridad del espacio aéreo colombiano, líder en los cumplimientos que demanda la OACI. (Organización de la aviación civil internacional)

La reglamentación de UAS (drones) fue incorporada a los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia en el Apéndice 13 de la parte 91. (RAC 91), por medio de la Resolución No. 4201 de 2018.

La Resolución No. 04201 del 27 de Diciembre de 2018, tiene como propósito ampliar la información e impartir instrucciones de cumplimiento en referencia a los requisitos de Aeronavegabilidad y Operaciones necesarios para inscripción de explotadores, operadores y equipos, y para solicitar permiso para realizar vuelos de UAS, de acuerdo a lo establecido en el apéndice 13 de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC 91), en lo relacionado con la realización de operaciones de Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia - RPAS en Colombia. (Aeronautica Civil de Colombia, 2018)

En el apéndice 13 del RAC 91, la UAEAC (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, Aeronáutica Civil o Aerocivil) categoriza los sistemas aéreos no tripulados con base al lugar y condiciones específicas de cada vuelo, es por ello que se da lugar a tres clases de sistemas aéreos no tripulados con base en el riesgo que suponen.

- Clase A: Operaciones con un riesgo mínimo que no requieren autorización de la UAEAC con aeronaves que no superen los 10 kg de peso máximo al despegue
- Clase B: operaciones que requieran autorización y la aeronave no supere los 150 kg de peso máximo
- Clase C: para aeronaves no tripuladas que superan los 150 kg y para las que solamente se autorizan, de momento, vuelos experimentales.

2 Análisis de restricciones

2.1 Ambientales:

Una cámara detecta la radiación, y la representa en forma de temperatura aparente, para los módulos fotovoltaicos la temperatura aparente, está dada por la radiación reflejada por el entorno como las nubes, por la radiación desde la estructura donde se encuentre ubicado, y la transmisión del panel y la radiación que emite el módulo fotovoltaico. Es por lo anteriormente mencionado, que, al momento al momento de configurar la cámara, y el software para realizar la medición, aspectos como la superficie o el ambiente del lugar donde se encuentran los módulos a inspeccionar deben ser considerados para obtener temperaturas reales y no aparentes.

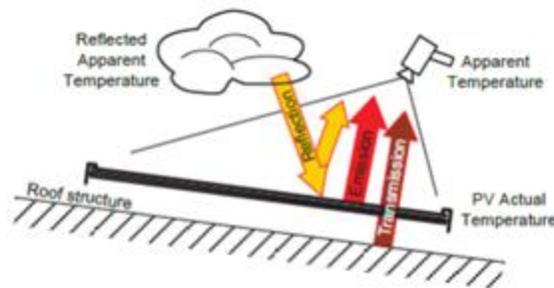


Ilustración 12

Fuente: Tomado de Barrio Andrés, M. (Dir.). (2018). *Derecho de los drones*. Wolters Kluwer España. <https://elibro-net.biblioteca.universidadean.edu.co/es/ereader/bibliotecaean/107194?page=39>

2.1.1 Emisividad:

Es la eficiencia con la que un cuerpo emite radiación y es dependiente del material

Temperatura reflejada:

Es la radiación térmica que se genera en otros objetos diferentes al que se está realizando la medición y se ve reflejada en este, proporcionando lecturas erróneas.

2.1.2 Angulo de posición del lente con la superficie:

Dado a que las superficies de los módulos están construidas en vidrio, la realización de las lecturas es muy compleja, dado que los reflejos en estos pueden generar falsos positivos a la hora de realizar una medición y afecta a los dos factores antes mencionados.

2.1.3 Irradiancia:

Es la cantidad de potencia incidente por unidad de superficie, en este caso de luz solar.

2.1.4 Humedad relativa:

Es la cantidad de agua presente en el ambiente, esta humedad afecta a los paneles debido a que absorbe y dispersa la energía térmica, afectando la lectura de la cámara y permitiendo que se pasen errores por alto, para ello es mejor no realizar lecturas en momentos cercanos a lluvias anteriores.

2.1.5 Velocidad del viento:

Este parámetro afecta directamente a la aeronave, debido a que puede afectar el vuelo y por efectos de turbulencia pueden causar difuminaciones en las imágenes, además de afectar al módulo por el fenómeno de convección que llevan el calor de un objeto a otro de menor temperatura hasta llegar a un equilibrio térmico.

2.1.6 Nubosidad:

Este aspecto puede afectar la lectura debido a que bloquea la radiación del sol que llegan a los módulos lo que afectan las lecturas haciendo que sean menores a las de un día de radiación alta.

2.1.7 Temperatura del aire atmosférico:

Esta temperatura está directamente relacionada con la temperatura reflejada de la que hablamos con anterioridad, debido a que en cuanto la temperatura ambiente sea mayor la irradiación también aumentara.

Parámetros	Limites
Irradiancia	Mínimo 600 W/m ² en el plano del módulo fotovoltaico para su inspección.
Velocidad del viento	Máximo de 4 Bft o 28 Km/h (Aprox 7,8 m/s).
Nubosidad (Cobertura de nubes)	Máximo 2 octas de cielo cubierto por cúmulos.
Soiling	Ideal que no haya o que sea lo más bajo posible. Se recomienda limpieza en el caso de existencia de excrementos de pájaros.

Ilustración 13 Condiciones ambientales de operación según IEC TS 62446-3

Fuente: Tomado de "Inspección basada en Termografía Aérea para Plantas Fotovoltaicas situadas en Techos"

2.2 Sociales:

Cada vuelo debe tener una planeación anticipada, y se debe realizar un estudio de las condiciones climatológicas y demográficas de la zona, debido a que el vuelo con UAS supone un alto riesgo, tanto para las personas que se encuentran en la zona objetiva, como para los elementos materiales. Este nivel de riesgo está dado en mayor medida por la alta probabilidad

de desplome del artefacto, ya sea por las condiciones climáticas, técnicas o el planeamiento de la maniobra.

Estas restricciones también son contempladas dentro de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC), en el Apéndice 13 de la parte 91, sin embargo, no hay lineamientos establecidos, puesto que, al momento de realizar una inspección y un sobrevuelo, se debe solicitar un permiso especial por parte de la UAEAC, en donde este órgano evaluara todas estas variables.

Es válido señalar; que no todos los vuelos necesariamente deben tener un permiso especial, debido al bajo nivel de peligro que supone la actividad, por el bajo peso del dispositivo y por la tarea a realizar.

En caso de que se causen lesiones a personas, o daños a la propiedad privada, la aeronave colisione con otra UAS, o se generen daños a la infraestructura crítica del país, como torres de energía, antenas, entre otras. se debe reportar a la Secretaria de Seguridad Operacional y de la aviación civil (SSOAC).

Las UAS, aunque no generan mucho ruido, suponen una molestia en zonas urbanas o donde se encuentra una alta concentración de población, ya que representan una violación a la intimidad.

2.3 Capacidad de fabricación:

En este apartado se tomarán en cuenta todas las variables necesarias para brindar el servicio, ya que no ofrecemos un artículo. Debido a que la toma de fotografías debe ser controlada, y el vuelo debe ser lo más preciso posible, para que los resultados sean de la mejor

calidad posible, para de esta manera generar datos importantes para los vuelos futuros de mantenimiento. Es necesario tener algunas consideraciones que podrían afectar el proceso de la toma de imágenes, debido a que es una actividad para realizar en zonas abiertas, y poco controladas, por lo cual existen factores técnicos y externos a considerar, para ello hemos tomado algunos apartes a resaltar, basados en el trabajo de (Sánchez G José U, 2020).

2.4 Aspectos técnicos

2.4.1 Lente de la cámara térmica:

Para la toma de imágenes, la lente de la cámara necesita de sensores, los cuales se clasifican en dos tipos:

2.4.2 Refrigeradas:

Se trata de equipos que tienen un sensor generador de imágenes de radiación térmica, que se encuentra en una unidad sellada al vacío, y está integrado a un refrigerador que opera a temperaturas muy bajas, este proceso es conocido como enfriamiento criogénico.

2.4.3 No refrigeradas:

Estos equipos usan un sensor micro bolómetro, que no requiere enfriamiento, fabricado con óxido de vanadio, estos son mucho más fáciles de fabricar y su costo es menor, pero no tienen la misma sensibilidad térmica que los equipos refrigerados, por lo que no son prácticos para usos en largas distancias ni con aplicaciones que requieren niveles de detalle especial.” (Prado, I., 2011. Tecnología rmds Cámaras térmicas aplicadas a la seguridad)

2.4.4 Cámaras refrigeradas vs no refrigeradas:

Las cámaras termográficas refrigeradas no son usadas normalmente en aplicaciones fotovoltaicas, debido a su alto costo en comparación con las cámaras no refrigeradas, y la complejidad del sistema de enfriamiento, lo que hace que tenga una mayor demanda de energía, y se agote más rápido la batería en comparación con un equipo no refrigerado. Por otro lado, la cámara requiere de un tiempo antes de entrar en servicio luego de conectarse.

Al juntar “h” número de bolómetros en el eje horizontal y “v” bolómetros en el eje vertical se forma una malla de bolómetros que representa una imagen termográfica de $h \times v$ pixeles [5], siendo esta la resolución de la cámara termográfica. En otras palabras, los pixeles de la cámara están elaborados con materiales que cumplen la función de estos bolómetros, siendo los píxeles, los puntos de adquisición de datos para mediciones térmicas (FLIR Systems, “Cámaras térmicas de alta velocidad: la velocidad necesaria)

2.4.5 Campo de visión (FOV):

Es el área captada por el sensor o detector, por lo general se entrega en grados $H^\circ \times V^\circ$, para convertirlo en unidades de longitud se debe usar la siguiente formula:

$$FOVH \text{ o } V[mm] = 2 * Distancia \text{ de trabajo}[mm] * \tan \left(\frac{FOV^\circ H \text{ o } V}{2} \right)$$

2.4.6 Campo de visión instantáneo (iFOV):

Es también conocido como resolución espacial, es el objeto más pequeño que se puede detectar a una distancia establecida, este se representa en mrad Para calcular la resolución espacial se usa a siguiente ecuación:

$$iFOV[mm] = \frac{iFOV[mrad] * Distancia\ de\ trabajo[mm]}{1000}$$

Lo anterior nos dará el tamaño de un píxel a cierta distancia, para el iFOV es la equivalencia del término de distancia de muestreo en tierra (GSD).

2.4.7 Distancia de muestreo en tierra (GSD):

Sus unidades son cm/píxel, y representa la distancia entre el centro de dos pixeles consecutivos medidos en el suelo, dependen de la altura de vuelo y las especificaciones de la cámara. Este término es más usado en la industria para referirse a los centímetros por píxel.

2.4.8 Masa máxima de despegue:

Para ello se tiene en cuenta el peso mismo del dron, su estructura completa junto con el peso de la batería, y la capacidad de carga en gramos para realizar el despegue, hay que tener en cuenta que a un mayor peso total el consumo de energía es mayor, por lo que el tiempo de operación en aire es menor.

Se destacan 4 subcategorías:

- Drones de hasta 250 gr de MTOW (aeronaves de juguete)
- Drones de hasta 2kg de MTOW (Operaciones más allá del alcance visual del piloto requieren autorización administrativa)
- Drones con una MTOW superior 25 kg de uso civil (requieren autorización administrativa)
- Drones cuya MTOW excede los 50 kg (en el campo civil no es de aplicación real, salvo excepciones) (Barrio Andres, 2018, pág. 40)

2.4.9 Altura de vuelo:

Esta altura es de gran importancia, como observamos anteriormente, porque tiene implicación con el GSD, ya que depende de ángulo en la que esté la cámara apuntando, para ello se recomienda que el GSD calculado sea con base a que una celda de un módulo sea abarcada por 5x5 píxeles, por lo que hay que considerar el tamaño de las celdas, según la IEC TS 62446-3, para la cual el estándar es de 3cm/píxel, también la literatura indica que para tener imágenes de calidad se debe estar en un rango de 3 a 5 cm/píxel. (S. Gallardo-Saavedra, L. Hernandez-Callejo, and O. Duque-Perez, “Image resolution influence in aerial thermographic inspections of photovoltaic plants,”)

2.4.10 Velocidad de vuelo:

Cuando las imágenes se toman en movimiento la velocidad máxima para tomar imágenes de calidad debe ser menor a los 3m/s según la IEC TS 62446-3, si las imágenes son tomadas con la aeronave quieta aspectos como la turbulencia, los vientos, la vibración de los rotores y el movimiento inherente de la aeronave hace que se presente efectos de difuminado en las imágenes, por lo cual se debe reducir al máximo estos aspectos.

2.4.11 Sensibilidad térmica (NEDT):

Es la diferencia de temperatura mínima que la cámara puede medir en presencia de ruido proveniente de los circuitos electrónicos del módulo, este es un parámetro técnico de la cámara y entre menor sea la sensibilidad permite la detección con mayor precisión.

2.4.12 Superposición o traslape (overlap):

Es utilizado en la planificación del vuelo para la proyección del cielo y la toma de imágenes cada cierta distancia, es tomada a través de un software o aplicación de vuelo, es dividida en superposición lateral o Side Overlap, que se refiere al porcentaje de superposición entre tramos de vuelo y superposición frontal o Front Overlap, que se relaciona entre el porcentaje de superposición entre una imagen y la siguiente, dentro de una misma ruta de vuelo.

2.4.13 Software:

Para la correcta programación tanto de la cámara, como de la UAS, es necesario contar con aplicaciones que nos permitan realizar estas tareas, para ello existen gran variedad de ellas, sin embargo, basándonos en los modelos de cámara y UAS hemos escogido las siguientes aplicaciones que son las recomendadas por los fabricantes:

- DJI GO 4: Es utilizada para configurar las actualizaciones de software y registrar las rutas
- DJI GS Pro – DJI pilot: Se utiliza para la generación y configuración de las rutas de vuelo, la primera es usada para sistemas IOS y la segunda en caso de utilizar un sistema Android. En estas aplicaciones podemos configurar los parámetros de vuelo como la velocidad, la altura y el overlap, estas aplicaciones nos permiten programar un plan de vuelo automático, sin embargo, todo el tiempo este debe ser monitoreado por el operador de las UAS, y de igual manera los resultados obtenidos. Esta aplicación también nos permite la opción “return to home” que básicamente nos permite que la UAS vuelva al mismo punto de partida de manera automática.

- DJI XT PRO: Nos sirve para configurar la cámara termográfica en aspectos como el rango de temperaturas de las lecturas, la paleta de colores. Que para nuestro caso será White hot, debido a que nos permite tener un mejor contraste

2.5 Éticas:

- Las aeronaves tripuladas tienen una prelación sobre las UAS, en caso tal de compartir espacio aéreo con una unidad tripulada, se debe retornar la aeronave o realizar un aterrizaje de manera inmediata.
- Al momento de realizar sobre vuelos en lugares con población civil, se deben delimitar muy bien el área de vuelo, debido a que estas aeronaves al tener cámaras incorporadas con un buen rango, representan una violación a la intimidad de las personas.

2.6 Salud y seguridad:

Todos los aspectos mencionados en el referente teórico, y el proceso que se debe llevar a cabo antes y durante el procedimiento de vuelo son importantes, para garantizar el bienestar y seguridad tanto del equipo de trabajo, como de las personas que se encuentren en las instalaciones en el momento de realizar el procedimiento. Algunos de los aspectos más relevantes son:

- Realizar un completo estudio de las condiciones climáticas y todas las características del lugar donde se va a realizar la maniobra para planear posibles procesos en caso de necesitarlo.

- Se debe tener un plan de vuelo detallado, estimar el tiempo necesario y el consumo de energía, para así llevar la cantidad de baterías necesarias, y que la UAS no se quede sin batería en vuelo, lo que puede ocasionar el desplome de este y causar un accidente.
- Se debe realizar una revisión exhaustiva de los elementos de cuidado especial, como la durabilidad y calidad de las baterías, para asegurar el tiempo de vuelo estimado.
- La maniobra y los aspectos de esta deben ser informados a todo el personal, tanto de la empresa contratista como de la contratada, y de la comunidad colindante de ser así, además de llevar un riguroso seguimiento de la misma.

2.7 Políticas:

2.7.1 Restricciones Nacionales

Además de las restricciones ya planteadas en el marco de referencia, existen algunas restricciones directamente para Colombia, esta normatividad se encuentra en continuo cambio ya que los vuelos con UAS son relativamente nuevos.

Un aspecto relevante a tener en cuenta en la actualidad dada la coyuntura generada por la pandemia del COVID 19, es la tomada por el gobierno, el cual ha restringido las actividades de vuelo de las UAS o drones, permitiendo solo las actividades para los servicios de salud, las labores que adelantan las misiones médicas, la revisión y atención de emergencias, afectaciones viales y el funcionamiento de infraestructura crítica, esta decisión fue tomada el 01 de abril del 2020, y tiene vigencia indefinida hasta que se tome nuevas decisiones.

Para ámbitos generales diferentes a los ocasionados por la pandemia, la aeronáutica civil en su función de ente rector planteo la reglamentación de UAS (drones), la cual fue incorporada a los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia en el Apéndice 13 de la parte 91.

(RAC 91), por medio de la Resolución No. 4201 de 2018, estas restricciones están dirigidas para actividades civiles, algunas de estas son:

- Cualquier actividad que violente las normas establecidas en los RAC (Reglamentos Aeronáuticos de Colombia), constituirá una infracción sancionable bajo la premisa de violación del espacio aéreo.
- Las autoridades de vigilancia podrán suspender o impedir toda actividad con drones, e incautar el dispositivo de ser necesario, de acuerdo con el Código Nacional de Policía y Convivencia descritas en el numeral 10 del artículo 2146 y 149.
- Debido a que la clasificación de los vuelos es específica para cada maniobra ya que dependen de las condiciones de vuelo y del lugar donde se va a realizar, nuestros vuelos se podrían clasificar en clase A (Abierta) y clase B (regulada), factores como el peso de la aeronave no tienen gran impacto, ya que se planea usar artefactos con un peso menor a los 10 Kg
- Sin embargo, para efectos del proyecto, se tendrán en cuenta las regulaciones para UAS clase B, ya que estas son reguladas, y deben cumplir ciertas restricciones.

“Limitaciones de operación UAS clase B:

- La UA deberá tener un MTOW de hasta 150 kg.
- La UA no deberá exceder, en su velocidad, de 100 MPH (87 kt o 160 km/h o 44 m/seg).
- El operador deberá mantener la aeronave no tripulada en el alcance de línea de vista, en un radio máximo de operación de 750 m horizontales durante todas las fases del vuelo. Si la pierde, deberá interrumpir inmediatamente la operación.

- Todo vuelo deberá efectuarse a una altura no superior de 400 ft (123 m AGL) sobre tierra o sobre agua.
- Las condiciones de visibilidad no deberán ser inferiores a 5 km, medidos desde la ubicación de la estación de control del UAS.
- La distancia mínima de las nubes respecto de la UAS no podrá ser menor de 500 ft (150 m).
- No se podrá operar desde un aeródromo o en sus proximidades dentro de un radio de 9 km (4,8 NM) medidos desde el ARP.
- No se podrá operar desde un helipuerto o en sus proximidades dentro de un radio de 3 km (1,6 NM) medidos desde el ARH.
- Cualquier operación aérea que implique trabajos aéreos especiales diferentes de la simple captura de imágenes, fijas o en movimiento, requerirá de permiso especial de la UAEAC.
- No se podrán realizar operaciones de búsqueda y salvamento (SAR) o similares que entorpezcan las ejecutadas por las autoridades y organismos de socorro o sin la debida coordinación previa con ellos.
- No se podrán realizar operaciones al interior de una zona prohibida, restringida, peligrosa o de entrenamiento del espacio aéreo publicada por la UAEAC sin contar con la previa autorización de la DSNA, dependencia que coordinará previamente con la AAAE cuando ello sea pertinente.
- Una persona solamente podrá operar un UAS a la vez, excepto para los casos en que la UAEAC autorice operaciones tipo enjambre.

- Excepto cuando se trate de operaciones de aspersión agrícola debidamente autorizadas, no deberá arrojarse objeto alguno desde la UA estando en vuelo.
- No se podrán transportar animales. Sin embargo, la UAEAC podrá autorizar el uso de UAS en tareas de agronomía en los que se utilicen cierto tipo de insectos vivos para el control de plagas.
- No se podrán realizar operaciones autónomas, con excepción de aquellas autorizadas de conformidad con el numeral anterior.
- No se podrán transportar materiales explosivos, corrosivos, de riesgo biológico, armas o cualquier tipo de mercancía considerada como peligrosa o prohibida, con excepción de las baterías requeridas para la operación.
- No se podrán realizar operaciones dentro de un radio de 2 km (1,1 NM) alrededor de cualquier lugar donde se encuentre el Presidente de la República u otros Jefes de Estado.
- No se podrán realizar operaciones dentro de un radio de 1 km (0,6 NM) alrededor del perímetro de bases militares o de policía, cárceles, infraestructura crítica o de cualquier aeronave tripulada en operación.
- No se podrán realizar operaciones a menos de 3,6 km (2 NM) de áreas fronterizas ni traspasar límites fronterizos con Estados vecinos.
- En aplicación de las reglas generales sobre el derecho de paso y prevención de colisiones, una UA siempre deberá ceder el paso a cualquiera otra aeronave tripulada que esté usando el mismo espacio aéreo.” (Reglamentos Aeronáuticos de Colombia, 2020)

- Para llevar a cabo la operación de aeronaves no tripuladas como piloto, operador o explotador de UAS, se debe realizar un curso de no menos de 50 horas en una institución de la aeronáutica civil donde conste que curso y aprobó con éxito.

2.8 Generación de posibles soluciones

Dadas las medidas de contingencia tomadas por la coyuntura generada por el Covid-19, no se logró realizar un trabajo experimental, por esta razón nos basamos en otras investigaciones, donde el trabajo realizado si fue experimental, algunos de estos estudios experimentales son:

- “Aerial Solar Thermography and Condition Monitoring of Photovoltaic Systems” (Denio, 2011) en el cual se encontro un experimento del monitoreo de imágenes termográficas aéreas en una instalación fotovoltaica de 858 kW, localizada en Portland, Oregon, EUA. En este informe se realiza un estudio de acerca de las imágenes termográficas aéreas captadas desde un avión y se comprueba que dicha práctica es, además de necesaria, bastante efectiva para detectar anomalías térmicas preventivamente.
- “Light Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Cooperative Inspection of PV Plants” (P. B. Quater, 2014) En el cual ilustran un monitoreo con drones y cámaras que proporcionan tanto imágenes reales como térmicas, en una planta fotovoltaica de 200 kW, con 810 paneles fotovoltaicos en el norte de Italia.
- “Planning for PV plant performance monitoring by means of unmanned aerial systems (UAS)” (Grimaccia, 2014) en este documento se diseña un experimento en el cual se predefine el plan de vuelo de los drones sin necesidad de un operador, sino de una programación con el GPS, este experimento se realizó en una planta fotovoltaica de 3

MW, de 12.600 paneles policristalinos ubicada en Italia. En este trabajo se resalta la influencia económica de una buena planeación de las rutas del vuelo.

- Por otra parte Lopez-Fernandez, L.; Laguela, S.; Fernandez, J.; Gonzales-Aguilera, D en su trabajo “Lopez-Fernandez, L.; Laguela, S.; Fernandez, J.; Gonzales-Aguilera, D” plantea la necesidad de fusionar las imágenes termográficas, RGB e imágenes digitales de intensidad captadas desde el dron para construir así una imagen fiable y facilitar la geolocalización de los paneles con averías, evaluando las patologías y defectos geométricos en los paneles, este trabajo fu llevado a cabo con un dron de bajo costo y dos cámaras, se llevó a cabo en la localidad de Gotarrendura en una planta fotovoltaica de 1.4 MW.
- Por otro(Aghaei et al., 2018) en su trabajo experimental “Inspection by Aerial Infrared Thermography in a PV Plant after a Meteorological Tsunami.” llevan a cabo un estudio experimental en una planta fotovoltaica de 3MW en Tubarão, estado de Santa Catarina, en el sur de Brasil, luego de ser afectada por un tsunami, para finalmente argumentar que las anomalías en los sistemas fotovoltaicos ha sido estandarizados y definidos en normas internacionales (IEC TS 62446-3).
- José Ramón Domínguez Barbadillo en su trabajo fin de máster “MANTENIMIENTO Y EXPLOTACIÓN DE UNA PLANTA FOTOVOLTAICA” nos relata algunos aspectos técnicos al momento de realizar la elaboración de las termografías, entre estas se encuentran que para la correcta toma de imágenes y datos la radiación del solo debe ser de 500 W/m² o superior. también indica que para una correcta medición ya respecto al ente de la Cámara el Angulo de observación debe estar entre los 5° y los 60° teniendo

especial cuidado en no generar sombra sobre los paneles y no tener una reelección de los rayos de luz solar.

- Los ingenieros Javier Iván Guacho Remache y Enzo Fernando Carrera Espinoza en su tesis de ingeniería “INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA DE LÍNEAS ELÉCTRICAS Y TORRES DE TELECOMUNICACIONES IMPLEMENTADO EN DRON DENTRO DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL” con una experimentación acerca de la inspección en elementos de la red de distribución realizan un informe de pruebas en el cual comparan las imágenes termográficas tomadas por un dron y las imágenes tomadas desde el piso por un técnico.



Ilustración 14

Fuente: Tomado de “<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redu/g/34607/1/B-CINT-PTG-N.373%20Guacho%20Remache%20Javier%20%20Iv%C3%A1n%20.%20Carrera%20Espinoza%20Enzo%20Fernando.pdf>”

En esta imagen se observa el rango de temperatura ambiente, el router a una temperatura de 20°C y las líneas eléctricas en un promedio de 18,7°C, estos parámetros indican su correcto funcionamiento.



Ilustración 15

Fuente: Tomado de “<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/34607/1/B-CINT-PTG-N.373%20Guacho%20Remache%20Javier%20%20lv%20%20C3%A1n%20.%20Carrera%20Espinoza%20Enzo%20Fernando.pdf>”

Sin embargo, se hacen tomas con ayuda del dron a una altura de 9 metros y una distancia a los dispositivos medidos de 1,5 metros, la medición con el dron es más exacta, se muestra el router con una temperatura de 23,4°C y las líneas eléctricas entre sus sensores con una temperatura promedio de 23°C.

- Como último caso, basados en la experimentación realizadas en la tesis de grado en Santiago de Chile para la Universidad Técnica Federico Santa María, sobre “Inspección basada en Termografía Aérea para Plantas Fotovoltaicas situadas en Techos” (1), en esta parte solo mencionaremos este ya que en los siguientes ítems acerca de la **Selección de la mejor alternativa y Especificaciones de ingeniería para la solución** vamos a ahondar mejor en esa tesis.

2.9 Selección de la mejor alternativa y Especificaciones de ingeniería para la solución

Para la selección de la mejor alternativa, parte de las soluciones potenciales determinadas en el apartado anterior, y la evaluación de estas a través de criterios claros de diseño y de

ingeniería, definidos por el grupo de investigadores¹, traemos a mención la tesis de “Inspección basada en Termografía Aérea para Plantas Fotovoltaicas situadas en Techos” donde explica que el método experimental implementado, donde se dividió en 2 etapas: la primera consistió en las pruebas y verificación de parámetros, para una instalación de paneles solares ubicados en techo, y la segunda etapa consistió en un experimento en el cual, se utilizó vidrio para verificar y establecer medidas de error, al usar métodos termográficos. Cabe resaltar que este proyecto se vio afectado por la pandemia producto del COVID-19, por lo cual la segunda etapa tuvo que ser realizada en vidrio y no en paneles. Para el estudio realizado en el techo se utilizó el software Flir Tools, y los siguientes equipos: quadróptero DJI Matrice 200 v1.0 y una cámara termográfica FLIR Zenmuse XT2 con las siguientes características:

¹ “Inspección basada en Termografía Aérea para Plantas Fotovoltaicas situadas en Techos”, Santiago de Chile para la Universidad Técnica Federico Santa María

Características	DJI Matrice 200
Modelo	Quadróptero
Peso (TB50)	3,8 kg
Número de baterías	2
Tiempo de Vuelo	13-27 min
Dimensiones	887×880×378 mm
Paracaídas	Opale Safetech ST60x
Peso Paracaídas	220 g
Peso máximo de soporte del paracaídas	4,9 kg
Peso total	4,6 kg
Máxima velocidad de ascenso	5 m/s
Máxima velocidad de descenso	3 m/s
Máxima velocidad de resistencia del viento	10 m/s
Rango de temperatura de operación	-20° a 45° C

Características	Zenmuse XT2
Resolución	336x256
Tamaño	118,02x111,6x125,5 mm
Rango de temperatura	-25 a 100 °C
Rango espectral	7,5-13,5 μm
Sensibilidad Térmica (NETD)	<0,05 K
Precisión	± 5 °C
FOV	25°x19°
iFOV	1,308 mrad
Constante mínima de captura	2 s
Formato de fotos	JPEG, TIFF, R-JPEG
Peso	588 g

Ilustración 16 Características equipos utilizados

.Fuente: <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/50038/3560902038085UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

La primera etapa se realizó en uno de los edificios de la universidad Santa María, donde se tiene una planta con paneles solares policristalinos con capacidad de 95kW. La planta está en funcionamiento desde el 2019, y este estudio se realizó 4 meses después de su instalación. Una condición importante para realizar este proceso consiste en cumplir la normal IEC 62446-3:2017, donde se estipula que la irradiancia que impacta en el panel debe ser mayor a 600W/m². Las pruebas fueron realizadas con el fin de determinar rutas de vuelo, que sean perpendiculares a los módulos, y que se puedan sobreponer de manera óptima para agilizar tiempos de inspección y calidad de imágenes. Luego de definir la ruta, se evaluó en 2 opciones distintas de software de mapeo, con la condición de considerar la altura de instalación de los paneles y en el otro no. Por último, se transfiere la información al software utilizado para procesar la base de datos, revisar y procesar la información.

La segunda etapa consistió en realizar pruebas de parámetros térmicos frente a distintas condiciones de vuelo. El montaje fue de manera experimental utilizando focos emisores de calor, los cuales se podrían mover a lo largo del vidrio instalado en una plataforma de madera ubicada de manera diagonal, como se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 17 Montaje experimental etapa 2

Fuente: <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/50038/3560902038085UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Adicional a los equipos utilizados en la etapa anterior, se manejó la toma de información por medio de una cámara termográfica manual Fluke TI 400, para verificar los valores iniciales del vidrio. Se procede entonces a verificar parámetros meteorológicos de acuerdo con la norma IEC IT 62446-3:2017 como: cúmulos en el cielo, velocidad del viento y humedad relativa. Se realizaron pruebas cambiando la altura paulatinamente de registro de información con los 2 posibles casos (con 1 foco o con 2), así como haciendo variaciones en el ángulo de toma de información, teniendo como punto de origen el dato tomado con la cámara termográfica manual, y con especial cuidado de no generar una ruptura del vidrio ocasionado por un choque térmico.

Los resultados obtenidos en esta tesis para la primera parte, representa la altura óptima de vuelo de acuerdo con los estándares de la norma anteriormente mencionada, junto con la correcta adaptación de las generación de imágenes, ubicando los porcentajes adecuados de superposición, considerando que una superposición vertical implicará información más

precisa, pero así mismo un mayor tiempo de inspección, mientras que la superposición lateral no tiene un óptimo y dependerá del cómo se quiere inspeccionar la planta, y el recorrido de vuelo establecido. En manera general se recomienda que los vuelos sean realizados de manera perpendicular a la ubicación de los módulos, y que el lado más largo de la fila quede alineado con el ancho de la imagen.

Respecto a la segunda parte del experimento, se logró comprobar que a medida que la altura crece, la calidad de la imagen y la temperatura registrada decrece, así como también comprobar los efectos de difuminado, dados como el máximo de la velocidad de vuelo de 3m/s establecido en la norma. (Mecánica et al., 2020)

2.10 Dimensionamiento de los componentes

En el apartado anterior, se describieron los equipos y/o componentes que se deben utilizar para una correcta y buena toma de información, aun así, fue superficial la descripción de estos, es por ello por lo que nos apoyaremos de las páginas de los fabricantes, para tener una mayor indagación de estos y así tener una mayor visión de todos los elementos que conforman los equipos.

2.10.1 Drone Matrice 200



Ilustración 18 Drone Matrice 200

Fuente: <https://www.dji.com/matrice-200-series>

Tabla 2 Especificaciones técnicas del drone.

Drone			
Modelo	M200	Modelo	M200
Dimensiones del paquete	31,1 × 15,4 × 11,4 pulgadas (790 × 390 × 290 mm)	Velocidad máxima de ascenso	16,4 pies / s (5 m / s)
Dimensiones (desplegadas)	34,9 × 34,6 × 14,9 pulgadas (887 × 880 × 378 mm)	Velocidad máxima de descenso	Vertical: 9,8 pies / s (3 m / s)
Dimensiones (plegado)	28,2 × 8,7 × 9,3 pulgadas (716 × 220 × 236 mm)	Máxima velocidad	Modo S: 51,4 mph (82,8 km / h)
Método de plegado	Doblado hacia adentro		Modo P: 38 mph (61,2 km / h)
Distancia entre ejes diagonal	25,3 pulgadas (643 mm)		Modo A: 51,4 mph (82,8 km / h)
Número de baterías	2	Techo de servicio máximo sobre el nivel del mar	3000 m (1,86 millas)

Peso (TB50)	Aprox. 3,80 kilogramos	Resistencia máxima al viento	39,4 pies / s (12 m / s)
Peso (TB55)	Aprox. 4,53 kilogramos	Tiempo máximo de vuelo (sin carga útil, con TB50)	27min
Peso máximo al despegue	6,14 KILOGRAMOS	Tiempo de vuelo máximo (sin carga útil, con TB55)	38min
Carga útil máxima (2 TB50)	Aproximadamente 2,34 kg (con dos baterías estándar)	Tiempo de vuelo máximo (carga útil completa, con TB50)	13min
Carga útil máxima (2 TB55)	Aproximadamente 1,61 kg (con dos baterías estándar)	Tiempo máximo de vuelo (carga útil completa, con TB55)	24min
Precisión de desplazamiento (modo P con GPS)	Vertical: $\pm 1,64$ pies (0,5 m) o $\pm 0,33$ pies (0,1 m, sistema de visión hacia abajo habilitado)	Modelo de motor	DJI 3515
	Horizontal: $\pm 4,92$ pies (1,5 m) o $\pm 0,98$ pies (0,3 m) Sistema de visión hacia abajo habilitado	Modelo de hélice	1760S
Velocidad angular máxima	Paso: $300^\circ / s$; Guiñada: $150^\circ / s$	Temperatura de funcionamiento	-4° a 113° F (-20° a 45° C)
Ángulo de paso máximo	Modo P: 30° (Sistema de visión hacia adelante habilitado: 25°) ; Modo A: 35° ; Modo S: 35°	Clasificación del IP	IP43

Tabla 3 Especificaciones técnicas de la batería del dron.

Batería (estándar)		Batería (opcional)	
Modelo	TB50	Modelo	TB55
Capacidad	4280 mAh	Capacidad	7660 mAh
Voltaje	22,8 V	Voltaje	22,8 V
Tipo de Batería	LiPo 6S	Tipo de Batería	LiPo 6S
Energía	97,58 Wh	Energía	174,6 Wh
Peso neto	Aprox. 520g	Peso neto	Aprox. 885g
Temperatura de funcionamiento	-4 ° a 113 ° F (-20 ° a 45 ° C)	Temperatura de funcionamiento	-4 ° a 113 ° F (-20 ° a 45 ° C)
Temperatura de almacenamiento	Menos de 3 meses: -4 ° a 113 ° F (-20 ° a 45 ° C)	Temperatura de almacenamiento	Menos de 3 meses: -20 ° C a 45 ° C
	Más de 3 meses: 72 ° a 82 ° F (22 ° a 28 ° C)		Más de 3 meses: 22 ° C a 28 ° C
Temperatura de carga	41 ° a 104 ° F (5 ° a 40 ° C)	Temperatura de carga	41 ° a 104 ° F (5 ° a 40 ° C)
Potencia de carga máxima	180 W	Potencia de carga máxima	174,6 W

Tabla 4 Especificaciones técnicas del control remoto del drone.

Control remoto			
Modelo	GL6D10A	Modelo	GL6D10A
Frecuencia de operación	2.400-2.483 GHz	Soporte para dispositivo móvil	Tableta o teléfono inteligente
	5.725-5.850 GHz	Ancho máximo del dispositivo móvil	170 mm
Distancia de transmisión máxima (sin obstáculos, sin interferencias)	2,4 GHz: 4,3 millas (7 km, FCC); 2,2 millas (3,5 km, CE); 2,5 millas (4 km, SRRC)	Potencia de salida	9 W (sin suministrar energía al dispositivo inteligente)
	5,8 GHz: 4,3 millas (7 km, FCC); 1,2 millas (2 km, CE); 3,1 millas (5 km, SRRC)	Temperatura de funcionamiento	-4 ° a 104 ° F (-20 ° a 40 ° C)
EIRP	2,4 GHz: 26 dBm (FCC); 17 dBm (CE); 20 dBm (SRRC)	Temperatura de almacenamiento	Menos de 3 meses: -4 ° a 113 ° F (-20 ° a 45 ° C)
	5,8 GHz: 28 dBm (FCC); 14 dBm (CE); 20 dBm (SRRC)		Más de 3 meses: 72 ° a 82 ° F (22 ° a 28 ° C)
Puertos de salida de video	USB, HDMI	Temperatura de carga	32 ° a 104 ° F (0 ° a 40 ° C)
Fuente de alimentación	Batería integrada	Batería	6000mAh 2S LiPo
Cargando	Cargador DJI	Fuente de alimentación USB	iOS: 1 A a 5,2 V (máx.); Android: 1,5 A a 5,2 V (máx.)
Capacidad de doble usuario	Conexión de host y esclavo		

2.10.2 Cámara Zenmuse XT2



Ilustración 19 Cámara Zenmuse XT2 en drone y sola.

Fuente: <https://www.dji.com/matrice-200-series>

Tabla 5 Especificaciones del cardán.

Cardán²	
Rango de vibración angular	$\pm 0,01^\circ$
Montar	Desmontable
Rango controlable	Inclinación: $+ 30^\circ$ a -90° Pan: $\pm 320^\circ$
Rango mecánico	Inclinación: $+ 45^\circ$ a -130° Panorámica: $\pm 330^\circ$ Giro: -90° a $+ 60^\circ$
Velocidad máxima controlable	Inclinación: $90^\circ / s$ Pan: $90^\circ / s$

² Cardán: Mecanismo que permite transmitir un movimiento de rotación entre dos ejes no alineados.

Tabla 6 Especificaciones técnicas de la cámara térmica.

Cámara térmica			
Cámara térmica	Microbolómetro VOx no refrigerado	Sensibilidad (NETD)	<50 mk @ f / 1.0
Formatos de visualización de video digital / FPA	640 × 512 336 × 256	Rango de escena (alta ganancia)	640 × 512: de - 25 ° a 135 °C 336 × 256: de - 25 ° a 100 °C
Zoom digital	640 × 512: 1x, 2x, 4x, 8x 336 × 256: 1x, 2x, 4x	Rango de escena (ganancia baja)	-40 ° a 550 °C
Tamaño de píxel	17 micras	Almacenamiento de archivos	Tarjeta microSD ³
Banda espectral	7,5-13,5 micras	Formato de foto	JPEG, TIFF, R- JPEG
Tasas de fotogramas completas	30 Hz	Formato de video	8 bits: MOV, MP4 14 bits: secuencia TIFF, SEQ ⁴
Velocidades de fotogramas exportables	<9 Hz		

³ La tarjeta SD, que se encuentra cerca de la lente, se usa para almacenar la secuencia TIFF y el video RAW infrarrojo SEO únicamente. El metraje de otro formato se almacenará en la otra tarjeta SD.

⁴ Se recomienda usar ImageJ para reproducir el video de secuencia TIFF y Flir Tools para reproducir video SEO.

Tabla 7 Especificaciones técnicas Cámara visual (normal).

Cámara visual			
Sensor	Píxeles efectivos CMOS de 1 / 1,7 " : 12 M	Modos de trabajo	Capturar, grabar, reproducir
Lente	Lente principal Enfoque a 8 mm FOV 57,12 ° × 42,44 °	Modos de fotografía fija	Disparo en ráfaga de un solo disparo (3/5 fotogramas) Intervalo (2/3/5/7/10/15/20/30 seg)
Zoom digital	1x, 2x, 4x, 8x (solo visualización en vivo)	Subtítulo de video	Soportado
Formatos de fotos	JPEG	Contra parpadeo	Automático, 50 Hz, 60 Hz
Formatos de video	MOV, MP4	Almacenamiento	Tarjeta MicroSD Capacidad máxima: 128 GB. Requiere UHS-3 Modelo recomendado: Sandisk Extreme 16/32 GB UHS-3 microSDHC Sandisk Extreme 64/128 GB UHS-3 microSDXC
Resoluciones de video	4K Ultra HD: 3840 × 2160 29,97p FHD: 1920 × 1080 29,97p	Sistema de archivos compatible	FAT 32 (≤32 GB), exFAT (> 32 GB)

Fuente de las tablas 4 a 6: <https://www.dji.com/matrice-200-series>

Fuente de las tablas 7 a 9: <https://www.dji.com/zenmuse-xt2/specs>

2.11 Análisis de costos del diseño

En la siguiente tabla se relacionan los precios (dados en dólares estadounidenses) de los elementos (drone, cámara, baterías adicionales, etc.) los cuales deben ser importados:

Tabla 8 Costos elementos.

Drone Matrice 200	\$ 6.000
Cámara Zenmuse XT2	\$ 10.500
Batería TB55 X4 (adicionales)	\$ 1.900
Hard case	\$ 723
MicroSD 2T X2	\$ 100
Management software - Basic x 1 año	\$ 1.000
Costos de nacionalización	\$ 5.144
Envío a Colombia	\$ 353
	\$ 25.720

Fuente: <https://www.dronenerd.com/>

Los costos de nacionalización se desglosan en la siguiente tabla:

Tabla 9 Costos Nacionalización.

Cotos de nacionalización	
IVA	19%
Intermediación aduanera (valor aproximado)	\$ 290
Arancel aduanero	5%

Fuente: <https://www.eshopex.com/co/tarifas/informacion-de-colombia/>

Se observa según la **tabla 2** el costo total de los elementos con valor de envío e importación es de \$25.720 dólares, que al cambio del día 26 de abril de 2020 equivaldría en pesos colombianos a un aproximado de \$95'000.000.

Además de las tablas anteriores, en la siguiente se relacionan costos del personal, certificados, funcionamiento, entre otros.

Tabla 10 Tabla de costos y cobros.

TABLA COSTOS				
CONCEPTO	ÍTEM	COSTO	UNIDAD	OBSERVACIONES
CERTIFICADO ACADÉMICOS PARA EL FUNCIONAMIENTO	Certificado de Vuelo de drones	\$ 1.800.000	Curso completo	Incluye el certificado.
	Certificado de termografía con drones	\$ 1.400.000	Curso completo	Incluye el certificado.
	Certificado de Fotogrametría	\$ 1.200.000	Curso completo	Incluye el certificado.
COSTOS DE FUNCIONAMIENTO	Registro en la Aeronáutica Civil			No se encuentra información del costo para los permisos.
	Servicio técnico	\$ 1.130.000	Revisión por 3 meses	Consiste en el mantenimiento preventivo y correctivo de los drones y sus accesorios, los cuales se empezarán a cobrar una vez acabe el tiempo de garantía de los equipos.
COSTOS DE PERSONAL	Ing de sistemas	\$ 4.500.000	Mes	Salario.
	Ing Eléctrico o en Energías	\$ 4.500.000	Mes	Salario.
	Piloto de dron	\$ 500.000	Jornada	Día de trabajo en sitio de inspección.
VIÁTICOS	Transporte Aéreo y/o terrestre	\$ 1.500.000	Inspección	Costos de transporte del personal puerta a puerta o desde el aeropuerto más cercano al sitio de inspección, con sus desplazamientos internos.
	Gastos de Hospedaje y alimentación	\$ 225.000	Día de inspección por personal en sitio	Consiste en el 5% del sueldo del personal por día.
GASTOS VARIOS	Permiso de vuelos	N/A		Se validan los permisos con el curso certificado de pilotaje de drones.

	Costos de papelería	\$ 500.000	Mes	Costo promedio de impresiones, memorias USB, CD y demás
	Licencia para software de planeación de ruta	\$ 11.241.000	anuales	Licencia de la misma marca de los drones y sus accesorios para la planeación de ruta.
	Licencia office	\$ 900.000	anuales	Incluye programa para el almacenamiento de datos
	Impuestos			Se definirán de acuerdo con el costo del proyecto, se debe tener en cuenta las retenciones, impuestos por gobernación, IVA, y demás.
TABLA COBROS				
CONCEPTO	ÍTEM	COBRO	UNIDAD	OBSERVACIONES
VISITA DE INSPECCIÓN	Cobro de inspección a campo solar	\$ 200.000	\$/MWh	

Fuentes tabla 10:

<https://www.ftaviation.com.co/curso-operador-de-drones/#:~:text=Valor%20del%20curso%3A%20%241'780.000>

<https://apd.org/cursos-y-entrenamiento-en-drones/>

<https://www.kapter.mx/>

<https://www.dronesencolombia.com/forum/main-forum/fotografia-aerea-colombia/712-cuanto-cobrar>

<http://dronebox.one/precios/precios-por-servicio-drones-uav>

<https://www.dronerds.com/catalogsearch/result/?o=software+matrice+200&q=software+matrice+200>

<https://www.multicopter.com/es/tienda-on-line/curso-piloto-dron/curso-termografia-drones/>

Dada la *tabla 10* y de acuerdo con la explicación descrita en cada uno de los ítems, es complejo determinar un presupuesto fijo ya que tenemos variables como los MW instalados de la planta, el área por abarcar, el tiempo de luz solar día, entre otras que se determinan según el proyecto y ubicación geográfica. Aun con lo anterior dicho, los valores determinados dan una gran expectativa y avance con lo que se debe contar para la ejecución de la inspección.

3 Conclusiones

- El auge de las energías renovables ha traído consigo un nuevo modelo de negocio, en la industria energética, en donde tiene que ir de la mano con la vanguardia tecnológica, que trae su constante desarrollo en todas sus fases, como lo son; su planificación, construcción y operación. En donde ir de la mano de la tecnología es el común denominador de crecimiento, en el caso de la energía solar, que "es la implementación energética de más continuo crecimiento", llevar a cabo soluciones que ayuden a solventar los problemas que presenta esta tecnología en la rutina operativa, tanto de una granja solar, como de una instalación a pequeña escala, es viable desde el punto de vista económico y operativo.

- A nivel regional, ante un acelerado cambio de la matriz energética, inclinado principalmente hacia la energía solar, implementada tanto en suelo (granjas solares) como en la parte superior de las edificaciones, se ve avocada la necesidad de tener más control por parte del instalador, en términos de eficiencia y protección de su instalación fotovoltaica, para lograr una vida útil óptima, principalmente de los módulos solares, los cuales son un elemento de alto costo e indispensables para su correcto funcionamiento. Es por lo anterior que la necesidad de estudiar la termografía aérea en las instalaciones fotovoltaicas surge como apoyo de cuidado y rendimiento energético.

- Un monitoreo realizado por un técnico conlleva diferentes variables, las cuales pueden jugar en contra a la hora de hacer una inspección, ya sea para prevenir o corregir fallos. Entre estas variables están: el tiempo para realizar un barrido efectivo del área a tratar, puesto que este cambia dependiendo el tamaño de la instalación. Aspectos como la altura de los paneles, y la disposición de estos, hacen que llevar a cabo este proceso dificulte la actividad de inspección, y aumente el

tiempo destinado, y el riesgo latente por parte del personal operativo para dar solución oportuna a una eventualidad presentada en el sistema fotovoltaico. Tiempo que es vital para la generación de energía eléctrica, ocasionando pérdidas que se ven reflejadas económicamente.

- Dado a la evolución que se ha tenido en la producción de energías limpias y el constante cambio de nuevas tecnologías que optimizan cada vez más los procesos, la tecnología para la inspecciones aéreas se encuentran en constante cambio, es por esto que para el proyecto planteado se acogido la mejor tecnología basándose en la mejor relación calidad precio, teniendo en cuenta que dicha tecnología debe ser actualizada en un par de años, debido a la evolución de la misma, otra de las barreras actuales que suponen la implementación de esta tecnología para la aerografía es el software, debido a que en el momento no hay un elevado número de estos y por ello el precio del licenciamiento es bastante alto y la renovación del mismo es anual, en síntesis la revolución tecnológica augura grandes avances tecnológicos en el campo de la aerografía aérea, sin embargo esto también supone retos para el proyecto debido a que se debe tener una constante evolución y adquisición de nuevos equipos.

- Según el estudio de costos realizado en el proyecto es un proyecto viable, el costo de los instrumentos necesarios es aproximadamente 95 millones de pesos, esto basándose en la mejor relación calidad precio encontrada en el mercado y suponiendo una vida útil de los mismo de 4 a 5 años, tiempo en el cual la inversión debe retornar, sin embargo, uno de los mayores retos que supone este proyecto es la inversión inicial, dado a que los instrumentos utilizados se deben importar lo que supone mayores costos, además de un mayor tiempo debido al envío de los mismos.

- Algunos de los costos adicionales a los fijos que están ligados a las herramientas, son los costos de viáticos y costos de transporte tanto del personal como de los elementos para realizar el debido proceso, estos costos varían de acuerdo a la ubicación donde se va a realizar la inspección, ya que en zonas de difícil acceso o que son alejadas de las zonas urbanas el valor del transporte puede variar, la cantidad de paneles y de megavatios hora que tenga la instalación a inspeccionar, ya que una mayor cantidad de paneles para inspeccionar supone una mayor inversión en tiempo y personal.

- Al ser la energía solar una constante de aumento de generación de energía eléctrica permite visualizar por medio de estudios prácticos anteriormente realizados, las posibilidades de implementar una solución tecnológica que es emergente en el mundo, y sin una notable presencia aun en Colombia. Como lo son los sistemas Dron- cámara térmica que confieren la capacidad de detectar fallos en los módulos fotovoltaicos, y vienen siendo aplicados en el ámbito de las energías renovables a nivel mundial.

- En la actualidad la inspección de paneles solares representa un sinnúmero de retos a los cuales el personal de mantenimiento en muchas ocasiones no está preparado para los mismos, esto sumado al difícil acceso de los lugares donde se encuentran instalados los paneles, así como el tiempo que supone recorrer grandes extensiones de terreno donde se encuentran generan muchos inconvenientes, el uso de los drones supone un gran progreso en esta área debido a que se sistematiza, se disminuyen los riesgos para el personal además de optimizar tiempos para la inspección.

- Los directos beneficiarios con los resultados de esta investigación son los generadores de energía solar a pequeña y a gran escala en Colombia, ya que por medio de este estudio se

permitiría al generador, ampliar la gama de soluciones para inspección, vigilancia y control de su instalación, y contemplar la reducción de riesgos innecesarios en el momento de llevar a cabo estas labores de mantenimiento.

- El valor teórico de esta investigación permitirá disminuir el desconocimiento de esta tecnología, por parte de los generadores de energía solar, obteniendo información vital para optimizar el mantenimiento e intervención de sus paneles, propiciando el conocimiento para dimensionar el funcionamiento de esta tecnología, con las condiciones tanto climáticas como geográficas del país, y servirá de apoyo para futuras investigaciones.

4 Recomendaciones

- Para una póstuma investigación se recomienda realizar un mapeo respecto a la estrategia usada en la actualidad para la inspección de paneles solares, y realizar estudios para determinar numéricamente tiempos, riesgos y problemas en el proceso, lo cual aportaría aún más a la hora de dictaminar el progreso que suponen los drones.

- Se recomienda a los investigadores ahondar en el tipo de tecnología y aparatos utilizados, debido a que como se concluye esta tecnología se encuentra en constante cambio y los elementos planteados pueden estar desactualizados en el momento que se realice esta investigación.

REFERENCIAS

Aghaei, M., Madukanya, U. E., Kirsten, A., & Oliveira, V. De. (2018). Fault Inspection By Aerial Infrared Thermography in a Pv Plant Fault Inspection By Aerial Infrared Thermography in a. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2018*, (May).
<http://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/203>

Barrio Andrés, M. (Dir.). (2018). *Derecho de los drones*. Wolters Kluwer España.
<https://elibro-net.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/es/ereader/bibliotecaean/107194?page=31>

Chris Henry, Sahadev Poudel, Sang-Woong Lee, & Heon Jeong. (2020). *Automatic Detection System of Deteriorated PV Modules Using Drone with Thermal Camera*. *Applied Sciences*, 10(3802), 3802. <https://doi.org/10.3390/app10113802>

Cucó Pardillos, S. (2017). *Manual de energía eólica: desarrollo de proyectos e instalaciones*. Valencia, Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de
<https://elibro-net.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/es/ereader/bibliotecaean/108718?page=2>.

Delgadillo, E. L., Enrique, L., Miranda, A., Rivera, A. V., Ubaldo, V., Sánchez, M., & Jiménez, D. S. (2019). *IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE PANELES SOLARES MEDIANTE VERILOGA*. 41(134), 357–367.

Domingo, A., 2011. *Apuntes de Transmisión del Calor*. [online] Oa.upm.es. Available at:
 <<http://oa.upm.es/6935/1/amd-apuntes-transmision-calor.pdf>> [Accessed 28 March 2021].

Donald Norris. *Construye tu propio cuadricóptero: potencia tus diseños con el Parallax Elev-8. Introducción a los cuadricópteros*, capítulo (McGraw-Hill Education: Nueva York, Chicago, San Francisco, Atenas, Londres, Madrid, Ciudad de México, Milán, Nueva Delhi, Singapur, Sydney, Toronto, 2014). <https://www-accessengineeringlibrary-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/content/book/9780071822282/chapter/chapter1>

Denio III, H. Aerial Solar *Thermography and Condition Monitoring of Photovoltaic Systems*. InfraMation 2011 Proceedings. IEEE. 2011.

Edwin Rúa-Ramírez, Iván Mendoza-Jiménez, Edison Torres-Suarez, Elkin Flórez-Serrano, & Juan Serrano-Rico. (2021). *Banco de pruebas didáctico para aprendizaje y medición del rendimiento de paneles solares fotovoltaicos*. Revista UIS Ingenierías, 20(2).

FERNANDO IGNACIO DE PRADA PÉREZ DE AZPEITIA. *La termografía infrarroja: un sorprendente recurso para la enseñanza de la física y la química*. Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 605–615, 2016.

Freitas, J. G. de, Carasek, H., & Cascudo, O. (2014). *Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura / Using infrared thermography to evaluate cracks on facades rendered with mortar and painting*. Ambiente Construído, 14(1), 57–73. <https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.1590/S1678-86212014000100006>

Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., & Duque-Pérez, Ó. (2019). *Analysis and characterization of PV module defects by thermographic inspection*. Revista Facultad de

Ingeniería Universidad de Antioquia, 93, 92–104. <https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.17533/udea.redin.20190517>

Grimaccia, F., Aghaei, M., Mussetta, M., Leva, S., & Quater, P. B. (2015). Planning for PV plant performance monitoring by means of unmanned aerial systems (UAS). *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 6(1), 47. <https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.1007/s40095-014-0149-6>

Gómez González, P., 2006. *GUÍA BÁSICA DE CONCEPTOS DE RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA*. [online] Laplace.us.es. Available at: <http://laplace.us.es/campos/optica/general/opt-guia2.pdf> [Accessed 28 March 2021].

Haluani, M. (2014). *La tecnología aviónica militar en los conflictos asimétricos: historia, tipos y funciones de los drones letales*. (Spanish). *Cuestiones Políticas*, 30(52), 46–89. <https://www.aerocivil.gov.co/autoridad-de-la-aviacion-civil/reglamentacion/rac> (Aeronautica Civil de Colombia, 2018) <https://www-ebooks7-24-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/?il=10416&pg=20> (Smith, Abbott, Van Ness, & Swihart, 2018)

IEC, IEC TS 62446-3:2018 “PHOTOVOLTAIC (PV) SYSTEMS –REQUIREMENTS FOR TESTING, DOCUMENTATION AND MAINTENANCE – Part 3: Photovoltaic modules and plants –Outdoor infrared thermography.” 2018.

International Electrotechnical Commission. (Junio de 2017). *Normativa IEC TS62446-3*. Ayscom Datatec. Obtenido de <https://ayscomdatatec.com/wp-content/uploads/2019/09/Normativa-IEC-TS-62446-3.pdf>

- Jhon Edwin Vera, Jhon Fredy Bayona, & Ricardo Sanchez Cayanza. (2014). *Seguimiento Del Punto De Maxima Potencia (Spmp) en Paneles Solares*. *Visión Electrónica*, 8(2), 49–53.
- Mecánica, D. De, Urbano, J., & Garay, S. (2020). “*Inspección basada en Termografía Aérea para Plantas Fotovoltaicas situadas en Techos.*”
- Nieto Carlier, R. González Fernández, C. y López Paniagua, I. (2014). *Termodinámica*. Madrid, Spain: Dextra Editorial. Recuperado de <https://elibro-net.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/es/lc/bibliotecaean/titulos/43934>.
- P. B. Quater, F. Grimaccia, S. Leva, M. Mussetta and M. Aghaei, "Light Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Cooperative Inspection of PV Plants," in *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 4, pp. 1107-1113, July 2014, doi: 10.1109/JPHOTOV.2014.2323714.
- Prado, I., 2011. *Tecnología rnds Cámaras térmicas aplicadas a la seguridad*. [online] Rnds.com.ar. Available at: <http://rnds.com.ar/articulos/036/RNDS_128W.pdf> [Accessed 27 March 2021].
- Rentadrone. (2020). *Webinar: Inspección de Plantas Fotovoltaicas con Drones*. Obtenido de Rentadrone Chile Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=JslGN7XG_DA
- Rogers, J. (2018). *The Origins of Drone Warfare: There is nothing new about uncrewed aircraft*. *History Today*, 68(4), 8–11.
- Rúa-Ramírez, E., Mendoza-Jiménez, I., Torres-Suarez, E., Flórez-Serrano, E., & Serrano-Rico, J. (2021). Banco de pruebas didáctico para aprendizaje y medición del rendimiento de paneles solares fotovoltaicos. *Revista UIS Ingenierías*, 20(2).

<https://bdbiblioteca.universidadean.edu.co/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsdoj&AN=edsdoj.30b8d8ba3f7142f0abd2a59724c4b419&lang=es&site=eds-live&scope=site>

Sánchez Pinzón, B. F., Tapia Ortega, J. R., & Rosa, P. (2016). *Drones: aspectos generales y aplicaciones sociales. Visión electrónica*, 10(2), 262-273.

<https://doi.org/10.14483/22484728.11769>

Segovia Ramirez, I., Pliego Marugan, A., Garcia Marquez, F. P., Huerta Herraiz, A., Navarro Leal, M., & Garcia de Carellan Esteban-Infantes, I. (2018). SCARAB: Herramienta inteligente de optimización de la operación y el mantenimiento de plantas fotovoltaicas, basada en nuevos sistemas de monitorización embarcados en UAVs. *Aend*, 85(March), pp 32-41. <http://hdl.handle.net/10578/20132>

Szafron, C., n.d. *Application of thermal imaging in electrical equipment examination. Wroclaw University of Technology*

Tobajas Vázquez, C. (2018). *Energía solar fotovoltaica*. Murcia, Spain: Cano Pina.

Recuperado de <https://elibro-net.biblioteca.universidadean.edu.co/es/ereader/bibliotecaean/45047?page=1>.

Wallysson Klaus Pires Barros, Carlos Frederico Dias Diniz, Victor Raphael Souza Araújo, Nithyane Rayssa Pires Barros, Estéfani Félix Barboza de Menezes Fonceca, & Júlio Antônio de Oliveira Neto. (2018). *A utilização termografia para a melhoria da gestão da manutenção a partir da identificação, à distância, de falhas em equipamentos e sistemas. Brazilian Journal of Development*, 4(6), 2800–2810.

Wroclaw University of Technology, & Szafron, C. (2014). *Application of thermal imaging in electrical equipment examination* (N.º 50–370 Wroclaw, Poland).

Zhang, J., Jung, J., Sohn, G., Cohen, M., 2015, *Thermal infrared inspection of roof insulation using unmanned aerial vehicles*, *International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics*, Canada.