



CAMPUS
DE EXCELENCIA
INTERNACIONAL



POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

Graduado en Ingeniería Informática

Universidad Politécnica de Madrid

Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Informáticos

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis de imágenes termográficas de parques
solares

Autor: Adrián Pinilla Carretero

Director: Luis Baumela Molina

MADRID, ENERO 2019

Resumen

El presente trabajo describe el desarrollo de una herramienta para la generación de un preinforme técnico sobre el estado de las placas solares que componen un parque solar.

Para ello, el alumno debió aprender sobre el uso y funcionamiento de drones así como de los sistemas y cámaras de precisión utilizados para recopilar un conjunto de fotografías sobre los que se realiza normalmente este tipo de estudios, para después procesar dichas imágenes y generar una ortofoto (una imagen 2D generada a partir de un conjunto de fotografías).

Una vez obtenida dicha ortofoto, fue necesario producir un conjunto de datos que sirvieran para probar y entrenar dicha herramienta, por lo que se procedió a seleccionar muestras de la ortofoto con el fin de poder generar una base de conocimientos que permitiese entrenar la herramienta para que ésta reconociese los paneles solares dentro de la ortofoto.

Paralelamente, se desarrolló una herramienta en Python, que usando múltiples librerías, entre ellas OpenCV y funciones implementadas por el alumno que utilizan algoritmos de reconocimiento vistos en la carrera, es capaz de fragmentar la ortofoto en pequeñas imágenes y reconocer en estas los paneles solares para estudiar si éstos presentan o no algún defecto visible.

Por último, usando la herramienta y el conjunto de datos generados, se realizaron pruebas de la precisión de la herramienta en el caso concreto de estudio.

Abstract

This work describes the development of a tool for the generation of a preliminary technical report about the status of the solar panels that conform a solar farm.

In order to achieve this, the student had to learn about the use, work mechanisms and systems of the drones and the precision cameras used to gather a series of pictures, which are normally used in these type of studies. These pictures are subsequently processed to generate an orthophoto (a 2D complex image generated from a set of pictures).

Once the orthophoto is obtained, a set of data had to be created in order to train the tool. For this task, the student selected samples from the orthophoto to generate a knowledge database that allows the tool to recognize the solar panels present in the orthophoto and differentiate them from other structures in the picture.

At the same time, a tool was developed using Python and multiple libraries, like OpenCV, as well as recognition algorithms learnt during the degree and implemented by the student. This tool can be used to fragment the orthophoto into smaller pictures and recognise if these correspond to a solar panel or other structure. Once a fragment from the orthophoto is recognised as a solar panel, it is possible to study if there is a visible failure in it.

Lastly, using the tool and the generated dataset, tests were run to measure the precision of the tool in this specific case of study.

Índice de contenidos

1. Introducción.....	2
1.1 Fotogrametría	4
1.2 Aeronaves.....	4
1.3 Objetivos	5
2. Herramientas	7
2.1 Pix4D y Photoscan	7
2.2 UgCS	8
2.3 FLIRTTools	9
2.4 Python y Pyzo	9
2.5 OpenCV.....	9
2.6 Otras librerías	10
3. Desarrollo.....	11
3.1 Recolección de datos	11
3.1.1 Planificación del vuelo	11
3.1.2 La aeronave	11
3.1.3 Previo al vuelo.....	11
3.1.4 Vuelo.....	13
3.2 Procesamiento de datos	13
3.2.1 Generando la ortofoto.....	14
3.3 El proyecto	15
3.3.1 Reconocedores de formas e imágenes.....	15
3.3.2 Construcción del dataset.....	15
3.3.3 Entrenamiento del reconocedor.....	17
3.3.4 Pruebas	19
3.3.5 Fase 1: Reconocimiento de formas	19
3.3.6 Fase 2: Ubicación de panel.....	20
3.3.7 Fase 3: Análisis del Panel.....	20
3.3.8 Fase 4: Emisión del preinforme	21
4. Resultados	22
5. Conclusiones	24
6. Bibliografía	24

1. Introducción

El objetivo principal de esta herramienta de procesado de imágenes es ahorrar tiempo al analista encargado de la ardua tarea consistente en hacer un informe sobre el estado y funcionamiento de los paneles solares que componen un parque solar.

La forma actual de evaluar el rendimiento de un parque solar es mediante la estimación de la capacidad máxima de la planta o parque y la capacidad real que tiene ésta en unas condiciones climatológicas concretas. El problema, concretamente, viene cuando, tras fallar una serie de células fotovoltaicas por múltiples posibles causas, y repartidas aleatoriamente por toda la instalación, hay que hacer las sustituciones correspondientes de los elementos afectados. Debido a que, cuando una célula fotovoltaica falla, no sufre un cambio apreciable visualmente, hay que recurrir a la comprobación de los siguientes parámetros:

- La tensión que genera.
- La resistencia interna.
- La temperatura de funcionamiento de la misma.

La unidad elemental de un parque solar es la célula fotovoltaica, una fila de éstas forma un diodo y varios diodos en paralelo forman un panel, un grupo de paneles comúnmente montados sobre una misma estructura se denomina bloque, una fila de bloques es denominada hilera y un conjunto de estas podría denominarse sector (**Figura 1**).

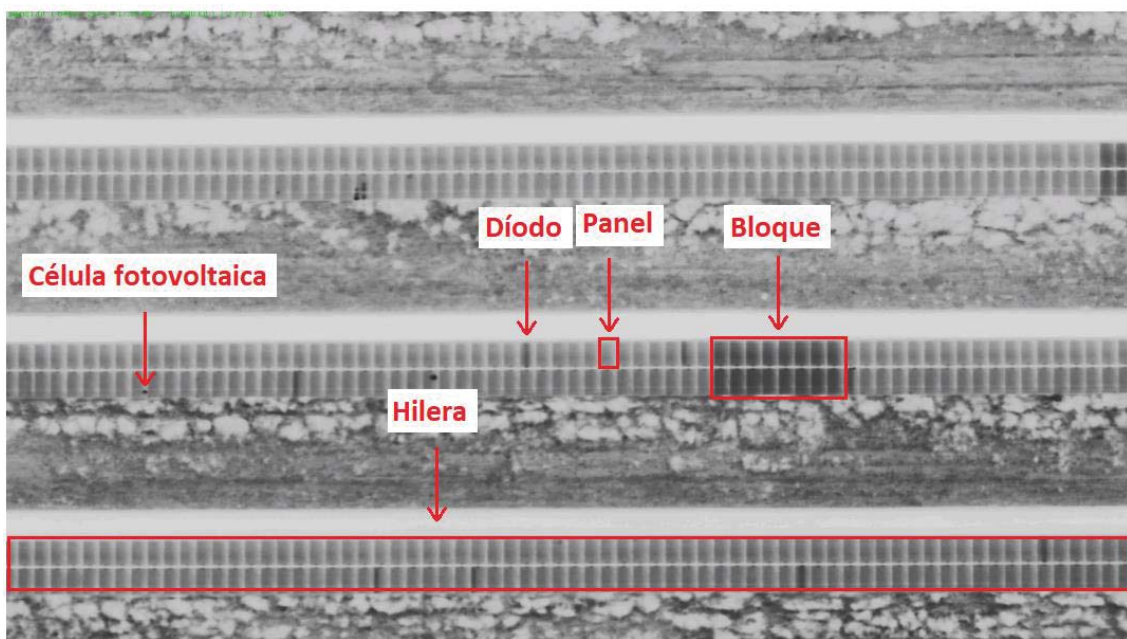


Figura 1. Distintas unidades que componen un parque solar. Toda la sección mostrada en la imagen podría definirse como uno o varios sectores.

Si tomamos por ejemplo un panel de 13 células por diodo y 9 diodos por panel, 33 paneles por bloque y un total de 50 bloques (un huerto solar pequeño), tendríamos que comprobar 193.050 células. Si la forma más rápida es mediante una pistola termómetro infrarroja y tardásemos de media unos 60 segundos en hacer la medición y anotar el punto de fallo por cada célula, tardaríamos unas 3217,5 horas en revisar el pequeño huerto solar.

Dado que los paneles solares se montan formando grandes extensiones y a que estos están montados en estructuras selladas para que no les afecte la climatología, la mejor manera de comprobar el estado de estos sistemas es mediante la comprobación de su temperatura de trabajo, usando un sistema de fotografía infrarroja montado en un dron, que es una aeronave no tripulada capaz de pasar por encima de los paneles sin necesidad de ningún soporte y puede quedarse estática en un punto en caso de necesidad.

Usando el método actual, empleando drones, tras haber fotografiado todo el parque solar, el resultado es un fichero con miles de fotografías en escala de grises tomadas por una cámara infrarroja graduada donde cada pixel indica una temperatura.

El Técnico en este caso, pasa a tardar aproximadamente unos dos minutos por panel en analizar los puntos con diferencias de temperatura y añadir cada uno al informe, con su tipo de fallo. Según temperatura y celdas afectadas y su posición. Esto hace unas 55 horas aproximadamente para un huerto solar pequeño, casi 7 jornadas enteras de trabajo.

Una vez tenemos esas fotografías, gracias a los metadatos introducidos por el sistema del dron, podremos confeccionar una imagen que es el resultado de combinar todas las del estudio: la ortofoto (ver apartado 3.2.1 para más información). Esta ortofoto es el resultado de combinar las imágenes que se tomaron con un solape del 80% frontal y 60% lateral entre ellas, haciendo correcciones gracias a los puntos GPS que incluyen las fotos y que añadimos manualmente en el procesado, valiéndonos de puntos fijos de la infraestructura del parque que han sido estudiados por un topógrafo.

Valiéndose de las imágenes tomadas en la planta y de la ortofoto, la herramienta deberá encontrar cada uno de los paneles a estudiar, estudiar los puntos de interés de los mismos y añadir el tipo de fallo y la posición del panel en un pre-informe, reduciendo el tiempo invertido de 55 horas que se tardaría en analizar todas las fotos a las 4 que se tardaría en preparar la ortofoto y dejar que la herramienta examine los datos sin necesidad de supervisión, revisar el pre-informe que genera ésta y redactar el informe final.

1.1 Fotogrametría

La fotogrametría es una técnica que tiene como fin estudiar y definir la forma y posición de un objeto, utilizando para ello medidas tomadas sobre una o varias imágenes.

Mediante la fotogrametría, también seríamos capaces de lograr cosas como la composición de un modelo bidimensional o tridimensional de un objeto, lo cual tiene aplicaciones muy útiles para el campo de la cartografía, el desarrollo y fabricación de componentes, construcción o incluso la agricultura.

En este caso, el objeto de estudio sería el conjunto de los elementos fotovoltaicos y otros sistemas que componen el parque solar, de los cuales formaremos un imagen en 3 dimensiones, usando el conjunto de imágenes obtenidas mediante la aeronave y su carga de pago y una serie de puntos GPS tomados de forma precisa y referenciados en las imágenes, los cuales nos ayudarán en la yuxtaposición de la imágenes y a la correcta formación de las curvas de nivel del terreno. Una vez obtenida esta imagen en tres dimensiones de la zona de estudio, procedemos a extraer una imagen bidimensional desde el plano cenital de la misma. Esta imagen, la ortofoto, nos servirá como base para el estudio del parque.

1.2 Aeronaves

Las aeronaves utilizadas en este caso de estudio serán vehículos aéreos no tripulados, UAVs (del inglés *unmanned aerial vehicles*), más concretamente drones con seis motores, comúnmente denominados hexacópteros.

Se utilizará esta plataforma para portar las cargas de pago (equipo que porta el UAV) requeridas debido a su versatilidad y a la posibilidad de mantener su posición estática sobre el campo de estudio, además de ser hasta cierto punto más capaces de responder a cambios en la dirección y velocidad del viento.

Las partes principales de un hexacóptero son:

- **La controladora:**

Es el cerebro de la aeronave. Se compone de una unidad de cómputo programada y una serie de sensores (como acelerómetros, giróscopos y barómetros, entre otros). La controladora mantiene la aeronave estable mientras es pilotada y es la responsable de variar la velocidad de giro de cada uno de sus rotores para responder a cambios de dirección, rumbo y altitud o como respuesta en oposición de una fuerza puntual (como una

ráfaga de viento o un ajuste de sustentación). Además, es la encargada de generar los datos de aviónica que el piloto necesita para tener control sobre la operación.

Conectadas a esta parte pueden encontrarse otras, como módulos de geoposicionamiento, comunicaciones y vídeo.

- **Los motores:**

Son los encargados de dar sustentación y propulsión a la aeronave. Son alimentados y controlados a través de la etapa de potencia (que modifica las revoluciones a las que estos giran) por la controladora.

- **El chasis:**

Soporta y fija todos los componentes de la aeronave. Además, evita que estos entren en contacto con el suelo o entre sí.

- **Las baterías:**

Son el componente encargado de proporcionar la energía necesaria para que se alimenten todos los sistemas de la aeronave.

- **La carga de pago:**

Son todos los sistemas no necesarios para el control o el vuelo de la aeronave que se acoplan a la misma. En este caso, se trata de un sistema de control para un gimbal (sistema de estabilización y dirección) y una cámara, además de un dispositivo de transmisión de vídeo mediante radiofrecuencia.

1.3 Objetivos

Los objetivos principales de este proyecto son:

- Crear una herramienta que reduzca el tiempo necesario para generar un informe técnico sobre el estado de los paneles solares de una instalación.
- Probar la eficacia de algunos reconocedores de formas para elaborar informes y sugerir actuaciones tras analizar un set de datos.
- Adquirir conocimientos sobre fotogrametría y el procedimiento de generación de objetos 2D y 3D a partir de imágenes tomadas en las zonas de estudio así como aplicar los adquiridos durante la carrera en este campo de estudio.

Los objetivos secundarios son:

- Dotar a la herramienta con capacidad para generar un preinforme completo de manera automática.
- Dotar a la herramienta con la opción de procesar las imágenes directamente, sin necesidad de preprocesarlas con otros programas previamente.

2. Herramientas

En este apartado se describen las herramientas utilizadas en la realización de este proyecto.

2.1. Pix4D y Photoscan

Los dos son programas para la composición de modelos como nubes de puntos, ortomosaicos, modelos de superficie digitales, modelos 3D con texturas, mapas de índices y termales entre otros. El modo de funcionamiento del programa es el siguiente:

A partir de un conjunto de fotos con sus correspondientes metadatos (como posición GPS y orientación de la cámara), el programa solapa las imágenes para formar una imagen completa del campo de estudio, tomando en cuenta el porcentaje de solapamiento predefinido entre imágenes que se definió en la fase previa al vuelo del dron y que se introdujo en los parámetros de configuración. Además, crea una nube de puntos y toma la referencia de las distintas posiciones de estos puntos en el plano, para fabricar un modelo en 3D (**Figura 2**) de las elevaciones y curvas de la zona de estudio.

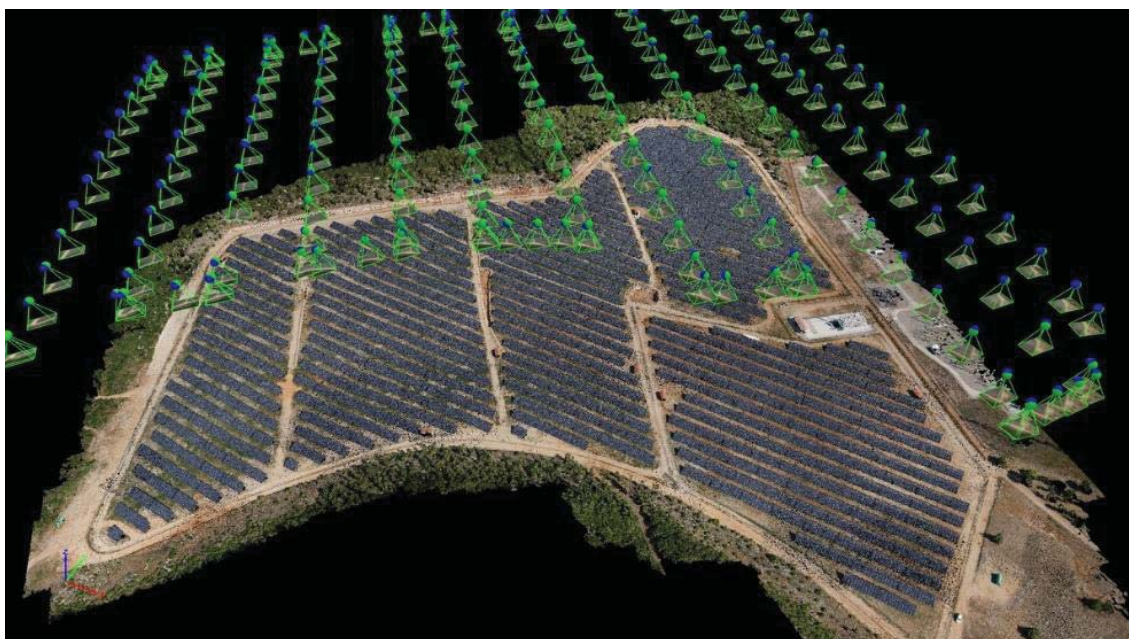


Figura 2. Modelo 3D generado con Pix4D en el que se muestran los puntos focales de las imágenes (Imagen tomada de: <https://www.pix4d.com/blog/smart-inspection-of-a-solar-farm>).

Esta nube es utilizada para generar, mediante triángulos, la malla de lo que sería el modelo 3D de la estructura fotografiada y/o el mapa con las curvas de nivel en el caso de otros modelos.

Por último, podemos usar la imagen completa del primer paso como textura para la malla previamente generada, de forma que tengamos un objeto 3D con la forma y color originales, sobre las curvas de nivel, para generar un ortomosaico o directamente como mapa 2D para estudiar, tras la aplicación de distintos índices, las características térmicas o vegetativas, entre otras, del modelo.

2.2. UgCS

UgCS es un programa diseñado para la planificación de rutas de vuelo de UAVs y su control automático desde el equipo donde se ejecuta este y mediante un sistema de transmisión de radiofrecuencia.

Este programa permite controlar uno o varios UAVs en tiempo real para que éstos sigan un plan de vuelo complejo intercambiando órdenes e información de aviónica generada por la aeronave, de tal forma que el programa conoce todas las variables (como posición, rumbo, velocidad, altitud y nivel de baterías) de esta y puede efectuar las correcciones correspondientes de forma que se cumpla la ruta predefinida.

El plan de vuelo se compone de puntos de ruta que la aeronave tiene que atravesar, con una trayectoria estipulada y ejecutando una serie de acciones en cada uno de esos puntos (como efectuar un disparo de cámara o encender una luz).

Estos puntos y acciones se definen sobre una ubicación o localización concreta, de la cual el programa extrae los datos presentes en google maps referentes a cartografía y nos muestra el mapa de la zona para que tengamos una referencia más clara sobre las particularidades del terreno (**Figura 3**).



Figura 3. Ruta generada con UgCS (imagen tomada de: <https://www.ugcs.com/>).

2.3. FLIRTools

FLIRTools es una herramienta gratuita que permite analizar imágenes térmicas, tomadas con equipos de cámaras calibradas, para poder generar un informe técnico sobre puntos de interés de las mismas.

Este software se utiliza sobre todo para realizar estudios térmicos en equipos eléctricos, como tendidos eléctricos, torres de alta tensión, paneles solares o generadores, entre otros, de forma que se puedan usar sus herramientas internas para detectar temperaturas anormales en puntos concretos de una estructura y localizar un fallo, avería o punto problemático en un sistema, para después emitir un informe que genera la propia herramienta dando detalles sobre los estudios realizados.

2.4. Python y Pyzo

Python es un lenguaje de programación interpretado, multiplataforma, multiparadigma y que posee una licencia de código abierto. Esto último ha propiciado que haya una gran cantidad de librerías disponibles para implementar nuevos programas y soluciones, como por ejemplo, OpenCV.

Pyzo es un entorno de computación basado en el lenguaje de programación Python, es open-source y cuenta con un editor y una terminal o Shell donde ejecutar los comandos, entre otras herramientas.

2.5. OpenCV

OpenCV u Open Source Computer Vision Library es una librería open-source diseñada para proyectos de visión por computadora y machine learning.

Tiene más de 2500 algoritmos optimizados que pueden ser utilizados para detectar e identificar caras u objetos, clasificar acciones humanas, seguir movimientos, extraer modelos 3D de objetos y otras muchas funciones.

2.6. Otras librerías

Otras librerías de algoritmos para Python empleadas en este trabajo son las siguientes:

- **Numpy:** es la librería principal de computación científica para Python.
- **Mahotas:** es una librería dedicada a la visión por computador y procesamiento de imagen.
- **Pickle:** es una librería para tratamiento de archivos.
- **Glob:** es una librería para el tratamiento de direcciones en sistemas de ficheros.
- **PIL(Pillow):** es una librería dedicada al tratamiento de imágenes.
- **CSV:** es una librería dedicada al tratamiento de ficheros con esa extensión (.csv), que se utiliza para la creación y gestión de la base de datos.

3. Desarrollo

En este apartado se describirá el procedimiento seguido en los casos de estudio llevados a cabo para la consecución del proyecto.

3.1. Recolección de datos

Antes de poder analizar fotografías o datos existentes para procesar con la herramienta que se está desarrollando, es necesario conseguir dichos datos y entender la metodología de su extracción, ya que las particularidades de cada estudio harán necesarias ciertas correcciones y/o planificación única y específica para cada entorno en concreto.

3.1.1. Planificación del vuelo

Una vez se ha establecido la zona de estudio, en este caso un parque solar, es necesario obtener los permisos de vuelo y acceso a la zona, además de tener en regla toda la documentación y permisos de la aeronave y el piloto que realizarán dicho estudio.

Tras pasar esos requisitos previos, es necesario realizar un estudio de seguridad sobre la zona y alrededores, conocer el parte meteorológico de la zona en el momento del estudio y hacer un estudio previo del terreno teniendo en cuenta factores como la zona de aterrizaje y despegue, la extensión de terreno a cubrir, el tiempo de vuelo aproximado, la duración de las baterías a utilizar, puntos de acceso a electricidad y otros servicios, etc.

3.1.2. La aeronave

La aeronave a utilizar en estos estudios es un hexacóptero con una capacidad de carga de aproximadamente 5 kilos y una autonomía de vuelo cercana a los 15 minutos por cada grupo de baterías.

3.1.3. Previo al vuelo

Después de ver el parte meteorológico del día en el que se va a realizar el estudio, se observó que habrá rachas de viento y una cantidad de luz suficiente a partir de las 9:00.

La cantidad de luz que reciben los paneles es crítica, ya que si no han recibido suficiente luz no habrán podido desarrollar la conversión fotovoltaica y no tendrán la temperatura

suficiente para poder realizar el estudio, ya que las placas presentarán una temperatura homogénea, no pudiéndose detectar puntos calientes que indicarían una posible mal función de los mismos.

Teniendo en cuenta la extensión de terreno a cubrir, la altitud de vuelo determinada por el GSD, Ground Sample Distance (que se extrapola de la sensibilidad de la cámara y los cm/pixel que necesitemos en el estudio), las circunstancias meteorológicas y posibles contratiempos, se estimó un tiempo de vuelo de aproximadamente 2 horas.

Ya que la zona de estudio disponía de puntos de red, se estimó que lo más conveniente sería hacer uso de cuatro grupos de dos baterías y disponer de una maleta de carga (que contiene los equipos y fuentes de alimentación regulada necesarios para cargar las baterías de Litio-Polímero que usa el dron), de forma que mientras el piloto volaba usando un grupo de baterías, otro estuviera cargándose y de esta forma no fuese necesario reservar un número elevado de baterías para la operación. Además, se reservó un generador eléctrico por si hubiera fallos en el suministro eléctrico.

Paralelamente, se reservó y preparó el equipo y documentación necesarios para la operación, como equipos informáticos, sistema de comunicaciones entre el dron y la estación de control (ordenador portátil con UgCS), el propio dron y el kit de mantenimiento y repuestos del mismo.

A la hora de preparar la aeronave, tras acoplar el gimbal y la cámara utilizada (una FLIR Vue Pro) a la parte inferior del dron, fueron necesarios varios ajustes, como por ejemplo los parámetros de ajuste de precisión de los motores paso a paso del gimbal o el contrapesado del mismo y por último, realizar un vuelo de prueba para cerciorarse de que todos los sistemas operaban correctamente.

Por último, se creó el plan de vuelo que se estimó más eficaz para cubrir la zona de estudio durante la operación. Teniendo en cuenta los despegues y aterrizajes del dron para realizar los cambios de baterías pertinentes, se designaron las localizaciones más eficientes para colocar los puntos de apoyo GPS y se ajustaron los porcentajes de solape lateral y frontal entre imágenes (60% y 80% respectivamente).

Una vez en la zona de vuelo, hubo que hacer modificaciones en el plan, debido a que, por las condiciones climáticas específicas de la zona, hubo que retrasar el vuelo, ya que las placas solares no estaban lo suficientemente calientes. Este retraso también implicó que posteriormente fuese necesario cambiar el ángulo de ataque de las pasadas del dron sobre las hileras de paneles, ya que debido a la posición del sol, se producía un reflejo intermitente directamente sobre el objetivo de la cámara al coincidir el ángulo de

refracción de la luz con la posición del dron, efecto que dejaba las imágenes totalmente inservibles.

3.1.4. Vuelo

En el momento previo al despegue se aseguró la zona y se hicieron todas las comprobaciones rutinarias de seguridad tanto en la aeronave como en la zona de vuelo para asegurar que la operación se realizase según lo previsto.

La duración total de la operación superó las 2 horas previstas debido a que las constantes rachas de viento lateral supusieron un mayor gasto energético para la aeronave, ya que tenía que maniobrar de acuerdo a las rachas para contrarrestarlas, por lo que hubo que hacer más despegues y aterrizajes además de cargar más grupos de baterías para su reutilización.

Una vez finalizados los vuelos y verificada la validez del conjunto de datos adquirido, se copia este en un medio diferente al utilizado para su adquisición y se dispone el material y los equipos para las labores de mantenimiento y almacenaje.

3.2. Procesamiento de datos

Debido a que el sistema utilizado no podía transmitir la información de la controladora del dron a la cámara utilizada por una incompatibilidad de protocolos de comunicación, hubo que añadir previamente estos datos al set de fotografías adquirido.

Esto se hace mediante la herramienta correspondiente de UgCS, que nos permite añadir los datos de cada punto de acción (disparo de la cámara) definido en el plan de vuelo a cada una de las fotografías, de modo que éstas contengan la posición GPS y el ángulo de disparo en sus metadatos, ya que posteriormente, esta información será imprescindible para su procesado.

Una vez tenemos el set de fotografías completo, procedemos a cargarlo en la herramienta Pix4D, verificamos la configuración que el programa extrae de los metadatos y corregimos los campos procedentes. Después, seleccionamos el tipo de proyecto de modelado que queremos realizar y se nos muestra el panel de herramientas y el visor con el que trabajaremos.

Lo primero que necesitaremos hacer es añadir los puntos de apoyo y sus coordenadas GPS, para que Pix4D pueda ajustar con más precisión el modelo. Tras añadir los puntos,

procederemos a marcar cada uno visualmente en una cantidad suficiente de imágenes (comúnmente entre 5 y 15 fotografías).

Después, procedemos a iniciar el procesado. Dependiendo del equipo desde el que realicemos el procesado, esta tarea puede llevar desde 30/45 minutos hasta más de 4 horas para la carga de trabajo. En este caso, ensamblamos y preparamos un equipo con las características adecuadas para la ejecución de este tipo de programas y procesados, por lo que el sistema está en la franja menor de tiempo de procesado.

Debido a posibles inconsistencias en cada una de las fases de procesado, es posible que tengamos que repetir las fases después de realizar ajustes puntuales como eliminar fotografías inválidas que hayan escapado a la revisión previa o el marcado de puntos de apoyo en un número mayor de fotografías. Es posible, además, que por sombras o cambios en la iluminación de la zona de estudio, si este se prolongó durante demasiado tiempo, que el programa genere una serie de inconsistencias que nos obliguen a dividir el proyecto en varios subproyectos que tengan mayor concordancia en sus sets de datos para procesar.

3.2.1. Generando la ortofoto

Una vez tenemos generada en Pix4D la nube de puntos y la imagen compuesta, podemos generar la ortofoto (**Figura 4**) aplicando el índice que procede, en este caso, térmico, en escala de grises, para mayor facilidad a la hora de distinguir los puntos de estudio.



Figura 4. Ortofoto generada en este estudio.

En ella se pueden observar a simple vista paneles que presentan cambios de color o pequeños puntos, que serían los puntos de interés a estudiar. Por otro lado, debido a la amplitud de la zona de estudio, se pueden observar cambios de luminosidad. Esto es

debido a que, en el momento de tomar las fotografías de esa zona, cambiaron puntualmente las condiciones de luminosidad de la zona, bien por un hueco entre las nubes o por un tiempo de espera prolongado debido a operaciones de mantenimiento de la aeronave, por ejemplo.

3.3. El proyecto

En este apartado describiremos en concreto las capacidades y los fundamentos de la herramienta desarrollada así como su funcionamiento.

3.3.1. Reconocedores de formas e imágenes

El reconocimiento de formas consiste en el reconocimiento de patrones que se obtienen de los procesos de segmentación, extracción de características y posterior descripción de cada objeto, donde éste queda representado por una colección de características descriptoras. Una vez el reconocedor está entrenado, debe asignarle a cada objeto representado por la colección antes descrita un tipo, categoría o clase.

Para entrenar un reconocedor, se han de preparar sets de datos para que éste genere las diferentes clases o tipos mediante uno o varios algoritmos, como por ejemplo:

- **Clasificación euclídea:**
Cada clase se representa por el centro de masas de sus datos de entrenamiento. Una nueva clase se clasifica en aquella cuyo representante sea el más cercano.
- **Clasificación gaussiana:**
Este clasificador se basa en la densidad de probabilidad de las clases y las expresa como combinaciones lineales de distribuciones gaussianas, clasificando cada nueva forma según la probabilidad de pertenencia a cada grupo.

3.3.2. Construcción del dataset

Esta es la parte del proyecto que mayor cantidad de tiempo ha demandado, debido a que ha requerido obtener una ortofoto del parque completo, generada de forma que sea regular y no presente fallos que induzcan errores al reconocedor.

Además, una vez obtenida esa ortofoto, se ha procedido a seleccionar y extraer cada uno de los paneles que se utilizará en el dataset de entrenamiento mediante el recorte de los mismos de la ortofoto. Siendo estos recortes imágenes de 19x31 píxeles.

El dataset utilizado para probar la herramienta se divide en 2 partes:

- **Dataset de entrenamiento:** compuesto por 40 imágenes correspondientes a paneles en buen estado, 33 imágenes correspondientes a paneles en mal estado y 191 imágenes correspondientes a terreno y otras estructuras.
- **Dataset de pruebas:** compuesto por 10 imágenes correspondientes a paneles (en buen y mal estado) y 10 imágenes correspondientes a terreno y otras estructuras.

Las clases sobre las que se pretende entrenar el clasificador son:

- **Panel solar:**
Set de imágenes que contiene fragmentos de la ortofoto correspondientes a paneles solares en buen estado.
- **No panel solar:**
Set de imágenes que contiene fragmentos de la ortofoto que corresponden con zonas de terreno o estructuras diferentes a paneles solares.
- **Panel solar dañado:**
Set de imágenes que contiene fragmentos de la ortofoto correspondientes a paneles solares en mal estado. Esta clasificación no es óptima en este punto debido a que, para generar los vectores de características de cada objeto, se usa el contorno extraído de la imagen, que en el caso de un panel solar debe ser un rectángulo de unas dimensiones concretas. Aun así, se añaden estas imágenes al set de entrenamiento para que los contornos de estos paneles, que podrían variar si se presenta un punto de interés en el borde de los mismos, sean reconocidos igualmente como panel, para ser posteriormente analizado.

Esta lista de imágenes, se utilizarán para entrenar la herramienta, usando la función “Crear base de conocimientos” y seleccionando el filtro correspondiente.

Para ello, la herramienta pasa el filtro a cada imagen, extrae su contorno, genera su vector de características y añade la etiqueta del grupo correcto (que se extrae del nombre del archivo) al vector, generando así una base de datos de vectores de características etiquetados con la clase a la que pertenecen.

3.3.3. Entrenamiento del reconocedor

Parte del código desarrollado consiste en una herramienta que genera una base de datos con los vectores de características del dataset de entrenamiento.

Esta base de datos, donde cada vector está previamente etiquetado con la clase a la que pertenece, sirve para que el reconocedor cuente con una base de conocimientos que le permita crear sus puntos céntricos de clase (para calcular distancias euclídeas), áreas de pertenencia (en el caso de análisis estadístico) o establezca los puntos que representan a los futuros vecinos del objeto a clasificar.

En el código de la herramienta podemos encontrar varios tipos de filtros para definir el vector de características de cada elemento. Este vector de características se trata del contorno de la imagen una vez se encuentra ésta en una escala de grises y es dependiente del tipo de filtro que se utilice para generarlo.

Para generar esta base de datos, se han de predefinir una serie de filtros a utilizar y ha de existir una carpeta con todas las imágenes que se vayan a utilizar como dataset de entrenamiento.

Estos filtros tienen como función pasar una imagen que está expresada en una escala de grises a una imagen que se expresa en una escala binaria (blanco y negro) y es un paso imprescindible para poder extraer el contorno de la imagen, el cual necesitamos para reconocer cada uno de los paneles solares de la ortofoto, para procesarlo posteriormente.

Gracias a que la librería OpenCV incluye múltiples tipos de filtros, de todos ellos, en la herramienta se hace uso los siguientes tres tipos de filtro para procesar la imagen:

- **Adaptativo por media:**
Si el pixel a filtrar supera la media de color del área, se le asigna el color máximo y viceversa.
- **Adaptativo gaussiano:**
Como el adaptativo por media, pero teniendo en cuenta una distribución de probabilidad de que el pixel tenga un color según el asignado al resto de vecinos en el área.
- **Otsu tras filtro gaussiano:**
Aplica la binarización de Otsu, que consiste en calcular la media de color automáticamente según el histograma de la imagen, después de aplicar un

filtro gaussiano. Se aplica de esta manera, ya que aplicar el filtrado Otsu en una imagen que no es binaria lo hace impreciso.

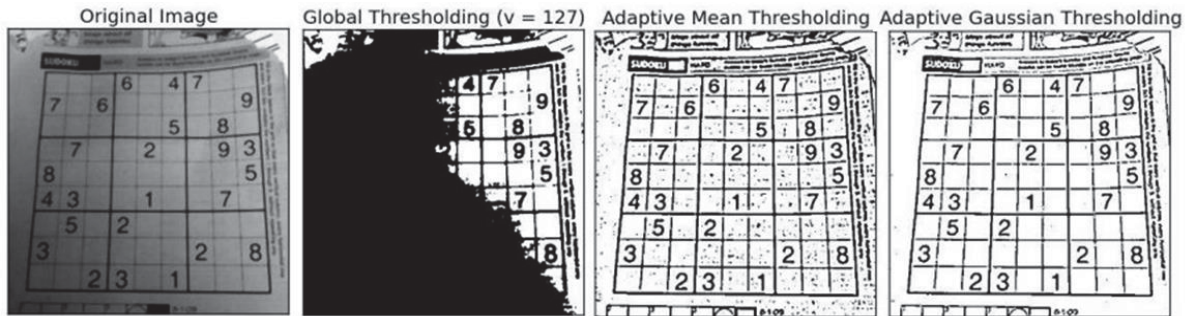


Figura 5. Resultado de aplicar los diferentes filtros a una imagen (imagen modificada de: https://docs.opencv.org/3.4.0/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html).

Imagen original	Imagen procesada

Figura 6. Imágenes filtradas mediante filtrado Otsu tras un filtro gaussiano.

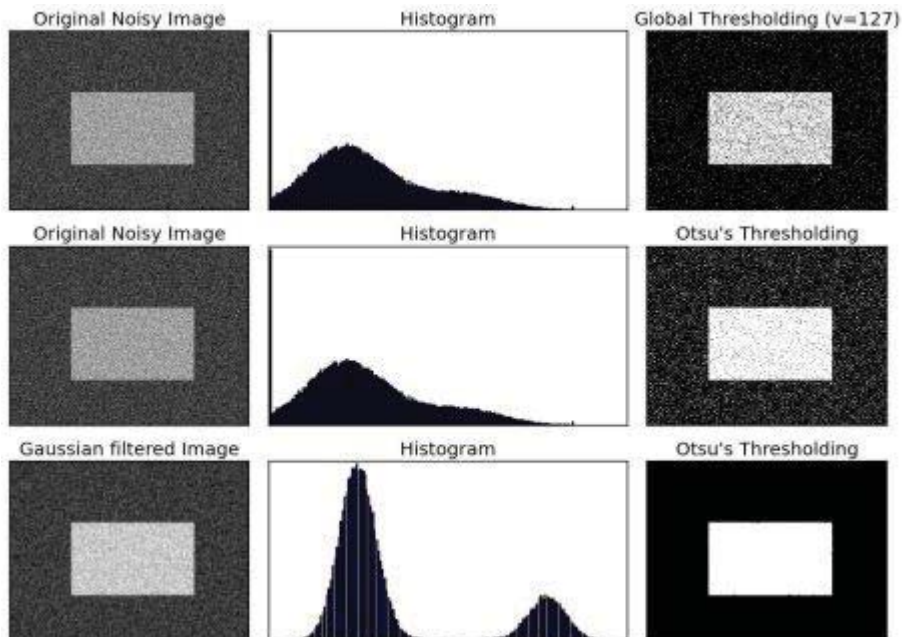


Figura 7. Comparativa de la aplicación del filtro Otsu tras un filtro gaussiano (imagen tomada de: https://docs.opencv.org/3.4.0/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html)

Una vez aplicado el filtro seleccionado, se procede a invertir el resultado y a extraer el contorno de la forma del cual extraeremos el vector de características, usando una función de la librería OpenCV llamada `drawContours`.

Teniendo ya preparado el contorno de la imagen, el programa calcula los momentos de H_u del contorno para usarlos como vector de características. Dado que la herramienta puede utilizar tanto los momentos de H_u como los momentos de Zernike, se estudiarán los resultados de ambos para ver cuál de los dos es más preciso en este caso de estudio.

En este momento, tendríamos el vector de características de una de las imágenes del dataset, ésta se añadiría a la base de datos y se procedería con las siguientes hasta haber procesado todas las imágenes de la carpeta.

3.3.4. Pruebas

La herramienta programada tiene una función que permite realizar pruebas de acierto sobre el clasificador, dando la opción de probar distintos algoritmos de clasificación.

Las pruebas de tasa de acierto de este clasificador se realizan sobre imágenes extraídas de la ortofoto, no contenidas en el dataset de entrenamiento.

Para realizar dichas pruebas, una vez entrenado el clasificador, se le asigna un número de elementos pertenecientes al dataset de entrenamiento, elegidos aleatoriamente y se le pide al clasificador que les asigne una clase. Después, el programa retorna el porcentaje de aciertos obtenidos.

Esta función no solo es interesante para probar qué algoritmos son más eficaces después de aplicar cada filtro, sino que somete a prueba la validez del dataset para que pueda juzgarse si este es completo y adecuado para los casos de estudio.

3.3.5. Fase 1: Reconocimiento de formas

El objeto sobre el que trabaja el reconocedor es la ortofoto generada anteriormente, la herramienta carga ésta y la trata como una matriz de píxeles sobre la que va trabajando.

Una vez se han definido las variables de entorno para el caso de estudio en la herramienta, tales como puntos GPS, GSD y dimensiones de los objetos a reconocer y analizar, la herramienta procede a fragmentar la ortofoto a estudiar en celdas más pequeñas con una superficie de solapamiento lateral predefinida y las analiza en busca de la forma de un panel solar y la recorre por filas. Dado que los paneles se instalan de forma matricial,

cuando la herramienta encuentra un panel, ésta empieza a segmentar la ortofoto directamente, de forma que extrae celdas adyacentes con un tamaño concreto, hasta que topa con una celda clasificada como algo distinto a un panel solar, momento en el que retoma el comportamiento anterior. En el momento en el que la herramienta detecta el final de la fila, pasa a la siguiente fila y continúa hasta el final de la imagen.













Descripción	Fragmento	Filtrado: adaptativo por media	Filtrado: adaptativo Gaussiano	Filtrado: Otsu tras filtro gausiano
Fragmento suelo				
Panel solar OK				
Panel solar mal				

Figura 8. Ejemplos de la fragmentación de la ortofoto.

Por último, se genera su vector de características con el algoritmo seleccionado y se les asigna una clase usando el clasificador entrenado.

3.3.6. Fase 2: Ubicación de panel

Una vez que la herramienta detecta un panel defectuoso, ésta selecciona la posición de dicho panel en la ortofoto y extrapola su posición GPS, además de numerarlo según el orden de aparición, de arriba abajo y de izquierda a derecha.

3.3.7. Fase 3: Análisis del Panel

Debido a que intentar analizar el estado del panel según el estudio del contorno generado por alguno de los algoritmos previamente listados ha resultado ser poco eficiente, debido a que si el fallo está en el centro de la figura, no se registra en su contorno y si está en un borde, altera el contorno de la figura haciendo que no se clasifique correctamente, se ha optado por una aproximación diferente, que es: una vez clasificada una imagen como panel, estudiar la variación de los valores de color de sus píxeles.

Dado que los paneles solares que funcionan en condiciones óptimas se calientan homogéneamente al tener todas sus celdas un comportamiento similar, si hacemos un conteo de todos los píxeles que componen dicho panel y los agrupamos según su valor de color (de 0 a 255) deberíamos observar que un porcentaje alto de estos píxeles están en la

media del valor (que podríamos predefinir según las condiciones meteorológicas presentes a la hora de realizar el vuelo). Sin embargo, si observamos que hay parte que mantiene una distancia considerable de la media, podemos considerar que hay (según la cantidad de estos) algunas celdas que presentan una mayor temperatura que las celdas aledañas, por lo que encontraríamos un punto de interés.

Los puntos de interés, una vez detectados, se clasifican de la siguiente manera:

- **Punto caliente:** punto con un incremento de temperatura superior a 10 °C respecto a la media.
- **Punto latente:** punto con un incremento de temperatura de entre 5 y 10 °C.

En la siguiente imagen podemos observar distintos fallos en las placas solares:

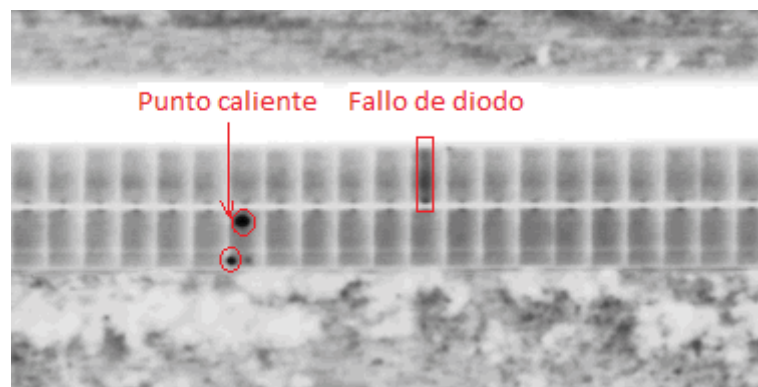


Figura 9. Distintos fallos en placas solares.

3.3.8. Fase 4: Emisión del preinforme

Una vez localizados los paneles con puntos de interés, la herramienta genera un documento con los siguientes puntos:

- La ubicación y la numeración del panel.
- La imagen del panel en el que se ha detectado un fallo.
- Una referencia a su posición en la ortofoto.

4. Resultados

Al utilizar la función TasaAcierto de la herramienta, podemos comprobar el porcentaje de acierto que ha tenido el clasificador seleccionado con la base de datos de aprendizaje generada.

A continuación se presentan los resultados de ejecutar dicha función tras crear dos bases de datos, una mediante los momentos de Hu (**Tabla 1**) y otra con los momentos de Zernike (**Tabla 2**).

Tabla 1. Momentos de Hu.

Adaptativo por media	Euclídeo	70%
	Gaussiano	50%
Adaptativo gaussiano	Euclídeo	65%
	Gaussiano	50%
Otsu tras filtro gaussiano	Euclídeo	75%
	Gaussiano	50%

Tabla 2. Momentos de Zernike.

Adaptativo por media	Euclídeo	85%
	Gaussiano	75%
Adaptativo gaussiano	Euclídeo	80%
	Gaussiano	65%
Otsu tras filtro gaussiano	Euclídeo	65%
	Gaussiano	65%

Las tasas de aciertos obtenidas aplicando los momentos de Zernike son en todos los casos muy superiores a las obtenidas aplicando los momentos de Hu. Esto puede deberse a que los momentos de Zernike son aptos para medir la forma del objeto, mientras que los momentos de Hu son más adecuados para medir tanto la forma como la estructura del objeto, por lo que incluyen otra información que pudiera resultar no relevante para el caso de estudio.

Como los polinomios de Zernike son ortogonales entre ellos, no hay redundancia de información entre los momentos, y esto repercute en que el reconocedor sea más preciso, dado que no hay información compartida, es decir, hay menos similitudes entre los momentos de dos imágenes distintas.

5. Conclusiones

Estos resultados indican que la herramienta no está siendo suficientemente precisa a la hora de clasificar una imagen como un panel o un “no panel”. Dado que el dataset cuenta con 40 entradas de paneles en buen estado, 33 de paneles en mal estado y 191 entradas de elementos distintos a un panel, se estima que es necesario aumentar el número de entradas de paneles solares y/o buscar otra aproximación a la hora de discriminar si una imagen es o no un panel, ya que la clase “no panel” tiene vectores de características tan diferentes que hace problemático el generalizarlos en una clase.

Por otro lado, la diferencia de precisión que se observa entre los clasificadores euclídeo y gaussiano parece estar propiciada debido a que la principal característica del filtro gaussiano, que se basa en la densidad de objetos de la misma clase, puede estar fallando al ser tan dispares los vectores de características y posiblemente al no haber suficientes datos en el dataset como para haber generado estas densidades correctamente, haciendo de esta forma, que el clasificador euclídeo sea más preciso en este caso concreto.

Opciones de mejora:

- Aumentar el número de entradas del dataset de entrenamiento.
- Tomar una aproximación diferente a la hora de diferenciar paneles de terreno.
- Trabajar directamente sobre las imágenes tomadas por la aeronave en vez de hacerlo sobre la ortofoto, ya que estas imágenes tienen mayor calidad y podríamos basarnos en imágenes con más información que los segmentos de ortofoto que se han utilizado.

Debido a que la obtención de imágenes necesarias para la construcción de la ortofoto y la generación de esta requirieron mucho más tiempo del estimado inicialmente, no se pudieron implementar las mejoras descritas anteriormente para aumentar la tasa de aciertos de la herramienta.

6. Bibliografía

<https://es.wikipedia.org/wiki/Fotogrametr%C3%ADa>

<https://es.wikipedia.org/wiki/Ortofotograf%C3%ADa>

<https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>

<https://www.ugcs.com/>

<https://prod.flir.es/products/flir-tools/>


<https://pyzo.org/>

<https://opencv.org/about.html>

https://docs.opencv.org/3.4.0/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html

https://es.wikipedia.org/wiki/Polinomios_de_Zernike

Este documento esta firmado por

	Firmante	CN=tfgm.fi.upm.es, OU=CCFI, O=Facultad de Informatica - UPM, C=ES
	Fecha/Hora	Sun Jan 13 19:39:22 CET 2019
	Emisor del Certificado	EMAILADDRESS=camanager@fi.upm.es, CN=CA Facultad de Informatica, O=Facultad de Informatica - UPM, C=ES
	Numero de Serie	630
	Metodo	urn:adobe.com:Adobe.PPKLite:adbe.pkcs7.sha1 (Adobe Signature)