

# Monitoreo en plantas fotovoltaicas: una revisión de técnicas y métodos utilizando imágenes termográficas

**Autores:** L.E. Ituarte<sup>1</sup>; S.L. Martínez<sup>1,2</sup>; E.E. Tarifa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy

<sup>2</sup>Departamento Académico San Salvador, Universidad Católica de Santiago del Estero  
luisituarte@hotmail.com

## Resumen

Existe un gran interés en la generación de energía eléctrica a través de plantas fotovoltaicas de grandes dimensiones. De hecho, los acuerdos internacionales para reducir el calentamiento global han sido impulsores de este desarrollo. En Argentina, estas plantas han sido de construcción reciente aunque las condiciones de irradiación solar para su funcionamiento siempre fueron promisorias. Sin embargo, el mantenimiento de las mismas requiere de un monitoreo no destructivo para alcanzar la vida útil proyectada. Debido a ello, este trabajo ha sido concebido para revisar diferentes técnicas y métodos para el monitoreo de plantas fotovoltaicas utilizando drones y cámaras termográficas. Para tal fin, el trabajo ha analizado experiencias previas realizadas en otros países. Los resultados experimentales sugieren que el monitoreo por drones es una solución acertada para ser implementada en futuras instalaciones fotovoltaicas del noroeste argentino.

## Palabras clave

Monitoreo de planta fotovoltaica, imagen termográfica, detección de anomalías

## Abstract

*There is a great interest in the generation of electric power through large-scale photovoltaic plants. In fact, international agreements for reducing global warming have been drivers of this development. In Argentina, these plants have been of recent construction although the conditions of solar irradiation were always promising. However, maintaining them requires non-destructive monitoring to achieve the projected useful life. Because of that, this paper has been conceived to review photovoltaic plants monitoring techniques using unmanned autonomous vehicles (UAVs) and thermal cameras. Experimental results suggest that UAVs monitoring is a promising solution to be implemented in future photovoltaic plants in northern Argentina.*

## Key Words

*pv plant monitoring, thermal imaging, anomaly detection*

## Introducción

De acuerdo a reportes internacionales del sector energético industrial solar [1], el año 2018 es el primero en el cual la instalación de equipamiento solar para la generación de energía eléctrica ha superado los 100 GW por año. Debido a ello, este sector industrial ha logrado el objetivo de acumular 500 GW de energía solar instalada en todo el planeta. Próximamente, en el año 2022, se alcanzaría el valor de 1 TW de energía solar instalada.

En Sudamérica, Brasil presenta una participación de 45,3% de energías renovables en su matriz energética nacional. Dentro de ese segmento destinado a las energías renovables, el 1,5 % corresponde a energía renovable fotovoltaica y su capacidad instalada era de 1798 MW en el año 2018 [2]. Por otra parte, Argentina muestra un plan de inversiones en infraestructura con la meta de alcanzar el 20% de energías renovables en su matriz energética nacional para el año 2025. A septiembre del año 2018, dichas inversiones habían aportado 48,45 MW de energía fotovoltaica nueva al sistema interconectado nacional (SADI [3]). Esto sugiere que la meta fijada para el año 2025 es aún factible. Asimismo, Chile ha realizado importantes inversiones en plantas fotovoltaicas con la meta de alcanzar el 21% de energías renovables no convencionales en su matriz energética nacional para el año

2024. Hoy, la participación de la energía solar fotovoltaica en la matriz chilena de energías renovables no convencionales es del 21% [4]. Resumiendo, todos los países sudamericanos han incrementado esfuerzos para incorporar infraestructura energética a través de plantas fotovoltaicas de grandes dimensiones en conformidad con los acuerdos internacionales firmados (Acuerdo de París).

Sin embargo, la incorporación reciente de plantas fotovoltaicas de gran escala a los sistemas interconectados eléctricos ha abierto un debate sobre las tecnologías a utilizar en el monitoreo de las mismas.

Actualmente, una de las tecnologías de monitoreo con perspectivas prometedoras para los operadores de la generación eléctrica es la utilización de imágenes aéreas captadas por drones o vehículos aéreos no tripulados (En idioma inglés “unmanned aerial vehicles”). Esta tecnología incluye imágenes que son proporcionadas por una cámara termográfica instalada en la base de un dron. Específicamente, el control de posición del dron permite situar dicha cámara en una ubicación en la cual la misma percibe fácilmente las diferencias de temperatura en la superficie de los paneles fotovoltaicos.

El propósito de este trabajo es discutir las experiencias utilizadas en otros países para el monitoreo de plantas de generación eléctrica fotovoltaica de grandes dimensiones utilizando imágenes termográficas con drones. De hecho, los resultados de esta revisión de técnicas y métodos podrían ser útiles para el monitoreo de futuras instalaciones fotovoltaicas en el noroeste argentino. Un ejemplo es la planta fotovoltaica (en construcción) situada en la localidad de Cauchari, provincia de Jujuy, Argentina (Ver Fig. 1 [5]).



**Fig. 1 - Imágenes del Proyecto “Cauchari I-II-III”, en proceso de construcción, de 300 MW de potencia proyectada, situado en la localidad de Cauchari, provincia de Jujuy, República Argentina, (Prensa, Gobierno de Jujuy [5])**

## Revisión de la literatura específica

La tecnología de monitoreo con imágenes aéreas destinada a plantas fotovoltaicas no es de naturaleza destructiva. Tampoco es una tecnología nueva. La misma consiste en la utilización de drones, equipados con cámaras térmicas y cámaras visuales que emplean herramientas de procesamiento digital de imágenes para la detección de anomalías en temperaturas diferentes al rango de trabajo óptimo de los paneles fotovoltaicos.

En la literatura especializada, existen numerosos trabajos de investigación sobre esta tecnología y su empleo.


Denio III [6] sostiene que las imágenes aéreas termográficas, captadas desde un avión para monitorear los paneles fotovoltaicos, son necesarias para detectar anomalías térmicas preventivamente.

Bellezza Quarter et al. [7] presentan el primer trabajo relacionado con la utilización de drones para el monitoreo de plantas fotovoltaicas de grandes dimensiones. En dicho trabajo, los autores sugieren una significativa reducción de costos ocasionada por el reemplazo de aviones y helicópteros por estos drones.

Grimaccia et al. [8] señalan la necesidad de medir otras variables como la irradiación solar, la temperatura ambiente, la humedad y la velocidad y dirección del viento para complementar eficazmente la detección de anomalías térmicas provista por el procesamiento digital de imágenes del dron. Asimismo, ellos afirman que el rol del sistema de control de vuelo del dron es esencial para contrarrestar la interrupción del sistema GPS y la pérdida de localización geográfica en condiciones ambientales desfavorables.

Daliento et al. [12] argumentan que la tecnología de monitoreo basada en drones presenta numerosos desafíos para su implementación práctica. Primero, el posicionamiento del dron debe ser preciso en su estabilidad para la captura de imágenes a procesar. Segundo, la identificación del módulo debe ser individual para posibilitar la localización de la falla en forma inmediata. Tercero, la detección de la falla en la imagen térmica captada debe ser factible en una única recorrida del dron. Cuarto, la clasificación de la falla debe ser concretada por el sistema informático del dron de monitoreo.

López-Fernández et al. [13] realizan la evaluación de patologías térmicas y defectos geométricos en paneles fotovoltaicos utilizando imágenes termográficas, imágenes digitales RGB (Modelo sRGB) e imágenes digitales de Intensidad (Modelo HSI) captadas por un dron liviano, de bajo costo y con dos cámaras. Estas imágenes son procesadas para generar un espacio de cinco dimensiones, en el cual se utilizan algoritmos de segmentación en tres niveles diferentes para encontrar anomalías en los paneles fotovoltaicos.



## Plantas de generación eléctrica fotovoltaica investigadas en estudios previos

Cada investigación mencionada ilustra diversos aspectos técnicos esenciales en la utilización de drones para el monitoreo de plantas fotovoltaicas. De hecho, estos aspectos mejoran progresivamente la detección de anomalías en imágenes termográficas.

Denio III [6] considera que la obtención adecuada de imágenes aéreas termográficas depende significativamente de factores como la humedad y la temperatura del medioambiente. También, la obtención de imágenes nítidas depende de la distancia y altura del avión. Para tal fin, Denio III [6] experimento el monitoreo de imágenes termográficas aéreas en una instalación fotovoltaica de 858 kW, localizada en Portland, Oregon, EUA.

En contraste, Bellezza Quarter et al. [7] ilustran el monitoreo cooperativo con drones al utilizar datos experimentales producidos por la combinación de imágenes visuales con imágenes térmicas. Como ejemplo de aplicación, Bellezza Quarter et al. [7] emplean un sistema de monitoreo en una planta fotovoltaica 200 kW, situada en el norte de Italia y constituida por 810 paneles fotovoltaicos.

Asimismo, Grimaccia et al. [8] diseñan un experimento de drones con una trayectoria de vuelo predefinida (sin necesidad de un piloto). De hecho, ellos muestran la influencia económica de la elección de rutas a seguir por el dron, coordinadas únicamente por el sistema GPS. Específicamente, Grimaccia et al. [8] investigan una planta fotovoltaica 3 MW, compuesta por 12.600 paneles policristalinos y localizada también en el Norte de Italia.

En la misma dirección, López-Fernández et al. [13] recomiendan fusionar imágenes de diferentes cámaras instaladas en el dron y construir un espacio de cinco dimensiones compuesto por imágenes RGB, imágenes termográficas y por imágenes de Intensidad (modelo HSI) para detectar anomalías térmicas y su ubicación. Para tal fin, López-Fernández et al. [13] investigan una planta fotovoltaica de 1,4 MW en la localidad de Gotarrendura, situada en la comunidad autónoma de Castilla y León, España.

Adicionalmente, Aghaei et al. [14] argumentan que las imágenes térmicas ocasionadas por las distintas anomalías en los sistemas fotovoltaicos han sido estandarizados y definidos en normas internacionales (IEC TS 62446-3). Como estudio experimental en condiciones reales, Aghaei et al. [14] inspeccionan una planta fotovoltaica de 3 MW en condiciones posteriores a un tsunami. Dicha planta está localizada en Tubarão, estado de Santa Catarina, en el sur de Brasil.

Seguidamente, este trabajo detalla las características del equipamiento utilizado en este tipo de operaciones de inspección y monitoreo.

## Equipamiento para monitoreo en plantas fotovoltaicas utilizando drones

El equipamiento utilizado en las diferentes experiencias de monitoreo de plantas fotovoltaicas se concentra en un modelo de dron compuesto por turbohélices, batería eléctrica, tarjetas electrónicas y un conjunto de cámaras. Uno de estos drones es el cuadricóptero ( “quadcopter” ) y es el diseño preferido por la mayoría de los usuarios durante la inspección de paneles fotovoltaicos y otras instalaciones eléctricas. La Fig. 2 muestra dos ejemplos de cuadricópteros. El primero es el dron denominado “DJI Phantom 3 Advanced” de DJI [19] y el segundo es el denominado “Nimbus 850” de Nimbus UAV [20].

Adicionalmente, Gallardo-Saavedra et al. [18] describen equipamiento complementario como cámaras de tamaño reducido y equipos de comunicaciones para transmisión de imágenes y videos para el monitoreo de paneles fotovoltaicos.



**Fig. 2 - Imágenes de drones utilizados para monitoreo de plantas fotovoltaicas:**  
a) DJI Phantom 3 Advanced [19], b) Nimbus 850 [20]

Es evidente que la elección del modelo de dron y su adaptación a la inspección de paneles fotovoltaicos es definitiva respecto a la elección de otros componentes.

Resumiendo, la Tabla 1 describe las marcas comerciales de los drones utilizados en los trabajos sobre monitoreo de paneles fotovoltaicos [18].



Tabla 1 - Drones utilizados para Monitoreo de Plantas Fotovoltaicas

Trabajo de Investigación	Dron utilizado ("UAV")
Denio III [6]	No especificado
Bellezza et al. [7]	NimbusEoxXi, NimbusPLP6
Grimaccia et al. [8]	NimbusPPL - 610
Kauppinen et al. [9]	Jupiter: Walkera QR-X800 Venus: Walkera QR-X350
Tyutyundzhiev et al. [10]	No especificado
Muntwyler et al. [11]	DJI S1000
Aghaei et al. [14]	NimbusPPL - 610
Dalsass et al. [15]	OctoperDaVinci Copters Scarabot X8
Tsanakas et al. [16]	Hexacopter Condor AY-704
Addabbo et al. [17]	DJI Matrice 100

Tabla 1 - Drones utilizados en el monitoreo de paneles fotovoltaicos utilizando imágenes termográficas (Gallardo-Saavedra et al. [18])

A continuación, este informe describe resultados experimentales obtenidos en investigaciones llevadas a cabo recientemente.

## Resultados experimentales revisados

Este trabajo de investigación enumera diversas observaciones a tener en cuenta al implementar un sistema de monitoreo en plantas fotovoltaicas de grandes dimensiones.

Primero, Denio III [6] describió las dificultades de la obtención de imágenes aéreas nítidas desde distintos ángulos y posiciones. Esto debería ser evitado porque estos ángulos y posiciones generan errores por desenfoque de movimiento ("motion blur") en las imágenes digitales obtenidas.

Segundo, Bellezza Quarter et al. [7] puntualizaron que las imágenes termográficas fueron eficaces para detectar anomalías en los paneles fotovoltaicos. Sin embargo, ellos explicaron que las imágenes visuales proveían información esencial para la ubicación geográfica de dichos paneles. Razón por la cual, debería ser necesario incorporar un conjunto de cámara termográfica y cámara visual en el dron simultáneamente. En la Fig. 3 se puede observar las dimensiones de una planta fotovoltaica en operación, captadas desde un dron liviano y utilizando una cámara termográfica (Ired [21]).



Fig. 3 - Imágenes de un dron utilizado para monitoreo de plantas fotovoltaicas (Ired [21])

Tercero, Grimaccia et al. [8] concluyeron que algunas trayectorias del dron de monitoreo son más eficientes en la detección de imágenes de paneles fotovoltaicos. De acuerdo a esta evaluación, el vuelo del dron debería ser convenientemente planificado con una trayectoria estudiada, dado que esta presupone un ahorro significativo de costos.

Cuarto, López-Fernández et al. [13] ilustraron imágenes digitales de paneles fotovoltaicos con segmentación en zonas de anomalías térmicas. Dichas imágenes segmentadas permitirían localizar estos paneles para su reparación y reemplazo. En las Figs. 4 y 5 se pueden observar dichas anomalías en paneles fotovoltaicos, detectadas por la cámara termográfica de un dron (Kitawa [22]).

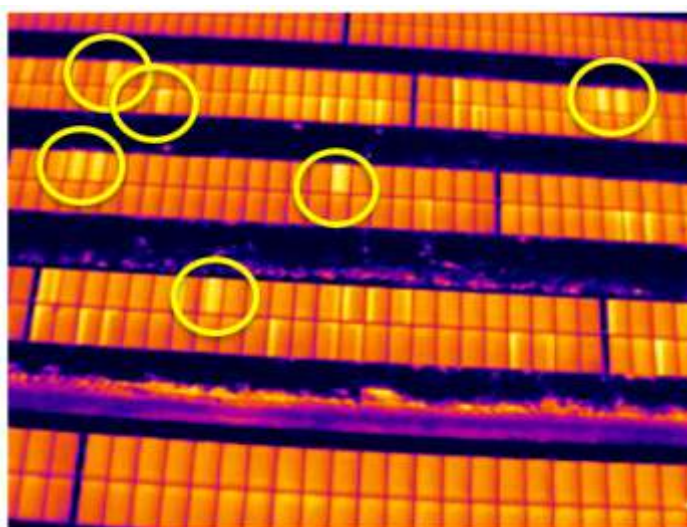


Fig. 4 - Imágenes de anomalías térmicas detectadas por drones utilizados para monitoreo de plantas fotovoltaicas (Kitawa, P. [22])



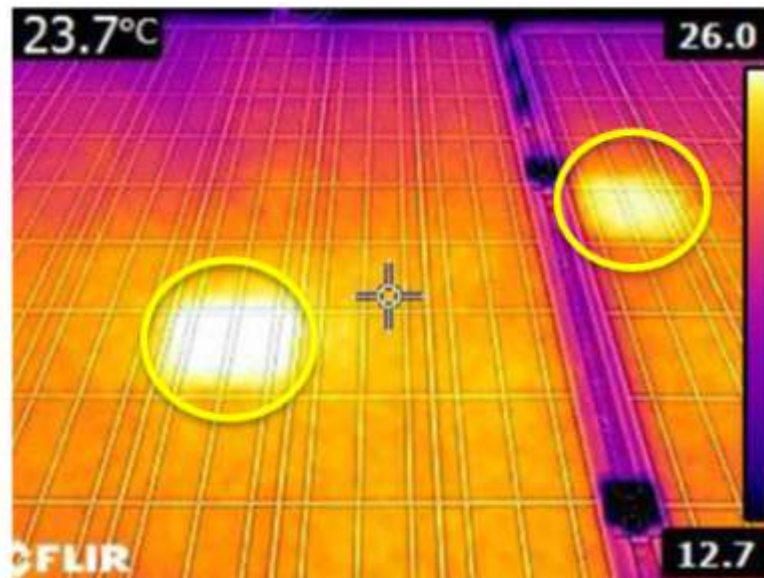


Fig. 5 - Imágenes de anomalías térmicas detectadas por drones utilizados para monitoreo de plantas fotovoltaicas, rango de temperatura de 12.7 °C – 26 °C (Leloux et al. [10])

Quinto, Agahei et al. [14] sugirieron que las condiciones óptimas para realizar el monitoreo de paneles fotovoltaicos utilizando drones eran las siguientes: a) el ángulo de la cámara termográfica, ubicada en la base del dron, debería ser perpendicular al plano del módulo fotovoltaico que está filmando, b) la mínima altitud del dron respecto a la base de los paneles fotovoltaicos debería ser 5 metros para evitar las sombras propias durante la inspección, c) el dron debería trabajar en un día soleado, con muchísima claridad y sin nubes, d) el dron debería trabajar en un entorno en el cual la velocidad promedio del viento no exceda los 4 m/seg, e) el horario para realizar la termografía aérea con drones debería ser alrededor del mediodía y f) la irradiación solar debería ser superior a 800 W/m<sup>2</sup>. Los detalles respecto a la ubicación del dron están ilustrados en la Fig. 6.

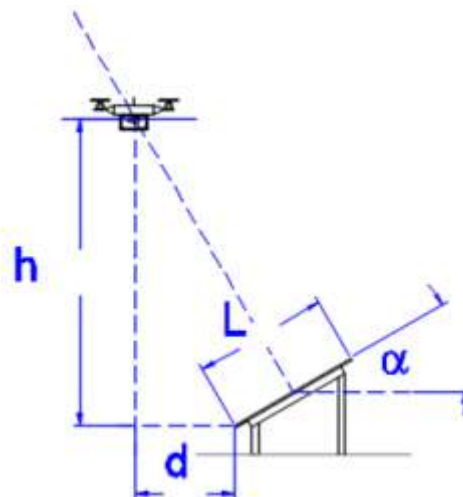


Fig. 6 – Disposición de un Dron para inspeccionar paneles fotovoltaicos (Aghaei et al. [7])

Por último, este trabajo presenta las conclusiones de la revisión de literatura de monitoreo con drones en plantas fotovoltaicas.

## Conclusiones

Las conclusiones de este estudio respecto al monitoreo de drones para plantas fotovoltaicas de grandes dimensiones son diversas.

Primero, los costos implementados en la captación de imágenes aéreas son superiores a los costos de captación de imágenes realizadas por drones. Esto representa un excelente incentivo para invertir en la tecnología de drones.

Segundo, el mapeo adecuado de trayectorias para el monitoreo por drones es fundamental para el ahorro de costos operativos de esta tecnología.

Tercero, el monitoreo de paneles fotovoltaicos con un dron debe tener en cuenta la altura del mismo en el instante de vuelo y el ángulo de la cámara termográfica respecto a los paneles fotovoltaicos. La mayoría de los estudios experimentales coinciden con estas recomendaciones y otras expresadas por Agahei et al. [7].

Cuarto, esta revisión de los trabajos experimentales efectuados sobre el monitoreo de plantas fotovoltaicas con drones es relevante pero aun es exploratoria. Razón por la cual, es preciso continuar investigando sobre esta tecnología para brindar detalles de otras técnicas y resultados.

## Referencias

[1] Solar Power Europe. 'Global Market Outlook for Solar Power 2019 – 2023', 2019.[Online]. Disponible: <http://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2019/05/SolarPower-Europe-Global-Market-Outlook-2019-2023.pdf>

[Descargado: 1 Agosto 2019].

[2] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministerio de Minas e Energia, Governo do Brasil, 'Relatório Síntese / Ano base 2018, Balanço Energético Nacional 2019', may 2019. [Online]. Disponible: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>

[Descargado: 1 Agosto 2019]

[3] Cámara Argentina de Energías Renovables (CADER). 'Anuario 2018. RENOVAR, un punto de inflexión', 2018.[Online]. Disponible: <http://www.cader.org.ar/anuario-2018-reporte-del-mercado-de-las-energias-renovables-en-argentina/>

[Descargado: 1 Agosto 2019].

- [4] Comisión Nacional de Energía. Ministerio de Energía. Gobierno de Chile. 'Anuario Estadístico de Energía 2018', 2018.[Online]. Disponible: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2019/04/Anuario-CNE-2018.pdf>  
[Descargado: 1 Agosto 2019].
- [5] Dirección de Prensa, Gobierno de Jujuy, 'Progresó la Construcción de Cauchari', 6 oct 2018. [Online]. Disponible: <http://prensa.jujuy.gob.ar/tag/cauchari/>  
[Descargado: 1 Agosto 2019]
- [6] Denio III, H. Aerial Solar Thermography and Condition Monitoring of Photovoltaic Systems. *InfraMation 2011 Proceedings*. IEEE. 2011.
- [7] Bellezza Quater, P.; Grimaccia, F.; Leva, S.; Mussetta, M.; Aghaei, M. Light Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Cooperative Inspection of PV Plants. *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, No. 4, July 2014.
- [8] Grimaccia, F.; Aghaei, M.; Mussetta, M.; Leva, S.; Bellezza Quarter, P. Planning for PV Plant Performance Monitoring by Means of Unmanned Aerial Systems (UAS). 2014.
- [9] Kauppinen, T.; Panouillot, P-E.; Siikanen, S.; Athanasakou, E.; Baltas, P. Nikopoulos, B. About infrared scanning of photovoltaic solar plant. In: Hsieh, S.J.; Zalameda, J. Editors. *THERMOSENSE Therm. INFRARED Appl. XXXVII*, vol. 9485, 1000 20TH ST, PO BOX 10, BELLINGHAM, WA 98227-0010 USA: SPIE-INT SOC OPTICAL ENGINEERING; 2015, p. 948517 1-14.
- [10] Leloux, J.; Narvarte, L. Advanced PV modules inspection using multirotor UAV. 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, September 2015, Hamburg.
- [11] Muntwyler U, Schüpbach E, Lanz M. Infrared (IR) Drone for Quick and Cheap PV Inspection. In: *Proceedings of 31st European photovoltaic solar energy conference and exhibition, Hamburg, Germany: WIP; 2015, p. 1804–6.*
- [12] Daliento, S.; Chouder, A.; Guerriero, P.; Massi Pavan, A.; Mellit, A.; Moeini, R.; Tricoli, R. Monitoring, Diagnosis and Power Forecasting for Photovoltaic Fields: A Review. *Hindawi. International Journal of Photoenergy*. Vol. 2017. Article ID 1356851, 13 pages.
- [13] Lopez-Fernandez, L.; Laguela, S.; Fernandez, J.; Gonzales-Aguilera, D. Automatic Evaluation of Photovoltaic Power Stations from High-Density RGB- T 3D Point Clouds. *Remote Sensing* 2017, 9 (6), 631; doi:
- [14] Aghaei; M. Madukanya, U. E.; Vidal de Oliveira, A. K.; Ruther, R. Fault Inspection by Aerial Infrared Thermography in a PV Plant after a Meteorological Tsunami. *VII Congreso Brasileiro de Energia Solar*. Brazil. 17 al 20 de abril de 2018.
- [15] Dalsass M, Scheuerpflug H, Fecher FW, Buerhop-Lutz C, Camus C, Brabec CJ. Correlation between the generated string powers of a photovoltaic: Power plant and module defects detected by aerial thermography. In: *Proceedings of IEEE photovoltaic specialists conference, Portland, OR, USA, 2016, p. 3113–8.*

- [16] Tsanakas JA, Vannier G, Plissonnier A, Ha DL, Barruel F. Fault diagnosis and classification of large-scale photovoltaic plants through aerial orthophoto thermal mapping. In: Proceedings of 31st European photovoltaic solar energy conference and exhibition. EU PVSEC, Hamburg, Germany: 2015, 2015, p. 1783–1788.
- [17] Addabbo P, Angrisano A, Bernardi ML, Gagliarde G, Mennella A, Nisi M. et al. A UAV infrared measurement approach for defect detection in photovoltaic plants. In: Proceedings of IEEE international workshop on metrology aerospace, IEEE, 2017, p. 345–350.
- [18] Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L.; Duque-Perez, O. Technological review of the instrumentation used in aerial thermographic inspection of photovoltaic plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews 93 (2018) 566–579.
- [19] DJI, 'Phantom 3 Advanced', 2019. [Online]. Disponible: <https://www.dji.com/phantom-3-adv>.  
[Descargado: 1 de Agosto 2019]
- [20] Nimbusuav Pte. Ltd., 'Industrial Solutions'. [Online]. Disponible: <https://www.nimbusuav.com/industrial-solution>  
[Descargado: 1 Agosto 2019]
- [21] Ired Remote Sensing, 'Thermal Imaging Solar Surve', 2019. [Online]. Disponible: <https://ired.co.uk/services/solar-farm-surveys/>.  
[Descargado: 1 Agosto 2019]
- [22] Kitawa, P., 'Infrared Images with Errors on PV Modules', 2014. [Online]. Disponible: <https://www.kitawa.de/en/thermography-pv-systems>.  
[Descargado: 1 Agosto 2019]