

# Atmospheric extinction of solar radiation measurement in solar thermal electric plants

## Medida de la extinción atmosférica de la radiación solar en centrales solares termoeléctricas de receptor central

M. E. Carra<sup>1S\*</sup>, J. Ballestrín<sup>1</sup>, J. Barbero<sup>2S</sup>

1. CIEMAT-Plataforma Solar de Almería. Ctra. de Senés km. 4,5. Tabernas (04200) (Almería), Spain

2. Dpto. Química y Física, Universidad Almería, Ctra. Sacramento, s/n, 04120 La Cañada, Almería, Spain

(\*) E-mail: [elena.carra@psa.es](mailto:elena.carra@psa.es)

S: SEDOPTICA member

Received: 10/11/2020

Accepted: 15/03/2021

DOI: 10.7149/OPA.54.2.51054

### ABSTRACT:

An optical system has been developed to measure the atmospheric extinction of solar radiation. The system applies optical imaging and image processing to obtain scientific information of interest. The system contributes to making solar concentration technology more efficient, helping to combat climate change. Future solar tower plants will have higher power and greater heliostats-central receiver distances, making important the atmospheric extinction of solar radiation effect. Until now, the extinction had been determined with unrealistic parametric models. Therefore, a procedure for measuring extinction based on an optical system has been developed. Simulations and calculations with radiative transfer codes were carried out to estimate the extinction levels expected. Based on these levels, the optical measurement system was developed. The system consists of two identical high-resolution digital cameras focussed at a Lambertian target at different distances taking simultaneous images. These images are converted into matrices with numerical values and after a series of complex operations the extinguished solar radiation is obtained. The daily extinction measured has been monitored for the first time in the control panel of a tower plant operating room with the rest of the meteorological control variables for the daily operation.

**Key words:** Solar Energy, Atmospheric Extinction, Optical Measuring System, Applied Optics

### RESUMEN:

Se ha desarrollado un sistema óptico de medida de la extinción atmosférica de la radiación solar. El sistema utiliza aplicación y procesamiento de imágenes ópticas para obtener información científica de interés. El sistema contribuye a hacer más eficiente la tecnología solar de concentración ayudando a combatir el cambio climático. Las futuras plantas solares de torre serán de mayor potencia y mayores distancias helióstato-receptor central que las actuales, cobrando la extinción atmosférica de la radiación solar gran importancia. Hasta ahora, la extinción se había determinado con modelos paramétricos poco realistas. Por ello, se ha desarrollado un procedimiento para medir extinción atmosférica basado en un sistema óptico. Se realizaron simulaciones y cálculos con códigos de transferencia radiativa para estimar los niveles de extinción esperados y basándose en estos niveles se desarrolló el sistema óptico. El sistema consiste en dos cámaras digitales idénticas de alta resolución enfocadas hacia una diana lambertiana, las cuales toman imágenes simultáneas. Las imágenes se convierten en matrices con valores numéricos y tras una serie de complejas operaciones se obtiene la radiación solar extinguida. La extinción diaria medida ha sido monitorizada por primera vez en el panel de control de la sala de operaciones de una planta de torre junto con el resto de variables meteorológicas de control para el funcionamiento diario de una planta.

**Palabras clave:** Energía Solar, Extinción Atmosférica, Sistema Óptico de Medida, Óptica Aplicada

## REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] Comisión Europea, *Hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050*. Bruselas, Comisión Europea (2011).
- [2] C. Aid, G. Alliance, Greenpeace, RSPB, WWF, *Getting a global agreement on climate change*. London, G. Alliance (2014).
- [3] IPCC, "Intergovernmental panel on climate change," <https://www.ipcc.ch>
- [4] J. Ballestrín, A. Marzo, "Solar radiation attenuation in solar tower plants," *Sol Energy*, pp. 388-392 (2011).
- [5] C. Pitman, L. Vant-Hull, "Atmospheric transmittance model for a solar beam propagating between an heliostat and a receiver," *Sol Energy*, pp. 1247-1251 (1982).
- [6] Vittitoe, C.N. and F. Biggs. Terrestrial Propagation Loss. Denver: presented at the American Section of the International Solar Energy Society, 1978. Sandia release SAND78-1137C, May 26, 1978
- [7] M. Sengupta, M. Wagner, "Atmospheric attenuation in central receiver systems from DNI measurements," *SolarPACES*, Marrakech (2012).
- [8] Z. Tahboub, Z. Oumbe, Z. Hassar, A. Obaidli, "Modelling of irradiance attenuation from a heliostat to the receiver of a solar central tower" *Energy Procedia*, 49, 2405-2413 (2014).
- [9] N. Hanrieder, S. Wilbert, R. Pitz-Paal, C. Emde, J. Gasteiger, B. Mayer, J. Polo, "Atmospheric extinction in solar tower plants: absorption and broadband correction for MOR measurements," *Atmos Meas Tech*, 8, 3467-3480 (2015).
- [10] J. Ballestrín y R. Monterreal, "Hybrid heat flux measurement system for solar central receiver evaluation," *Energy*, 29, 5-6, 915-924 (2004).
- [11] K. Du, K. Wang, P. Shi, "Quantification of atmospheric visibility with dual digital cameras during daytime and night time," *Atmos Meas Tech*, 6, 2121-2130 (2013).
- [12] J. Polo, J. Ballestrín, E. Carra, "Sensitivity study for modelling atmospheric attenuation of solar radiation with radiative transfer models and the impact in solar tower plant production," *Sol Energy*, 134, 219-227 (2016).
- [13] J. Polo, J. Ballestrín, J. Alonso-Montesinos, G. López-Rodriguez, J. Barbero, E. Carra, J. Fernández-Reche, J. Bosch, F. Batlles, "Analysis of Solar Tower Plant Performance influenced by atmospheric attenuation at different temporal resolutions related to Aerosol Optical Depth.," *Sol Energy*, 157, 803-810, (2017).
- [14] A. Beer, "Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten," *Annalen der Physik*, 78-88, (1852).
- [15] T. Elias, D. Ramon, L. Dubus, C. Bourdil, E. Cuevas-Agulló, T. Zaidouni y P. Formenti, "Aerosols attenuating the solar radiation collected by solar tower plants: The horizontal pathway at surface level," *AIP Conference Proceedings*, 1734, 150004, (2016).
- [16] E. Carra, J. Ballestrín, J. Polo, J. Barbero, J. Fernández-Reche, "Atmospheric extinction levels of solar radiation at Plataforma Solar de Almería. Application to solar thermal electric plants," *Energy*, 145, 400-407, (2018).
- [17] NASA, "Aerosol Robotic Network. AERONET Stations. AOT Data Sites.," [https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/type\\_piece\\_of\\_map\\_opera\\_v2\\_new](https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/type_piece_of_map_opera_v2_new).
- [18] B. Holben, E. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. Reagan, Y. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak, "AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization," *Rem Sens Environ*, 66, 1-16, (1998).
- [19] S. Wilcox, W. Marion, *User's manual for TMY3 Data Sets*. Sandía, NREL, (2008).
- [20] J. Finkelstein, R. Schafer, "Improved goodness-of-fit tests," *Biometrika*, 58, 641-645, (1971).
- [21] R. Festa, C. Ratto, "Proposal of a numerical procedure to select reference years," *Sol Energy*, 50,1, 9-17, (1993).
- [22] F. Vignola, K. McDaniels, "Value of long-term solar radiation data", *Proceedings of the Solar '93 Conference*, American Solar Energy Society, Boulder, CO, (1993).
- [23] J. Benkhalifa, J. F. León, M. Chaabane, "Aerosol optical properties of Western Mediterranean basin from multi-year AERONET data," *J Atmos Sol-Terr Phys*, 164, 222-228, (2017).



- [24] A. Georgoulas, G. Alexandri, K. Kourtidis, J. Lelieveld, P. Zanis, U. Pöschl, R. Levy, V. Amiridis, E. Marinou, A. Tsikerdekis, "Spatiotemporal variability and contribution of different aerosol types to the aerosol optical depth over the Eastern Mediterranean," *Atmos Chem Phys*, 21, 13853-13884, (2016).
- [25] E. Carra, A. Marzo, J. Ballestrín, J. Polo, J. Alonso-Montesinos, R. Monterreal, E. Abreu, J. Fernández-Reche, "Atmospheric extinction levels of solar radiation using Aerosol Optical Thickness satellite data. Validation methodology with measurement system," *Renew Energ*, 149, 1120-1132, (2020).
- [26] J. Kelcey y A. Lucieer, "Sensor correction of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing," *Remote Sens*, 4, 5, 1462-1493, (2012).
- [27] A. Mansouri, F. S. Marzani, P. Gouton, "Development of a protocol for CCD calibration: Application to a multispectral imaging system.," *Int J Rob Autom*, 20, 2, 94-100, (2005).
- [28] J. Ballestrín, R. Monterreal y E. Carra, "Measurement of solar extinction in tower plants with digital cameras," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1734, p. 130002, 2016.
- [29] J. Ballestrín, R. Monterreal, M. E. Carra, J. Fernández-Reche, J. Polo, R. Enrique, A. Marzo, "Solar extinction measurement system based on digital cameras. Application to solar tower plants," *Renew Energ*, 125, 648-654, (2018).
- [30] M.E. Carra, *Medida de la extinción atmosférica de la radiación solar en centrales solares termoeléctricas de receptor central*. Madrid, Editorial CIEMAT (2019)
- [31] J. Ballestrín, M. E. Carra, R. Enrique, R. Monterreal, J. Fernández-Reche, P. J., M. Casanova, F. Barbero, A. Marzo, "Diagnosis of a Lambertian target in solar context," *Measurement*, 119, 265-269, (2018).
- [32] J. Tong, "The mean value theorems of Lagrange and Cauchy," *Int J Math Educ Sci Technol*, 30, 3, 456-458, (1999).
- [33] J. Ballestrín, E. Carra, R. Monterreal, R. Enrique, J. Polo, J. Fernández-Reche, J. Barbero, A. Marzo, J. Alonso-Montesinos, G. López, F. Batlles, "One year of solar extinction measurements at Plataforma Solar de Almería. Application to solar tower plant," *Renew Energ*, 136, 1002-1011, (2019).

---

## 1. Introducción

En la actualidad, el consumo energético mundial aumenta cada año entre el 1 y el 2%. A este ritmo, en los próximos años habrá crisis de abastecimiento por un lado, provocando por ejemplo un 70% de dependencia energética exterior en la Unión Europea. Por otro lado, se encuentra la amenaza que esto supone frente al cambio climático y calentamiento del Planeta debido a las emisiones de dióxido de carbono, principal causa de este cambio [1].

Aunque en el acuerdo de París se estipuló limitar la subida de la temperatura del Planeta 2 °C para frenar el cambio climático [2], en la reunión del Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC) celebrada en Corea del Sur el 8 de octubre del 2018 [3], los expertos alertaron de la necesidad de limitar la subida de la temperatura del Planeta a 1.5 °C en lugar de 2 °C, pues superar la barrera de los 1.5 °C tendría consecuencias catastróficas. Para conseguir este objetivo es necesario realizar cambios a nivel global sin precedentes, disminuyendo un 45% las emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2030 y consiguiendo cero emisiones en el 2050. Lograrlo implica un cambio en el sector energético donde habrá que apostar por tecnologías energéticas bajas en carbono, aumentando la tasa de producción con energías renovables, como la energía solar termoeléctrica (STE), consistente en campo de heliostatos que concentran la radiación solar en el receptor de una torre, calentando vapor usado para producir electricidad.

Debido a ello, la STE está experimentando un crecimiento exponencial en la construcción de nuevas plantas solares de torre de mayores potencias. Mayores potencias implican grandes superficies de heliostatos y mayores distancias entre los heliostatos más alejados y el receptor central. Estas distancias provocan que la extinción atmosférica de la radiación solar cobre importancia a la hora de determinar con exactitud la radiación solar incidente en el receptor central, en tiempo real. Este es uno de los retos a los que se enfrenta la tecnología solar termoeléctrica para poder conocer con certeza la radiación incidente en el receptor central, parámetro necesario para la correcta operación y control de este tipo de plantas. La extinción atmosférica de la radiación solar es debida a los aerosoles y otras moléculas gaseosas presentes en la atmosfera, que atenúan la radiación en el camino óptico heliostato-receptor, absorbiendo la radiación o dispersándola. Las pérdidas por extinción pueden ser significativas según el emplazamiento. Cálculos paramétricos estiman, para una distancia heliostato-torre de 1 km, unas pérdidas de potencia de hasta el 25% para días turbios [4]. Estas pérdidas traducidas en términos económicos pueden ser elevadas, si este parámetro no se tiene controlado.

Hasta el momento, la extinción atmosférica había sido abordada con modelos paramétricos utilizando atmosferas estándar, poco representativas para las condiciones atmosféricas variables y específicas de cada emplazamiento [4], [5], [6]. También se han usado metodologías con medidas realizadas con instrumentación para el tráfico rodado o la navegación aérea, pero los errores asociados a estas medidas son mayores que los niveles de extinción que se pretenden medir [7], [8]. En algunos casos la instrumentación es monocromática cuando la variable a medir está afectada por todo el espectro solar, y en otros, los instrumentos determinan la visibilidad atmosférica en unos pocos metros, extrapolándola a largas distancias, no siendo representativa y detectando sólo el fenómeno de dispersión y no el de absorción [9]. En todos estos trabajos, los autores destacan la dificultad de realizar medidas realistas de la extinción, siendo necesario desarrollar sistemas de medida más robustos y fiables. Las cámaras digitales con sensores CCD o CMOS son ampliamente utilizadas en diversos ámbitos como vigilancia, control de tráfico en tiempo real, control de condiciones ambientales y medida de la radiación solar concentrada [10]. Otro de los usos es para determinar visibilidad, aunque el objetivo sea la reconstrucción de la calidad de la imagen y no la determinación del coeficiente de extinción atmosférica [11]. La alta sensibilidad de los sensores de las cámaras digitales permite detectar variación de intensidades próximas a los niveles de extinción. Son utilizadas en multitud de aplicaciones científicas por su capacidad para convertir la radiación disponible en imágenes digitales. Su amplio rango espectral, alta resolución y alta relación señal-ruido, hacen de ellas un dispositivo interesante en la tecnología solar.

Debido a la versatilidad y las posibilidades de estos sensores, y a la importante necesidad descrita de poder obtener la extinción atmosférica de forma real y fiable, se ha desarrollado una metodología innovadora para la medida de la extinción atmosférica con cámaras digitales a distintas distancias, enfocadas hacia una diana lambertiana y con una incertidumbre menor del 2% absoluto. El dispositivo experimental se ha implantado en la Plataforma Solar de Almería (PSA) y se ha llevado a cabo un año de medidas para determinar los niveles de extinción. El dispositivo óptico de medida puede ser implementado en cualquier planta solar o emplazamiento de interés. Para el desarrollo de este sistema de medida, se han estudiado los fundamentos físicos, científicos y ópticos en los que se basa la energía solar de concentración de torre y la extinción atmosférica de la radiación solar. Se ha realizado una revisión de las metodologías existentes para la medida y determinación de la extinción atmosférica y se realizaron simulaciones con un código de transferencia radiativa (CTR) para determinar los niveles de extinción esperados en la PSA para seleccionar el sensor óptico más apropiado para medirlos, capaz de detectar estos niveles.

Para seleccionar la cámara digital adecuada se realizó, en el laboratorio de radiometría de la PSA, el análisis de distintas cámaras digitales con distintos sensores para seleccionar el mejor instrumento de medida posible, basándose en las simulaciones previas realizadas para determinar los niveles de extinción esperados, así como en las características de las cámaras. Tras la selección del sensor óptico apropiado, se diseñó, construyó y se puso en marcha el sistema de medida en la PSA, realizando un año de medidas de extinción y comprobando la fiabilidad del sistema óptico de medida. Con las medidas realizadas con el sistema óptico se han validado los niveles de extinción obtenidos mediante las simulaciones previas con CTR. Se ha realizado también caracterización de patrones de comportamiento de la extinción en PSA. Por último, se ha realizado un estudio preliminar de la relación de la extinción atmosférica medida con otros parámetros meteorológicos como la humedad o la concentración de partículas. Con todo ello, se ha contribuido al desarrollo de un sistema de medida que permite controlar uno de los parámetros desconocidos hasta el momento en las plantas solares de concentración, midiendo de una forma fiable una variable importante en el dimensionado y funcionamiento de una planta.

## 2. Estado del arte

### 2.a. Modelos paramétricos

Algunos autores han intentado caracterizar la extinción usando modelos paramétricos con parámetros estándar e introduciéndolos en CTR como Disort, LibRadtran o Modtran, obteniendo modelos paramétricos para la extinción en función del *slant range* (SR, distancia heliostato-receptor). Estos modelos paramétricos pueden ser introducidos a su vez en códigos de diseño de plantas como Delsol, Mirval o SAM para ver la influencia de la extinción en este tipo de instalaciones.

En uno de los trabajos [6], los autores utilizan el código Lowtran para obtener la transmitancia heliostato-receptor (relacionada con la extinción) usando 180 escenarios distintos con diferentes altitudes, tipos de

atmósferas estándar, visibilidades, alturas de torre y SR. En otro trabajo [5], otros autores utilizan los 180 escenarios del modelo anterior para obtener también la transmitancia espectral heliostato-receptor pero con un rango más amplio de condiciones, añadiéndole al modelo 5 variables físicas explícitas y 3 variables físicas implícitas más. Otros autores utilizan el código Modtran para obtener la extinción en función del SR para condiciones de visibilidad de días limpios y turbios, usando parámetros estándar, de humedad, temperatura, atmósfera, ... [4]. De esta forma, los autores hacen una comparación de sus resultados con los demás códigos y modelos, determinando la extinción introduciendo los mismos inputs de su modelo en los modelos paramétricos anteriores y distintos códigos, obteniendo en la comparación algunas diferencias en los resultados, sobre todo para los casos de buenas condiciones de visibilidad. Esto pone de manifiesto que es necesario realizar medidas locales para obtener la extinción con fiabilidad debido a su carácter local. Otros autores han utilizado datos de AOT (Aerosol Optical Thickness) de seis estaciones de medida de aerosoles de distinta localización a lo largo del Planeta. El AOT es un parámetro que indica los aerosoles distribuidos en columna desde la superficie hasta la capa alta de la atmósfera. En este trabajo los autores aseguran que el AOT es un parámetro más adecuado para introducir la extinción en el modelado de plantas y obtienen para ello un modelo de extinción en función del SR donde cada coeficiente es modelado en función del AOT local [12], [13].

## 2.b. Modelos basados en medidas

Algunos autores han utilizado pirheliómetros (instrumentos que miden la radiación solar directa (DNI)) para obtener la extinción [7]. Utilizan la DNI medida con el pirheliómetro y una DNI calculada para una atmósfera limpia, libre de aerosoles, obteniendo a través de ellas la extinción. En cualquier caso, esta metodología no es una medida directa ya que simulan la DNI que habría en un cielo libre de aerosoles. Otros autores han utilizado también cuatro pirheliómetros a distintas alturas en la montaña Jabal Hafeet (Emiratos Árabes). Realizan un análisis de las medidas obtenidas y usando un modelo basado en la Ley de Beer-Lambert-Bouguer [14] obtienen la extinción [8]. El inconveniente que presenta esta metodología es la diferencia horizontal entre estaciones (unos 5.2 km), siendo la atmósfera distinta en cada estación de medida. Por otro lado, algunos trabajos han utilizado fotómetros solares para medir la transmitancia espectral debida a los aerosoles (relacionada con la extinción atmosférica) [15]. Consideran una capa de aerosoles única y uniforme. Los autores ponen de manifiesto que sería necesario validar esta suposición con medidas en tierra usando un visibilímetro. También ha sido utilizada instrumentación para visibilidad en aviación y tráfico rodado (escatómetros y transmisómetros) [9]. Los escatómetros sólo miden dispersión, por lo tanto, los autores utilizan una corrección con un CTR para la absorción en todo el ancho de banda, midiendo para ello la absorción con el transmisómetro que mide absorción y dispersión. Estas metodologías están basadas en medidas monocromáticas y realizan simulaciones para extender las medidas a todo el ancho de banda, por lo tanto, no es una medida directa para todo el rango espectral de extinción.

## 3. Estimación de los niveles de extinción en la PSA

Se desarrolló una metodología paramétrica con un nuevo enfoque para determinar la extinción atmosférica en condiciones atmosféricas más realistas para la PSA [16]. Para ello, se realizó un año típico de aerosoles (TAY) con datos de la estación AERONET de la PSA. La red AERONET es una red mundial de estaciones de medida de AOT promovida por la NASA [17] que proporciona información sobre las propiedades físicas, ópticas y radiativas de los aerosoles en numerosos emplazamientos alrededor del Planeta (800 estaciones en todo el mundo) [18]. El TAY se generó usando la metodología del Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos (NREL) para la generación de años típicos meteorológicos (TMY) [19]. Esta metodología consiste en una muestra de 30 años de variables meteorológicas reales de una localización, a la que se realiza un tratamiento estadístico con la finalidad de obtener un TMY. El TMY estará formado por la concatenación de 12 meses de diferentes años seleccionados de la muestra de años, los cuales minimizan el estadístico de Finkelstein & Schafer, estadístico utilizado para determinar el valor de las variables meteorológicas más características para un emplazamiento a partir de un amplio periodo de tiempo [20]. Aunque en la metodología de NREL se recomienda usar una muestra de datos de al menos 10 años, algunos autores afirman que tan solo 5 años de datos son representativos para la meteorología de un emplazamiento [21], [22]. Por ello se utilizan 5 años de datos AOT de la estación AERONET de la PSA a ocho longitudes de onda distintas, desde 340 nm hasta 1640 nm para la realización del TAY de la PSA. El TAY será igual que un TMY pero formado por AOT a distintas longitudes de onda en lugar de por variables meteorológicas. El TAY desarrollado para la PSA presentaba variabilidad estacional de la cantidad de aerosoles a lo largo del año, siendo mayor el AOT en

las estaciones cálidas. Esto es debido a la baja precipitación en los meses cálidos, favoreciendo la producción físico-química de aerosoles orgánicos [23]. Además, presentaba algunos picos de extinción a lo largo del año coincidentes con los meses con episodios de polvo sahariano en la Península procedente de la actividad ciclónica del Norte de África [24].

A partir del TAY generado para la PSA se obtienen el AOT medio, máximo y mínimo para cada longitud de onda de la misma forma que se obtienen las medias y los máximos en meteorología. Estos niveles típicos de AOT son usados para obtener los parámetros de Ångström característicos para la PSA, utilizando para ello la Ley de Ångström ( $AOT(\lambda)=\beta\lambda^{-\alpha}$ ). El valor de los parámetros sería  $\alpha_{media}=0.762$ ,  $\beta_{media}=0.0775$ ,  $\alpha_{max}=0.505$ ,  $\beta_{max}=0.2924$ ,  $\alpha_{min}=1.142$ ,  $\beta_{min}=0.0194$ .  $\beta$  es el coeficiente de turbidez e indica la cantidad de partículas que hay en la atmósfera. El valor medio en la PSA es menor de 0.2, siendo por lo tanto una atmósfera limpia, con episodios puntales de turbidez.  $\alpha$  es el exponente de Ångström e indica el tamaño de las partículas, siendo 0 polvo grueso y 1 partículas pequeñas. El valor de este exponente para la PSA nos indica que la atmósfera de la PSA contiene aerosoles gruesos, principalmente polvo y partículas higroscópicas [25]. Los parámetros de Ångström característicos son introducidos en el CTR LibRadtran para obtener las transmitancias espectrales a distintas distancias heliostato-receptor o SR. Además de los parámetros de Ångström característicos se introducen otros parámetros que definen la atmósfera de la PSA como la Temperatura, Humedad Relativa, Altitud, ... La transmitancia calculada para cada SR es transformada en términos de extinción restándose a la unidad y multiplicando por 100. Tras ello, se obtiene la extinción en función del SR en forma de polinomio de tercer grado, que es la forma en la que la mayoría de los códigos de simulación de plantas permiten introducir este parámetro. En la Fig. 1 se puede ver los niveles de extinción calculados con esta metodología para el emplazamiento de la PSA.

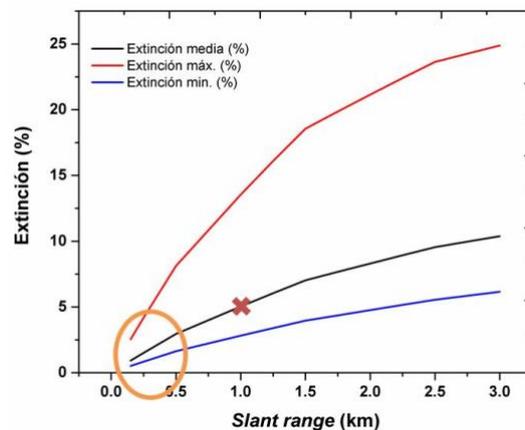


Fig.1. Niveles de extinción en la PSA con el modelo CTR

Se observa que los niveles medios de extinción característicos son unos niveles bajos de extinción en general, más próximos a los niveles mínimos característicos que a los máximos. La extinción media característica en la PSA para 1 km de SR es de un 5% según muestra la gráfica, por lo tanto, es necesario seleccionar y desarrollar un método de medida de extinción con un sensor óptico que sea capaz de detectar estos niveles de extinción. El nivel de ruido del sensor no puede ser mayor que el orden de magnitud de la propia medida.

#### 4. Sistema de medida de extinción

Los sensores seleccionados para detectar pérdidas de radiación de un 5% por extinción en aproximadamente 1 km han sido cámaras digitales de gran resolución con sensores ópticos de detección de radiación con respuesta proporcional a la intensidad de ésta. La metodología consiste en utilizar dos cámaras digitales idénticas enfocadas mediante lentes adecuadas hacia una diana lambertiana de dimensiones 2x2 m, con una mitad pintada de blanco y otra de negro (Fig. 2). La parte negra es utilizada para eliminar de la medida la contaminación lumínica, es decir, aquella radiación que detectará el sensor que no viene directamente de la diana, sino que ha sido introducida por el entorno en la trayectoria entre cámaras y diana, y por lo tanto no debe ser tenida en cuenta para determinar las pérdidas de extinción. Ambas cámaras toman imágenes simultáneas de la diana situada en la parte central del campo de visión de éstas. El software Image Proplus permite obtener los niveles de intensidad o grey levels (gl) de las imágenes, de las cuales se selecciona un área de interés (AOI) de 0.5x1 m de la parte blanca y de la parte

negra en la parte central de la diana. Se consigue de esta forma trabajar con óptica paraxial y evitar aberraciones ópticas no deseadas como efecto de bordes, viñeteo,... [26], [27]. Los  $gl$  obtenidos de los píxeles de los AOI seleccionados en las imágenes usando el software *Image Proplus* son matrices numéricas [28], [29].

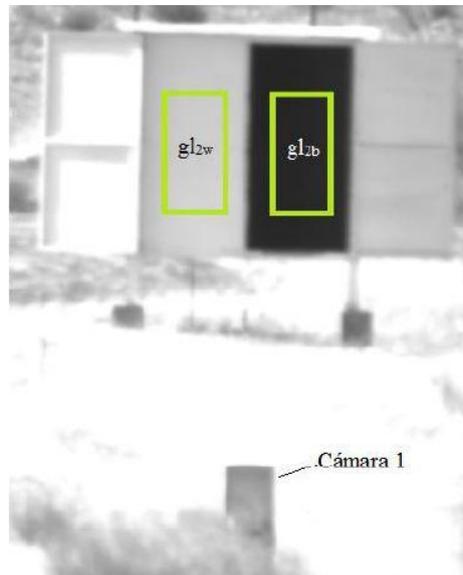


Fig.2. Diana lambertiana del sistema de medida de extinción. En amarillo el área de interés utilizada para obtener los niveles de gris de la parte blanca y negra de la diana.

De esta forma, los  $gl_1$  registrados por la cámara 1 serán los  $gl_{1w}$  de la parte blanca menos los  $gl_{1b}$  de la parte negra. De la misma forma, los  $gl_2$  de la cámara 2, serán los  $gl_{2w}$  de la parte blanca menos los  $gl_{2b}$  de la parte negra. Por lo tanto, la extinción atmosférica a la distancia entre cámaras vendrá dada por la Ecuación (1) y la incertidumbre asociada a estas medidas,  $\psi_{Extinción}$ , se puede obtener con la Ecuación (2), donde  $\psi_{gl1}$  y  $\psi_{gl2}$  son las incertidumbres de los niveles de gris de la cámara 1 y de la cámara 2 respectivamente. La extinción para un heliostato a cualquier distancia  $SR_N$  distinta de la distancia entre cámaras,  $Extinción_N$  se obtiene mediante la Ecuación (4), la cual utiliza para ello el coeficiente de extinción,  $\beta_{ext}$ , obtenido a partir de las medidas, calculado mediante la Ecuación (3), donde  $(l_2-l_1)$  es la distancia entre cámaras. Esta relación del coeficiente de extinción y los niveles de gris se obtiene con un desarrollo de la Ley de Beer-Lambert-Bouguer [30]. La incertidumbre asociada para la extinción a cualquier distancia,  $\psi_{ExtinciónN}$ , se obtendrá con la Ecuación (5), donde  $\psi_{\beta_{ext}}$  es el error del coeficiente de extinción. La incertidumbre calculada en este caso es algo mayor que la obtenida directamente de las medidas a la distancia entre cámaras (Ecuación (2)).

$$Ext (\%) = 100 \left(1 - \frac{gl_2}{gl_1}\right) \quad (1)$$

$$\psi_{Extinción} (\%) = \pm \frac{100}{gl_1} \sqrt{\left(\frac{gl_2}{gl_1}\right)^2 \psi_{gl_1}^2 + \psi_{gl_2}^2} \quad (2)$$

$$\beta_{ext} = -\frac{\ln \frac{gl_2}{gl_1}}{l_2 - l_1} \quad (3)$$

$$Extinción_N (\%) = 100 (1 - e^{-\beta_{ext} SR_N}) \quad (4)$$

$$\psi_{ExtinciónN} (\%) = 100 e^{-\beta_{ext} SR_N} \sqrt{(SR_N \psi_{\beta_{ext}})^2 + (\beta_{ext} \psi_{SR_N})^2} \quad (5)$$

#### 4.a. Selección de la cámara digital

Se realizaron varias pruebas en el laboratorio de radiometría de la PSA para determinar cuál sería la cámara con el sensor más adecuado para medir extinción atmosférica. Las pruebas se realizaron con una esfera Ulbricht (fuente luminosa que proporciona un frente plano de radiación). De todas las cámaras testeadas se seleccionó una cámara Hamamatsu con sensor CMOS, de 16 bits, refrigeración Peltier y con

una electrónica avanzada. En la Fig. 3 se presentan cortes de imágenes con tiempos de exposición muy próximos, se puede observar que la cámara seleccionada es capaz de detectar pequeñas variaciones de niveles de intensidad, del orden de 1.5%. Además, la cámara presenta una buena relación señal ruido ( $\psi/\mu$ , desviación típica/media), menor del 1%. Por lo tanto, debido a su sensibilidad y resolución, se consideró que dicha cámara era capaz de medir los niveles de extinción esperados (5%).

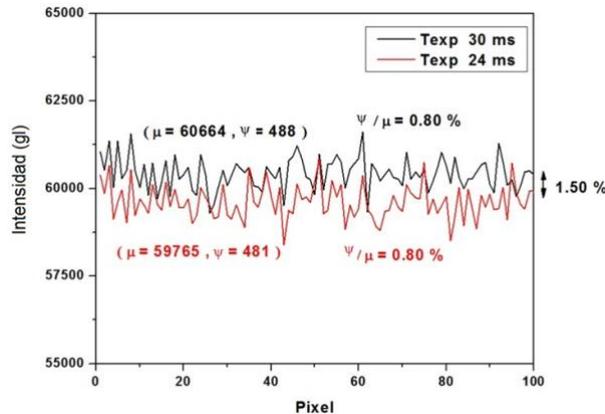


Fig.3. Resultados test cámara Hamamatsu en el Laboratorio de Radiometría de la PSA.

El rango espectral que detectan las cámaras es de 400 a 1000 nm, detectando por lo tanto el 73% de la extinción. El otro 27% que la cámara no detecta sería una pequeña parte del ultravioleta y del infrarrojo lejano. En el momento de selección de la cámara era la que mayor rango espectral era capaz de detectar de todas las del mercado.

#### 4.b. Características físicas, ópticas y radiométricas del sistema

El sistema ha sido instalado en la PSA, a lo largo de la línea Norte-Sur de la instalación. La cámara 2 más alejada se encuentra situada al norte de la instalación, a 824.51 m de la diana. A 741.63 m de la cámara más alejada o cámara 2 se encuentra la cámara más cercana o cámara 1. La diana se encuentra a 82.88 m de la cámara 1, estando su parte blanca y negra dirigida hacia el norte, detectando por lo tanto las cámaras radiación difusa en lugar de DNI. Las plantas solares de concentración de torre trabajan con DNI, en la tesis doctoral realizada se puede ver el desarrollo teórico realizado para comprobar que la componente de la radiación no influye en la medida del sistema de extinción, siendo correcto por lo tanto usar radiación difusa en lugar de DNI [30]. La cámara 1 tiene un objetivo óptico con una distancia focal de 50 mm, mientras que la cámara 2 tiene un objetivo con una distancia focal de 500mm. De esta forma, como la distancia cámara-diana (AOI) es distinta, nos aseguramos que la proyección de área de diana sobre píxel de cada cámara sea la misma. Cada píxel recibe radiación de un área de 10.4 mm de diámetro desde la diana. La calibración de las cámaras digitales, con distinta distancia focal cada una, se realizó en un ensayo en campo durante un día con unas condiciones atmosféricas idóneas (alta irradiancia solar directa, baja humedad relativa, baja velocidad de viento y bajo nivel de partículas). De esta forma, se consiguieron obtener los niveles de intensidad de la diana lambertiana por ambas cámaras, registrándose un offset con estas medidas, el cual es tenido en cuenta en el resto de medidas tomadas con el sistema [30]. Además, a ambas cámaras se le han colocado unos filtros atenuadores de densidad neutra con una ventana espectral de 400-2000 nm, con una transmitancia del 6.25%, evitando así problemas de saturación óptica de los sensores.

Los tres elementos del sistema han sido colocados alineados mediante un estudio topográfico para poder situarlos en línea recta con el menor error posible. Aun así, las partes blanca y negra de la diana han sido pintadas con pinturas difusoras para evitar que posibles desviaciones en la linealidad de las cámaras respecto la diana pudieran introducir problemas de especularidad. Para ello se desarrolló una metodología para validar que la diana era lambertiana usando un luminancímetro [31]. Esta metodología fue publicada y puede ser utilizada para determinar el grado de difusividad de cualquier diana u objetivo de interés para la energía solar de concentración o cualquier otro ámbito.

Las cámaras fueron alojadas dentro de unos armarios refrigerados, evitando así ruido térmico en la medida y envejecimiento de los sensores. Para garantizar la visibilidad de las cámaras, en ambos armarios se pusieron ventanas de borosilicato, el cual tiene una transmitancia espectral suficiente para el rango espectral de las cámaras.

#### 4.c. Toma de medidas

Tras la instalación y puesta a punto del sistema óptico de medida de extinción, comenzaron a tomarse medidas de extinción cada 15 minutos, tras un periodo cada 10 minutos y cuando se vio que el sistema de adquisición de datos tenía la robustez y consistencia necesarias, comenzó a medirse extinción cada minuto. Además de los datos de extinción, se registra el coeficiente de extinción y otras variables meteorológicas de interés para la energía solar de concentración y que tienen influencia en el valor diario de extinción como son la DNI, humedad relativa, presión atmosférica, temperatura, velocidad de viento, AOT, agua precipitable y concentración de partículas. Estas variables son comúnmente monitorizadas en la sala de control de las plantas solares de concentración para la correcta operación de este tipo de instalaciones. Gracias al desarrollo del sistema óptico de medida de extinción, por primera vez ha podido ser monitorizado este parámetro en la sala de control de una planta de torre junto con el resto de variables, como se muestra en la Fig.4.



Fig.4. Extinción atmosférica monitorizada por primera vez en el panel de control de una planta solar de torre (CESA1, PSA)

#### 5. Año de medidas de extinción realizado con el sistema óptico de medida

Con el sistema desarrollado se realizó un año de medidas, llevado a cabo desde el 28 de junio del 2017 hasta el 29 de junio del 2018 de 10:00 a 15:00 de la tarde hora local [32]. Se registraron 17632 datos durante 179 días útiles de medida, con una incertidumbre menor del 2%. Aunque en la tesis doctoral desarrollada se realizó el estudio de un año de medidas, el sistema óptico de extinción sigue registrando medidas diarias actualmente. En la Fig. 5 se puede ver a la izquierda el año de medidas de extinción (medias diarias). Se puede observar que los niveles en los meses cálidos son más altos que en las estaciones frías, como ocurría con el AOT anual registrado en el TAY para la PSA. También se observa un pico de extinción en rojo el cual coincide con un episodio registrado de polvo sahariano procedente de África en la Península. Que el sistema sea capaz de detectar este fenómeno, registrando una extinción más elevada de lo habitual da idea de que el sistema tiene gran sensibilidad, siendo un sistema que mide bien. En la parte derecha de la Fig. 5 se puede ver el histograma de las medidas de extinción, siendo la media anual 5.8%, el mínimo 1.5% y el máximo 13.2%.

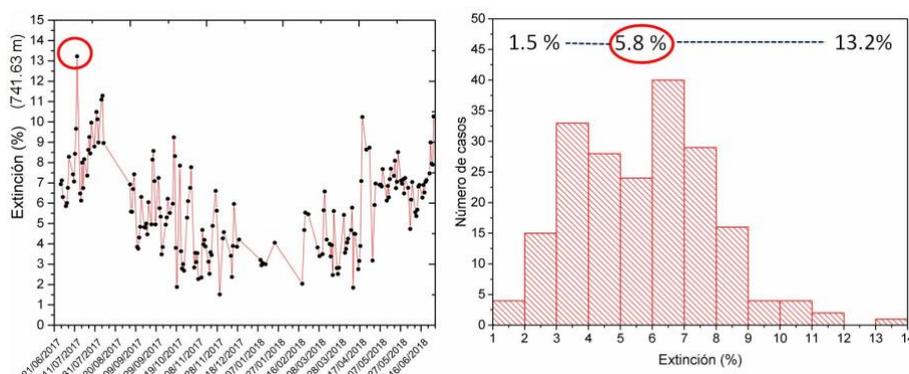


Fig.5. Año de extinción medido en la PSA con el sistema óptico de medida desarrollado.

Los niveles calculados de extinción para una distancia de 741.63 m con el modelo CTR serían 4.0% de nivel medio y con máximo de extinción del 11.0%. El valor medio de un año de extinción medido con el dispositivo experimental para la misma distancia es de  $5.8 \pm 2.2\%$ , lo cual valida la metodología CTR, al ser valores de extinción coincidentes dentro de los márgenes de error. En el caso de los máximos medidos en

la PSA, 13.2 %, se puede observar que la frecuencia de este valor es muy baja. En el caso del modelo CTR, el máximo es de 11.0% y se refiere al máximo más usual que se puede encontrar. En la Fig.5 se observa que la frecuencia de valores de extinción mayores de 11.0% es muy baja, siendo algo mayor la frecuencia de episodios entre el 9 y el 11.0%. Por lo tanto, teniendo en cuenta el margen de error estadístico (2.2%), los valores máximos calculados para la PSA en el modelo CTR y los medidos con el dispositivo experimental coinciden dentro de los márgenes de error. Los mínimos valores calculados en el modelo CTR dan un valor de 2.2% de extinción, y los medidos 1.5%, y teniendo en cuenta el margen de error, quedan nuevamente validados los datos obtenidos utilizando simulaciones con CTR.

### 5.a. Dependencia de la extinción con otras variables meteorológicas

Se ha observado fuerte dependencia de la extinción medida con las variables meteorológicas registradas, siendo la humedad relativa y la concentración de partículas las más influyentes. Se ha observado que en días donde la velocidad del viento es baja, la extinción a lo largo del día es algo homogénea, con ciertos patrones diarios dependiendo de la estación. En cambio, días donde la velocidad del viento es elevada la extinción medida a lo largo del día es más heterogénea, mostrando los datos mayor dispersión. También se ha observado que la lluvia tiene influencia sobre la extinción ya que días posteriores a lluvia se registran extinciones más bajas que los días previos. Esto es debido a que la lluvia limpia la atmósfera de atenuadores atmosféricos. Por otro lado, en la Fig. 6 se puede ver el efecto de la humedad relativa y la concentración de partículas, principales atenuadores atmosféricos, la primera propiciando la absorción y la segunda la dispersión de la radiación solar. Se puede observar que a mayor humedad relativa y mayor concentración de partículas la extinción es mayor, disminuyendo su valor de la misma forma que estas variables lo hacen. Se ha observado en días de gran humedad relativa en el ambiente, y días con mucha concentración de partículas, sobre todo procedentes de África, que la extinción registrada es mucho mayor que los niveles medidos en condiciones normales.

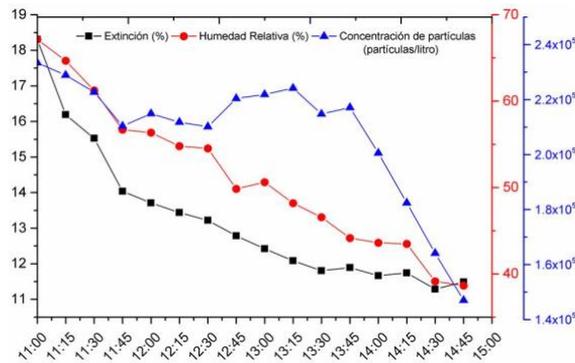


Fig.6. Dependencia de la extinción con la humedad relativa y la concentración de partículas.

Todos estos fenómenos que el sistema es capaz de detectar verifican que el sistema óptico de medida de extinción desarrollado es un sistema fiable, capaz de medir la extinción de forma real y directa. Es el único sistema óptico desarrollado actualmente que es capaz de medir la extinción en estas condiciones de exactitud y fiabilidad.

## 6. Conclusiones

Se ha desarrollado un sistema de medida directa de la extinción atmosférica de la radiación solar en un ancho de banda de 400 a 1000 nm, basado en la toma de imágenes digitales realizadas con dos cámaras de sensores CMOS, con una incertidumbre menor del 2% absoluto. Con el sistema desarrollado se ha conseguido medir la extinción atmosférica en la PSA durante un año, obteniéndose unos valores de extinción media de  $5.8 \pm 2.2\%$ , siendo unos valores bajos de extinción, con lo que se concluye que la atmósfera de la PSA es una atmósfera limpia. Con las medidas realizadas con el sistema desarrollado ha quedado validado el modelo CTR realizado para obtener los niveles de extinción esperados en la PSA. El sistema de medida desarrollado puede ser instalado en cualquier entorno de interés para las plantas solares de torre, ya sea en una planta ya construida o en un posible emplazamiento donde se quiera realizar un estudio de viabilidad para la construcción de futuras plantas. En la actualidad, el sistema de medida de extinción atmosférica desarrollado en la PSA es único en el mundo, siendo el único sistema de

medida directo de extinción. Además, es un sistema de referencia para los demás sistemas de medida de extinción, con el que pueden ser comparados.

En el futuro se espera tener un histórico de varios años de medidas de extinción en el mismo emplazamiento para ver su variabilidad interanual, información de gran interés para las empresas promotoras de plantas de energía solar de concentración. Con un histórico de medidas se pretende estudiar la relación entre los valores de extinción y los demás parámetros meteorológicos, para poder examinar posibles dependencias entre ellos y poder obtener un modelo que los relacione, si son los datos concluyentes.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen a la Plataforma Solar de Almería y a la Universidad de Almería toda la ayuda para poder realizar con éxito la tesis doctoral en la que se basan todos estos estudios y resultados. También agradecen al equipo de trabajo del proyecto PRESOL y al equipo de trabajo de la PSA por todo el asesoramiento y ayuda científica y técnica prestados.