



Proyecto Fin de Carrera

Analysis of aerosol particles for the determination
of energy losses in solar power plants

Juan Prats Briceño

Director: Markus Sauerborn
Ponente: Cristóbal Cortés Gracia

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2012

RESUMEN

El siguiente proyecto de fin de carrera ha sido realizado para el Solar-Institut Jülich, en Jülich Alemania. El objetivo principal del proyecto es demostrar si existe o no una influencia de las partículas de aerosol y de las nubes en la energía solar incidente en la superficie de la tierra. Esta información sería importante para las plantas de energía solar térmica de concentración, ya que se puede ver directamente afectada por estas pérdidas de energía producidas por las partículas de aerosol.

La interacción de las partículas de aerosol forman lo que se llama la radiación circunsolar, que es la "aureola" vista desde la tierra situada alrededor del sol. Esta radiación circunsolar es radiación solar difusa, la cual contiene menos energía al ser difuminada y no proviene directamente de la esfera solar. De manera que, en centrales de energía solar térmica de concentración, la radiación solar no es reflejada correctamente por heliostatos hacia su objetivo o lo hará con menor energía.

Para realizar este proyecto de fin de carrera se han utilizado una serie de equipos de medida. Los equipos son los siguientes: Un ceilómetro que da información de partículas y nubes presentes en la atmósfera entre alturas comprendidas de 15 y 15000 metros. Un espectrómetro de aerosoles que proporciona datos a cerca de la concentración de aerosoles al nivel del suelo. Una estación meteorológica que de la que se obtiene información de varios parámetros, siendo especialmente útiles los relativos a la radiación solar. Por último se ha utilizado una cámara con un sensor CCD para tomar fotografías del sol y poder medir su intensidad, tanto en la circunferencia solar como en la radiación circunsolar. Con los datos de la intensidad, se ha calculado da el porcentaje de energía proveniente del área circunsolar.

Las mediciones se han tomado en diferentes días con condiciones atmosféricas muy variables, de este modo, al compararlas, se puede apreciar que factores son los más influyentes en la radiación circunsolar y poder así demostrar la influencia de las partículas de aerosol.

TABLA DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	4
2	Teoría.....	7
2.1	Energía solar.....	7
2.2	Radiación cicunsolar	9
2.3	Partículas de aerosol	10
2.4	Nubes	11
3	Equipos utilizados	12
3.1	Ceilómetro: CHM 15K.....	12
3.2	Espectrómetro de aerosoles: Fidas ® 200	13
3.3	Estación meteorológica.....	14
3.4	Sistema de cámara	14
4	Mediciones	16
4.1	Resultado de las mediciones.....	16
4.2	Análisis de las mediciones.....	18
5	Conclusión.....	21

El anexo (proyecto original) se encuentra a continuación de la conclusión.

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto ha sido escrito para el “Solar-Institut Jülich” (SIJ) el cual está situado en la localidad de Jülich, Alemania. El SIJ fue fundado en el año 1992 como una institución científica de universidad de ciencias aplicadas “FH Aachen”. El instituto fue creado con el objetivo de investigar en el campo de las energías renovables, especialmente en la energía solar. Uno de los proyectos más importantes en los que el SIJ participa es la “Solar Turm Jülich” (STJ), una torre solar construida conjuntamente con el “Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt” (DLR), que es la agencia aeroespacial alemana. La STJ es una planta de concentración solar de alta temperatura, en la que 2000 helióstatos reflejan la radiación solar contra lo alto de la torre. En la torre se concentra la energía en un absorbedor crómico que transmite la radiación solar al fluido de transferencia. En este caso se utiliza aire que alcanza una temperatura de hasta 700 °C, este aire evapora el agua para que luego el vapor entre en una turbina que genere hasta 1500 KW.

Una central eléctrica de energía solar térmica puede tener una eficiencia de un 17%. Las pérdidas que normalmente están consideradas son, por ejemplo, la acción del viento, pérdidas del coseno, reflexión, absorción... Estas pérdidas generalmente son cuantificables y se han tenido en cuenta en las centrales construidas, pero este proyecto se va a centrar en otras pérdidas sobre las cuales no se ha investigado apenas. Las partículas de aerosol presentes en el aire de la atmósfera dispersan la luz solar al interactuar con ella, cambiando la dirección de los rayos solares incidentes sobre la superficie de la tierra. Parte de estos rayos son dispersados muy levemente y causan la llamada radiación circunsolar, la cual es medida como parte de la radiación directa, (es la radiación útil para centrales solares térmicas) pero realmente no es reflejada en la torre o llega a esta de manera muy difuminada.

El objetivo principal de este proyecto de fin de carrera es realizar un estudio sobre la influencia de las partículas de aerosol en la radiación circunsolar. La investigación comenzó en Octubre de 2011 con la lectura y estudio de estudios previos realizados sobre la radiación circunsolar y las partículas de aerosol. Después, fue necesario aprender el funcionamiento de las diversas máquinas que iban a ser usadas para realizar el estudio. Para cada uno de los equipos se tardó una semana en aprender a

manejarlas y comprender como funcionaban, para más adelante ir probándolas uno a uno. Una vez resueltos una serie de problemas relacionados con las máquinas, se pudo comenzar a realizar mediciones en el mes de Diciembre del 2011, para terminar con la recopilación de datos a final de Enero del año 2012.

En este proyecto de fin de carrera han sido utilizados cuatro diferentes equipos: un nefobasímetro o ceilómetro, un espectrómetro de aerosoles, una cámara CCD y una estación meteorológica (compuesta a su vez por diferentes equipos). El ceilómetro es una máquina que mediante un láser, puede medir la concentración de las partículas de aerosol hasta una altura de 15000 metros. El espectrómetro de aerosoles mide la concentración y el tamaño de las partículas al nivel del suelo. La estación meteorológica proporciona multitud de datos, siendo los más importantes los relativos a la radiación solar, diferenciando radiación directa, difusa y global. Estos datos se pueden obtener gracias al pirheliómetro y el piranómetro. La cámara CCD se utiliza en conjunto con un trípode automático, un teleobjetivo y un filtro, para luego obtener las imágenes tomadas mediante un programa de ordenador. Ésta cámara se ha utilizado para tomar fotos del sol y luego analizarlas para poder medir la radiación circunsolar. Todos estos equipos funcionaban simultáneamente para obtener mediciones completas en cinco días diferentes durante ocho momentos. Una vez estas mediciones fueron realizadas, se analizaron y compararon los datos obtenidos meticulosamente, para así poder ver la influencia o no de las partículas de aerosol en la radiación circunsolar. En la figura 1 se puede ver el lugar donde la gran mayoría de las mediciones fueron tomadas: la azotea del edificio “Naturwissenschaft” del SIJ (Jülich, Alemania). Se puede apreciar el conjunto cámara, teleobjetivo y trípode en primer plano, al fondo a la izquierda se distingue el nefobasímetro y pegado a él está el espectrómetro de aerosoles. Unos metros más arriba se encuentran el pirheliómetro y el piranómetro.



Figura 1: lugar donde se realizaron las mediciones, en Jülich, Alemania

Este proyecto de fin de carrera esta originalmente escrito en inglés, y el trabajo completo detallado se encuentra en los anexos. El trabajo original se divide en cuatro grandes partes divididas en nueve diferentes capítulos. La primera parte es puramente teórica e incluye los capítulos: Radiación Solar, CSR, partículas de aerosol y nubes. La segunda parte describe el modo de funcionamiento de cada uno de los equipos usados además de incluir sus características técnicas, los capítulos son: CHM 15k, Fidas 200, Cámara y Estación Meteorológica. En la tercera parte aparecen todos los datos obtenidos por las mediciones, exponiéndolos primero, para después analizarlos, esta parte se conforma por el capítulo: Mediciones. Finalmente como anexos del trabajo inicial aparece la manera de haber realizado los cálculos necesarios para la realización de este proyecto, así como una serie de resultados. La parte resumida escrita en castellano, contará con cuatro capítulos, uno por cada uno de las partes, además de la conclusión e introducción. En esta parte resumida se hará referencia a textos, figuras, tablas o ecuaciones del proyecto original, en la que está todo extensamente explicado. La bibliografía se encuentra también en el proyecto original y la numeración de las figuras en este resumen, será la misma que tienen en el proyecto original.

2.TEORÍA

2.1 Energía Solar

El sol es una esfera compuesta por gases a alta temperatura que está situado a una distancia de unos 1.5×10^{11} m de la tierra. Se estima que la temperatura de la fotosfera solar es la misma que “la temperatura efectiva del cuerpo negro” la cual es 5762 K. La fotosfera es la parte más exterior del sol, y se considera opaca, por lo que emite la mayor parte de la radiación. El sol genera energía por medio de reacciones nucleares de fusión, producidas en su núcleo, por lo que la energía viene dada por la pérdida de masa, y se expresa con la ecuación $E = mc^2$.

La energía que emitida por un cuerpo negro viene dada por la “ley de Stefan-Bolzman”. Esta ley sostiene que la energía radiada por un cuerpo negro es directamente proporcional a la cuarta potencia de su temperatura. La radiación solar que llega a la tierra se considera constante y depende de la temperatura del cuerpo negro, de la distancia de la tierra al sol, la relación de áreas entre la esfera solar y la terrestre y la constante de Steffan Bolzmann. La ecuación número 1 (véase página 10 del anexo) calcula el valor de la radiación que alcanza a la tierra (antes de entrar en la atmósfera) y tiene un valor de 1366 W/m². Una vez ha entrado en la atmósfera esta radiación puede sufrir muchos cambios debido a fenómenos meteorológicos o a las partículas de aerosol.

El espectro electromagnético de la radiación solar es muy amplio y se divide en ultravioleta, infrarrojo y visible. La mayor parte de la energía se concentra en la parte visible, la cual está comprendida entre las longitudes de onda de 400 y 700 nm. En la figura 2 (véase página 11 del anexo) aparece el espectro solar, y separa la radiación de un cuerpo negro, la radiación solar en lo alto de la atmósfera y la radiación solar al nivel del mar.

Al atravesar la atmósfera, los rayos solares pueden sufrir muchas variaciones antes de alcanzar la superficie terrestre. Reflexión, absorción y difusión son los tres factores que afectan a la radiación en su paso por la atmósfera. La radiación solar puede llegar a la tierra de tres maneras diferentes: directa, difusa y reflejada. La radiación directa es la que va a ser útil para obtener energía, y es aquella que proviene directamente de la esfera solar sin sufrir ningún cambio. La radiación difusa es la que ha sido desviada de su trayectoria inicial, y la reflejada la que es reflejada por un objeto después de incidir sobre él. La suma de las tres es llamada radiación global.

La difusión de la luz es el fenómeno que causa la radiación circunsolar y por lo

tanto la radiación difusa es importante para este proyecto. Las dos formas más comunes de difusión de la luz son difusión Rayleigh y la difusión Mie, ambas son explicadas en detalle en la página 12 del anexo con apoyo de las figuras 9 y 10.

2.2. Radiación circunsolar

La radiación circunsolar es aquella radiación que puede observarse alrededor de la esfera solar pero que no pertenece a ella. Esta radiación se suele incluir como parte de la radiación directa, pero realmente ha sido desviada ligeramente. A continuación, en la figura 2 se puede observar claramente la “aureola solar” que rodea el sol, siendo la radiación proveniente de esta aureola la que se denomina radiación circunsolar. Esta radiación es causada por una leve difusión de los rayos solares en dirección hacia la tierra. Al ser una gran cantidad y estar tan cerca del sol parece que provienen directamente de la esfera, pero no es así. En una central solar térmica es muy importante, ya que al ser ligeramente desviados no serán reflejados al mismo lugar que la radiación directa. Esta difusión de los rayos solares es causada por las partículas de aerosol presentes en la atmósfera, sobre todo por aquellas que tienen un tamaño similar a la longitud de onda de la radiación.



Figura 5: Fotografía del sol y su “aureola solar” tomada el 10/01/2012

La radiación solar directa se mide con un aparato llamado pirhelímetro, el cual va acoplado a un seguidor solar y tiene un ángulo de apertura de entre 5° y 6°. El diámetro medio solar que se observa desde la tierra tiene 9,3 mrad, lo que equivale a sólo 0,533°. Por lo la medición de la radiación solar directa puede incluir radiaciones que no provengan de la esfera solar, como es el caso de la radiación circunsolar.

Para dimensionar la cantidad de energía que proviene del área circunsolar se utiliza un término llamado “ratio circunsolar” (CSR), el cual proporciona la parte de la radiación que proviene de la aureola solar con respecto a la radiación total. Las ecuaciones 4 y 5 que encuentran en la página 15 del anexo explican la manera de calcular el CSR.

Los estudios realizados a lo largo de los últimos años sobre la radiación circunsolar y el CSR no son muy numerosos, pero hay dos que han sido analizados antes de la realización de este proyecto de fin de carrera, y son pioneros en esta investigación. Uno fue hecho por el “Lawrence Berkeley Laboratory” en Estados Unidos, en el cual se tomaron mediciones en numerosas ciudades de dicho país. En Europa el estudio más destacable lo realizó “Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt” (DLR), que es la agencia aeroespacial alemana, la cual tomó datos en Alemania, Francia y España. En las páginas 16 y 17 del anexo se pueden ver los datos técnicos de las mediciones y los resultados obtenidos. Estos resultados fueron relevantes para demostrar la existencia de la radiación circunsolar, pero no aclaran su origen.

2.3 Aerosoles:

Técnicamente, un aerosol es una pequeña partícula sólida o líquida suspendida en un gas. El tamaño de estas partículas puede variar entre 0,002 μm hasta 100 μm. Las más pequeñas pueden permanecer suspendidas en el aire durante semanas y viajar cientos de kilómetros. Las partículas grandes (con un tamaño superior a 10 μm) permanecen tan sólo horas suspendidas, y no se alejan mucho de su foco emisor.

En este proyecto de fin de carrera se utiliza el término materia particulada (PM) para medir cantidad de partículas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con un tamaño igual o inferior al diámetro aerodinámico de la partícula.

Hay dos formas de clasificar a los aerosoles, por composición u origen. Los aerosoles pueden estar compuestos por multitud de materiales, los más comunes son: sulfatos, carbón orgánico, nitratos, polvo mineral o sal marina. Normalmente un aerosol

está compuesto por muchas sustancias diferentes. Según su origen se dividen en dos grandes grupos: origen natural y origen antropogénico. Estos grupos se comentan extensamente en las páginas 20 y 21 del anexo. Dentro del origen natural se encuentran: polvo en suspensión, sal marina, aerosoles biogénicos primarios y volcánicos. Los aerosoles de origen natural son el 90% del total, aunque parte de ellos aumenta dada la acción del hombre (desertificación). Los grupos en los que se dividen los aerosoles con origen antropogénico son los siguientes: sulfatos y nitratos, carbón negro y orgánico y el polvo industrial.

Como será demostrado en capítulos posteriores las partículas de aerosol tienen una fuerte influencia en la difusión de la luz solar. La imagen 9 situada en la página 23 del anexo explica la influencia de las partículas de aerosol en la difusión comparando la longitud de onda de la radiación y el tamaño de partícula. Las partículas de aerosol tienen un marcado efecto sobre el clima, y este puede ser directo o indirecto.

El efecto directo se refiere a las partículas que han interactuado directamente con las ondas electromagnéticas. Por ejemplo el que puede tener una partícula desviando la luz solar o el que puede tener una nube reflejando al espacio la radiación solar.

El efecto indirecto está referido a la colaboración de las partículas de aerosol en la formación de nubes. Las nubes necesitan pequeñas partículas para poder formarse y una presencia excesiva hace el tamaño de gota en la nube sea menor.

2.4. Nubes:

Una nube es una masa visible de gotas líquidas de agua, pequeños cristales de nieve y otras sustancias, suspendida en la atmósfera. Las nubes también están consideradas como aerosoles ya que son pequeñas partículas suspendidas en un gas. El tamaño de las gotas o cristales varía entre 5 y 100 μm , y hasta que no alcanzan tamaños de 1 mm de diámetro, no caen a la superficie terrestre como gotas de lluvia. La concentración de gotas o cristales en la nube puede variar entre 25000 y un millón de gotas por litro de aire.

Las nubes tienen una influencia muy grande en el clima, en la radiación solar que incide sobre la tierra y en la radiación que es emitida o reflejada por la tierra.

La cantidad de radiación reflejada se mide con el albedo, y toda superficie refleja la luz. En el caso de las nubes su albedo puede variar entre un 40 y un 80%. En la página 26 del anexo se puede observar un esquema con los albedos de diferentes superficies.

Las nubes se pueden dividir por su forma: verticales y estratiformes, o por su altura: bajas, medias y altas. En la página 28 del anexo se encuentra la figura 14 en la que distinguen todos los tipos. Para este proyecto el grupo más importante es el que forman las nubes altas, ya que pueden ser precursoras de la radiación circunsolar. Las nubes altas tienen un tamaño de gota o cristal más grande que las nubes bajas y la cantidad de gotas o cristales por litro es mucho menor. Esto produce que dejen pasar mucha más radiación a través de ellas y que la difusión de los rayos sea muy leve debido al gran tamaño de las partículas en comparación con la longitud de onda. Por estos motivos estas nubes dejan pasar tanto radiación directa como difusa a través de ellas, además de reflejar también parte de la luz. Al observar la esfera solar desde la tierra a través de una de estas nubes, se puede apreciar un aumento de la “aureola solar”. Al tener un tamaño de partícula muy grande las nubes altas reflejan la radiación electromagnética emitida por la tierra, lo cual produce un sobrecalentamiento de la atmósfera. Las nubes más bajas, se caracterizan por un tamaño de partícula menor y ser mucho más densas. Lo cual provoca que éstas puedan reflejar un gran porcentaje de la radiación solar al tener un tamaño similar a la longitud de onda de la luz visible. Esto produce que en un día nublado no haya apenas radiación directa y que la mayor parte de la radiación que llega a la tierra sea difusa. Esta radiación difusa no será apenas parte de la radiación circunsolar, ya que en las nubes bajas los rayos solares son desviados con un mayor ángulo que las altas. En las figuras 16 y 18, de las páginas 30 y 31 del anexo, aparecen esquemas explicativos de cómo interactúan las nubes con la radiación.

3. EQUIPOS UTILIZADOS:

3.1. Ceilómetro: CHM 15k

Para las medir la concentración de partículas en la troposfera, hemos utilizado un ceilómetro denominado CHM 15K que comercializa la compañía alemana Jenoptiks. El CHM 15 K es capaz de medir la concentración de partículas entre 15 metros y 15000 metros de altura. En las mediciones también se analizarán las nubes, ya que también afectan a la radiación solar. La máquina podía ser configurada para obtener información cada cierto tiempo, en este proyecto se configuró para obtener datos cada 10 segundos.

Los ceilómetros basan su funcionamiento en la tecnología LIDAR (Light Detection And Ranging). Esta tecnología sirve para medir la distancia y otras propiedades de los objetos hacia los que apunta por medio de pulsos provenientes de un láser. Este método es muy similar al del radar, que determina la distancia a la que está un objeto dependiendo del retraso de entre la señal emitida y la reflejada, pero en vez de ondas de radio se utiliza luz. LIDAR se utiliza principalmente para desarrollar mapas, pero tiene más aplicaciones.

LIDAR utiliza longitudes de onda entre 10 micrómetros y 250 nanómetros. De manera que engloba casi en su totalidad el espectro solar, lo cual va a ser muy útil para el desarrollo de éste proyecto. De esta manera sólo aparecerán en las mediciones las partículas que interfieren con la luz solar, como nubes, gotas de lluvia partículas de aerosol e incluso moléculas. Los pulsos de láser interactúan con las partículas vía dispersión (mayoritariamente Mie).

En un ceilómetro, el láser apunta hacia verticalmente hacia arriba y tiene a su lado el receptor. La duración de un pulso es de nanosegundos, cuando el haz atraviesa la atmósfera un parte es dispersada por partículas o moléculas de la atmósfera, y una pequeña parte de esta luz dispersada retorna al ceilómetro. El tiempo que transcurre entre que el láser emite la luz y la recibe de vuelta medirá la distancia que existe entre el láser y la partícula que la ha devuelto. Esto se obtiene con la ecuación 6, situada en la página 33 del anexo. La potencia de la luz recibida nos la dan las ecuaciones 7, 8, 9 y 10, la cual da más información acerca de la partícula.

En la figura 20 de la página 35 del anexo se puede ver el ceilómetro utilizado en este proyecto, y en la tabla 1 los datos técnicos del CHM 15K.

3.2 Espectrómetro de aerosoles: Fidas ® 200:

Para tomar las mediciones de la cantidad de aerosoles presentes en el aire a la altura del suelo, se ha utilizado un espectrómetro de aerosoles, el Fidas ® 200, comercializado por la empresa alemana Palas.

Fidas ® 200 da información sobre las condiciones en las que se encuentra aire, dando información continua y simultánea de PM1, PM 2,5, PM4, PM10 y TSP (total suspended matter), y también información meteorológica. Para este proyecto se configuró la máquina para obtener datos cada minuto.

El sistema utilizado para medir la concentración de las partículas y su tamaño, es una tecnología que emite luz por medio de un LED, y al ser ésta difuminada se obtienen los datos. En el espectrómetro de aerosoles utilizado entra una cantidad de aire de 5 litros por, y antes de ser medido pasa por un sistema IADS (Aerosol Drying System) el cual quita la humedad al aire.

En la figura 21 de la página 38 del anexo se puede ver el principio de operación del equipo Fidas ® 200. A continuación las figuras 22 y 23 ilustran la máquina utilizada en este proyecto y la tabla 2 contiene las especificaciones técnicas.

3.3 Estación Meteorológica:

El Solar-Institut Jülich dispone de una estación meteorológica que daba multitud de datos que se han utilizado para realizar este proyecto. La estación está separada en dos partes: un mástil y seguidor solar. El seguidor solar se encuentra muy próximo al ceilómetro, nefobasímetro y el lugar donde se realizaron las fotos, el mástil está a unos 300 metros de los demás equipos, pero se ha considerado que había las mismas condiciones en ambos lugares. En el mástil se toman mediciones de la humedad relativa, la presión atmosférica, la velocidad y dirección del viento, las precipitaciones y la radiación solar global. Con el seguidor solar se obtienen las mediciones de radiación directa y difusa.

Los datos obtenidos que más han sido utilizados en este proyecto son los relativos a la radiación solar. Para medir la radiación global y difusa se utiliza el mismo aparato, el piranómetro. El piranómetro consiste en un termopar aislado por dos cápsulas de vidrio, el termopar está pintado de color negro para absorber así toda la energía. El piranómetro recibe radiación solar de todo su espectro electromagnético y su tiene un campo de 180 grados. La energía es medida en Kilowatios por metro cuadrado.

Para medir la radiación difusa se coloca al piranómetro en un seguidor solar, el cual incorpora un pequeña pantalla que tapa la esfera solar, obteniendo únicamente de este modo la energía difusa. La radiación reflejada no está incluida en la radiación global medida por el piranómetro, ya que el campo es de 180 grados, y sólo mide la parte de la radiación reflejada que a su vez reflejen las nubes. Para la medir la radiación directa se ha utilizado un pirheliómetro. El pirheliómetro va acoplado a un seguido solar, de manera que está apuntando continuamente al sol, formando un ángulo con éste de 90 grados. Su principio de funcionamiento es similar al del piranómetro, pero el sensor que capta la energía, se aloja al final de un tubo de 90 centímetros, obteniendo un ángulo de visión de unos 5 grados. En la página 43 del anexo se puede ver la figura 27, en la que aparece un esquema de cómo se miden la radiación global, difusa y directa.

En el capítulo 8.3 del anexo, aparecen los equipos utilizados para medir la humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento y precipitaciones.

La estación meteorológica proporcionaba datos cada minuto, y estos eran reflejados en un archivo propiedad del Solar-Institut Jülich.

3.4 Sistema de cámara

Para medir la radiación circunsolar se ha utilizado una cámara CCD, la cual iba acoplada a un teleobjetivo, y ambos en conjunto a un trípode automático.

El teleobjetivo es un sistema de lentes que proporciona una longitud focal más larga y un ángulo de visión menor que las lentes normales. El teleobjetivo consigue agrandar la imagen que se encuentren lejanas, de manera que éstas puedan ser analizadas con mayor detalle.

El teleobjetivo utilizado en este proyecto de fin de carrera, es el WalimexPro 500mm/5.6 con enfocado manual. Éste ha sido acoplado a un filtro para no dañar la cámara y las lentes del teleobjetivo. Sus especificaciones técnicas se pueden ver en la tabla 3, situada en la página 46 del anexo.

Las imágenes que reproduce el teleobjetivo pueden tener una serie de distorsiones que afecten a las fotografía tomadas. Una de ellas es el enfoque, ya que el sol y la radiación circunsolar se encuentran a millones de kilómetros de distancia, de manera que es difícil poder enfocar correctamente. Las aberraciones coma o esféricas, explicadas en la página 47 del anexo, también son muy comunes.

La cámara, con la que se han tomado las imágenes para medir la radiación circunsolal, funciona con un sensor CCD (Charge-Coupled Device). Un sensor CCD es un circuito integrado que contiene una serie de condensadores acoplados. Un circuito interno controla la carga de los condensadores y va transfiriendo su carga a los condensadores lindantes. Los detectores CCD se basan en el efecto fotoeléctrico; los fotones que inciden sobre el sensor provocan una corriente eléctrica, y la cantidad de electrones transmitidos será proporcional a la intensidad de la luz incidente. La carga es transferida entre cada uno de los condensadores (llamados fotosites), para finalmente ser transferida a un amplificador, que convierte la carga en una señal de voltaje. Este proceso es repetido hasta que se obtiene el contenido de la matriz de condensadores en una serie de voltajes, que son transformados por un dispositivo electrónico para crear la imagen digital. El uso de los sensores CCD en astronomía es muy común, porque registran gran parte del espectro electromagnético. Esto es muy útil para el desarrollo de este proyecto de fin de carrera.

La cámara utilizada en este proyecto es la Stingray F-504, comercializada por la empresa “Allied Vision Technologies”. En la página 49 del anexo se puede observar la figura 34 y la tabla 3, que son la cámara y sus especificaciones técnicas respectivamente. Para transferir las imágenes al ordenador se utiliza un software desarrollado por la misma empresa que fabrica la cámara y los datos son transferidos por medio de FireWire.

Además de las distorsiones del teleobjetivo, hay que considerar otras que pueden aparecer en un sensor CCD, como son el efecto Blooming o el Smear, que son explicados en detalle en el anexo. Todo esto hace que las imágenes obtenidas no reproduzcan exactamente la realidad, pero pueden proporcionar información muy válida de la radiación solar y circunsolal.

4. Mediciones

En este capítulo se ha analizan y se exponen los resultados de las mediciones realizadas. Aquellos días que eran soleados o en los que se esperaba que pudiese aparecer el sol, se conectaban el ceilómetro y espectrómetro de aerosoles, además de la estación meteorológica que funcionaba continuamente. Con estos tres equipos se puede obtener una información muy clara de cuál es la situación metrológica de cada día, así como la composición de las partículas de aerosol en el aire. En los momentos que el sol salía, se le realizaban una serie de fotos, para después comparar todos los datos obtenidos en ese instante con la foto obtenida. De esta manera se podrán comparar para ver si existe una influencia de las partículas de aerosol en la radiación circunsolar. Los días en que se tomaron las imágenes del sol fueron: el 14 de diciembre del 2011, el 10 de Enero de 2012, el 11 de Enero de 2012, el 13 de Enero de 2012 (2 imágenes) y el 16 de Enero de 2012 (3 imágenes).

4.1. Resultado de las mediciones

El día 14 de Diciembre de 2011 (en detalle en la página 51 del anexo) fue un día lluvioso en la ciudad de Jülich, donde predominó durante toda la mañana el cielo cubierto. La foto utilizada para medir la radiación circunsolar fue tomada a las 13:31 h. Entre las 9 y la 10:30 h de esa misma mañana hubo precipitaciones en forma de lluvia de unos 3mm, y en los tres días anteriores (con una meteorología muy similar) se recogieron 12 mm de lluvias. La humedad relativa estaba en torno al 70 % a la hora de la medición, con una temperatura de 9°C y una presión atmosférica de 980 hPa. La radiación directa ascendía a 583 W/m² y la difusa 126 W/ m². El sol salió durante aproximadamente 5 minutos, y durante ese tiempo la concentración de partículas de aerosol bajó drásticamente, tanto al nivel del suelo como a mayores alturas. En la figura 36 del anexo se puede apreciar claramente la baja concentración del partículas en la imagen proporcionada por el ceilómetro. El espectrómetro daba valores de tan solo 1,02 PM_{2,5} o 1,88 PM₁₀. En la figura 38 del anexo se puede ver la medición de la intensidad medida de la fotografía tomada del sol y su área circunsolar, con un valor de CSR relativo de 22,64.

El día 10 de Enero de 2012 (en detalle en la página 54 del anexo) fue un día muy nuboso pero no se registró ninguna precipitación. Sin embargo si llovió una cantidad de unos 2mm la noche anterior entre las 21:00 y las 23:00 h, y también durante la semana previa en la que se alcanzaron los 20 mm. La foto analizada se tomó a las 14:03 h, momento en el que había una humedad relativa del 73%, una temperatura de 9,2°C y una presión atmosférica de 1019,5 hPa. La radiación directa se situaba en torno a las 550 W/m² y la difusa 98 W/m². Las nubes estaban situadas a una altura de unos 1200 m, pero la troposfera estaba muy despejada en niveles más altos. La concentración de partículas medida por el ceilómetro era bastante baja como se puede ver en la figura 39 de anexo. La concentración de partículas a la altura del suelo medidas por el espectrómetro era de 5 PM_{2,5} y 14 PM₁₀. En la figura 41 del anexo se puede ver la medición de la intensidad medida de la fotografía tomada del sol y su área circunsolar, con valor de CSR relativo de 22,04.

El día 11 de Enero de 2012 (en detalle en la página 56 del anexo) fue un día despejado aunque con la presencia de algunas nubes estratos. Las últimas precipitaciones registradas son las de la noche del 9 Enero. La foto analizado se tomó a las 11:34 h, momento en el que había una humedad relativa del 80%, una temperatura de 9,7°C y una presión atmosférica de 1019,6 hPa. La radiación directa era de 474 W/m² y la difusa de 42 W/m². En las figuras 43 y 44 del anexo se puede ver la presencia de las nubes estratos, las cuales se situaban a una altura de unos 7000 m. La concentración de partículas medida por el ceilómetro era más alta que la registrada en días anteriores, aunque las medidas tomada por el espectrómetro de aerosoles es similar: 4,8 PM_{2,5} y 13,7 PM₁₀. En la figura 46 del anexo se puede ver la medición de la intensidad medida de la fotografía tomada del sol y su área circunsolar, con un valor de CSR relativo de 24.

El día 13 de Enero de 2012 (en detalle en la página 60 del anexo) fue un día despejado con la presencia de alguna nube que provocaba episodios aislados de lluvia. A las 8:20 se registraron 0,3mm de lluvia, cantidad que al ser tan pequeña y de tan corta duración sería difícil que afectase a presencia de partículas de aerosol en el aire. Este días se han analizado fotos en dos momentos diferentes, a las 11:06 h y a las 12:16 h. A las 11:06 había una alta humedad relativa, alcanzando un 84%, una temperatura de 5,2°C y una presión atmosférica de 1014 hPa. La radiación directa era de 554 W/m² y la difusa de 56 W/m². A las 12:16 había una humedad relativa del 77%, una temperatura de 9,7°C y una presión atmosférica de 1019,6 hPa. La radiación directa era de 560

W/m² y la difusa de 103 W/m². La concentración de partículas medida por el ceilómetro era muy alta entre el nivel del suelo y unos 400 m de altura, alcanzando los máximos niveles a una alta de unos 100m. Las mediciones tomadas por el espectrómetro de aerosoles a las 11:06 11,8 PM2,5 y 20 PM10. A las 12:16 los resultados fueron 8,8 PM2,5 y 21 PM10. En la figura 49 del anexo se puede ver la medición de la intensidad medida de la fotografías tomadas del sol y su área circunsolar, con valores de CSR relativo de 32,9 (11:06 h) y 33,64 (12,17).

El día 16 de Enero de 1012 (detalle en la página 62 del anexo) fue un día muy despejado en el que no se registró ninguna nube en el cielo durante todo el día. La última vez que hubo alguna precipitación fue la mencionada antes del día 13 de Enero. El día 16 de Enero se realizaron tres mediciones diferentes, a las 12:15, 12:45 y 14:45. A las 12:15 la humedad relativa era la más baja obtenida, un 51 %, una temperatura de 4,4°C y una presión relativa de 1013 hPa. La radiación directa era de 736 W/m² y la difusa de tan solo 7,5 W/m². A las 12:45 subió la humedad relativa al 70% como consecuencia de la bajada de temperatura a 2,7°C, manteniéndose estable la presión atmosférica en 1013 hPa. La radiación directa era de 761 W/m², y la difusa de 10,94 W/m². En la medición tomada a las 14:45 h la humedad relativa era de 58%, la temperatura de 5,6°C y la presión atmosférica era de 1013 hPa. La radiación directa ascendía a 628 W/m² y no había radiación difusa. En la figura 52 del anexo se puede ver la intensidad relativa en las fotos tomadas del sol y su área circunsolar, con valores de CSR relativo de 39,31 (12:15), 39,58 (12:45) y 35,31 (14:45).

4.2 Análisis de las mediciones

Los datos que se han tenido más en cuenta para la realización de este proyecto son los relativos a la humedad relativa, radiación directa y difusa y la radiación circunsolar.

La presión atmosférica es importante en cuanto a los fenómenos meteorológicos que puedan aparecer, pero para la radiación solar no tiene apenas influencia. Con la temperatura pasa de igual manera, aunque esta tiene una mayor influencia en la radiación solar ya que afecta a la humedad relativa del aire. Ésta sí que influye en la radiación solar: a mayor humedad relativa, mayor vapor de agua presente en el aire, y estas moléculas de agua sí que contribuyen a la difusión de la luz solar. En la tabla 14 (página 67 del anexo) se compara la radiación difusa, la humedad relativa y el CSR. No

parece ser determinante en el valor obtenido de CSR, aunque sí que se aprecia cierta influencia.

Antes de comenzar a comparar las mediciones hay que analizar algunas distorsiones que pueden afectar a los resultados obtenidos del CSR. En primer lugar, aparece un problema relacionado con la intensidad solar puede incrementar el valor obtenido de CSR. El sol debería ser más brillante en la parte central del círculo obtenido en la fotografía, que en la parte exterior, pero por culpa de la limitación técnica de la cámara, todo el círculo solar ha sido medido con la misma intensidad. Por este motivo al realizar el cálculo del CSR se incluye menos radiación proveniente del sol, lo que hace que el CSR obtenido sea mayor. Otro motivo por el que el CSR podía ser incrementado es el brillo del cielo, el cual está incluido en la intensidad del área circunsolar. Por otro lado, hay otros dos factores que pueden hacer que el CSR se vea disminuido al calcularlo: uno es la luz que no ha sido medida por localizarse fuera del área de la fotografía, y el otro es la radiación circunsolar que brilla en el interior del círculo solar. Como se puede observar, las fotos realizadas del sol no son mucho más grandes que el propio sol. Y al ver los resultados obtenidos al medir la intensidad de la radiación se aprecia que en la parte más externa de la imagen aún decrece el brillo, por lo que se deduce que no toda la radiación circunsolar ha sido incluida en el cálculo del CSR. No obstante, al analizar detalladamente las mediciones se ve que esta cantidad no es muy importante. Con respecto a la radiación circunsolar medida como radiación proveniente de la esfera solar, es aquella radiación que llega a la superficie terrestre como radiación difusa, pero en la foto se incluye dentro del círculo solar, de este modo magnifica la cantidad de radiación directa, y resta parte de la radiación circunsolar. Esta radiación es muy difícil de cuantificar incluso con equipos más sofisticados. A la hora de comparar las mediciones se ha comprobado que los días en que mayor radiación directa se registró, más grande era la circunferencia solar con máxima intensidad. Esto podría deberse al efecto Blooming analizado en el capítulo referente al sensor CCD, la tabla 13 (página 66 del anexo) analiza este problema. Por estos motivos la referencia a los resultados obtenidos se harán como “CSR relativo”, ya que no se puede afirmar que el valor de CSR tomado refleje exactamente la realidad.

En la siguiente figura se pueden ver los resultados obtenidos realizando las mediciones de la radiación circunsolar relativa.

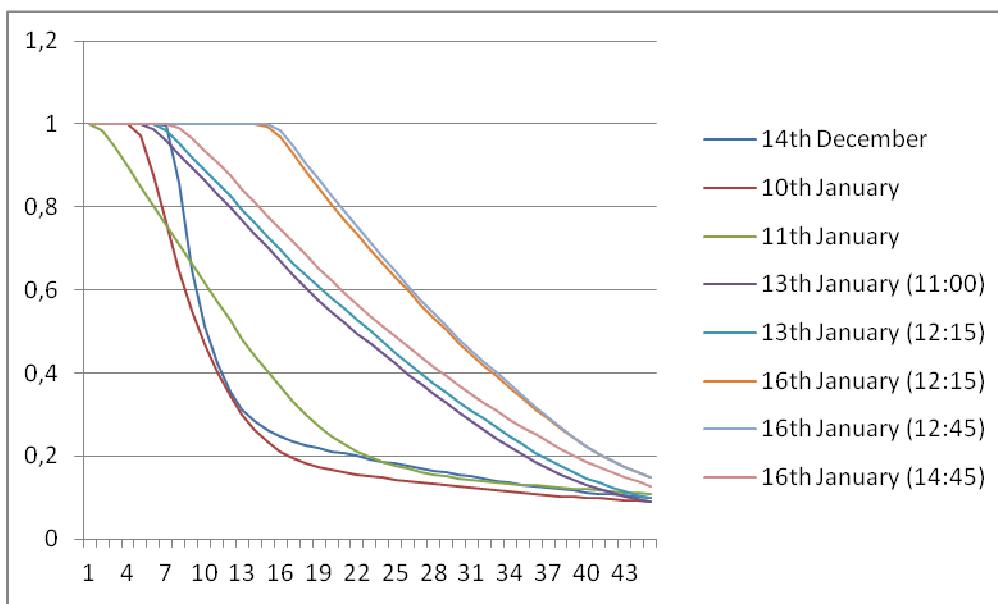


Figura 55: Mediciones de la radiación circunsolar relativa

En la figura, el eje de las abcisas corresponde a la distancia (en píxeles) del borde de la circunferencia solar, y las ordenadas están referidas a intensidad relativa de las imágenes. Mirando el gráfico a simple vista, se aprecia que las mediciones se dividen en dos grupos diferentes, las tomadas el 14 de Diciembre, 10 y 11 de Enero, y las tomadas el 13 y 16 de Enero. En las primeras la radiación circunsolar es mucho menor, y se ve conforme se aleja del centro de la circunferencia solar disminuye mucho más rápidamente que en los días 13 y 16 de Enero. Esto quiere decir que esos días la “aureola solar” era más reducida y tenía menos intensidad. A la hora de comparar estos grupos de días, con las datos que se han obtenido se ve una clara diferencia entre ambos, y es la concentración de partículas, tanto la medida a nivel de suelo como a alturas superiores, es muy diferente. En el anexo, los datos obtenidos son analizados en las tablas 16, 17 y 18 (páginas 71, 72 y 73) en donde se compara todo en detalle. En estas tablas se coge mediciones y se comparan entre dos para poder sacar una información más clara de qué factores han podido influir más en el CSR relativo obtenido.

5. Conclusión

El objetivo principal de este proyecto de fin de carrera era determinar el impacto producido por los aerosoles en la radiación solar, lo cual ha sido realizado con éxito. Los resultados obtenidos en las mediciones enseñan una clara relación entre la cantidad de partículas de aerosol y el CSR relativo. Aunque también han aparecido una serie de dificultades al llevar a cabo las mediciones y calcular el CSR.

Para encontrar la perfecta relación entre las partículas de aerosol y el CSR, es esencial saber la exacta concentración de partículas que se encuentran entre el equipo que mida la radiación (una cámara con un sensor CCD en este caso), y el sol (dentro de la atmósfera). Sin embargo las máquinas utilizadas (CHM 15K y Fidas 200) para medir esta concentración de aerosoles no nos permiten conocer esos datos con exactitud. El ceilómetro utilizado sólo puede medir en dirección vertical, cuando las fotos han sido tomadas con un ángulo de unos 35° , de manera que los datos obtenidos eran una aproximación de los valores reales. El espectrómetro de aerosoles mide partículas al nivel de suelo, y a esta altura la luz difuminada es muy poca si se considera el total. A alturas superiores la concentración de partículas es similar, pero no exactamente la misma. Sobre todo en el caso de partículas grandes, que se encuentran en una mayor concentración a poca altura y difuminan poco la luz, por lo que las partículas grandes medidas por el equipo Fidas 200 no se han considerado relevantes para este proyecto.

A pesar de todo, los datos obtenidos con ambos aparatos nos dan una aproximación muy buena de las partículas presentes en la atmósfera. Con el espectrómetro de aerosoles no se debe considerar la concentración de partículas grandes, pero la de partículas más pequeñas (por debajo de $2,5 \mu\text{m}$) es muy similar a nivel de suelo que a alturas más altas. Con el ceilómetro se obtienen los datos a una inclinación de 90° , que serán muy parecidos a los de 35° . Lo único que no se puede apreciar bien son las nubes que cubren el sol, pero cuando se muestran en el proyecto es porque han sido de características similares a las que estaban tapando el sol. Aún así, en las mediciones en las que el sol se encontraba tras una nube cirrus, se tomaban fotos del momento para que pudiese apreciarse mejor. Conjuntamente se aprecia aún mejor la concentración de aerosoles presentes en el aire, ya que con los datos de un aparato se complementan los del otro. Además, todas las mediciones se han realizado de la misma manera, por lo que son aptas para ser comparadas.

Como ya se había comentado en el capítulo “mediciones” se han encontrado algunas distorsiones que pueden afectar a los resultados obtenidos del CSR. Como son la limitación de la intensidad solar o el brillo del cielo, que pueden incrementar el valor obtenido en el cálculo del CSR. U otros como el tamaño de la fotografía o la radiación circunsolar incluida dentro de la circunferencia solar, que hacían que el valor del CSR se viese incrementado.

Aunque está claro que los valores del CSR relativo calculados no son los reales, si no una aproximación, son válidos para compararlos entre ellos y con las otras mediciones. Al haber obtenido todas los datos de igual manera, todas estas pequeñas distorsiones aparecen para todas las mediciones, lo cual hace que sean perfectamente aptos para ser comparados y obtener de esta comparación resultados concluyentes.

Los días en los que las medidas fueron tomadas fueron muy diferentes en cuanto a su meteorología, lo cual a sido tenido en cuenta a la hora de ser comparadas. Finalmente se ha podido apreciar como el factor que más influía en el CSR relativo, era la cantidad de aerosoles presentes en la atmósfera.

La climatología alemana en esta época del año, complicó en gran medida el poder tener un mayor número de días aptos para las mediciones. De los casi dos meses que fueron dedicados a tomar las mediciones, tan solo hubieron once días aptos para tomarlas, ya que el resto de días el cielo estaba cubierto. Finalmente, se incluyeron cinco días en el proyecto, con ocho mediciones diferentes, en las que hubo una climatología muy variada.

Analizando en detalle los datos obtenidos, se puede ver la influencia o no de los parámetros medidos y obtenidos. Los parámetros meteorológicos no tienen una influencia de importancia en la variación de CSR, con la excepción de la humedad relativa, aunque no es muy significativa. La radiación directa y la difusa tienen una influencia en el CSR relativo, ya que son parte de radiación utilizada para realizar el cálculo del CSR relativo. Ha sido difícil cuantificar en qué medida influyen las partículas de aerosoles en la radiación circunsolar, pero se ha podido demostrar que una mayor presencia de partículas de aerosol (sobre todo las más pequeñas), causa una mayor radiación circunsolar.

Después de obtener todos los resultados de las mediciones se puede afirmar que el objetivo principal de este proyecto de fin de carrera ha sido finalmente alcanzado: la radiación circunsolar es causada por la interacción de la luz solar y las partículas de aerosol.

El “Solar Instut Jülich” estudia e investiga sobre la radiación solar desde hace años. Y uno de sus objetivos es cuantificar la radiación circunsolar y ver el motivo por el que se produce. Ésta es una gran parte de la radiación solar y es algo sobre lo que no se ha investigado mucho hasta la fecha. Este proyecto ha sido un primer intento de demostrar el importante impacto que tienen las partículas de aerosol sobre la radiación circunsolar, y marcará la línea del trabajo a seguir en próximas investigaciones.

Actualmente la energía solar térmica está creciendo muy rápido y las plantas están comenzando a ser rentables en zonas donde hay una alta radiación. Desertec es un ambicioso proyecto que están desarrollando empresas europeas en el Norte de África. Este proyecto quiere hacer que el 15% de la energía consumida en Europa proceda de energías renovables del África septentrional, siendo la energía solar térmica la principal fuente. El plan ya ha comenzado en Marruecos, y le seguirán países como Argelia, Túnez o Mauritania entre otros. La gran mayoría de las plantas estarán ubicadas en el desierto del Sahara, el lugar del mundo donde más polvo en suspensión se acumula. Esto hace que estudios, como el que se realiza a cabo en este proyecto de fin de carrera, sean importantes a la hora de elegir correctamente la localización de las plantas.

Anexo

(Proyecto original)