



UNIVERSIDAD
DE
CÓRDOBA

INSTITUTO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO MÁSTER EN
ENERGÍAS RENOVABLES DISTRIBUIDAS

SISTEMA DE PREDICCIÓN DEL RECURSO SOLAR APLICADO A CENTRALES TERMOSOLARES

JAVIER RODRÍGUEZ BENÍTEZ

Trabajo para optar al Máster en Energías Renovables Distribuidas

Profesor Tutor:

ANTONIO MORENO MUÑOZ

Córdoba, (Junio, 2013)

© 2013, Javier Rodríguez Benítez



**INSTITUTO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO MÁSTER EN
ENERGÍAS RENOVABLES DISTRIBUIDAS**

SISTEMA DE PREDICCIÓN DEL RECURSO SOLAR APLICADO A CENTRALES TERMOSOLARES

JAVIER RODRÍGUEZ BENÍTEZ

Proyecto presentado a la Comisión integrada por los profesores:

**GONZALO CERRUELA
MARTA MARÍA VARO MARTÍNEZ
ISABEL SANTIAGO CHIQUERO**

Para completar las exigencias del Máster en Energías
Renovables Distribuidas

Córdoba, (Junio, 2013)

Autorización de Presentación del Trabajo Fin de Máster

D. ANTONIO MORENO MUÑOZ, Profesor TITULAR DE LA UNIVERSIDAD Y DIRECTOR DEL MÁSTER DE ENERGÍAS RENOVABLES DISTRIBUIDAS, del Departamento de ARQUITECTURA DE COMPUTADORAS, ELECTRÓNICA Y TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA (GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INSTRUMENTACIÓN COMPUTACIONAL Y ELECTRÓNICA INDUSTRIAL), de la Universidad de Córdoba, autorizan a D. JAVIER RODRÍGUEZ BENÍTEZ, con DNI 30986551P a presentar el trabajo titulado SISTEMA DE PREDICCIÓN DEL RECURSO SOLAR APLICADO A CENTRALES TERMOSOLARES, como Trabajo Fin de Máster del Programa Oficial de Energías Renovables Distribuidas de la Universidad de Córdoba.

El Trabajo Fin de Máster se presenta con carácter de Trabajo "DE INVESTIGACION".

Asimismo solicitan sea admitido para su defensa en la Convocatoria:			
Curso: 2012/2013			
Ordinaria:	Junio/Julio	<input checked="" type="checkbox"/>	Septiembre <input type="checkbox"/> Extraordinaria: Diciembre <input type="checkbox"/>
<i>Convocatoria Ordinaria, llamamiento de Junio: Solicitud de defensa de TFM: hasta el 20 de Junio Exposición y defensa de TFM: entre el 1 y el 10 de Julio Convocatoria Ordinaria, llamamiento de Septiembre: Solicitud de defensa de TFM: hasta el 10 de Septiembre Exposición y defensa de TFM: entre el 21 y el 30 de Septiembre Convocatoria Extraordinaria, llamamiento de Diciembre: Solicitud de defensa de TFM: hasta el 5 de Diciembre Exposición y defensa de TFM: entre el 16 y el 23 de Diciembre</i>			

Córdoba, a 28 de Junio de 2013

El Director
 Antonio Moreno Muñoz
 Fdo:

Informe del Director del Trabajo Fin de Máster

Como director externo de Javier Rodríguez Benítez, yo, Rafael Ayuso Sánchez de Puerta, he realizado un seguimiento exhaustivo de la trayectoria y nivel de realización de su trabajo.

Al respecto, cabe destacar que, debido a que la elaboración del TFM ha sido dentro de un entorno empresarial, colaborando con Magtel I+D+i, y de que, por tanto, se trata de un proyecto real, la participación de Javier ha sido profesional en todos los aspectos, esto es, cumpliendo con las exigencias de calidad y fecha de entrega establecidos, de lo que se deduce que la totalidad del trabajo ha sido realizado dentro del periodo de colaboración establecido con la Empresa.

En cuanto al desarrollo propio de su actividad particular, Javier, tras haber sido introducido en el proyecto adecuadamente, ha colaborado de forma prácticamente autónoma, alineando sus objetivos con el resto del equipo, y cumpliendo así con el plan general trazado. En pocas palabras, Javier ha cumplido con los objetivos para él marcados.

Además de ello, se ha valorado de forma positiva las soluciones prácticas que se han tomado para la consecución de los obstáculos que en el camino han aparecido y la comunicación y resolución de los mismos ha sido compartida con el equipo, fomentando así un ambiente de trabajo más productivo y ameno.

Javier ha satisfecho correctamente su labor profesional y de investigación ya que, además de la fase de desarrollo, el periodo de documentación y diseño de estructura general para acometer el proyecto ocupó una fracción representativa del cómputo temporal global reservado para la elaboración de este módulo. Como resultado de ello, la solución alcanzada ha cubierto la necesidad que se planteó y la evaluación de los resultados está prevista como parte de una fase posterior del proyecto.

Para finalizar, comentar que la colaboración de Javier con la Empresa ha sido muy satisfactoria, lo que evidencia la extraordinaria calidad de la formación impartida en el máster de Energías Renovables Distribuidas de la UCO, ya que desde el principio, Javier ha estado a la altura de la situación y ha sido conocedor de los factores principales que han intervenido en la resolución de proyecto.

Córdoba, a 28 de Junio de 2013

El Director externo

Rafael Ayuso Sánchez de Puerta

Fdo:

Propuesta de Tribunal para la Evaluación del Trabajo Fin de Máster

Profesor D.: Antonio Moreno Muñoz Email: el1momua@uco.es	
Departamento: Arquitectura de Computadoras, Electrónica y Tecnología Electrónica (grupo de investigación en Instrumentación Computacional y Electrónica Industrial)	
Como Director del Trabajo Fin de Máster especificado a continuación, se propone a la Comisión Académica del Máster los siguientes miembros para el Tribunal de Evaluación de dicho trabajo: Sistema de predicción del recurso solar aplicado a centrales termosolares	
Autor: Javier Rodríguez Benítez	
Perfil: investigador	
Curso académico: 2012/2013 Convocatoria: Junio	
TRIBUNAL PROPUESTO	
Profesores del máster	
1	Gonzalo Cerruela, Profesor Contratado Doctor, Dpto. de Informática y Análisis Numérico.
2	Marta María Varo Martínez, Profesora Contratada Doctora, Dpto. de Física Aplicada
3	Isabel Pilar Santiago Chiquero, Profesora Titular de la Universidad, Dpto. de Arquitectura de Computadores, Electrónica y Tecnología Electrónica.
Profesionales externos al máster	
4	Francisco López Banderas, Magtel
5	Jorge Pino Martínez, Magtel
6	Aurora Martínez Martínez, Magtel
Córdoba, a 28 de Junio de 2013. El Tutor del TFM: Rafael Ayuso Sánchez de Puerta	
Fdo: Rafael Ayuso Sánchez de Puerta	
Normativa de referencia: Artículo 9 de la NORMATIVA ACADÉMICA BÁSICA PARA EL DESARROLLO DE LOS MÁSTERES OFICIALES Aprobada por Consejo de Gobierno de 2 de marzo de 2007 y modificaciones posteriores. "Los trabajos de fin de Máster serán expuestos y defendidos en acto público ante un tribunal para su evaluación y calificación. Este tribunal será aprobado por la Comisión de Estudios de Postgrado, a propuesta del Consejo Académico del Máster y estará compuesto por tres o cinco miembros doctores, de los que al menos uno de ellos será externo al Máster, no formando parte del mismo, los profesores que hayan dirigido los trabajos objeto de evaluación. Si por alguna causa debidamente justificada, un director de trabajo de fin de Máster debiera formar parte del tribunal de estos trabajos, será sustituido en el proceso de evaluación del trabajo dirigido.	

Índice General

1.	Resumen.....	12
2.	Abstract	13
3.	Introducción y marco contextual	14
4.	Objetivo y Alcance.....	17
5.	Estado del arte.....	23
6.	Método de implementación.....	28
7.	Descripción de la planta termosolar	30
8.	Metodología	31
8.1.	Parametrización del modelo	32
8.2.	Configuración del campo solar	33
8.3.	Entrada de datos	34
8.4.	Validación de datos	36
8.5.	Filtrado de la imagen.....	36
8.6.	Restricción del área de procesamiento.....	37
8.7.	Cálculo de la posición solar	39
8.8.	Anulación de la estructura de la cámara.....	40
8.9.	Interpolación del área oculta	43
8.10.	Identificación de nubes	46
8.11.	Limitación de la zona determinante de la imagen	49
8.12.	Cálculo de la zona del campo solar afectada	53
8.13.	Cálculo de potencia solar extraída	55
9.	Futuras líneas de actuación.....	57
10.	Conclusiones.....	60
11.	Anexos	62
Anexo 1.	Funcionamiento de la cámara de nubes	62
Anexo 2.	Funcionamiento del ceilómetro	63
Anexo 3.	Funcionamiento del pirheliómetro	65
Anexo 4.	Funcionamiento <i>sun_position.m</i>	66
12.	Índice de ilustraciones.....	67
13.	Índice de tablas	68
14.	Bibliografía.....	69

1. Resumen

La consecución global de este proyecto conlleva desarrollar un sistema de predicción a corto plazo del recurso solar, focalizando el resultado final a la extracción y transformación de la radiación directa. Más concretamente, este proyecto consiste en un desarrollo informático que permite calcular la superficie sombreada¹ de un campo solar por acción de los obstáculos transitorios que constituyen las nubes. El origen de datos del sistema se compone de imágenes de frecuencia minutal provenientes de una cámara de nubes, datos de altura y composición de aerosoles del aire facilitados por un ceilómetro e información de radiación cedida por un pirheliómetro. La herramienta desarrollada analiza el contenido de una fotografía de la bóveda celeste realizando las siguientes sub-tareas: Filtrado paso alto para realzar los bordes, reducción del área a procesar en función del foco de visión deseado, cálculo de la posición de los elementos capturados que forman parte de la estructura de la cámara y aplicación de una máscara, extrapolación de la información de la imagen oculta tras los elementos de la estructura, aplicación de un algoritmo que determina qué información de la imagen se corresponde con cielo y qué parte se corresponde con una nube, cálculo de la posición relativa del Sol en la imagen y la zona de bóveda que infiere sobre el campo solar descartando el resto de información, superposición de las nubes sobre el campo solar y cálculo de la potencia solar teórica capturada.

Palabras Claves: energía renovable, termosolar, procesamiento de imágenes, interpolación de imágenes, cálculo del sombreado, estimación de potencia.

¹ Entendiendo como sombreado no un área con sombra (umbra y penumbra) sino el área resultante de trasladar al suelo los obstáculos que se interponen entre el Sol y el campo solar, independientemente de que visualmente se halle oscurecida.

2. Abstract

The global aim of this project is developing a short time solar forecasting system (nowcasting), focusing on the direct irradiation extraction. Within this global target, this project is a computer tool to calculate the shading surface of a solar field produced for transient obstacles, better said, the clouds. The system data source includes minatural frequency images from a total sky camera, information about height and air composition given for a ceilometer and irradiation data taken from a pyrhelimeter. The developed tool analyses a whole sky picture and does several tasks: high pass filtering to encouraging the edges, reduction of processing area based on focus of vision parameter, detection of the camera arms position and application of a mask, calculation of hidden information by the arms, application of an algorithm in order to determinate the information of each pixel (if it is a cloud or a sky zone), calculation of relative solar position within the picture and the sky area involved in the solar field shading and ignoring the rest, superimposing the clouds over the solar field and finally, calculation of the theoretical solar power captured.

Keywords: renewable energy, thermosolar, image processing, image interpolation, shadowing, power estimation.

3. Introducción y marco contextual

El abastecimiento energético se presenta en la actualidad como una de las principales necesidades globales a cubrir y supone, para todas las economías mundiales, un elemento estratégico, ya se trate de un país exportador de energía como sobre todo, importador, porque se establece así una dependencia muy importante.

Las principales fuentes energéticas que representan esta dependencia son aquellas que provienen de combustibles fósiles (gas y petróleo). La explotación de estos recursos se destina principalmente a:

- Generación de energía eléctrica.
- Combustión para climatización.
- Combustión para el funcionamiento de medios de transporte.
- Fabricación de materiales plásticos, pinturas, medicinas, etc.

En el aspecto de la generación eléctrica, bien se trate de consumo industrial o consumo individual, las energías renovables están jugando un papel crucial, ya que se cada vez más se establecen como una alternativa sostenible, rentable y lo suficientemente eficiente como para promocionar el autoconsumo, prescindiendo total o parcialmente de fuentes tradicionales como el suministro eléctrico convencional que, como se ha mencionado, se genera en su mayoría a través del consumo de combustibles fósiles.

En la actualidad existen multitud de vías de aprovechamiento de recursos renovables para la generación eléctrica, donde cabe destacar la energía eólica, la energía solar termoeléctrica y la fotovoltaica, ya que todas ellas se caracterizan por poseer un grado de madurez lo suficientemente elevado como para ofrecer una alternativa sólida, eficaz y rentable y competir con el resto de energías prescindiendo, en ocasiones, de incentivación económica para su instauración.

Estas fuentes energéticas abarcan tanto el ámbito industrial como el consumo propio, ya que energías como la solar fotovoltaica son muy modulares y permiten ser instaladas sobre pequeñas superficies, por lo que están al alcance de los consumidores minoritarios (mercado *retail*).

Sin embargo, la mayoría de las energías renovables presentan desventajas notables que impiden la completa sustitución de los métodos de extracción tradicionales. Entre los más notables se encuentran:

- Baja calidad de servicio (*QoS*). El sistema energético actual establece unos niveles mínimos en cuanto a la calidad del servicio prestado, estableciendo un número determinado de interrupciones del servicio anuales y unos tiempos de reparación establecidos, además de unos valores de tensión y frecuencia fijados en un intervalo muy acotado. En el caso de no cumplir alguno de estos requisitos, los proveedores energéticos son penalizados. Las actuales energías renovables no se encuentran en condiciones de prestar el servicio eléctrico con la misma *QoS* que los proveedores actuales.

- Restricciones en la indisponibilidad del recurso. Por la propia naturaleza del recurso renovable del que se trate, éste puede no estar disponible a lo largo de todo el día. Este hecho es obvio si se piensa en energía solar o en energía eólica que, en días nublados y sin ráfagas constantes de vientos, respectivamente, no disponen del recurso necesario para la producción energética.
- Indisponibilidad geográfica. En ocasiones, el recurso renovable no está disponible en todas las zonas geográficas o no existen las condiciones óptimas o incluso mínimas que permitan la instalación de centrales capaces de aprovechar el recurso. Este es el gran inconveniente que presenta la energía eólica que, pese a ser la más atractiva, las zonas geográficas que permiten la instalación de parques eólicos (condiciones de viento fuerte y constante) son escasas.
- Límite de actuación dentro de un intervalo. Derivado del punto anterior, y aun en el supuesto de contar con condiciones favorables, las centrales eólicas y solares tienen límites de actuación impuestas por las variables meteorológicas que obligan, en el caso de sobrepasar unos límites establecidos, a parar la extracción energética. En el caso de la energía eólica, sobrepasar el umbral de velocidad del viento genera sobretensiones y/o turbulencias. En cuanto a la energía termosolar² se refiere, la temperatura excesiva puede degradar el fluido caloportador.
- Coste por encima de las fuentes tradicionales. Las tecnologías tradicionales de extracción energética se encuentran en un grado de madurez muy avanzado (referido a términos de economías de escala), por lo que los costes de producción se hallan muy depurados. Desde el punto de vista del autoconsumo, las energías alternativas, aunque competitivas, suponen un coste inicial muy superior, lo que es un obstáculo en su despliegue y comercialización. Desde el punto de vista de la producción industrial, el marco regulatorio y su promoción incentivada en combinación con el mercado ha proporcionado una situación insostenible.
- Gestionabilidad y almacenamiento. El mercado energético actual se establece a través de la subastación de "lotes" de energía según la demanda esperada del recurso para la jornada y/o periodo de negociación. Cualquier variación del pronóstico de la demanda debe ser cubierta instantáneamente, obligando a los proveedores energéticos a aumentar/disminuir la producción. La mayoría de las energías renovables no son gestionables, ya que no se puede regular el recurso natural del que se sirven. Las alternativas que hacen posible la gestionabilidad pasan por métodos de almacenamiento que, actualmente, muchos de ellos se encuentran en fase de ensayo de laboratorio. La única excepción la representa el almacenamiento en sales fundidas que, pese a ser viable y hallarse en una fase más madura, solo es aplicable a la energía solar térmica y presenta un coste elevado.
- Incapacidad de predicción. Muchas fuentes energéticas renovables se sirven de recursos naturales que, a menudo no son predecibles de forma exacta. La predicción del recurso natural es un factor clave de cara a la venta en el mercado energético ya que, en caso de no proporcionar el "lote" que ha sido adjudicado a un proveedor, éste está expuesto a ser penalizado. La predicción de variables como el viento o el sol es hoy en día una vía de investigación abierta.

² Aunque en el ámbito energético se habla comúnmente de energía "termosolar", en realidad se entiende que se trata de energía solar termoelectrica.

Pese a todos los inconvenientes citados, las energías renovables suponen una alternativa viable para la sustitución parcial de algunas fuentes energéticas tradicionales, reservando los recursos de los que se sirven (gas, petróleo) para otros usos más recomendables y necesarios. Además de ser una alternativa, supone un valor estratégico y ecológico que hay que abordar, ya que las fuentes de energía derivadas de combustibles fósiles, lejos de no ser renovables, constituyen un bien escaso que aumenta su precio paulatinamente.

Junto con la energía eólica, las alternativas solares, debido a su modularidad y escalabilidad, presentan cualidades muy atractivas, siendo particularmente la energía termosolar la que más expansión presenta en el mercado actual.

Actualmente existen proyectos faraónicos de despliegue de centrales termosolares porque el recurso solar es abundante en multitud de zonas geográficas, principalmente en zonas de gran radiación anual como desiertos donde no existen grandes zonas pobladas ni provistas de yacimientos, páramos, o parajes protegidos por razones ecológicas.

En consecuencia, la inversión en investigación y fuentes de energía renovable y ecológica suponen un valor estratégico y competitivo fiable. Entre los puntos clave que permitirán la imposición de fuentes renovables destacan:

- Aumento de la capacidad de almacenamiento y abaratamiento de costes. Actualmente, la producción energética podría ser suficiente si coincidiese con la curva demanda de los consumidores. Sin embargo, como esta situación no es la que actualmente se da, la solución pasa por idear sistemas de almacenamiento masivo que superen en capacidad y ahorro de costes a los actuales medios de que se disponen. Esta línea de investigación es la más importante.
- Aumento de la gestionabilidad del recurso. Impacta directamente en el punto anterior e incluye un mayor conocimiento de la naturaleza del recurso. El conocer profundamente el comportamiento del recurso natural conlleva la capacidad para predecir su comportamiento, y adaptar así las labores de gestión y operación. Pese a que existe un profundo conocimiento del comportamiento del recurso con respecto a las variables que lo determinan, los métodos de análisis tradicionales y, sobre todo, el número de variables que intervienen en la extracción energética son insuficientes para lograr predecir con exactitud la disponibilidad del recurso con antelación suficiente.

Particularizando al ámbito español, la situación económica actual no facilita el despliegue de plantas eléctricas de energía renovable pero, sin embargo, se debe aprovechar la experiencia desarrollada en este ámbito y el potencial de España como país, bien sea dentro de la propia economía española o como bien a exportar a otros países interesados. Los proyectos futuros en este ámbito pueden reservar para España una posible vía importante de desarrollo y crecimiento económico.

4. Objetivo y Alcance

El planteamiento de este proyecto se basa en profundizar en uno de los inconvenientes anteriormente citados, paliando o eliminando un punto negativo hacia el desarrollo de las energías renovables. El objetivo del proyecto global es el desarrollo de un sistema de predicción energética aplicado sobre una planta termosolar de tecnología de captadores cilindro parabólicos (en adelante, CCP) con un sistema de almacenamiento basado en sales fundidas. A continuación se realizará un desarrollo inductivo que acotará el *scope* del proyecto particular.

Para determinar el valor de la extracción energética entran en juego tres sistemas:

- Modelo físico de la instalación termosolar. Es necesario elaborar un modelo de simulación muy preciso que recree el comportamiento de la central termosolar en el que intervengan todos los módulos que la componen, lo que abarca el campo solar, el tren de vapor y el módulo de potencia. Los valores de las variables de trabajo son adquiridos desde el sistema de extracción de datos *SCADA* desplegado en la planta. Estas variables conforman la entrada del modelo físico que reproduce el comportamiento de la planta adaptándose dinámicamente a las fluctuaciones de las variables de entrada. Este modelo, por tanto, admite pocas o ninguna simplificación, por lo que es necesario incluir en el modelo todos los nodos de interconexión de equipos, así como funciones altamente precisas que recreen el comportamiento de cada dispositivo. La complejidad de este modelo radica en dos aspectos:
 - Modelado exacto del comportamiento de cada sistema. En función de la linealidad del sistema se aplican técnicas de análisis estadístico, funciones matemáticas, funciones fruto del análisis empírico o inteligencia artificial basada en algoritmos genéticos.
 - Número de sistemas intervinientes. Habitualmente, tanto en el estudio de las plantas termosolares como en la representación de algunos modelos informáticos, se incluyen los principales módulos que intervienen en los procesos, pero se obvian gran cantidad de sistemas auxiliares que repercuten directa y colateralmente en la producción energética.
- Modelo de predicción del recurso solar. Es necesario el diseño e implementación de un modelo de predicción del recurso solar irradiante sobre una zona geográfica determinada. Los datos de partida son recogidos por instrumentación meteorológica instalada en la planta, que arrojan en todo momento diversos indicativos del estado de la atmósfera. Además, el principal problema lo representan las nubes que, al actuar de forma transitoria por variar su posición en un intervalo de segundos o minutos, provocan cambios bruscos de temperatura (estrés térmico) y reducen la vida útil de los captadores, además de imposibilitar un cálculo preciso de la potencia solar ideal extraída. El desplazamiento de los transitorios repercute directamente en las labores de operación y mantenimiento de la planta (*O&M*).
- Interfaz de usuario. Todos los resultados se muestran a través de una interfaz gráfica amigable e intuitiva. Esta interfaz sirve como reflejo de la interacción de los modelos anteriores y conformar una herramienta de trabajo para el operador de planta ya que, en base a los resultados obtenidos y el horizonte temporal de predicción, el sistema propone al operador una serie de alternativas o actividades a realizar, siempre con el

objetivo de optimizar la producción eléctrica, o lo que es lo mismo, el rendimiento de la planta.

El sistema de predicción de extracción energética será una combinación de todos los modelos, en el que el sistema de predicción solar es la principal entrada del modelo físico de la planta termosolar y la interfaz de usuario es el nexo con el operador de planta.

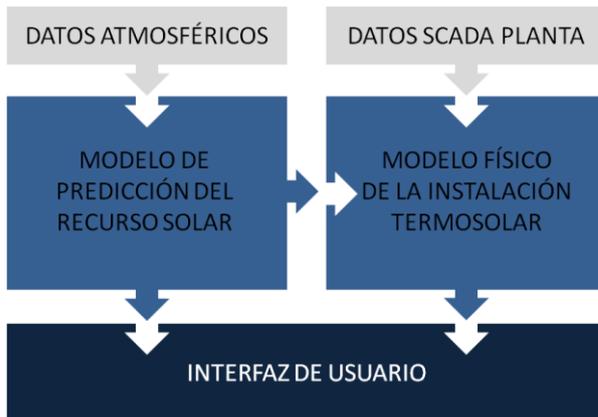


Ilustración 1. Módulos del *Master Plan*

De los tres módulos principales anteriormente citados, el foco del proyecto se centra en el diseño del modelo de predicción del recurso solar. A continuación se analizan las principales ventajas que aporta este sistema, justificando así su elaboración, más que por el mero hecho de conformar la entrada primordial de datos:

- Evitar penalizaciones del mercado energético. El sistema energético actual establece una penalización para aquellas fuentes energéticas que no disponen de medios de predicción del recurso del que se sirven ya que, derivado de este hecho, no son capaces de estimar con una precisión considerable la cantidad de energía que pueden ofrecer, lo que aporta inseguridad que se traduce en un riesgo. El mero hecho de no poder predecir el recurso implica una penalización, a la que se le puede sumar, si procede, la penalización impuesta por un incumplimiento del paquete de energía adjudicado en la subasta, de la que ningún proveedor energético está exento.
- Profundizar en sistemas de mantenimiento predictivo. El modelo arroja un valor teórico de extracción energético, que puede ser contrastado con el valor real. El índice de desviación entre el valor calculado y el valor real evidencia una malfunción del sistema físico. Se establece así un umbral a partir del cual, se deberán revisar los procesos de la planta y se podrá predecir una avería o, al menos, anticipar las tareas devengadas de la misma como puede ser el transporte, adquisición de materiales, etc. ya que en función de la avería detectada, el sistema propondrá una serie de acciones contingentes para solventar la malfunción. El mantenimiento predictivo es de todas, la clasificación menos desarrollada, por lo que este punto añade un valor diferenciador y competitivo al proyecto. La elaboración de técnicas de mantenimiento predictivo reduce el número de acciones correctivas.
- Mejora de la financiación. La puesta en marcha de este sistema aumentará el conocimiento exhaustivo de este tipo de plantas de generación eléctrica y el dominio de la gestión del recurso renovable solar. Cuanto más profundo y sólido sea el conocimiento sobre este tipo de proyectos, más garantías se ofrecen a la hora de solicitar financiación por parte de una entidad privada o una entidad financiera, lo que

repercute en la viabilidad de financiación o en las condiciones impuestas por la entidad financiadora.

- Optimización de la inversión. El mantenimiento predictivo ayuda a reducir el desgaste propio de la actividad de una planta, ya que elimina parcial o totalmente la repercusión que una avería causa en el resto de sistemas *aguas abajo*. Esta ventaja repercute directamente sobre el coste de la inversión, el flujo de caja del proyecto y el retorno de la inversión (*ROI*) lo que, dicho de otro modo, mejora los coeficientes económicos del estudio de viabilidad.
- Aumenta la gestionabilidad y la operación. Tener un conocimiento del comportamiento de las variables que determinan la explotación eléctrica aumenta la capacidad de maniobra y/o permite adaptar mejor la estrategia de extracción, modificando las operaciones con mayor criterio y anticipación. Debido a la existencia de los sistemas de almacenamiento de la planta, el conocimiento anticipado de las variables meteorológicas mejorará la operatividad y gestionabilidad de este sistema.

Derivado del enfoque adquirido, orientado a la optimización de la inversión realizada a través de la predicción precisa de los parámetros atmosféricos, que son los responsables del desarrollo del tren de vapor, se auto-induce el concepto de *termoeconomía* como eje principal del estudio. Además de ello, el carácter predictivo del mantenimiento relaciona el estudio dentro del ámbito de la eco-innovación, ya que la consecución del sistema promueve la reducción de emisiones de CO₂ y previene incendios y explosiones derivadas de un funcionamiento anómalo en la planta.

La predicción de fenómenos atmosféricos es un ámbito ampliamente estudiado. Quizás el ejemplo más cercano lo representa la predicción meteorológica convencional. Este enfoque tradicional basado en métodos numéricos no es válido para el objetivo del proyecto debido al horizonte temporal y la resolución espacial que aporta. En la actualidad, también existen centrales fotovoltaicas que disponen de un sistema de predicción similar basado en modelos de persistencia³ que también se consideran insuficientes. Es por ello que se acude a métodos alternativos o complementarios que conformen una herramienta de predicción que satisfaga las necesidades requeridas.

Se ha ideado, por tanto, un sistema que comparte algunas cualidades desarrolladas en modelos ya utilizados de predicción meteorológica pero que incluye, además, una serie de peculiaridades y métodos alternativos y novedosos que conforman, en conjunto, un sistema avanzado y preciso de predicción del recurso solar.

Este sistema combina dos grandes técnicas:

- Procesado de imágenes satelitales. Las imágenes captadas por satélite ayudan a componer una idea sobre el contenido más externo de la atmósfera, proporcionando información sobre estratos que no son perceptibles desde la superficie terrestre. Además de ello, esta fuente aporta información sobre las áreas adyacentes a la zona de estudio (el campo solar), lo que permite anticipar fenómenos que influyen en la extracción solar con suficiente antelación. De forma resumida, se puede decir que el análisis de imágenes satelitales ayuda a definir el comportamiento global de la atmósfera sobre la región de estudio. El correcto análisis de esta fuente aporta

³ Estos modelos asumen que el comportamiento del fenómeno a considerar, en este caso, la radiación solar sobre la planta, va a permanecer constante en el intervalo de tiempo siguiente al considerado.

predicciones fiables en horizontes temporales medios (horas). Sin embargo, carece de resolución espacial suficiente, ya que la granularidad que se puede extraer es del orden de kilómetros o cientos de metros. Derivado del horizonte temporal de este método se acuña el término de *forecasting*, refiriéndose a sistemas de predicción a corto plazo.

- Procesado de imágenes terrestres de la bóveda terrestre. El procesado de esta fuente se centra en definir el comportamiento de la atmósfera en la zona exacta del campo solar. La frecuencia de refresco de los datos de entrada es muy superior a las imágenes satelitales, hasta alcanzar un máximo de imágenes intra minutales. Esta fuente aporta beneficios donde las imágenes satelitales se muestran más carentes. La resolución espacial aumenta hasta el orden de decenas de metros o metros. Sin embargo, el horizonte temporal fiable es de minutos u horas. De forma homóloga al apartado anterior, en este caso se considera este sistema como un método de *nowcasting*, ya que el horizonte temporal es muy a corto plazo.

Para el análisis de estos datos se emplearán diversas técnicas, entre las que destacan:

- Métodos ARIMA. La fiabilidad de este método estadístico basados en modelos numéricos está ampliamente contrastada y su aplicación práctica se puede encontrar en métodos tan establecidos como los modelos de predicción meteorológica habituales. Esta técnica está muy depurada y documentada, por lo que su implementación no introduce grandes incertidumbres.
- CMV (*Cloud Motion Vector*). Este método basado en correlaciones cruzadas se emplea para determinar el movimiento de las nubes. El algoritmo sobre el que se basa este método es conocido y su implementación, aunque supone un coste computacional elevado proporcional al tamaño de la imagen, no supone un obstáculo.
- Redes neuronales artificiales. Este método tiene múltiples ámbitos de empleo, ya que se puede parametrizar para describir el comportamiento de cualquier fenómeno. Su naturaleza no es estadística, pero su precisión y fiabilidad supera, en ocasiones a los métodos estadísticos. Requiere de un tiempo de aprendizaje, lo que podría provocar un elevado coste computacional. Debido a su novedad y su incorporación reciente en aplicaciones de ingeniería supone:
 - Un riesgo por incertidumbre. La implementación de este método en plataformas convencionales es novedosa, por lo que su ubicación en el cronograma global del proyecto debe tener holgura, previendo complicaciones, modificaciones y optimizaciones.
 - Un aspecto diferenciador y vanguardista. Este hecho aporta un carácter de *I+D+i* al proyecto ya que su implementación en este tipo de aplicaciones es novedosa.

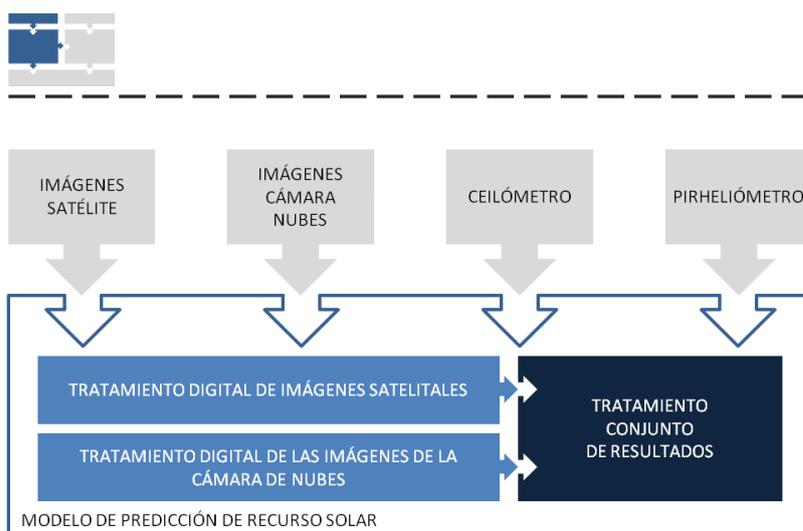


Ilustración 2. Módulos del sistema de predicción del recurso solar

El ámbito de actuación del proyecto se centra en el tratamiento digital de las imágenes facilitadas por la cámara de nubes. Este módulo se ha diseñado de tal forma que se adapta en el flujo de datos con el resto de datos del sistema completo, donde conforma una de las entradas principales del módulo de evaluación general. Sin embargo, por su arquitectura, este módulo posee significado por sí mismo de forma que su actividad puede ser llevada a cabo e interpretada de manera aislada al resto del sistema. La razón por la que se requiere de esta arquitectura es para llevar a cabo la calibración y testado del módulo de forma independiente manteniendo así una traza constante de las cualidades que aporta cada módulo.

Este módulo, al igual que el encargado del tratamiento de las imágenes satelitales, posee tres actividades principales (enunciados cronológicamente según la ejecución secuencial):

- Cálculo teórico de la radiación directa instantánea incidente en los colectores. Este apartado conforma el punto de partida del módulo y tiene dos objetivos principales:
 - Formatear adecuadamente la fuente de datos, estableciendo un área de análisis, aplicando algoritmos que ayuden a extraer la información de la imagen y corrigiendo algunos parámetros que, en conjunto, aporten todos los medios para extraer la máxima información de la fuente de datos.
 - Obtener la superficie sombreada⁴ como resultado de la interceptación de las ondas lumínicas solares por las nubes. El resultado de esta actividad es proporcionar una cifra de radiación captada en el campo solar.
- Cálculo del error producido en la predicción anterior con respecto a la muestra actual. El sistema es iterativo, donde la fuente de datos es una ventana temporal del instante actual (t_0) y el anterior (t_{-1}) que da como resultado información del instante siguiente (t_{+1}). El sistema realizará una comparación entre la superficie sombreada obtenida en el apartado anterior con la superficie sombreada predicha en el ciclo anterior. Nótese que las dos superficies a comparar se corresponden con instantes de tiempo iguales. La fiabilidad del sistema se verá reflejada en el índice de acierto obtenido. Dando por

⁴ Al igual que la nota al pie del apartado **Resumen**, el sombreadamiento no adquiere el significado cotidiano de sombra compuesta por umbra y penumbra, sino que se entiende sobre la superficie que no goza de radiación directa, independientemente de que visualmente se halle oscurecida.

hecho que siempre existirá un error como resultado de la falta de aprendizaje del sistema en un inicio y la componente estocástica del comportamiento de las nubes, se iniciará un proceso de recálculo de los pesos que configuran el sistema de predicción.

- Predicción de la siguiente muestra. Con los pesos previamente calculados en el apartado anterior, el algoritmo de predicción basado en redes neuronales predecirá el sombreado en el siguiente instante futuro. Este resultado se utilizará en el siguiente ciclo como elemento comparativo.

Siguiendo un orden cronológico en tiempo de ejecución, el objetivo del proyecto se ajustará a la implementación del primer apartado de este módulo, es decir, a la elaboración de un modelo computacional que calcule la radiación directa en los colectores del campo solar.

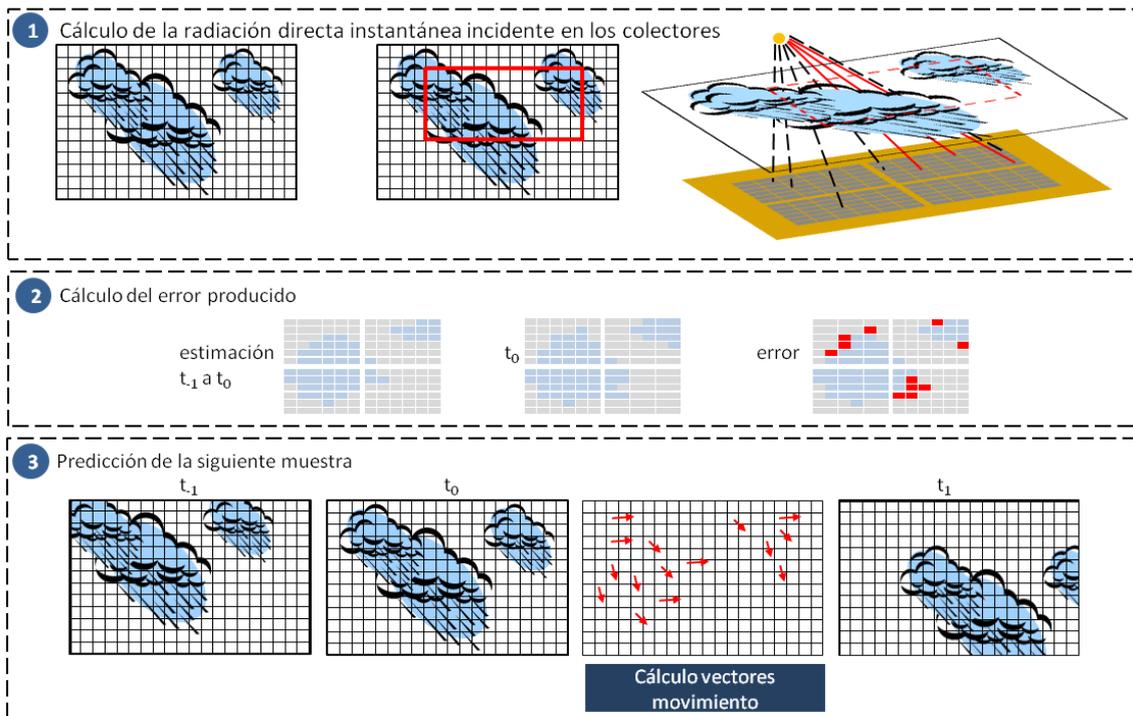


Ilustración 3. Modelo de análisis de las imágenes de la cámara de nubes

5. Estado del arte

A continuación se presentan las conclusiones alcanzadas tras haber realizado una investigación bibliográfica en diversas fuentes de información, entre las que se distinguen:

- Revistas especializadas
- Tesis doctorales y proyectos fin de carrera
- Artículos publicados accesibles desde Internet
- Páginas webs especializadas

Se ha realizado un análisis de la información obtenida dando como resultado una clasificación que se ha elaborado en base a:

- Actualidad de la información. Se ha ordenado la información por orden de publicación de forma que las fuentes de mayor actualidad tengan más peso que las antiguas, debido a que se asume que las técnicas han sido mejoradas con el paso de tiempo, debido, entre otras razones, a la mejora en la potencia de computación.
- Nivel de precisión. Se les ha restado prioridad a aquellos estudios que han arrojado conclusiones o resultados imprecisos o poco fiables, ya que actualmente existen modelos conocidos que establecen cierto margen de confianza y precisión como, por ejemplo, los modelos numéricos.
- Solapamiento con otras fuentes. Existen numerosas publicaciones en las que la información que proporcionan parecen provenir de estudios preliminares. Es importante contar con la información originaria ya que cuando se particulariza a un tema concreto pueden perderse matices.
- Viabilidad económica y por nivel de sofisticación. Es necesario eliminar aquellos estudios que, bien se deba a su nivel de complejidad y/o comprensión, o la inversión requerida, escapan al alcance de este proyecto. Es primordial encontrar una solución intermedia lo más cercana a la finalidad perseguida pero asegurando en todo momento, el pleno conocimiento de los métodos que se aplican.
- Utilización práctica con otra finalidad. Se le da especial importancia a aquellos trabajos que, tras haber superado la fase de estudio, han sido empleados con una finalidad específica, lo cual sirve de aval para su despliegue con la finalidad que se persigue en este proyecto.

Siguiendo las pautas anteriormente comentadas y en línea con el objetivo fijado para este proyecto se ha realizado un análisis de las iniciativas llevadas a cabo con antelación.

Primeramente, cabe destacar que, en numerosas ocasiones y en el caso del que se trata, el eje fundamental sobre el que se focaliza y orienta el objetivo de los proyectos es la predicción fidedigna de la capacidad de extracción eléctrica con fines económicos [1], con independencia del medio que se utilice para llevarla a cabo. Esta aclaración, aunque puede resultar superflua, tiene una repercusión notoria, ya que define este proyecto como módulo imprescindible pero no determinante de un sistema de mayor envergadura y complejidad. La finalidad última, por tanto, no es la maximización de la captación solar, sino la maximización de la producción

eléctrica, hecho que, derivado de las variables que componen el mercado energético de negociación y de otra serie de actores del sistema, repercute en que no siempre se trata del mismo objetivo, sino que es necesario conjugar todos los módulos bajo una estrategia de explotación [2] .

Cualquier estrategia solo tiene sentido si se orienta a acciones futuras. En este caso particular, dejando a un lado los objetivos a largo plazo, la estrategia a desarrollar se elaborará para un horizonte "cortoplacista", donde la clave del negocio se basa en la anticipación, es decir, en configurar la estrategia con arreglo al comportamiento futuro inmediato de la radiación solar. Actualmente, la mayoría de los estudios de fenómenos recurrentes están basados en cálculo estadístico, donde la probabilidad del suceso se obtiene a partir de su comportamiento histórico. Los métodos estadísticos son el medio tradicional de análisis debido, sobre todo a:

- **Fiabilidad.** Actualmente, las matemáticas asociadas al cálculo estadístico están muy desarrolladas, consiguiendo resultados altamente fiables que son capaces de predecir sucesos con una probabilidad de acierto alta.
- **Trazabilidad.** Los resultados alcanzados están claramente justificados si se repasa el cálculo realizado. De esta forma, la repercusión de cada variable que interviene en el sistema está muy definida.

Centrando el foco en la resolución de problemas atmosféricos, los métodos numéricos, métodos ARIMA y redes Bayesianas se emplean frecuentemente y sus resultados son más que satisfactorios, [9] , [3] . Sin embargo, en sistemas complejos, donde el número de variables que intervienen es muy elevado, en ocasiones, los métodos estadísticos no llegan a definir el comportamiento del sistema con la determinación esperada.

Actualmente, el gran avance en hardware informático permite realizar en número desorbitado de cálculos en un periodo de tiempo muy pequeño. Teniendo en cuenta este hecho, se puede explotar la capacidad de adaptación basándose en la experiencia (ensayos prueba y error) para llegar a definir el comportamiento de un sistema. La inteligencia artificial se basa en este hecho y, en ocasiones, el grado de definición del sistema sobrepasa al que los métodos estadísticos son capaces de dar, debido, entre otras cosas, a la capacidad para adaptarse a la variaciones del sistema y reaccionar en consecuencia [12] . Aunque se concluye la utilización de estos métodos frente al enfoque estadístico, es necesario afrontar que el rigor matemático se verá desplazado por la eficacia práctica. Además, este método introduce una fase de aprendizaje para que el sistema sea capaz de "asimilar" el funcionamiento e interacción de las variables.

La fuente principal de información que conforma el origen de datos para el cálculo de la predicción tradicionales son imágenes satelitales [14] o capturas de la bóveda celeste realizadas por las llamadas "cámaras de nubes" [13] . Para la evaluación de ambas fuentes con el objetivo de establecer una preferencia o usabilidad, es necesario evaluar dos aspectos clave:

- **Horizonte temporal.** Se entiende por este concepto como el espacio de tiempo donde las predicciones que se arrojan tienen una probabilidad de acierto óptima, sobre la cual el sistema ha sido diseñado.
- **Resolución espacial.** Entendido como la granularidad que ofrece cada sistema, la ventaja bondad de este parámetro radicará en aportar una determinación lo más pequeña posible, es decir, saber con precisión en qué punto se recibirá qué radiación,

donde el punto se especificará con un error de un orden de magnitud lo más pequeño posible.

- Frecuencia de muestreo. Entendido como el número de veces que se produce un evento, durante un periodo de tiempo. En este caso, el evento es la adquisición de una nueva imagen.

Las imágenes provenientes de las cámaras de nubes ofrecen una predicción fiable hasta un horizonte de una hora pero con una resolución espacial de metros o decenas de metros.

La interpretación de imágenes satelitales aumenta la precisión del pronóstico de la radiación solar global con mayor precisión a un horizonte más largo, con una resolución espacial de kilómetros cuadrados y con un refresco de captación de imágenes de 15 minutos. Los errores que aporta el sistema basado en este tipo de imágenes oscilan entre el 10% en horizontes de hasta 30 minutos y se disparan en horizontes más lejanos (40% en 6 horas).

La terminología que se emplea con respecto a los diferentes horizontes de predicción varían en base a las horas que se cubren manteniendo la probabilidad de acierto seleccionada como objetivo. Según el horizonte temporal a predecir, se habla de:

- *Nowcasting* (0-6 horas). Su objetivo es determinar las labores de operación y mantenimiento.
- *Short-Term* (hasta 48 horas). Determina la estrategia de venta de la energía y facilita la gestión de los sistemas eléctricos.
- *Medium-range* (hasta 180 horas). Su utilidad se centra en la planificación de operaciones a medio plazo.

La combinación de los horizontes temporales y resoluciones espaciales que ofrecen ambos sistemas (imágenes satelitales y cámara de nubes) junto con el resto de información de la instrumentación instalada se analizarán con un sistema de procesado de imágenes CMV (*Cloud Motion Vector*) y se corregirán con el aprendizaje de redes neuronales. El resultado final es un modelo 3D de transferencia radiativa que caracteriza la columna atmosférica de estudio, que aumenta la resolución temporal hasta el orden de metros, lo que se hace equiparable a las órdenes de magnitud de los CCP's.

Es necesario recalcar que la principal ventaja que aportan las imágenes satelitales es la anticipación prolongada, es decir, saber qué ocurre en las inmediaciones del terreno que la cámara de nubes no es capaz de percibir. Por lo demás, las imágenes provenientes de la cámara de nubes son una fuente mucho más fidedigna, porque en todo momento existe una dualidad tiempo-estado de la bóveda celeste. En el caso del satélite, este binomio se muestra difuso, porque la captura de una franja terrestre abarca varias franjas horarias. Como se puede ver en todas las fuentes de información de la **Bibliografía**, el tiempo exacto es una variable clave del sistema. Este hecho se ve acentuado, sobre todo, en el cálculo de la posición solar exacta.

El sistema resultante deberá compaginar las virtudes de ambos sistemas, aportando un nivel de precisión elevado, conformándose así el sistema de predicción a corto plazo, con un horizonte temporal máximo de varias horas y un error en torno al 5%. Este tiempo es suficiente para evaluar con antelación el comportamiento de la central termosolar con respecto a los valores de radiación que se esperan.

Actualmente, muchos estudios focalizan su objetivo en el cálculo de la predicción de algún fenómeno atmosférico, pero en este planteamiento está implícito un requerimiento añadido que es inherente al planteamiento y es la localización geográfica [8]. Todos ellos parten de una región geográfica concreta para, a partir de ahí, realizar una serie de planteamientos. Este enfoque, más que un mero punto de partida, debe funcionar como input y output del sistema. Es decir, la localización geográfica, además de condicionar el desarrollo del algoritmo, debe ser uno de los resultados esperados. Dentro del objetivo marcado para este proyecto, el mero dato de la irradiancia pronosticada no es el único, sino que forma parte de un set de datos, donde la locación puntual de cada valor de irradiancia conforma el resto. Dicho de otro modo, no basta con conocer un dato único, sino que el enfoque que se quiere adquirir es saber sobre qué punto concreto se va a producir qué nivel de irradiancia. Estos puntos formarán parte del campo solar y el resultado obtenido podrá determinar la posición de los CCP's. Este enfoque es una de las innovaciones que se alcanzará con la consecución del proyecto.

El producto final de este módulo será la predicción de una serie de variables meteorológicas que van más allá del mero dato de la irradiancia. En concreto, se extrapolarán valores referidos a la caracterización del viento, temperatura, irradiancia y, derivado de la interacción con el resto de módulos del sistema, potencia eléctrica. La repercusión que estos datos tienen sobre la estrategia de extracción se agrupan en:

- Indirecta. Son aquellos factores que intervienen en las labores de mantenimiento y operaciones de la central termosolar. Entre ellos, cabe mencionar:
 - Velocidad y dirección del viento. Debido a la posición que adoptan los CCP's, la velocidad y dirección del viento determina si, por razones de seguridad, es necesario colocar los captadores en posición de bandera (orientados de forma paralela al terreno). Además, la acción del viento sobre el captador repercute en la temperatura del mismo, ya que elimina parte del calor de la superficie por arrastre inductivo.
 - Temperatura. Es un factor determinante en cualquier instalación eléctrica o electrónica, ya que la temperatura determina el ruido térmico que se induce en los dispositivos. El exceso de temperatura disminuye el rendimiento de los equipos y distorsiona los valores de trabajo pudiendo llegar, incluso, a dañar los equipos.
 - Lluvia. La caída de agua influye tanto en el número de deposiciones que existen en la superficie del captador, que serán muy pocas en caso de lluvia abundante y mayores si se trata de un leve chubasco que arrastre polvo de la atmósfera, como en la posición del captador ya que, tanto como para aprovechar el limpiado de los paneles por lluvia como para captar la poca radiación existente (porque cuando llueve el cielo está cubierto de nubes densas), el foco de los paneles se coloca en posición perpendicular a la superficie del terreno.
- Directa. La irradiación directa, es la variable que influye de forma determinante en la extracción de energía calorífica de una central termosolar. Es por, tanto, la variable principal a pronosticar.

A modo de resumen de las líneas principales que han servido como eje e inspiración de este proyecto se encuentran:

- Finalidad económica basada en la maximización de la producción eléctrica, donde la predicción actúa como pieza fundamental del sistema pero no como parte única.
- Algoritmos basados en inteligencia artificial para la predicción de la radiación solar directa.
- Prevalencia de las imágenes de la cámara de nubes frente a las satelitales debido a que ofrecen una visión más precisa del contenido de la bóveda celeste. El horizonte temporal responde a las características de sistemas de *nowcasting*.
- El resultado final no será el mero dato de la irradiancia, sino la superficie del campo solar afectada.

6. Método de implementación

Existen diversas alternativas para llevar a cabo la implementación informática del sistema especificado, sin embargo, la elección de la infraestructura es crucial y ésta, como en todos los casos, se debe de escoger en base a las tareas que se vayan a realizar, existiendo siempre la alternativa de escoger una plataforma pero arriesgando posibles complicaciones futuras.

Los aspectos que el sistema debe abordar y que han servido como eje para la elección de la infraestructura de desarrollo son:

- Tratamiento digital de imágenes. El análisis dinámico de imágenes en un punto clave del modelo, por lo que se han valorado los lenguajes con librerías especializadas. Entre los hitos a realizar en este ámbito destacan:
 - Filtros
 - Clustering
 - Detección de bordes
- Cálculo matricial y potencia de cálculo. Este aspecto es crucial ya que, habitualmente, a medida que el lenguaje adquiere un grado de nivel más alto consume más recursos para el cálculo de bajo nivel. En este aspecto, el motor de cálculo debe ser lo más optimizado posible para que el procesado de la imagen sea casi instantáneo.
- Implementación de GUI. El resultado final debe ser visual, intuitivo y multiplataforma, para que pueda ser empleado independientemente del soporte físico sobre el que se reproduzca, bien sea un PC, una tableta o un Smartphone, añadiendo de esta forma movilidad.
- Licencias. La inversión en licencias supone un gasto fijo al proyecto global, por lo que, a ser posible, se utilizarán soluciones *open source* o herramientas de licencia gratuita o similar.
- Framework amigable. Este aspecto, aunque no es determinante, acelerará el tiempo de implementación.
- Grado de madurez e inserción en el mercado. La utilización masiva de la plataforma conlleva la abundancia de fuentes de información y facilita la transferencia tecnológica.
- Interoperabilidad con otras infraestructuras. Dado el desconocimiento del sistema operativo de destino, el sistema implementado debe ser capaz de interactuar con otras infraestructuras, así como la posibilidad de *embeber* código dentro de sus fuentes.

Por todas las razones citadas, se concluye que el sistema se diseñará desde cero, utilizando el lenguaje *Java* para la realización de la *GUI* y demás aspecto gráficos y técnicos. En base al nivel de cálculo exigido y su correspondiente demora, se plantea la posibilidad de recurrir a lenguajes de más bajo nivel que aligere la carga del procesador, optando por el empleo del lenguaje *Python* como complemento fácilmente integrable con la arquitectura *Java* y con el entorno de programación *Eclipse*.

Sin embargo, de cara a testear el modelo propuesto previa implementación final, se empleará el software de programación matemática *Matlab* para realizar la simulación y validar el planteamiento.

Independientemente del lenguaje sobre el que se realice el desarrollo, el sistema resultante deberá satisfacer y respetar las principales normas de programación para obtener un paquete competitivo y exportable por lo que se deducen las características de :

- Eficacia. El principal objetivo es satisfacer la necesidad propuesta. En el caso de no obtener un resultado correcto o muy impreciso, el objetivo marcado no se habrá alcanzado.
- Eficiencia. No basta con alcanzar la solución deseada, sino que debe realizarse consumiendo el mínimo de recursos posibles, de forma que se establezca un equilibrio entre facilidad de interpretación y recursos consumidos. Este punto crece de importancia sobre todo si se desconoce el equipo sobre el que se ejecutará el sistema.
- Simplicidad. Se razonarán y analizarán las soluciones planteadas con el objetivo de hallar el camino más simple haciendo que su implementación, independientemente de su complejidad tecnológica, no obstaculice la comprensión del problema a solventar.
- Modularidad. La división del conjunto total del problema en problemas más asequibles potencia la competitividad del sistema. Se utilizarán diversas funciones y módulos que permitan la reutilización de métodos.
- Escalabilidad. La ampliación, disminución o exportación del sistema es un factor clave ya que posteriormente puede ser de utilidad en otras centrales del mismo tipo o similares (tecnología *fresnel*, de receptor central o discos parabólicos).
- Trazabilidad. La ejecución del sistema debe ser interpretable en cada punto, extrayéndose información de los procesos que se realizan en cada momento o incluso produciendo informes que detallen la ejecución y eventos.

7. Descripción de la planta termosolar

Cualquier instalación termosolar implica una complejidad muy elevada, por lo que la descripción medianamente detallada de la instalación puede extenderse en exceso. Debido a que este modelo se ha diseñado como elemento independiente de la instalación termosolar, a continuación se muestran los principales datos técnicos que describen la instalación termosolar cuyo desarrollo ha propiciado la implementación de este modelo, dejando a un lado los demás detalles que, aunque importantes, no repercuten en el motor de cálculo llevado a cabo.

Planta termosolar "La Africana"	
Concepto	Dato
Potencia Neta	50 Mw
Tecnología de captación	Colectores Cilindro-Parabólicos
Número de lazos	168
Número de hileras	92
Número de colectores	672
Apertura del colector	5,774 m
Distancia entre hileras	17,2 m
Longitud del colector	150 m
Longitud del lazo	600 m
Superficie de captación	550.000 m ²
Superficie del campo solar	176 Km ²
Área de apertura total	510.120 m ²
Irradiación anual	1.171.236 Mwh/año
Generación térmica anual del campo solar	538.768 Mwh/año
Generación eléctrica bruta anual	214.283 Mwh/año
Eficiencia solar a neto eléctrico	16,10 %
Horas anuales equivalentes a plena carga	4.294 horas
Eficiencia térmica anual del campo solar	46 %
Latitud	37° 45' 21,0"
Longitud	5° 3' 23,3"
Altura sobre el nivel del mar	140 m
Sistema de almacenamiento	Sí, sales fundidas
Intercambiador de calor	2 trenes paralelos con tres etapas
Turbina	Dos cuerpos
Generador	Síncrono trifásico de dos polos con sistema de excitación estática
Refrigeración	Por agua, formado por cuatro celdas de base cuadrada
Término municipal	Entre Fuente Palmera, Guadalcazar, Almodóvar del Río y Posadas
Provincia	Córdoba

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la planta termosolar

8. Metodología

En este apartado se abandona el enfoque funcional hasta ahora llevado a cabo para adquirir un enfoque técnico con el objetivo de abordar el desglose de tareas que realiza el modelo planteado.

El siguiente gráfico muestra el esquema global de interacción de modelo desarrollado, en el que se visualizan las principales actividades que se llevan a cabo:



Ilustración 4. Módulos del sistema de cálculo

Como se resalta en la **Ilustración 4**, existen dos partes diferenciadas en el sistema: una primera etapa referida al pre tratamiento de la imagen y una segunda en la que se evalúa la existencia de nubes y su repercusión sobre el campo solar. Además, con otro enfoque, el sistema trabaja en dos estados:

- Online. El sistema ejecuta una herramienta que detecta la entrada de nuevos archivos. Se le indica una máscara de texto que el sistema debe emplear para detectar un nuevo archivo de imagen. La finalidad de este módulo es servir de *trigger* para accionar el motor de cálculo. Una vez se procese el archivo se historificará, añadiendo una cola en

su nombre de archivo consistente en el *dateTime* del final del proceso y moviéndolo a un directorio diferente. Con este hecho se consiguen dos objetivos:

- Automatizar el proceso. Con este enfoque, la herramienta diseñada sirve como elemento de monitoreo, ya que es independiente del motor de cálculo, que se ejecuta de forma paralela.
- Independizar la fecha de proceso de la fecha del archivo a procesar. El motor de cálculo no evalúa la fecha a procesar, sino que su foco se centra en la recepción y procesamiento de un nuevo archivo, de la que se extrae la información de fecha y hora. En consecuencia, el motor de cálculo procesa cualquier archivo que le llegue, sin importarle orden, fecha u hora.
- Offline. El dato de partida es la fecha y hora a procesar, que coincide con el nombre de archivo de imagen cedido por la cámara de cielo. La ventaja de este enfoque es la capacidad de procesamiento infinito sin generar archivos auxiliares, ya que no se inician las tareas de renombrado y movimiento de archivos. En este sentido, el enfoque es estático, ya que se parte de un archivo y se monitorea el proceso. Este estado es ideal para la etapa de diseño y testeado, en la que se generan multitud de procesamientos.

A continuación se disgregan los principales módulos del sistema según el orden cronológico de ejecución.

8.1. Parametrización del modelo

El modelo contiene una serie de constantes que rigen su comportamiento. Con el objetivo de evitar el *hardcoding*, se han externalizado las variables que actúan como constantes, consiguiendo que sea configurable y exportable a cualquier otro supuesto. Entre las variables constantes se encuentran:

- Datos de localización. indican la posición exacta del campo solar. Se compone de:
 - Latitud. Se expresa en grados, minutos y segundos con el objetivo de perder precisión en la conversión si se expresa solo en grados. Aunque su repercusión es ínfima debido a las magnitudes de las variables de trabajo en las que se ve involucrado este dato, es preferible facilitar el dato correspondiente al punto medio del campo solar.
 - Longitud. Las especificaciones de este dato son iguales a las del parámetro *latitud*, especificadas en el punto anterior.
 - Altitud. Entendida como altura sobre el nivel del mar, viene dada en metros.
- UTM. Se entiende como el offset que se le aplica a la hora para obtener el formato horario UTC. En el caso de España, donde se encuentra la instalación termosolar, el parámetro UTM es "-1".
- Altura de la cámara. Este dato se extrae de la hoja de características de la cámara. Se entiende por altura de la cámara como la distancia a la que se realiza la fotografía. Debido a la configuración de la cámara, la altura es la distancia entre la parte comprendida entre la parte inferior de las patas y la lente.

- Anchuras de los brazos de la cámara medidos en metros. Estos datos se pueden extraer de la hoja de características de la cámara. De no ser así, para evitar una leve deformación por la acción de la lente, se debe indicar las anchuras en sus puntos más próximos al punto que representa el foco de la lente sobre la imagen.
- Anchura del brazo de la cámara medido en píxeles. Puede llevarse a cabo un desarrollo para que este parámetro no sea un dato de entrada, sino que se calcule de forma automática. Sin embargo, en esta fase del proyecto, este parámetro se introducirá de forma manual.
- Foco de Visión (*FOV*). Este ángulo indica el nivel de discriminación de la imagen. Indicado en grados, este parámetro indica el grado de apertura de la lente, lo que determina la región de la imagen que se debe analizar. Teniendo en cuenta que 180 grados se corresponde con el máximo, el parámetro *FOV* se utiliza para obviar elementos no deseados captados por el objetivo de la cámara por acción de su *ojo de pez*, por ejemplo, un árbol. El valor por defecto se establece en 160°.
- Corrección vertical del punto medio de la imagen. Indicado en píxeles, este valor ajusta el punto medio de la imagen con respecto a la componente vertical del nexo de unión entre el sensor, el brazo fijo de la cámara y el brazo móvil de la cámara (para más detalles sobre la estructura de la cámara de nubes ver el acudir al anexo **Funcionamiento de la cámara de nubes**).
- Corrección horizontal del punto medio de la imagen. Indicado en píxeles, este valor ajusta el punto medio de la imagen con respecto a la componente horizontal del nexo de unión entre el sensor, el brazo fijo de la cámara y el brazo móvil de la cámara (para más detalles sobre la estructura de la cámara de nubes ver el acudir al anexo **Funcionamiento de la cámara de nubes**).
- Porcentaje de variación. Este factor se emplea en el algoritmo de detección de nubes y expresa, porcentualmente, el umbral máximo de variación permitido entre los valores de cada canal. Aumentar este valor equivale a ampliar el margen para detectar masas nubosas lo que, de forma aberrante, un alto valor detectará nubes donde la imagen contenga fluctuaciones considerables. Por el contrario, un ínfimo valor asignado a este parámetro excluirá todo valor que no se encuentre muy próximo a una escala de gris ideal, por lo que el área de masa nubosa detectada será muy inferior a la real. Después de realizar diversos ensayos, el valor por defecto asignado para este parámetro se estima en 30 (por ciento).

8.2. Configuración del campo solar

Este paso es estático para todos los cálculos y forma parte de la configuración inicial del modelo junto con la inserción de las constantes de trabajo. El objetivo de esta configuración es “dibujar” el campo solar sobre una matriz bidimensional donde cada celda tiene el valor de un metro cuadrado. El único parámetro a plasmar es qué superficie se corresponde con un colector y, por el contrario, qué porción se corresponde con cualquier otro elemento que no sea superficie captadora. El resultado final es una matriz donde la superficie de colectores cilindro-parabólicos se muestra en verde y el resto en negro.

El detalle más importante a tener en cuenta a la hora de configurar la superficie de captación es la orientación del campo solar. En el modelo propuesto para ello, el norte cardinal se corresponde con la parte superior de la matriz y el este con la parte derecha.

Es un factor determinante en la calidad del resultado final del modelo invertir el tiempo necesario en reflejar el campo solar sobre esta matriz. La opción de haber escogido una granularidad de un metro permite la posibilidad de ajustar la superficie de captación con los valores reales. Sin embargo, no basta con que ambas cifras sean coincidentes, sino que la disposición de los colectores debe de reproducirse lo más fielmente posible.

Por todo lo anteriormente mencionado, como mínimo, deberán reflejarse en esta matriz elementos tales como la isla de potencia, las vías de acceso a la isla de potencia y las principales vías de acceso a los colectores.

El hecho de que la superficie donde se refleje el campo solar tenga forma de paralelogramo (matriz bidimensional) no limita el hecho de que se pueda representar en ella cualquier campo solar que se corresponda con cualquier tecnología de captación (discos *stirling*, centrales de receptor de torre central, CCP, etc.).

La granularidad impuesta (celdas cuadradas de un metro de lado, 1 m²) limita el nivel de detalle a tener en cuenta. Todos los detalles de magnitud inferiores a este umbral pueden obviarse (e.g. separación entre módulos de un mismo colector). Si se desea, se pueden agrupar pequeños detalles que, en conjunto, sumen un metro y descontar éste de la superficie de captación aunque se advierte que, derivado del nivel de precisión final del sistema, este esfuerzo puede ser infructuoso.

Los datos con los que el modelo del campo solar ha sido parametrizado se encuentran en el apartado **Descripción de la planta termosolar**.

8.3. Entrada de datos

A continuación se enumeran los datos que sirven de fuente de información para la elaboración del cálculo. Dada la naturaleza iterativa del motor de cálculo, la adquisición de datos debe ser dinámica por lo que se deduce la necesidad de desarrollar una interfaz de acceso para los datos pertinentes. En cada caso se indicará el origen de los datos, la fuente física y el tratamiento asociado, si es que la utilización del mismo no se realiza de forma directa. El sistema se nutre para el cálculo de tres datos que deben ser facilitados en todo momento:

- Fotografía de la cámara de nubes. La imagen proviene de la cámara de nubes cede un archivo en formato *jpeg*. Debido a la arquitectura del motor de cálculo, el módulo admite formato *tiff*, *bmp*, *gif* y *png*. Sin embargo, debido a la etapa previa de selección de datos, como formato de trabajo se establece el *jpeg*.

El dispositivo está diseñado para que arroje los archivos en un directorio determinado, por lo que el origen de los datos se mantiene estático. En cuanto al nombre del fichero de la imagen, éste se compone de la fecha exacta de captación en formato *AAAAMDDhhmmss*. Del nombre de fichero se extrae la fecha y hora de proceso, por lo que ésta no tiene por qué coincidir con la fecha y hora del sistema. En lo que al motor de cálculo respecta, la única fecha y hora válida es la de proceso, por lo que cualquier información arrojada por el sistema se refiere a la fecha y hora de proceso.

El sistema no controla el tamaño de la imagen, por lo que admite cualquier resolución, repercutiendo ésta únicamente en el tiempo de proceso. La resolución de la imagen, que está íntimamente ligada al tamaño de la misma, es un parámetro seleccionable dentro de la configuración de la propia cámara (y por lo tanto es un parámetro externo al sistema), así como la frecuencia de datos de la misma que, como valor máximo,

puede adquirir un periodo de 30 segundos. De este hecho y del formato del nombre de archivo de la imagen se deduce que, en condiciones ideales, los dígitos del nombre correspondiente a los segundos deben ser siempre cero. Sin embargo, este hecho, no solo no es tratado a modo de simplificación, sino que se empleará como indicativo de desviación, irregularidad o desincronización en la configuración del sistema de adquisición de imágenes.

En la versión offline del motor de cálculo, esta entrada de datos se traduce en el nombre del fichero sin incluir la extensión.

- Altura de las nubes. Este dato es aportado por el ceilómetro que, en conjunto, aporta información relativa a⁵:
 - Altura de la base del elemento. Devuelve la distancia medida en metros que existe entre la superficie donde se encuentra el instrumento y la base del elemento captado.
 - Espesor del elemento. Devuelve la distancia en metros que el elemento tiene de espesor, es decir, desde la base hasta su punto más alto.
 - Composición de aerosoles del aire. Devuelve un análisis de la composición de la columna de aire en base a la interacción del láser del instrumento con las partículas de aire. Esta composición infiere en la difracción de las ondas lumínicas en su trayectoria por las diferentes capas de la atmósfera.

El instrumento arroja los datos sobre una base de datos, por lo que se deduce la necesidad de realizar un interfaz de conexión entre el motor de cálculo y la base de datos. Esta conexión debe ser *ad-hoc* ya que los drivers necesarios para conexión con la base de datos varían según la tecnología empleada (*Oracle, DB, MySQL, etc.*).

De todos los datos cedidos anteriormente mencionados, los únicos aplicables son la altura de la base y el espesor del elemento existente sobre el campo solar, ya que son los que interfieren en la radiación directa. El aporte restante, aplica al cálculo de la radiación global, que no aplica sobre el objetivo a cubrir.

- Irradiancia instantánea. El origen de estos datos es un pirheliómetro situado dentro del campo solar. Este dispositivo arrojará información sobre la radiación directa instantánea captada. Esta información se vuelca en un repositorio de datos donde se almacena con el resto del histórico. Al igual que para los datos del ceilómetro, en este caso será necesario desarrollar una interfaz de acceso a los datos almacenados en una base de datos, con las consecuentes particularidades antes mencionadas.

Como se puede deducir de las características de la instrumentación interviniente, el eje principal que une las tres fuentes de datos es la fecha y hora de proceso. Este dato se conforma como el parámetro relacional entre las diferentes tablas de búsqueda de las bases de datos y/o como máscara de selección del archivo de imagen. De forma complementaria, en el caso de no existir todas las fuentes de datos para un mismo parámetro de fecha y hora, el cálculo no debe realizarse, ya que éste hecho demuestra una inconsistencia de datos que

⁵ La información arrojada por el ceilómetro siempre se refiere a los elementos que detecte por encima del mismo, independientemente de que sea una nube o cualquier otro elemento. De igual manera, el instrumento tiene en cuenta la columna de aire que existe en la vertical a la localización del instrumento, sin tener en cuenta las zonas de alrededor, aunque éstas formen parte del elemento de estudio.

anula el resultado final del cálculo, no porque se realice de forma incorrecta, sino porque no es atribuible a un instante determinado.

8.4. Validación de datos

En este apartado se hace alusión a la importancia que adquiere la calidad de los datos de trabajo en tres aspectos diferentes:

- Calidad de los datos. Entendida como la validez del contenido recogido en el dato. En este sentido, en base a la naturaleza del dato habrá que determinar si el dato es inválido. Esto se puede traducir en una medida nula, desmesurada o incongruente, o una imagen con contenido nulo o corrupto.
- Fecha y hora adecuada y precisa. Es estrictamente necesario que los sistemas de adquisición de datos actúen en sincronía para que los datos reflejados correspondan al mismo instante de medida y sean consecuentes. Además de ello, el formato empleado debe ser coincidente para poder realizar fácilmente la *unión*⁶ de los datos en su obtención desde el repositorio.
- Existencia de huecos. Este aspecto es el que involucra mayor complejidad ya que, en caso de existir errores de ráfaga o, directamente, ausencia de datos, el hueco resultante ha de ser calculado y reemplazado. Existen diversas técnicas para el rellenado de datos que van desde soluciones que no implican un coste computacional elevado como la mera repetición o extrapolación, hasta soluciones muy avanzadas en las que intervienen multitud de tácticas estadísticas y basadas en inteligencia artificial. Sea cual sea la técnica empleada, el hecho de existir un hueco y haberlo reemplazado, ayudará a paliar el error inducido, aunque siempre existirá una incertidumbre con respecto al valor real.

Con el objetivo de facilitar el trabajo del motor de cálculo y del resto de aplicaciones utilitarias de esta información, el formateado de la información se acusa al tratamiento de los datos previo alojamiento en el repositorio pertinente. Es por ello que no se incluye esta actividad dentro del alcance del proyecto y se asume que los datos, en particular los relativos a fechas y horas comparten el mismo formato y las unidades de medida son las del Sistema Internacional, evitando así cualquier transformación intermedia con la posible pérdida parcial de información.

8.5. Filtrado de la imagen

Llegados a este punto, la consistencia de los datos se ha validado. En este módulo solo interviene la imagen de la bóveda celeste a la que es necesario aplicar ciertas correcciones para poder extraer la mayor cantidad de información posible. El archivo de origen se halla en formato *jpeg* que, como bien es sabido, es un formato de compresión con pérdidas. Este hecho, sumado a su reducido tamaño por razones de dimensionamiento del almacenaje, componen un escenario difícil de cara a la extracción de información. El algoritmo de compresión *jpeg* y, sobre todo, su versión *jpeg2000*, añaden un efecto de suavizado de los bordes de la imagen. Este hecho, aunque visualmente favorable y/o agradable a la vista, resta precisión en cuanto al análisis espectral de la imagen se refiere.

⁶ Referido al método de relación de datos de tablas diferentes, métodos *join*.

Es por ello que el paso previo a cualquier tratamiento de la imagen es aplicar un filtro que realce los elementos que en ella se reflejan. Esto se consigue mediante la aplicación de un filtro paso alto de la imagen. Como muchos filtros aplicados a imágenes, se puede precisar el peso de los elementos que actuarán en la interpolación y la dirección (máscara horizontal, vertical, diagonal, circular, etc.) de las variaciones que se quieren realzar. Sin embargo, la naturaleza de las imágenes capturadas es muy variada y la casuística de la disposición de las nubes es infinita, por lo que se estima preferente no indicar un peso concreto ni dirección de filtrado. En consecuencia, el filtro que se aplica es un filtro estándar paso alto, o lo que es lo mismo, de realce de bordes.

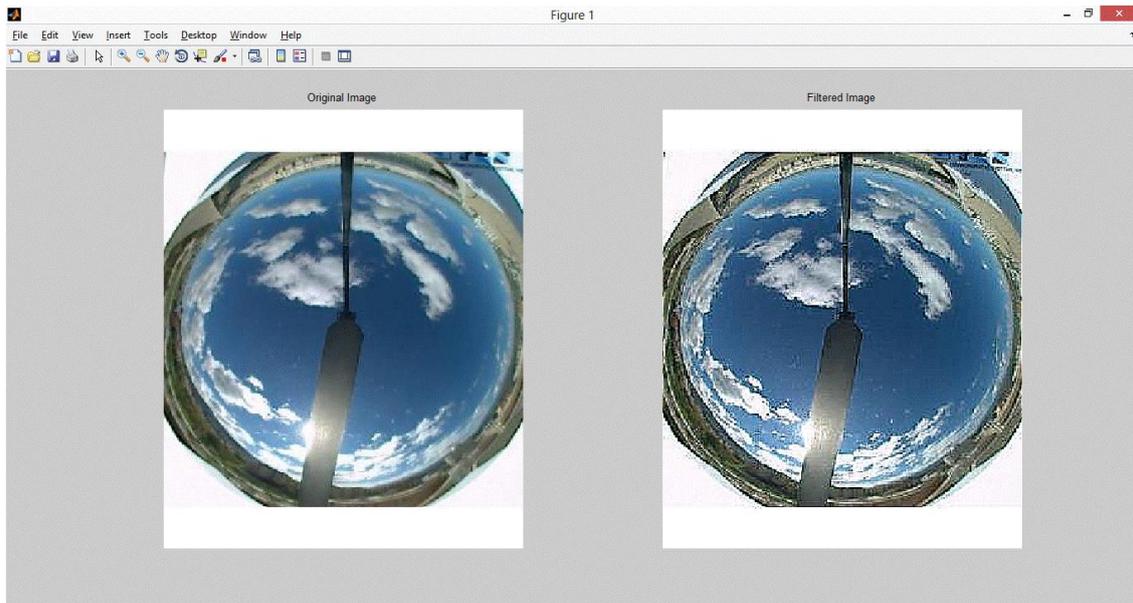


Ilustración 5. Imagen filtrada

Como se puede apreciar, el resultado final no es visualmente atractivo, pero la composición espectral es más abrupta, lo que ayudará a extraer información relevante de la imagen y facilitará decisiones futuras.

8.6. Restricción del área de procesamiento

La finalidad de este apartado es establecer un área de procesamiento sobre la imagen donde se disgregue la información nula o poco relevante de la información útil. El hecho de existir distintos grados de calidad de información dentro de una misma imagen se debe a dos motivos:

- Marco de la imagen. Derivado de la morfología de la cámara de nubes y del sistema de captación (para más información, ver el apartado **Funcionamiento de la cámara de nubes**), la información resultante adquiere forma circular como fruto del reflejo de la bóveda celeste. Este tipo de contorno es inadmisibile para los formatos de imágenes tradicionales, en los que todos tienen forma de paralelogramo⁷. Es por ello que la imagen circular se acompaña en ocasiones de un borde complementario que, además de conformar una superficie regular (de paralelogramo) se utiliza para incluir información adicional, como por ejemplo, el logotipo del fabricante de la cámara. Por

⁷ El hecho de en la actualidad se encuentran imágenes de contorno irregular se debe al efecto de aplicar a los píxeles complementarios que componen un contorno de paralelogramo la cualidad de ser transparentes. Este efecto solo es admitido por los formatos de imágenes *png* y *gif*.

estas razones, es necesario excluir todos estos elementos adyacentes de la información a procesar, ya que no contiene "información".

- Existencia de obstáculos cercanos. La situación geográfica ideal de una planta termosolar requiere de un emplazamiento nivelado sin elementos cercanos que obstaculicen la trayectoria de los rayos solares hasta su intercepción con los captadores solares. La referencia a los obstáculos cercanos se refiere a grandes volúmenes, ya que es casi imposible que en los extremos del horizonte no existan pequeños obstáculos que limiten, en parte, la captación solar a lo largo de toda la bóveda celeste. El resultado de este hecho se refleja en que, en los bordes de la bóveda celeste plasmada en la imagen (extremos del círculo central de la imagen) se muestra la masa boscosa que rodea a la instalación termosolar, así como pequeñas infraestructuras auxiliares necesarias para la operación de la planta. En consecuencia, estos cuerpos reflejados no forman parte de la información útil de la imagen y deben apartarse del estudio y procesado de la misma.
- Deformación extrema de la lente. Derivado de la estructura de la cámara de nubes, la imagen refleja el contenido de la bóveda celeste en un círculo (para más información, ver el apartado **Funcionamiento de la cámara de nubes**). Este fenómeno es el resultado de emplear un sistema de captación que, en conjunto, actúa como un ojo de pez (*fishereye*). Al igual que ocurre siempre que se utiliza este tipo de lente, cada elemento que compone la imagen contiene una distorsión que es función de la distancia al punto donde se sitúa el foco de la lente. Dicho de otro modo, cada elemento de la imagen contiene una deformación progresiva cuanto más alejado radialmente se encuentre del foco de la lente. Es por esto que la máxima deformación se halla en el extremo del círculo donde se representa la bóveda celeste. Esta deformación se traduce en el desconocimiento veraz de la forma y dimensión de los elementos capturados en esta zona de la imagen.

Ya que este efecto puede ser no deseado y se ve implicado en numerosos casos, se han desarrollado técnicas para corregir este efecto que, de forma muy simplificada, se puede decir que, basándose sobre algún elemento capturado que, aunque representado en la imagen con forma curva (por acción de la lente) se conoce que es un elemento rectilíneo, se trata la imagen como una malla en la que, estirando por algún punto de su contorno, arrastran varios elementos de la imagen deformando su posición hasta devolver al elemento conocido la forma deseada. Sin embargo, es necesario distinguir que la casuística es diferente a la que se da en la captación de la bóveda celeste por la cámara de nubes por dos razones:

- En la bóveda celeste no existen comúnmente elementos rectilíneos, por lo que no es imposible, a través de métodos automáticos, conocer la forma y dimensión real de los elementos capturados.
- El marco capturado no es plano como ocurre en la captura, por ejemplo, de un paisaje. En este caso, el plano capturado es curvo (bóveda celeste), por lo que, una vez corregida teóricamente la acción de la lente, habría que abatir nuevamente la superficie curva, obteniendo así una superficie plana.

En consecuencia de todo lo comentado, la corrección de la lente es un punto de solución muy compleja, tanto desde el punto de vista conceptual como computacional, ya que el tratamiento de esta información requiere acudir a técnicas de *clustering* y/o descomposición de la imagen con estructura radial y tratamiento sectorizado.

Tras todos los argumentos expuestos, se ve la necesidad de establecer un marco o límite a partir del cual (de ahí hacia el contorno de la imagen) descartar la información o, lo que es lo mismo, obviarla, es decir, reducir el procesamiento al área resultante. Este parámetro lo determina el denominado foco de visión, comentado en el apartado **Parametrización del modelo**. Siendo 180° la totalidad de la bóveda celeste y 1 el menor área circundante al punto que se corresponde con el foco de la lente, el grado aquí expresado establecerá un perímetro radial para descartar información irrelevante o altamente distorsionada. Como valor por defecto se propone un *FOC* de 160° , aunque debe de establecerse de forma tal que, como mínimo, excluya los elementos capturados no deseados.

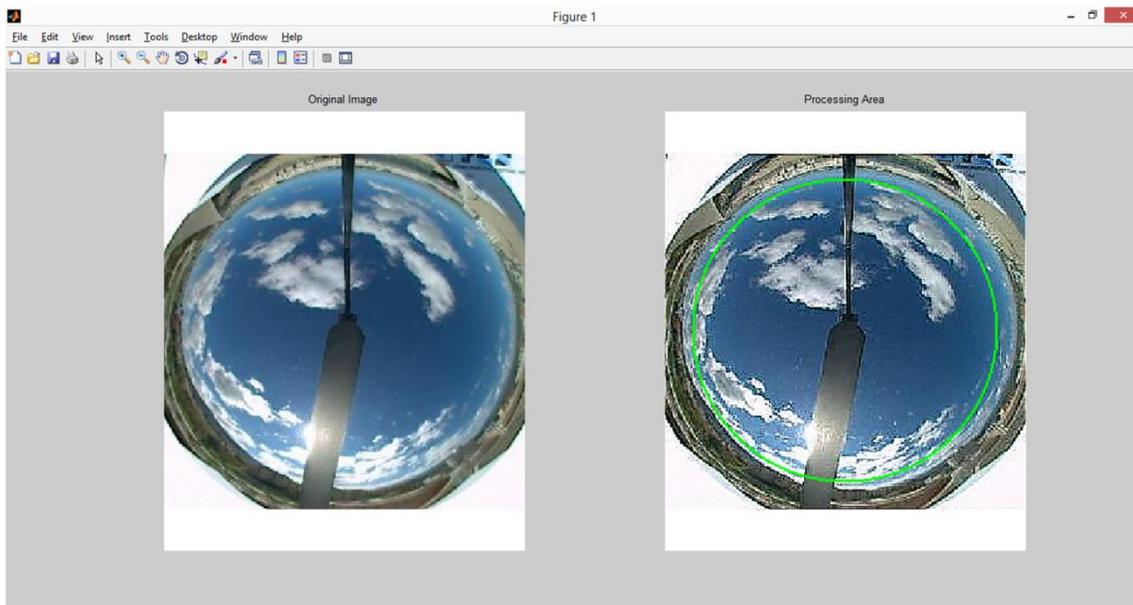


Ilustración 6. *FOV* sobre la imagen

Como se puede ver en **Ilustración 6. *FOV*** sobre la imagen, la implementación llevada a cabo, y con significado meramente informativo, la superficie delimitada por el *FOC* se representa con un contorno de color verde puro donde el área a procesar es la encerrada por la circunferencia, eliminando así, dejando fuera los elementos no deseados.

8.7. Cálculo de la posición solar

Para realizar el cálculo de la posición solar se ha empleado un *script* (*sun_position.m*) realizado de forma ajena al proyecto. En el apartado **Funcionamiento *sun_position.m*** se muestra la descripción literal (adecuando el formato de texto) que contiene el *script*, donde se especifica tanto su fundamentación como su nivel de precisión.

Es necesario comentar que se han barajado diferentes alternativas para el cálculo de la posición solar que han abarcado tanto *scripts* de otros autores como la posibilidad de realizar un *script* propio. Sin embargo, finalmente se ha optado por la utilización de este algoritmo por las siguientes razones:

- **Fiabilidad.** La base teórica sobre la que se sustenta el cálculo está aceptada por la comunidad científica y los autores del estudio conforman una figura de referencia en este ámbito.
- **Precisión.** Internamente, el código no escatima en capacidad de procesamiento para mantener la precisión de los resultados. Además de ello, los momentos en los que el

algoritmo se muestra más vulnerable exceden del alcance del proyecto, ya que se corresponde con los momentos de la aurora y el ocaso.

- Adecuación. El algoritmo se encuentra depurado y en lenguaje *Matlab*, por lo que su utilización es inmediata, sin necesidad de realizar ningún cambio y/o traducción, lo que podría inducir errores de precisión o interpretación, además de la propia demora temporal.
- Versatilidad. El resultado no deja margen de error en la interpretación. Obtenido como una estructura de datos, el algoritmo arroja como resultado:
 - Acimut. Medido en grados desde el norte (0°) en dirección este.
 - Cenit. Medido en grados desde la vertical (0°) hacia el nadir. Nótese que el ángulo aquí facilitado es el complementario a la altura solar desde el horizonte.

8.8. Anulación de la estructura de la cámara

Uno de los elementos más notables de la imagen tomada por la cámara de nubes es la existencia de la estructura⁸ compuesta de dos brazos, donde uno de ellos rota con el objetivo de obturar la corona solar (para más información consultar el anexo **Funcionamiento de la cámara de nubes**). Este elemento, que a simple vista se puede pensar que no induce gran complejidad o que no tiene repercusión, es uno de los elementos más intrincados, ya que requiere de:

- Sincronización horaria. El brazo móvil de la estructura debe ocultar en todo momento la corona solar, cuya posición se calcula utilizando la hora exacta en cada momento. En caso de no existir un acoplamiento perfecto entre el brazo y la posición del Sol, parte de los rayos solares inciden sobre la superficie reflectante de la cámara y produce un deslumbramiento, lo que se traduce en la imagen final como una zona quemada de la que no se debe extraer información.
- Diseño preciso. El sensor de captación se encuentra en el nexo de unión entre los brazos fijo y móvil de la estructura de la cámara que se ve reflejada en cada imagen. Esta posición debe coincidir con el punto medio de la imagen exactamente. Sin embargo, este hecho es teórico, ya que es casi imposible hacer coincidir este punto con un pixel concreto. Es por ello que se utilizan los parámetros de corrección horizontal y vertical (comentados en el apartado **Parametrización del modelo**) para indicar, independientemente de la imagen, qué pixel se corresponde con el punto medio, o lo que es lo mismo, con el foco de la lente sobre ésta.
- Ocultamiento de parte de la imagen. Estos elementos ocultan parte de la bóveda celeste y, si bien es cierto que no conforman un área mayoritaria, su tratamiento como "despreciable" es inadmisibles, ya que repercute directamente sobre la precisión del modelo. Es por ello que debe realizarse algún algoritmo que anule o palie la acción de esta estructura de forma que su acción no repercuta en el cálculo posterior.

⁸ En adelante, cuando se haga alusión a la estructura de la cámara se hará referencia, únicamente, a la porción de estructura reflejada en la imagen que atañe a los brazos y al sensor de la cámara.

- Criticidad del sistema físico. Desde un punto de vista hardware, simplemente por contar con partes móviles y accionamiento mecánico, se convierte en un punto delicado de la infraestructura ya que está expuesto a desniveles, averías derivadas de condiciones atmosféricas, etc.

En consecuencia de todo lo anteriormente expuesto, es necesario idear un método que controle la acción de los brazos de la estructura de la cámara, focalizando el objetivo en anular o paliar la parte de la bóveda celeste oculta y teniendo en cuenta el resto de las razones expuestas.

El resultado de las alternativas estudiadas es común y consiste en controlar, de alguna manera el área ocupada por la estructura. Llegado este punto se han barajado dos alternativas, que se detallan a continuación según el orden cronológico de implementación:

- Detección automática de elementos externos a los propios cuyo fin va enfocado el procesamiento digital de la imagen, esto es, llevado a la práctica, los brazos y sensor de captación aunque puede ser extensible a cualquier otro elemento que aparezca reflejado. Esta opción se presenta, *a priori*, como la más adecuada. Para llevar a cabo esta tarea es necesario realizar los siguientes pasos:
 - Recolección de elementos externos que pueden aparecer en la imagen. Se realiza una lista de todos los elementos que pueden aparecer en la imagen y que deben ser excluidos del análisis ya que, de una forma u otra, no son el objetivo del estudio, que son únicamente las nubes. En este sentido, el nivel de detalle puede ser tan elevado como se quiera, ya que, como mínimo, se deben tener en cuenta los elementos de la estructura de la cámara y, como máximo, se pueden incorporar figuras tales como aviones o pájaros.
 - Simplificación del contorno de cada elemento catalogado a una forma computacionalmente más sencilla. Basándose únicamente en el procesamiento de la imagen, sin recurrir a otras herramientas, la única manera de reconocer elementos es "enseñar" al modelo a detectar objetos externos, y esto se puede conseguir:
 - ◆ Indicando el contorno exacto del elemento tanto en forma como en dimensión.
 - ◆ Simplificando el contorno a formas conocidas o agrupaciones de éstas, de forma que el patrón resultante sea escalable en tamaño.
 - Agrupación de figuras de la misma "naturaleza". Cada forma geométrica se ataca de una forma diferente ya que es razonable, por ejemplo, pensar en detectar círculos buscando reiterativamente combinaciones de píxeles como un punto central y radios y, por el contrario, buscar formas rectilíneas a través de la unión simple de dos puntos. Es por ello que el punto común para la detección de formas será la elaboración de un filtro al uso que se configurará de forma diferente para cada tipo de figura a detectar.
 - Filtrado sucesivo. Una vez se cuenta con todos los filtros necesarios, han de realizarse sucesivos filtrados para detectar formas conocidas sobre la imagen.

De acuerdo con los pasos hasta aquí mencionados, la opción de reconocer figuras sobre la imagen es completamente plausible, sobre todo si se fija como objetivo

reconocer la estructura de la cámara, cuya simplificación se reduce, sobre todo, a dos elementos rectangulares (brazos). El filtro designado para tal uso es el *canny* que, utilizado conjuntamente con la *Transformada de Hough* y calibrando debidamente la concepción de picos, detectaría los elementos indicados. Sin embargo, esta alternativa presenta las siguientes desventajas:

- Contorno no uniforme. Derivado de la calidad de la imagen, en ocasiones, los contornos se muestran difusos y se dificulta la detección directa de líneas rectas, ya que éstas se presentan discontinuas. A grandes rasgos, el método intenta reconocer líneas de cierto tamaño pero, como éstas se muestran discontinuas, no es capaz de conseguirlo. La solución a este hecho se ha conseguido dividiendo la imagen en secciones más pequeñas y analizando, iterativamente, cada sección, detectando así líneas rectas más cortas.
- Desincronización horaria con respecto a la posición solar. En ocasiones, la corona solar no se ve completamente oculta lo que, además de "quemar" la imagen, hace imposible la detección de cualquier borde de este área. Se ha recurrido a tácticas alternativas analizando el problema cambiando el *espacio de color* sin alcanzar un resultado satisfactorio. Apartando el coste computacional de este método, debido a este último hecho, el método de la detección automática de bordes como posible alternativa se ve interrumpida. Es posible que, destinando más recursos a este problema se consigan resultados concluyentes y válidos. Sin embargo, debido al *deadline* establecido para la elaboración del proyecto, la consecución de este hito hace peligrar el calendario propuesto, por lo que se propone una solución alternativa.
- Superposición de una máscara. Este método, que finalmente ha sido el llevado a cabo, reduce el coste computacional de esta tarea ya que consiste, básicamente, en superponer sobre la imagen figuras simplificadas de la estructura de la cámara, anulando así su efecto. Además, con el objetivo de simplificar el cálculo, el área de actuación se ha reducido a un cuadrado con centro en foco de la lente sobre la imagen y cuyo lado lo determina la magnitud menor de la imagen (alto o ancho), que siempre es mayor al radio determinado por el parámetro *FOV*. Para realizar este hito se han seguido los siguientes pasos:
 - Inclusión del brazo fijo como una línea recta. Se necesita el punto de origen, el punto de destino y el ancho del brazo. Todos estos datos son conocidos, ya que el único no indicado entre las constantes que conforman el modelo, se determina como un punto orientado al norte y que coincide en el eje horizontal, con el foco de la lente sobre la imagen.
 - Inclusión de la lente. Se simplifica a un círculo situado en el foco de la lente sobre la imagen y cuyo diámetro coincide con la anchura del brazo móvil.
 - Inclusión del brazo móvil como una línea recta. El punto de origen se corresponde con el foco de la lente sobre la imagen y la anchura es un parámetro estático del modelo. El único dato desconocido es el punto final de la línea, para lo que se ha elaborado el siguiente método:
 - ◆ División de la cuadrícula en ocho partes de igual área, denominadas zonas.

- ◆ Determinación de la zona en función del parámetro del acimut., cuyo valor se ha obtenido previamente, según lo expuesto en el apartado **Cálculo de la posición solar**. Cada zona, implica una coordenada objetivo, que puede ser vertical u horizontal.
- ◆ Obtención, por función trigonométrica, de la coordenada final, utilizando como referencia la mitad del lado de la cuadrícula determinada, y que nuevamente, en función de la zona, puede ser una coordenada vertical u horizontal.

Como elemento final de esta función, que hubiese sido común a las dos alternativas planteadas, se ha complementado la máscara rellenando el área exterior al radio impuesto por el parámetro *FOV* del mismo color que los elementos de la estructura.

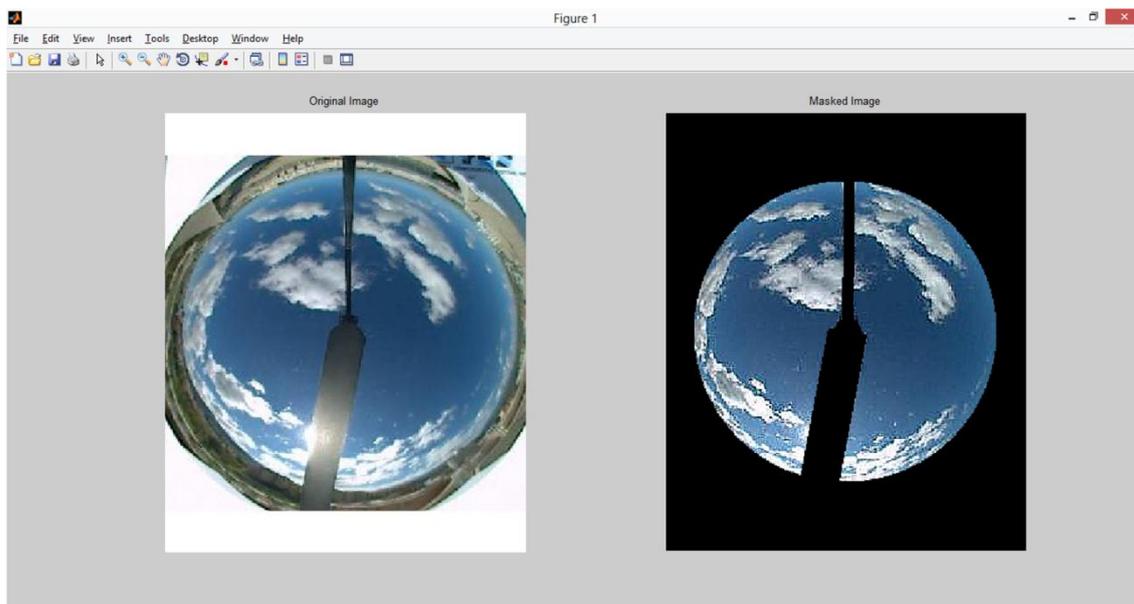


Ilustración 7. Imagen con estructura enmascarada

Como se puede ver en la **Ilustración 7**, el color escogido para la máscara es negro por motivos estéticos, coincidiendo así con el color natural de la estructura y contrastando con los elementos de la imagen, que son el objetivo de todo el procesamiento. Sin embargo, aunque el color puede cambiarse sin excesivo esfuerzo, es necesario no olvidar que, posteriormente, el color servirá como parámetro de determinación, por lo que, además de la finalidad estética, servirá como variable computacional.

Llegado este punto, la imagen se haya perfectamente dispuesta para poder trabajar con ella, ya que se han corregido y/o eliminado todos los elementos perjudiciales, dejando ver, exclusivamente, los elementos objeto del estudio.

8.9. Interpolación del área oculta

Esta función se sirve del resultado obtenido en el apartado **Anulación de la estructura de la cámara** y del color escogido en el mismo apartado para rellenar el contenido de la imagen que se halla oculto por los elementos de la estructura. El criterio tenido en cuenta, aunque simple, tiene una desviación baja debido, entre otras cosas, al área reducida que ocupan los elementos de la estructura. Éste consiste, básicamente, en suponer que el comportamiento

del contenido de la imagen antes y después de los elementos de la estructura, fluctúan de forma lineal tras ellos.

La dificultad viene impuesta por el sentido de la extrapolación, que puede ser vertical u horizontal en base al elemento de la estructura que se trate y de la posición que éste adquiera. Siguiendo esta premisa, el procesamiento de la imagen se realiza de forma sectorial, distinguiéndose las siguientes:

- Semi-sector superior. El único elemento que aquí se halla es el brazo fijo, por lo que la dirección de interpolación siempre es horizontal. Además, el hecho de introducir esta simplificación, como se verá más adelante, no introduce desviaciones.
- Semi-sector inferior. En este sector se encuentra el brazo inferior que, al igual que se ha visto en el apartado **Anulación de la estructura de la cámara**, su posición varía conforme al acimut. Ya que desde el amanecer hasta el ocaso el brazo móvil recorre todo el sector de derecha a izquierda (este-oeste) la dirección de interpolación variará. Este hecho es notable si se piensa en la posición que adquiere el brazo cuando el acimut se encuentra en un ángulo cercano a 90° ó 270° . En este caso, la dirección de interpolación debe ser vertical ya que el brazo ocupa una de las mitades del sector en sentido horizontal. Es por ello, que se han determinado tres regiones diferentes dentro de este sector y que se han calculado en base a la anchura del brazo móvil:
 - Región este. Se corresponde con un triángulo conformado por el foco de la lente sobre la imagen y la parte central del lado derecho de la imagen más menos la mitad de la anchura del brazo. En este caso, el sentido de interpolación es vertical.
 - Región oeste. Se corresponde con un triángulo conformado por el foco de la lente sobre la imagen y la parte central del lado izquierdo de la imagen más menos la mitad de la anchura del brazo. En este caso, el sentido de interpolación es vertical.
 - Región sur. Se corresponde con el área restante del semi-sector inferior. En este caso, la dirección de interpolación es horizontal.

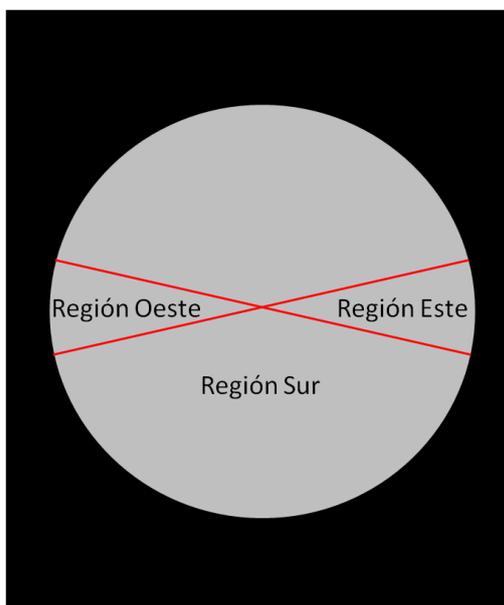


Ilustración 8. Sectorización de la imagen para la interpolación

Como antes se ha comentado, esta función recompone el área oculta por los elementos de la estructura de forma diferente en base a la posición que ésta adquiera pero, de forma genérica, el proceso se descompone en los siguientes pasos (por orden cronológico de ejecución):

- Reconocimiento del final de la máscara. En el análisis de los elementos de la imagen, dada la máscara previamente aplicada, lo primero que se encuentra, en cualquier caso, es la máscara radial aplicada, por lo que el primer objetivo es detectar que la región de análisis no se corresponde con un área enmascarada. Este objetivo se puede alcanzar de dos formas:
 - Evaluando el contenido del pixel. La variable de evaluación la conforma el color de la máscara. Sin embargo, este método, aunque válido, puede arrojar una pequeña desviación ya que, los bordes de la imagen no están perfectamente delimitados como consecuencia del algoritmo de compresión con pérdidas. Pese a la baja desviación que introduce el método, se cuenta con un método que no induce ninguna desviación.
 - Calculando la distancia con respecto al foco de la lente sobre la imagen. La máscara se determina por esta distancia, por lo que, a la hora de descartar la misma máscara, es preferente evaluar la misma distancia que la conforma.
- El segundo hito de esta función es detectar el borde de algún elemento enmascarado, momento en el que almacena el valor del pixel anterior y la referencia de la posición.
- El siguiente objetivo es volver a detectar un nuevo borde, que simboliza el final de un área enmascarada. En este momento vuelve a guardar la información del pixel y la posición.
- A continuación, se crea un vector cuya composición conforma un degradado lineal entre los valores de pixel almacenados y cuya longitud cuadra con la zona enmascarada.
- Finalmente, como paso final, se sustituye el área enmascarada por el degradado calculado.

Este método se repite de forma iterativa hasta recorrer todos los elementos de la imagen, por lo que el resultado final se muestra con la estructura total o parcialmente eliminada.

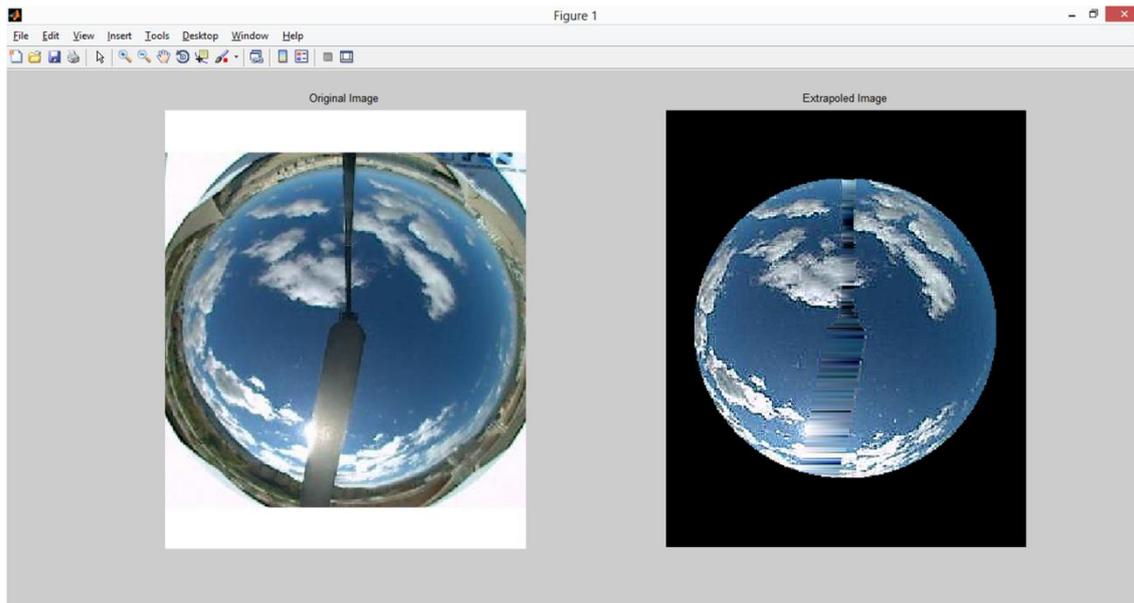


Ilustración 9. Estructura interpolada

El resultado final se muestra como una zona borrosa en la que se intuye el área anteriormente ocupada por la estructura. Esto se debe a que la dirección de interpolación se ha visto simplificada a una única, cuando en la realidad, la composición de un elemento de la imagen guarda relación con cada uno de sus vecinos. Como se puede apreciar, en ocasiones, el vector interpolado muestra gran contraste con los de alrededor. Este hecho se deriva, una vez más, del formato de compresión de la imagen, que produce un suavizado de los bordes de la imagen, generándose así pequeñas imperfecciones.

Se podría pensar que el resultado final o las mencionadas imperfecciones añaden *ruido* al resultado final pero, una vez más, es necesario no perder de vista que las capturas visuales sirven exclusivamente como método de traza y monitorización. Si bien es cierto que cualquier alteración de la fuente original añade un nivel de *ruido*, la cuestión a evaluar es si éste provoca desviaciones significativas en el resultado final.

Desde este punto de vista, y como se verá más adelante, aunque el aspecto visual puede ser mejorable, de cara al procesamiento de la imagen, el *ruido* añadido es despreciable, ya que no interfiere en los algoritmos de toma de decisiones.

8.10. Identificación de nubes

Este apartado es el que determina qué porción de análisis se corresponde con una zona de cielo abierto y qué parte contiene masas nubosas. Como se puede comprobar, en los apartados anteriores del modelo, la finalidad conjunta de todos ellos se ha centrado en adecuar la fuente de información para que este algoritmo pueda realizar su evaluación de forma correcta, aumentando la información a extraer de la imagen y corrigiendo imperfecciones. Sin embargo, es esta función la que representa el *core* del modelo de predicción.

Nota: En un principio, el planteamiento supuso un análisis sectorial mediante el establecimiento de una rejilla. El tamaño de cada celda (impar para facilitar el cálculo de distancias al existir, de esta manera, un punto medio exacto) determinaría la granularidad del análisis. La renuncia por pérdida de granularidad se compensaría con velocidad de procesamiento.

Este planteamiento se pensó como medida de regularización ante imágenes de entrada con una resolución del orden de varios mega píxeles. Sin embargo, posteriormente, desde el lado de la cámara de nubes, se dio prioridad al aumento de frecuencia de captura frente a la calidad de cada imagen, estableciendo así un compromiso entre calidad y necesidad de almacenamiento.

Como resultado de esta decisión, las imágenes provistas por la cámara tienen una resolución inferior a un mega píxel, por lo que el tiempo de procesamiento es asumible por cualquier sistema moderno y el requerimiento de análisis sectorizado se presenta como innecesario, ya que el consumo de recursos que conlleva realizar un análisis de cada elemento de la imagen es perfectamente asumible.

De los artículos indicados en el apartado **Estado del arte**, se concluye que los algoritmos de detección de nubes, de forma simplificada, se realiza de la siguiente manera:

- Cálculo del *sunshine factor* a partir de la zona cercana a la corona solar. Este factor no se obtiene para cada elemento sino que es constante para toda la imagen. Su cálculo, por tanto, se realiza independientemente de que vaya a ser utilizado.
- Cálculo iterativo de una tasa de información del canal rojo sobre el azul. Es el parámetro principal de evaluación. La utilización de este método como fuente de análisis reduce al máximo los recursos computacionales necesarios. Este hecho es evidente si se piensa, únicamente, en la evaluación de una sola matriz con respecto a las tres originales (una por canal).
- Contraste contra la misma tasa correspondiente a un día semejante sin masas nubosas. De este contraste se extrae un coeficiente que, comparado con un umbral de referencia, determina si la región de evaluación es cielo abierto o masa nubosa⁹. En ocasiones, el coeficiente obtenido no es determinante o añade incertidumbre, por lo que se recurre al siguiente hito.
- En ciertas ocasiones, debido, por ejemplo, a la existencia de sombras o masas nubosas muy claras/oscuras, el algoritmo no es capaz de discernir fehacientemente con qué se corresponde la región de análisis. En estas ocasiones, se compara (indirectamente) el coeficiente obtenido en el punto anterior con el *sunshine factor* de la imagen, determinando firmemente el contenido de la región de análisis.

El método descrito es altamente fiable y su tasa de error es más que aceptable. Sin embargo, supone contar con información adicional almacenada en históricos, además de mayor recurso computacional. En cualquier sistema profesional moderno, este gasto es asumible.

Sin embargo, en la implementación de este proyecto se utilizará un método alternativo ideado personalmente y *ad-hoc* para este proyecto. El método, de forma simplificada, asume que las nubes siempre adquieren un color que varía a lo largo de toda la escala de grises. Esto incluye a todos los estratos y a todos los niveles de condensación de vapor. Además de ello, también asume que, en determinadas condiciones y momentos del día, las masas nubosas adquieren tonalidades que distan mucho de estar próximas a la escala de grises. Este hecho es evidente si se piensa en el color rojizo que adquieren las nubes en los momentos de mayor ángulo cenital, es decir, en los momentos de la aurora y el ocaso. Sin embargo, como se especificará más

⁹ .Es en este punto donde el algoritmo, en mi opinión, se muestra vulnerable debido a la existencia de un umbral, que, a fin de cuentas, es un parámetro variable y poco objetivo.

adelante, el ámbito de actuación del modelo está restringido a un cierto umbral de elevación a partir del cual, la eficacia del modelo se considera aceptable, ya que no contiene desviaciones significativas. Este hecho, anula los momentos más extremos la aurora y el ocaso.

Para comprender el modelo es necesario recordar que las tonalidades grises, en el espacio de color RGB, se caracterizan, por tener valores iguales en cada uno de los tres canales. En la práctica, valores grises ideales son altamente improbables, por lo que es necesario introducir un umbral de permisividad¹⁰ que reconozca pequeñas desviaciones de color hacia cualquier componente. Este umbral, se halla descrito en el apartado **Parametrización del modelo** y, como valor por defecto se estima en 30 (por ciento). El efecto visual que admite este umbral es un teñido leve de la coloración en uno de sus canales.

Es importante destacar que el umbral atañe a la variación de un canal contra los dos restantes, y no tomado como dos a dos. Dicho de otro modo, la variación máxima entre los tres canales entre sí, no puede superar el nivel de umbral.

Restringido únicamente a la región delimitada por el *FOV*, una vez sometido el elemento de análisis al algoritmo de detección, el resultado adquiere carácter *booleano*, es decir, es masa nubosa o no lo es. Es por ello que se escogen dos valores para ser asignados a cada uno de los resultados que, por motivos estéticos, se han escogido próximos al valor real detectado (azul y gris). El resultado final de este módulo se muestra a continuación:

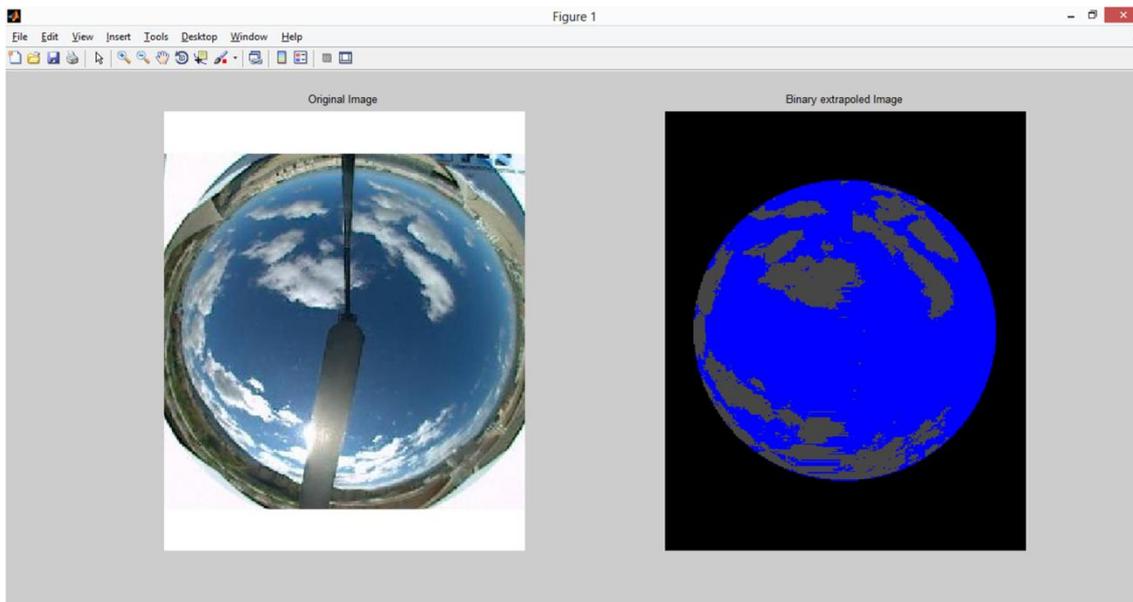


Ilustración 10. Imagen booleana

De la imagen mostrada en la **Ilustración 10**, se pueden realizar los siguientes comentarios:

- Se puede apreciar, en base al umbral escogido, el margen de error producido en cada elemento de la imagen. Este error, calibrado adecuadamente, arroja un valor altamente aceptable, ya que reconoce la forma y superficie de las masas nubosas existentes de forma muy precisa.

¹⁰ Tal y como ocurre en los algoritmos estudiados en el apartado de **Estado del arte**, el algoritmo diseñado también requiere de un umbral al que también se le achaca la variabilidad y falta de objetividad.

- Derivado del tratamiento diferenciado de cada pixel en lugar la división en regiones, el nivel de granularidad obtenido es el más alto posible, adquiriendo éste el valor de un pixel. De haber escogido la opción de aplicar una rejilla, la granularidad de hubiese visto afectada, por lo que el contorno de las masas nubosas se hubiese mostrado mucho más abrupto, de bordes más rectos, aumentando por tanto, el grado de error. El compromiso de granularidad hubiese sido el mismo solo en el caso de haber seleccionado un tamaño de celda de un píxel, pero se hubiese seguido manteniendo el gasto en recurso computacional.
- Como se puede comprobar, el *ruido* introducido por el algoritmo de interpolación es ínfimo, sobre todo si se compara con la ventaja de contar con una estimación del contenido de la bóveda celeste tras la zona oculta por la estructura.

Llegado este punto, finaliza la fase de tratamiento digital de la imagen, conformándose así la fuente de datos de análisis. El resto del cálculo se servirá de la información procesada sin realizar ningún cambio sobre ella.

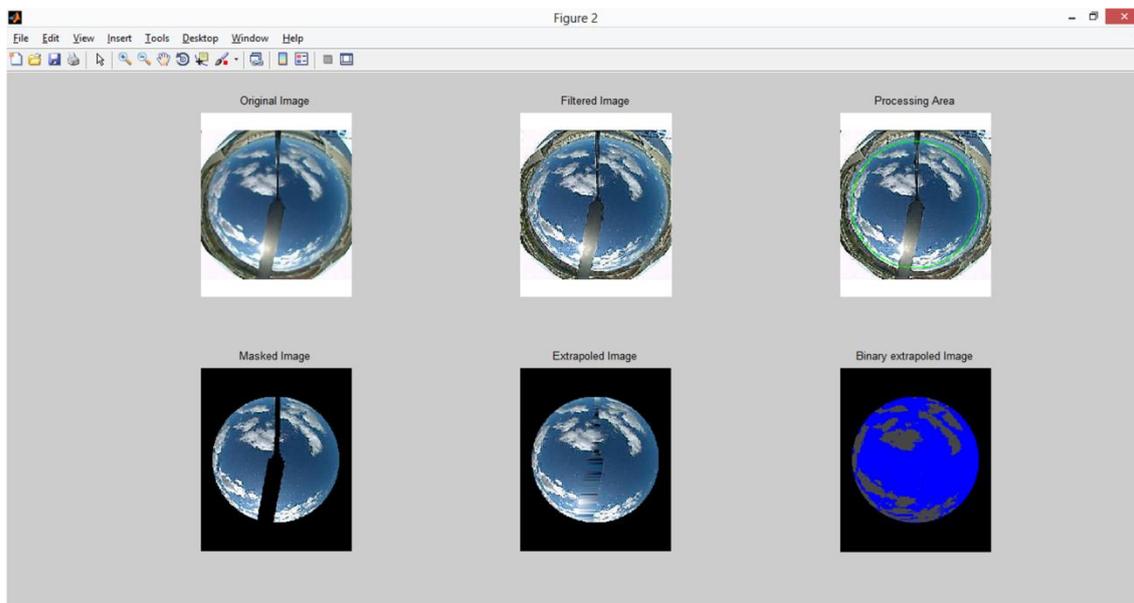


Ilustración 11. Cadena de Procesamiento Dígita de la Imagen

8.11. Limitación de la zona determinante de la imagen

Antes de desglosar el proceso que realiza el algoritmo, es necesario comentar las razones que impulsó a realizar este apartado:

- Disminuir el tiempo de cálculo. A través del análisis empírico del fenómeno de estudio, se indujo la posibilidad de descartar parte de la imagen como fuente de análisis.
- Aumentar la comprensión a partir de una representación visual del resultado alcanzado. En ocasiones, tras aplicar transformaciones, funciones y demás métodos, es posible que, intuitivamente, se pierda el enfoque de la información que se está tratando, bien sea en su conceptualización, en su magnitud o en su relación con los fenómenos naturales.

La imagen obtenida refleja el contenido de la bóveda celeste que la cámara es capaz de captar. Sin embargo, de cara a determinar qué masas nubosas son las que propician una zona sombreada sobre el campo solar, cabe pensar que la respuesta depende directamente de la altura de las nubes. Este hecho es evidente si se piensa en un caso extremo (*e.g.* si se captura un cúmulo de niebla que ocupa la zona central de la imagen a una altura de tres metros, la zona sombreada del campo solar será de poco metros cuadrados.) en el que la altura de la base de la masa nubosa se encuentre muy cerca o muy lejos.

Desde este punto de vista, sería interesante calcular, en base a la posición del Sol y la altura, qué región sobre la imagen ocupa el campo solar, para lo cual es necesario establecer las siguientes aclaraciones, que acotarán el marco de actuación:

Nota: Abstrayéndose de la información que, sobre la imagen, da el acimut, se puede concluir que determina la posición longitudinal del Sol, es decir, el eje "y". Siguiendo este mismo eje de pensamiento, el cenit determina la posición transversal del Sol, es decir, la coordenada "x".

- Acotación por acimut. Entendido desde dos puntos de vista:
 - Idealmente, el Sol aparece diariamente por el este y se oculta por el oeste. Desde el punto de vista ideal del acimut, teniendo en cuenta que la cifra que cede el algoritmo de cálculo parte desde el norte hacia el este, los ángulos entre 0° - 90° y 270° - 360° se corresponderían con horario nocturno, por lo que no tendría sentido correr el modelo. De aceptar esta premisa, la mitad superior de la imagen puede ser descartada, ya que dada la posición geográfica de la cámara, el Sol nunca aparecerá en esta región.

Nota: Para poder conceptualizar correctamente la siguiente suposición es necesario concebir el Sol como una fuente de luz puntual. Esta concepción no es errónea ya que en la naturaleza existen situaciones cotidianas en las que se evidencia este fenómeno.

La consecuencia inmediata de esta concepción es el tratamiento de los rayos solares como vectores paralelos entre sí, como acción de un frente de onda idealmente plano sobre la atmósfera, como consecuencia de la extrema lejanía del Sol en relación con la Tierra.



Ilustración 12. Perpendicularidad de los rayos solares

- La coordenada determinada por el acimut (coordenada x), delimita horizontalmente la sección de la bóveda celeste que aplica sobre el campo solar. Para ayudar a asimilar este hecho se puede abstraer la idea de que el Sol, a lo largo del recorrido trazado por el acimut, se encuentra en cuatro grandes sectores ($(0^{\circ}$ - $90^{\circ}]$, $(90^{\circ}$ - $180^{\circ}]$, $(180^{\circ}$ - $270^{\circ}]$, $(270^{\circ}$ - $360^{\circ}]$), donde, según el

punto de vista anteriormente descrito, dos de ellos se corresponden con horario nocturno, aplicando, por tanto, tan solo los sectores acimutales de horario diurno ($(90^{\circ}-180^{\circ}]$, $(180^{\circ}-270^{\circ}]$). Estos dos sectores determinan, en cada caso, la sección transversal de la bóveda celeste representada en la imagen que atañe al sombreado del campo solar, por lo que se pueden ver como un sector derecho (este, desde la vista de la fotografía) y un sector izquierdo(oeste, desde la vista de la fotografía). Puede abstraerse la idea de que la coordenada del Sol obtenida por el ángulo acimutal conforma el límite de la bóveda celeste que determina el sombreado del campo solar. El extremo determinado por el ángulo cenital es el opuesto al sector acimutal correspondiente. Dicho de otro modo, si la coordenada facilitada por el acimut se encuentra en el sector izquierdo, ésta coordenada determina el extremo derecho de la bóveda celeste que determina el sombreado del campo solar, y viceversa.

- Acotación por cenit. Entendido desde dos puntos de vista:
 - De manera análoga al caso anterior, idealmente, un ángulo cenital entre $90^{\circ}-270^{\circ}$ excederá el límite del horizonte lo que se traduce en horario nocturno. Nuevamente, la conclusión es la misma: sería razonable obviar el sector superior de la imagen en el procesamiento.
 - La coordenada determinada por el cenit (coordenada "y"), delimita verticalmente la sección de la bóveda celeste que aplica sobre el campo solar. Para ayudar a asimilar este hecho se puede abstraer la idea de que el Sol, a lo largo del recorrido trazado por el cenit, se encuentra en cuatro grandes sectores ($(0^{\circ}-90^{\circ}]$, $(90^{\circ}-180^{\circ}]$, $(180^{\circ}-270^{\circ}]$, $(270^{\circ}-360^{\circ}]$), donde, según el punto de vista anteriormente descrito, dos de ellos se corresponden con horario nocturno, aplicando, por tanto, tan solo los sectores cenitales de horario diurno ($(0^{\circ}-90^{\circ}]$, $(270^{\circ}-360^{\circ}]$). Estos dos sectores determinan, en cada caso, la sección longitudinal de la bóveda celeste representada en la imagen que atañe al sombreado del campo solar, por lo que se pueden ver como un sector superior(norte, desde la vista de la fotografía) y uno inferior(sur, desde la vista de la fotografía). Puede abstraerse la idea de que la coordenada del Sol determinada por el ángulo cenital conforma el límite de la bóveda celeste que determina el sombreado del campo solar. El extremo determinado por el ángulo cenital es el opuesto al sector cenital correspondiente. Dicho de otro modo, si la coordenada facilitada por el cenit se encuentra en el sector superior, ésta coordenada determina el extremo inferior de la bóveda celeste que determina el sombreado del campo solar, y viceversa.

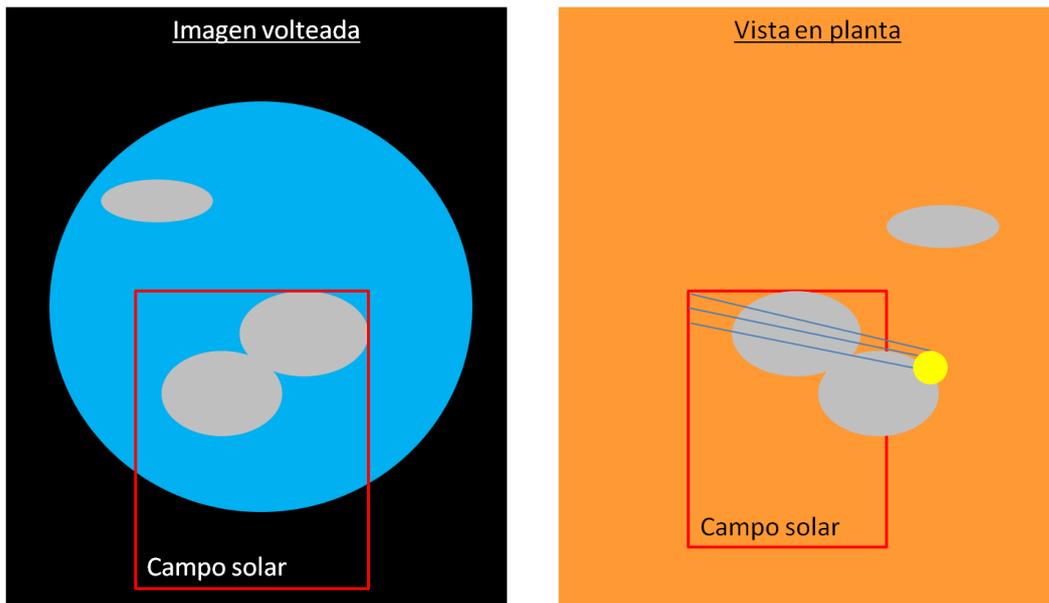


Ilustración 13. Abstracción de la información que facilita el ángulo acimutal

Llegado este punto, asumiendo las conclusiones anteriormente alcanzadas, la posición del Sol determinada por el ángulo acimutal y cenital determina una esquina de la bóveda que aplica sobre el campo solar. Para determinar el extremo contrario (restante) es necesario trasladar la superficie del campo solar escalado sobre la imagen, llevando uno de los vértices que lo conforman a la posición solar, tal y como se ha explicado anteriormente.

La dificultad de este planteamiento radica en escalar las dimensiones del campo solar dentro de la imagen. Nótese que las variables de trabajo son diferentes ya que, en el caso del campo solar se trabaja con unidades métricas y, del lado de la imagen, se trabaja con píxeles. De este hecho se deduce, por tanto, la necesidad de establecer una relación píxel-metro y/o viceversa. Habitualmente, manejar con precisión medidas físicas a partir de las imágenes presenta gran dificultad, ya que las unidades de la imagen son relativas (píxeles) y la resolución del *hardware* sobre el que se reproduzca determina su tamaño físico.

Sin embargo, en este caso, el enfoque con el que se acomete este problema es diferente, ya que, como hito intermedio, se fija la necesidad de establecer la relación píxel/metro, cuya naturaleza es independiente de la resolución del monitor sobre el que se reproduzca.

Actualmente existen recursos (*websites*) que realizan conversiones bastante precisas, donde, como parámetro de cálculo, se necesita la resolución del monitor sobre el que se reproduzca, razón por la que se anula la posibilidad de emplear esta alternativa.

Para el caso que nos ocupa, y con el objetivo de alcanzar este hito intermedio, se emplearán los parámetros de entrada que describen la anchura de la cámara en metros y en píxeles, estableciendo así la relación que se requiere como resultado de su cociente. Se deduce, por tanto, que dependiendo del orden de los operandos se obtiene la relación píxel/metro o metro/píxel.

Una vez se cuenta con estos coeficientes, ya es posible determinar la esquina opuesta que determina la porción de la bóveda celeste que se buscaba y que aplica para el sombreado del campo solar. Teniendo en cuenta todos los aspectos hasta aquí mencionados y, conociendo la disposición y orientación del campo solar, cabe esperar que la porción de bóveda que

provoca un sombreado sobre el campo solar, debido al paralelismo de los rayos solares, tendrá la misma forma y dimensión que el campo solar.

De cara a la correcta interpretación del resultado final y a facilitar su comprensión, se estima preferente mostrar el resultado desde el punto de vista del Sol, en lugar de desde el punto de vista de la cámara de nubes, o lo que a efecto práctico es lo mismo, desde el punto de vista del observador. Por ello, la imagen sobre la que se mostrará la superficie del campo solar se mostrará volteada horizontalmente.

Al hablar de sombreado y tratar el tema desde un enfoque cercano al concepto de proyección, cabría esperar que la dimensión de la porción de la bóveda celeste que provoca sombreado sobre el campo solar sea siempre inferior a la dimensión del propio campo solar y, sin embargo, en este caso se le ha atribuido la misma dimensión. Esta simplificación es razonable si se piensa en la proporción entre las distancias Sol-Tierra y base de la nube-Tierra. La proporción es tan pequeña que hace más que factible eliminar la aplicación de cualquier factor de escala.

En consecuencia de todos los aspectos y conceptos hasta ahora introducidos, se ha elaborado un algoritmo que visualiza el resultado alcanzado, cuyo producto se muestra a continuación:

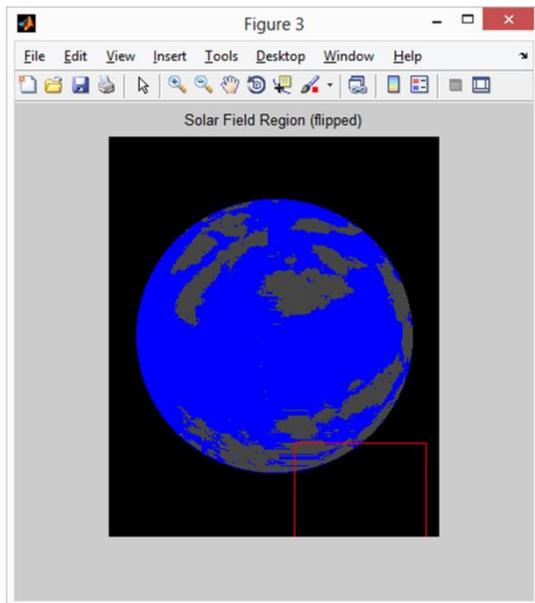


Ilustración 14. Campo solar sobre la bóveda celeste

Como puede verse en la imagen **Campo solar sobre la bóveda celeste**, devenido de la altura de la base de la nube, la dimensión del campo solar sobre la imagen de la bóveda celeste puede exceder el área de trabajo y, por lo tanto, introducirse en la zona enmascarada. Este hecho, arroja una alerta en el modelo advirtiendo de que no se puede determinar el sombreado en la totalidad del campo solar, por lo que se asume el mejor de los casos desde el punto de vista de extracción energética, esto es, que no existen masas nubosas.

8.12. Cálculo de la zona del campo solar afectada

El paradigma que se plantea para calcular la zona del campo solar sombreada compone el enfoque contrario al llevado a cabo en el apartado **Limitación de la zona determinante de la imagen**. En este aspecto, el objetivo de este hito se fija en representar la porción de la bóveda celeste que afecta al sombreado del campo solar sobre el propio campo solar,

adquiriendo así la distribución exacta de los colectores que se encuentran sombreados y los que reciben radiación solar directa.

Debido al parecido paradigma con respecto al apartado anterior se mantienen las mismas premisas relativas a:

- La posición del Sol. Juega un papel imprescindible ya que, coincidente con una de las esquinas superiores o inferiores del campo solar, conforma el origen de ordenadas y abscisas para plasmar la porción de bóveda celeste que provoca el sombreado.
- Relación píxel/metro. Es necesario contar con este coeficiente para adaptar la dimensión de la porción de la bóveda celeste sobre el terreno.
- Volteado de la imagen original. El punto de vista es la vista en planta del campo solar por lo que es necesario voltear horizontalmente la imagen procesada de la bóveda celeste.
- Concepción de la zona enmascarada como zona libre de obstáculos. Si la porción de bóveda celeste sobre el campo solar se encuentra, total o parcialmente, dentro de la zona de la imagen enmascarada, no es posible conocer si existen masas nubosas por lo que se sume el caso más favorable de cara a la extracción eléctrica y esto es, que la zona se encuentra libre de obstáculos.

La forma de atacar este sistema es realizar un procesamiento en paralelo entre la imagen de la bóveda celeste, acotando el marco de actuación a la región de interés, y la superficie del campo solar. El resultado obtenido se muestra a continuación:

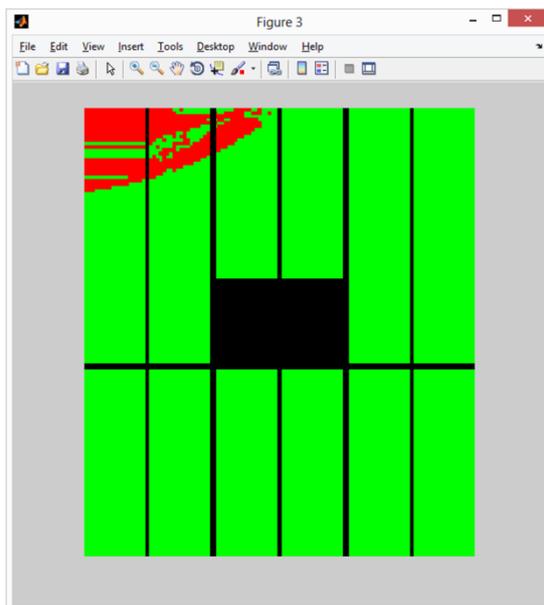


Ilustración 15. Campo solar sombreado

En la visualización del resultado del campo solar se hace uso de un código de colores intuitivo, donde se distinguen:

- Negro. Representa la zona carente de colectores solares, por lo que la existencia de masas nubosas sobre esta región es irrelevante.

- Verde. Representa la zona de colectores solares en la que no interfiere ninguna masa nubosa, por lo que es posible captar la radiación directa.
- Rojo. Representa la zona de colectores solares sobre la que existe masa nubosa, elemento que impide la captación de radiación directa.

Como se puede apreciar en la ilustración **Campo solar sombreado**, la granularidad llevada a cabo en el procesamiento digital de la imagen original, tras los sucesivos métodos, aun habiendo mantenido el nivel máximo posible y esto es, granularidad de un píxel, en el resultado final, por acción de lo que, en esencia, ha supuesto un factor de ampliación, el contorno de las masas nubosas se muestra abrupto. Derivado de la naturaleza del cálculo, esta cualidad se verá magnificada en base a la altura de la base de las nubes.

Es importante mencionar que, de haber escogido la opción del análisis sectorial de la imagen, lo abrupto del contorno de las masas nubosas se habría visto magnificada proporcionalmente al tamaño de la celda escogido en su momento, razón por la que cabe pensar que la opción escogida finalmente supone una mejora considerable teniendo en cuenta que, más allá del resultado visual del modelo, el efecto de pixelado de la masa nubosa repercute en el cálculo de la extracción de potencia, lo que se traduce, en consecuencia como una desviación.

8.13. Cálculo de potencia solar extraída

Este último hito tiene como resultado la estimación final de la potencia solar extraída de la radiación directa incidente. De acuerdo con el *Máster Plan* del proyecto, este hito conforma el nexo de unión con el motor de cálculo de la extracción eléctrica, conformándose como la principal entrada de datos del modelo físico de la planta, tal y como se detalla en el apartado **Objetivo y Alcance**.

Aunque a nivel funcional este hito es independiente del resto, a nivel técnico, este hito se alcanza simultáneamente al descrito en el apartado **Cálculo de la zona del campo solar afectada**.

De forma simplificada se puede decir que se realiza una contabilidad en tiempo real de las celdas correspondientes a colectores solares afectadas por la bóveda celeste. Como resultado de esta contabilidad se obtiene un número de celdas que reciben radiación solar directa.

Es en este momento donde se emplea el dato arrojado por el pirheliómetro, cuya información representa la cantidad de vatios solares, como fruto de la irradiancia directa, captados por unidad de superficie, esto es, metros cuadrados. Este dato, multiplicado por el número de celdas que reciben radiación directa, donde cada celda tiene una dimensión de un metro cuadrado, da como resultado los vatios solares totales en todo el campo solar.

El modelo desarrollado arroja un resumen de todas las cifras naturales y relativas que describen paso a paso toda la contabilidad realizada, resaltando, en especial, la cifra total de potencia captada. A continuación se muestra el *log* que arroja el sistema completo:

```
-----  
-I- Analyzing input image from sky camera  
-T- Image Loaded  
-I- Analyzing dateTime: 20121101124201  
-I- Azimuth(from north): 189.315088. Zenith(from vertical): 52.872041  
-T- Filtering Image...  
-T- Showing focus of vision  
-T- Applying Mask...  
-T- Processing Image...  
-I- Its cloudy at 36.396786 percent  
-----  
-I- Calculating shading  
-I- Selecting image region  
-I- 1cm on image = 6 pixels  
-I- 1px = 0.001667 meters on image  
-I- 1Px = 11.695906 real meters  
-I- SF width [px]: 115  
-I- SF large [px]: 133  
-W- SF size exceeds image region  
-T- Drawing SF...  
-I- SF Area: 2083700 m^2  
-I- Colectors Area: 1807260 m^2 (86.733215 percent)  
-I- Ground+Power Island Area: 276440 m^2 (13.266785 percent)  
-I- Blocked Colectors: 92873 m^2 (5.138884 percent)  
-I- Free Colectors: 1714387 m^2 (94.861116 percent)  
-----  
-I- Captured Solar Power: 1714.387000 MW  
-----
```

9. Futuras líneas de actuación

A continuación se enunciarán aquellas cuestiones que, tras haber realizado el proyecto, se presentan como una mejora a incluir en futuras versiones del sistema o como aspectos ampliables. En todas ellas se indicará el motivo por el cuál ha sido identificada como un hecho mejorable así como la solución propuesta en términos teóricos o incluso las posibles vías técnicas para la alcanzar la solución. Sin embargo, pese a conocerse ésta, el objetivo a alcanzar puede comprometer la fecha de entrega del proyecto, por lo que se propone desarrollar los aspectos mejorables en versiones posteriores.

Es necesario precisar que el hecho de mencionar un apartado como éste no supone la nulidad del sistema propuestos. Todos los sistemas analizados, así como todos los estudios indicados en la **Bibliografía** contienen aspectos mejorables. La debilidad no se representa como una posible mejora no alcanzada, sino como un hecho descontrolado o cuya repercusión se desconoce.

- Límite horario. Como viene expresado en todos los apartados del capítulo **Anexos**, la ejecución del sistema no aplica en horario nocturno, ya que en este intervalo no existe capacidad de extracción solar. Más allá de esta acotación, el método de cálculo de la posición solar, según viene expresado entre las especificaciones del autor, induce una leve desviación en momentos cercanos al alba y al ocaso. Es por ello que, de ejecutarse el sistema, es necesario advertir de dicha desviación. Sin embargo, esta salvedad es irrelevante debido a que:
 - El error introducido por el algoritmo es tan ínfimo que se solapa con el error natural inherente a la captura de las imágenes o la pérdida de decimales en los cálculos.
 - Durante los momentos de altura solar próxima a cero, tampoco se realiza extracción energética porque coincide con los momentos de arranque de la turbina y aceleración hasta que se alcanza un estado de adecuado de revolución e inercia. Es por ello que, pese a ser de día, no existe extracción energético. Se deduce, por tanto, que el calendario de procesos diarios a ejecutar debe gobernar sobre el sistema de predicción del recurso solar.
- Según el desarrollo llevado a cabo y las dimensiones tan grandes del campo solar, el área que ocupa éste sobre la imagen expresada en la ilustración **Campo solar sobre la bóveda celeste** supera frecuentemente el *FOV*. Esta regularidad disminuye a medida que la altura de las nubes es mayor. Sin embargo, en intervalos lluviosos y cuando existen cúmulos abundantes, donde la altura de la masa nubosa es menor este hecho es muy notable. Es necesario precisar que en estos momentos en los que el cielo está cubierto o se producen precipitaciones, el recurso solar es escaso o incluso nulo, por lo que no aplica la ejecución del sistema. En cualquier caso, la solución a este hecho no repercute sobre el sistema de cálculo, sino sobre la red de instrumentación. Para paliar o eliminar este fenómeno es necesario desplegar más cámaras de nubes y evaluar la información que se cede de forma conjunta. Este hecho se refleja en el anexo **Funcionamiento de la cámara de nubes**.
- Tal y como se menciona en la nota expresada en el apartado **Limitación de la zona determinante de la imagen**, el Sol es tratado como una fuente puntual. Éste, aun siendo la simplificación más sencilla y exacta, en ciertos aspectos, induce un pequeño error. Este error se acentúa en momentos cercanos en los que el acimut adquiere

valores múltiples del ángulo recto. Es en estos momentos en lo que, derivado de hacer coincidir la ubicación de una de las aristas del campo solar, se produce una leve desviación. Para solventar este efecto, se debe tratar, excepcionalmente, el Sol como una fuente de geometría circular variable cuyo centro se hace coincidir con el perímetro del campo solar. Aun con este enfoque, una vez el acimut se aleja de los puntos críticos mencionados, su tratamiento como fuente puntual es nuevamente aplicable. También es necesario que, de las cuatro zonas críticas (acimut = 90°, 180°, 270°, 0°), en dos de ellas la variación espacial es muy rápida. Este hecho es fácilmente asimilable si se piensa en la rapidez con la que el Sol aparece y sube por el este y, por el contrario, alcanzando el oeste su altura disminuye con rapidez¹¹. De las dos zonas críticas restantes, una es irrelevante por la localización geográfica del observador. Además, el inconveniente de este apartado se solapa con el expresado en el apartado anterior.

- El sistema de captación, como se ha mencionado en repetidas ocasiones, induce un defecto óptico como producto de reflejar la bóveda celeste sobre una superficie curva, adquiriendo el mismo efecto que un objetivo gran angular. El resultado de este hecho es que toda la información que se extraiga utilizando las zonas periféricas del área restringida por el *FOV* incluirán una desviación. Con el ánimo de corregir este efecto existen dos alternativas:
 - Despliegue de más cámaras de nubes. Una vez más, la utilización de un solo dispositivo marca una limitación en el sistema de cálculo. Lo ideal sería disponer de una red de dispositivos que cubriesen todo el campo solar describiendo celdas de espacio uniforme. De esta forma, la superposición de todas las imágenes describirían la bóveda celeste sin distorsiones ópticas relevantes.
 - Disminución del *FOV*. Ya que la desviación aumenta proporcionalmente al radio cuyo centro se sitúa en el foco de la lente sobre la imagen y que el área de estudio se limita al ángulo expresado por el *FOV*, a medida que se reduzca el *FOV*, se disminuirá la zona de estudio pero se disminuirá también la distorsión inducida por la lente.
 - Elaboración de un algoritmo de corrección. Conociendo las dimensiones de la bóveda celeste y la forma exacta de la superficie reflectante de la cámara, a partir del plano descrito por la imagen capturada podría recrearse la superficie curvada. Este algoritmo, de naturaleza puramente orientada al tratamiento digital de la imagen, consta de gran complejidad debido principalmente al hecho de que las celdas de análisis no son con forma de paralelepípedo, como son los píxeles, sino que en este caso deben recrear sectores circulares. Se ha planteado un sistema de seccionamiento de la imagen en la que, a partir del centro de la imagen y con forma rectangular, se recorta la imagen a la vez que con solapamientos y empleo de máscaras sectoriales se pueda reconstruir la imagen original.

¹¹ Este hecho es el mismo que se observa en el recorrido de una onda senoidal, donde su variación espacial es mayor en los puntos próximos a los extremos y menor en los puntos cercanos al eje.

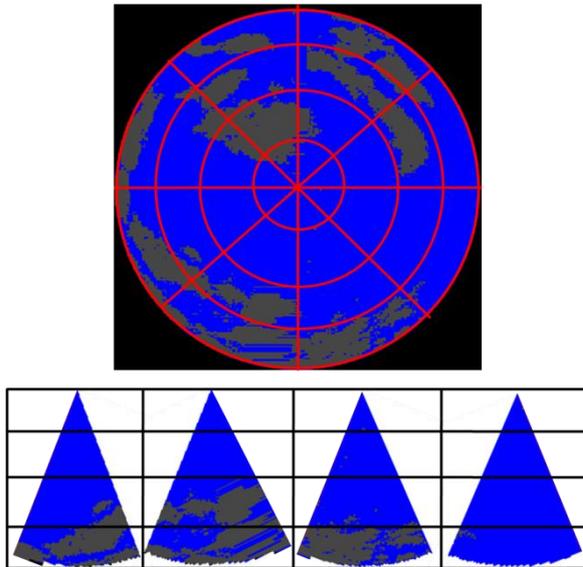


Ilustración 16. Ejemplo de corte sectorial de la imagen

- Un hecho muy simple pero fundamental es la sincronización lo más perfecta posible entre la hora real y la hora de la cámara de nubes. En caso de una desalineación entre ambos elementos, los resultados se verán fuertemente afectados. Un hecho muy gráfico de una mala coordinación se ve reflejada cuando un disco solar se ve parcialmente en la imagen.
- Existen infinidad de elementos que pueden ser capturados erróneamente por la cámara de nubes, tal y como se indicó en el apartado **Anulación de la estructura de la cámara**. El estudio de la geometría de cada uno de ellos de cara a obviarlos en el estudio de la bóveda celeste es extremadamente arduo. Sin embargo, el fenómeno más fácilmente identificable, por la geometría y posición conocida, es la Luna. Sería necesario, por tanto, incluir un algoritmo adicional para calcular la posición y geometría exacta de la Luna e incorporar el resultado antes de proceder a la detección binaria de las nubes, dejando a un lado el área determinada.
- La información que arroja el ceilómetro proporciona, además de la altura de la base de la nube, el punto más alto de ésta. Esta información debe ser incluida en el cálculo debido a que, según la posición del Sol, la proyección de la sobra puede verse determinada por este dato. Es necesario mencionar que, pese a que este hecho supone una desviación del resultado final, tan solo es notable en las zonas críticas del acimut correspondientes al alba y el ocaso. En el resto de los casos, esta simplificación no induce una desviación muy relevante.

10. Conclusiones

A continuación se indicarán las conclusiones que se deducen del proyecto realizado, que evidencian la calidad, viabilidad y competitividad del sistema de cálculo realizado.

- Como se ha descrito en el apartado **Futuras líneas de actuación**, existen varios hechos que dificultan el cálculo planteado en un inicio pero, en rasgos generales, los efectos negativos se solapan mutuamente, por lo que no adquieren un factor acumulativo. Además de ello, muchos de los efectos que provocan una desviación del resultado final se producen en instantes o situaciones donde no es aplicable esta metodología de cálculo, puesto que no se produce aprovechamiento energético. En consecuencia, puede extrapolarse que las desviaciones no anulan el resultado alcanzado y que su repercusión es leve, aunque no por ello despreciable.
- La premisa marcada por el sistema es obtener un algoritmo que arroje datos en tiempo real y cuyo tiempo de ejecución sea muy inferior a la frecuencia de refresco del sistema de adquisición de datos, que se ve determinado por la frecuencia de captación de imágenes de la cámara de nubes. En este sentido, el objetivo se ha conseguido con creces ya que, en un equipo doméstico compartido y tras haber depurado y optimizado el código, el ciclo completo utilizando programación lineal bajo un lenguaje de programación de medio nivel tiene una duración de unos 12 segundos. Este valor se verá fuertemente reducido una vez se establezca un *pipeline* de ejecución y se utilicen varios hilos de ejecución. Todo ello, sumado a la capacidad que ofrece un servidor, reducirían el tiempo total de ejecución hasta tal punto que se hace perfectamente compatible incluso configurando la cámara de nubes con su periodo mínimo de muestreo.
- Se han cumplido los requerimientos espaciales y temporales marcados ya que se ha diseñado un sistema cuyos requisitos básicos se han externalizado:
 - La frecuencia temporal. Se ha derivado de la cámara de nubes y se ha conseguido tiempo de ejecución mínimo que no supera la frecuencia mínima de muestreo de la cámara de nubes. En consecuencia, la frecuencia temporal no la impone el sistema, sino la cámara.
 - El horizonte espacial. Se deriva, sobre todo, de la resolución configurada en la cámara de nubes, que provoca la desviación más relevante. Por la parte del sistema desarrollado, la granularidad mínima es de un m^2 , que cumple con creces las expectativas marcadas.
- Este algoritmo forma parte de un sistema de mayor envergadura en el que, la fiabilidad y la precisión es el producto de combinar todas las técnicas y procesos. La solución alcanzada, que ha evolucionado desde su concepción tras ir asumiendo soluciones de compromiso hasta adquirir el nivel de complejidad avanzado, cumple con creces con el objetivo marcado. Evidentemente, la dedicación de más recursos supondría la mejora del resultado final pero el paradigma planteado ha evolucionado hasta tal punto en el que el perfeccionamiento alcanzado se aproxima a un nivel asintótico con respecto a los recursos dedicados. En consecuencia, la solución de compromiso alcanzada es muy competitiva y cumple con los objetivos marcados.
- Contrariamente a como se ha expresado en el punto anterior, el aumento de recursos destinados a la complementación de la red de instrumentación desplegada en la

planta, así como la inclusión de aparataje adicional que complementen la información de partida supondría un avance muy significativo, tal y como se ha expresado en numerosas ocasiones en el apartado **Futuras líneas de actuación**.

- Actualmente el testeo del sistema se encuentra en fase de implementación. Sin embargo, la obtención de los parámetros finales que definen el comportamiento y adecuación del sistema en su conjunto guarda dependencias con la elaboración del resto de módulos, por lo que será necesario finalizar todos los hitos que componen el proyecto para comenzar las pruebas definitivas.
- El algoritmo de detección de nubes, basado en el procesado de las tres capas que componen la imagen supone un método novedoso que prescinde, además, de cálculos adicionales necesarios si se utiliza el método *tradicional* basado en una tasa que relacione componentes. Este método supone, por tanto, un elemento diferenciador que, además, se presenta como intuitivamente más comprensible, lo que puede ser muy bien recibido por un potencial cliente que, en ocasiones, la opacidad de los sistemas se le presenta como una desventaja.
- Uno de los aspectos que añade competitividad al proyecto y capacidad de comercialización es su fácil y rápida configuración y exportación a otros sistemas de extracción solar y regiones geográficas. Si se examina con detalle la estructura desarrollada, en ningún momento se establece una dependencia que limite la empleabilidad del sistema en cualquier otra instalación.
- Todos los recursos empleados en la concepción del sistema de cálculo son exportables a cualquier plataforma y a cualquier módulo de otro sistema, por lo que no depende de ninguna plataforma ni licencias. Además, como se ha mencionado anteriormente, los recursos computacionales que consume el algoritmo no son prohibitivos a nivel empresarial, por lo que el sistema puede correrse en cualquier servidor de gama baja o media incluso sin necesidad de ser empleado de forma exclusiva, sino compartida.
- Derivado de anteriores puntos entendidos de forma conjunta, el sistema final podría ser concebido como una *app*, por lo que podría correr desde un servidor propio con filosofía *cloud computing*, abaratando los recursos que se le exigirían a un potencial cliente y asegurando y prolongando la relación comercial con el cliente, posibilitando así el ofrecimiento de servicios colaterales.

11. Anexos

Anexo 1. Funcionamiento de la cámara de nubes

Este dispositivo se encarga de realizar capturas fotográficas de la bóveda celeste. Para ello, el sensor fotosensible recoge la información de los elementos que se hallen sobre la superficie y que se ven reflejados sobre un espejo. Dicha superficie reflectante se encuentra curvada adquiriendo un volumen semejante a un cono de revolución, lo que provoca:

- Reflejo de la totalidad de la bóveda celeste sobre el horizonte. De forma análoga a un objetivo gran angular, también conocido como ojo de pez (*fishereye*), se amplía el ángulo de captura.
- Derivado de la anterior, este objetivo aumenta el ángulo de captura a base de inducir una deformación en la imagen. Esta deformación aumenta de forma proporcional a la distancia desde el foco de la lente sobre la imagen, que se asumen en el centro de la imagen.



Ilustración 17. TSC-880

La localización geográfica de la cámara de nubes no es un hecho trivial. Obviamente, el dispositivo ha de estar dentro del campo solar, pero la localización dentro del mismo es variable en función del hemisferio donde se encuentre el observador. En el caso particular que ocupa, la cámara debe de estar dispuesta en dirección norte-sur donde, por razones de homogeneidad, el brazo fijo se orienta hacia el norte.

A priori, en el supuesto de disponer de una sola cámara, como es el caso, se puede pensar en colocarla en la zona central del campo solar, situación no desfavorable. En cualquier caso, como se evidencia a lo largo del análisis llevado a cabo, de cara a un correcto análisis de la bóveda celeste sin inducir deformaciones significativas, sería necesario contar con una red de cámaras desplegadas de forma uniforme a lo largo del campo solar.

A continuación se muestra una tabla resumen de las principales características que definen el funcionamiento de la cámara de nubes:

Características Técnicas TSI-880	
Resolución de imagen	352 x 288 color, 24-bit, espejo rotatorio con banda de sombreado automatizado por ordenador
Frecuencia de muestreo	Variable, con un máximo de una imagen cada 30 segundos
Rango de operación	-30°C a +34°C

Características Técnicas TSI-880	
Peso	Aprox. 20 kg
Tamaño	base de 41cm x 76cm; altura de 71cm
Requerimientos energéticos	115/230 V _{AC} ; El calentador varía el <i>duty cycle</i> debido a la temperatura del aire: aprox. 600 vatios con el calentador encendido; 50 vatios con calentador apagado
Software:	Aplicación de imágenes soportada por MS-Windows 9x/NT
Almacenamiento de datos	Disco local de la estación
Comunicaciones	10BaseT/RJ45 (15m)

Tabla 2. Características técnicas de la cámara de nubes

La información que captura la cámara se almacena finalmente en un directorio específico del servidor por lo que, para acceder a la información basta con dirigirse al directorio concreto y emplear las imágenes que se encontrarán, por defecto, en formato *jpeg*.

Este dispositivo cuenta con un sistema de almacenamiento integrado en el que se guardan sucesivamente las imágenes que se generan. La finalidad de esta memoria es almacenar la actividad de varias jornadas para que la información sea descargada de forma recurrente cada cierto tiempo. No es posible determinar *a priori* la frecuencia crítica de descarga de datos que permita contar con un histórico continuo¹², ya que ésta será función de la resolución escogida y la frecuencia de captura, ambos parámetros seleccionables entre las características de la cámara. Sin embargo, de cara a la predicción del recurso solar, el refresco debe ser inmediato, reservando la memoria interna del dispositivo como método de contingencia.

Anexo 2. Funcionamiento del ceilómetro

Este dispositivo se ha introducido recientemente entre la instrumentación convencional utilizadas para medir componentes atmosféricos. En concreto, el ámbito de utilización del ceilómetro se reduce a la caracterización de la columna de aire de estudio que se encuentra sobre el instrumento. Más concretamente, el ceilómetro se emplea para evaluar las masas nubosas de la atmósfera y la composición de aerosoles del aire.

A nivel técnico, este dispositivo cuenta con un emisor láser que, basándose en el fenómeno físico del efecto *Doppler*, obtiene información sobre:

- Altura de la nube. La distancia a la que se encuentra la base de la masa nubosa, independientemente del tipo de nube del que se trate (cirros, altocúmulos, cúmulos, estratos, nimbos, etc.).
- Espesor de la masa nubosa. El instrumento arroja información sobre el espesor de la nube a través de la obtención de la altura del punto más elevado de la nube, lo que en sí proporciona una información muy importante.
- Capas nubosas. El instrumento está diseñado para trabajar con diversos estratos nubosos, por lo que aporta información sobre cada capa diferenciada de la columna de aire de análisis.

¹² Entendiéndose por éste que no existen franjas de tiempo durante el horario diurno representadas por una imagen. Durante el horario nocturno, el almacenamiento puede deshabilitarse o incluso desconectar el dispositivo.

- Contenido de aerosoles. Entendiéndose como la composición del aire en suspensión, el dispositivo arroja información sobre las partículas que existen en la columna de aire de estudio, de lo que se extrapola la atenuación y difracción de la radiación solar.

Contrariamente a como ocurre en el caso de la cámara de nubes, la colocación del ceilómetro es favorable en un punto cercano al centro del campo solar, por lo que en este caso concreto, el dispositivo se ha colocado sobre la cubierta de la isla de potencia. Esto es debido a la independencia de la trayectoria de las nubes en función de la localización geográfica del observador. Además, pese a que es conveniente desplegar una red de varios dispositivos para la correcta caracterización de la bóveda celeste, la medida de uno de ellos, dependiendo de la altura y del tipo de las nubes es aplicable a la zona circundante, con un radio aproximado de 10 kilómetros, que excede las dimensiones del campo solar. Sin embargo, esta medida es aplicable siempre que el haz de luz capture una nube ya que, en el caso de no hacerlo no existe ninguna información a tener en cuenta, razón por la que se justifica el despliegue de la red de ceilómetros.



Ilustración 18. Ceilómetro CHM 15k | 15k-x

A continuación se muestra una tabla con las principales características técnicas que definen el comportamiento de este instrumento:

Características Técnicas CHM 15k 15k-x	
Método de medida	Óptico (LIDAR)
Rango de medida	15 m - 15.000 m (50 ft ... 50.000 ft)
Precisión ¹³	±5m (±16 ft)
Resolución de datos de retrodispersión	Estándar: 15 m (50 ft) Opcional: 5 m (16 ft)
Resolución hardware	200 MHz (frecuencia de muestreo)
Tiempo de medida	5 s...60 min (programable)
Objetivos	Aerosoles, nubes
Cantidades a ser medidas	<ul style="list-style-type: none"> • Base de la nube (5 capas máx. por defecto 3 capas) • Nubes totales • Profundidad de penetración • Visibilidad vertical • Altura de las capas mezcladas
Fuente de luz	Nd: laser de estado sólido, longitud de onda 1064 nm

Tabla 3. Características técnicas del ceilómetro

¹³ Medida sobre objetivo fijado a 10 km de distancia

A este dispositivo se le ha añadido un sistema de almacenamiento (*datalogger*) con el objetivo de almacenar los datos capturados hasta que éstos sean descargados desde el sistema central de adquisición de datos. La frecuencia de muestreo de este dispositivo debe ser, como mínimo, la misma frecuencia seleccionada en la cámara de nubes para que la información sea consistente y no se sobrecarguen innecesariamente las líneas de comunicación. En el caso de que la frecuencia de muestreo sea superior, los datos se almacenarán en el sistema de almacenamiento hasta la siguiente descarga. Se deduce, por tanto, que la latencia del sistema de adquisición de datos viene impuesta por la frecuencia de muestreo más baja de todos los dispositivos que lo componen, esto es normalmente, la cámara de nubes. Al igual que se ha mencionado en la **12**, el intervalo de funcionamiento puede acotarse al horario diurno, añadiendo la premisa de que los dispositivos se encuentre perfectamente sincronizados.

Anexo 3. Funcionamiento del pirheliómetro

Este dispositivo se encarga de obtener el valor preciso de la radiación directa incidente en el campo solar sobre un punto concreto. Es por ello que, al igual que ocurre con el ceilómetro, para contar con más garantías acerca de la medida realizada, se debe contar con varios de estos dispositivos distribuidos uniformemente por el campo solar de forma que se cubra la mayor área posible porque así se garantiza al máximo que una misma masa nubosa anule erróneamente la medida de todo el campo solar. Sin embargo, en el caso concreto de este proyecto, tan solo se hará uso de un dispositivo de este tipo situado junto al ceilómetro, esto es, sobre la cubierta de la isla de potencia.

La función que desempeña este dispositivo dentro del sistema implementado es el de servir como medida de referencia a la hora de estimar un valor de potencia solar capturada en el campo solar. En concreto, aportará la potencia radiada por metro cuadrado por lo que el valor total de potencia en el conjunto del campo solar será un múltiplo entero de este factor. Por esta razón se le suma importancia al hecho de contar con varios de estos dispositivos, porque de obtenerse un valor poco representativo la estimación del cálculo total se verá fuertemente desvirtuada lo que, *a posteriori*, provocará una leve descalibración del sistema.



Ilustración 19. Pirheliómetro Kipp & Zonen CHP 1

Este dispositivo cuenta con un sistema de almacenamiento externo (*datalogger*) que funciona y cubre las mismas necesidades que el mencionado en el apartado **Funcionamiento del ceilómetro**.

A continuación se muestran las características técnicas que definen el comportamiento de este dispositivo:

Características Técnicas Kipp & Zonen CHP 1

Características Técnicas Kipp & Zonen CHP 1	
Rango espectral	200 a 4000 nm
Sensibilidad	7 a 14 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Tiempo de respuesta	< 5 s
Offset cero B	< 1 W/m^2
Dependencia de temperatura con respecto de la sensibilidad (-20 °C a 50 °C)	< 5%
Campo de visión	$5 \pm 0.2^\circ$
Tiempo de respuesta	-40 a 80 s
No linealidad	0,2 %
Irradiación solar máxima	4000 W/m^2
Normas internacionales	Primera clase ISO

Tabla 4. Características técnicas del pirheliómetro

Anexo 4. Funcionamiento *sun_position.m*

```

% This function compute the sun position (zenith and azimuth angle at
% the observer location) as a function of the observer local time and
% position.
%
% It is an implementation of the algorithm presented by Reda et
% Andreas in:
% Reda, I., Andreas, A. (2003) Solar position algorithm for solar
% radiation application. National Renewable Energy Laboratory (NREL)
% Technical report NREL/TP-560-34302.
% This document is available at www.osti.gov/bridge
%
% This algorithm is based on numerical approximation of the exact
% equations.
% The authors of the original paper state that this algorithm should
% be precise at +/- 0.0003 degrees. I have compared it to NOAA solar
% table (http://www.srrb.noaa.gov/highlights/sunrise/azel.html) and to
% USNO solar table (http://aa.usno.navy.mil/data/docs/AltAz.html) and
% found very good correspondance (up to the precision of those
% tables), except for large zenith angle, where the refraction by the
% atmosphere is significant (difference of about 1 degree). Note that
% in this code the correction for refraction in the atmosphere as been
% implemented for a temperature of 10C (283 kelvins) and a pressure of
% 1010 mbar. See the subfunction
% sun_topocentric_zenith_angle_calculation for a possible modification
% to explicitly model the effect of temperature and pressure as
% describe in Reda & Andreas (2003).

```

12. Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Módulos del <i>Master Plan</i>	18
Ilustración 2. Módulos del sistema de predicción del recurso solar.....	21
Ilustración 3. Modelo de análisis de las imágenes de la cámara de nubes.....	22
Ilustración 4. Módulos del sistema de cálculo	31
Ilustración 5. Imagen filtrada	37
Ilustración 6. <i>FOV</i> sobre la imagen.....	39
Ilustración 7. Imagen con estructura enmascarada.....	43
Ilustración 8. Sectorización de la imagen para la interpolación	45
Ilustración 9. Estructura interpolada	46
Ilustración 10. Imagen booleana.....	48
Ilustración 11. Cadena de Procesamiento Digita de la Imagen.....	49
Ilustración 12. Perpendicularidad de los rayos solares.....	50
Ilustración 13. Abstracción de la información que facilita el ángulo acimutal	52
Ilustración 14. Campo solar sobre la bóveda celeste.....	53
Ilustración 15. Campo solar sombreado	54
Ilustración 16. Ejemplo de corte sectorial de la imagen	59
Ilustración 17. TSC-880.....	62
Ilustración 18. Ceilómetro CHM 15k 15k-x.....	64
Ilustración 19. Pirheliómetro Kipp & Zonen CHP 1	65

13. Índice de tablas

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la planta termosolar	30
Tabla 2. Características técnicas de la cámara de nubes	63
Tabla 3. Características técnicas del ceilómetro	64
Tabla 4. Características técnicas del pirheliómetro	66

14. Bibliografía

- [1] . LORENZO, E., et al. Predicción y ensayo de la producción de energía fotovoltaica conectada a la red: retratos de la conexión fotovoltaica a la red (IX). *Era solar: Energías renovables*, 2007, no 139, p. 22-31.
- [2] . MARTÍN POMARES, Luis. Análisis y predicción de series temporales de irradiancia solar global mediante modelos estadísticos. 2012.
- [3] . MUÑOZ-JIMÉNEZ, A., et al. MODELOS DE PREDICCIÓN A CORTO PLAZO PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.
- [4] . PELLAND, Sophie; GALANIS, George; KALLOS, George. Solar and photovoltaic forecasting through post-processing of the Global Environmental Multiscale numerical weather prediction model. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011.
- [5] . DEAN, Steve R.; ASA, P. E. Quantifying the variability of solar PV production forecasts. *American Solar Energy Society*, 2010.
- [6] . PICAULT, Damien, et al. Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch losses. *Solar Energy*, 2010, vol. 84, no 7, p. 1301-1309.
- [7] . LORENZ, Elke, et al. Irradiance forecasting for the power prediction of grid-connected photovoltaic systems. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of*, 2009, vol. 2, no 1, p. 2-10.
- [8] . KALECINSKI, Natacha, et al. Evaluation of the performance of a meso-scale NWP model to forecast solar irradiance on Reunion Island for photovoltaic power applications. En *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2013. p. 11851.
- [9] . CHAKRABORTY, Prithwish, et al. Fine-grained Photovoltaic Output Prediction using a Bayesian Ensemble. En *Twenty-Sixth AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2012.
- [10] . HEINEMANN, Detlev; LORENZ, Elke; GIRODO, Marco. Forecasting of solar radiation.) *Solar energy resource management for electricity generation from local level to global scale*. Nova Science Publishers, New York, 2006.
- [11] . POLO, Fernando Agustín Olivencia; DEL ROSARIO, Jose J. Alonso; GARCÍA, Gonzalo Cerruela. Supervisory control and automatic failure detection in grid-connected photovoltaic systems. En *Trends in Applied Intelligent Systems*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 458-467.
- [12] . MORATIEL, CARLOS ENTRENA. ESTUDIO DE VIABILIDAD SOBRE LA PREVISIÓN HORARIA DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA MEDIANTE TÉCNICAS DE REDES NEURONALES.
- [13] . DIAGNE, Hadja Maïmouna, et al. SOLAR IRRADIATION FORECASTING: STATE-OF-THE-ART AND PROPOSITION FOR FUTURE DEVELOPMENTS FOR SMALL-SCALE INSULAR GRIDS.

- [14] . HAMMER, Annette, et al. Short-term forecasting of solar radiation: a statistical approach using satellite data. *Solar Energy*, 1999, vol. 67, no 1, p. 139-150.
- [15] . BACHER, Peder; MADSEN, Henrik; NIELSEN, Henrik Aalborg. Online short-term solar power forecasting. *Solar Energy*, 2009, vol. 83, no 10, p. 1772-1783.

ex nihilo nihil fit



© Universidad de Córdoba
Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci
14071 CÓRDOBA (España)