

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Revisión de Modelos y Procedimientos de
Estimación de Atenuación Atmosférica en Centrales
Termosolares de Torre

Autor: Alicia Martínez Minchón

Tutor: Manuel Antonio Silva Pérez

Dep. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Revisión de Modelos y Procedimientos de Estimación de Atenuación Atmosférica en Centrales Termosolares de Torre

Autor:

Alicia Martínez Minchón

Tutor:

Manuel A. Silva Pérez

Profesor contratado doctor

Dep. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Grado: Revisión de Modelos y Procedimientos de Estimación de Atenuación Atmosférica en Centrales Termosolares de Torre

Autor: Alicia Martínez Minchón

Tutor: Manuel A. Silva Pérez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

*A mi madre, por enseñarme a
soñar.*

Agradecimientos

Con la finalización de este trabajo se cierra la que creo que ha sido la etapa más importante de mi vida hasta ahora y me gustaría agradecer a todas las personas que han contribuido a mi crecimiento como persona estos últimos cuatro años. En primer lugar, y debo extenderme un poco más con ellos, a mi madre y Manolo, los días de agobio en los que nunca me ha faltado un abrazo, las llamadas de alegría al aprobar una asignatura, vuestro cariño incondicional día tras día, los zumos de naranja en las largas noches de estudio...Sin duda, sois los mejores padres que se podrían tener y todo esto es por vosotros. Al resto de mi familia, ellos han celebrado mis victorias como tuyas y siempre han estado en mis derrotas. A Luis, mi mayor regalo de esta etapa, gracias por tanto sin esperar nada a cambio. A Cristina, porque lo hemos conseguido, hemos acabado y lo más importante, siempre juntas, como empezamos. A mis compañeros, mi gran familia, por enseñarme que entre integral y derivada siempre hay tiempo para una buena risa con amigos.

Finalmente, a mi profesor y tutor, Manuel Silva que ha demostrado ser a parte de buen profesor, una excelente persona.

Alicia Martínez Minchón
Sevilla, 2017

Resumen

Lás pérdidas de radiación que tienen lugar entre el campo de heliostatos y el receptor en plantas de receptor central, se producen debido a la atenuación atmosférica que es dependiente del lugar y del tiempo. Actualmente, la atenuación suele aproximarse utilizando condiciones atmosféricas estándar constantes en las herramientas de trazado de rayos y de optimización de plantas. Algunas de estas herramientas permiten como entrada datos de atenuación dependientes del tiempo, pero estos conjuntos de datos no suelen estar disponibles para los lugares de interés para CSP.

En esta revisión se resumen y comparan las ecuaciones modelos más empleadas en las diferentes herramientas de ray-tracing. Además, se presentan distintos métodos experimentales desarrollados para determinar la atenuación atmosférica a partir de mediciones in situ. Por último, se resumen diferentes estudios sobre el efecto de la atenuación sobre el rendimiento de la planta.

Se puede concluir que durante el desarrollo del proyecto, así como en la optimización de la planta y en el pronóstico del rendimiento, no se puede despreciar la atenuación ni su variación temporal, por lo que es recomendable el uso de series temporales específicas del lugar bajo estudio.

Abstract

Radiation losses between the heliostat field and the receiver in central receiver plants, occur due to atmospheric extinction which depends on site and time. Currently, atmospheric extinction is usually approximate using a constant standard atmospheric condition in ray-tracing and plant optimization tools. Some of this tools allow as input dependent of time extinction data, but such data sets are generally not available for places of interest for CSP.

In this review, the most applied model equations in the different ray-tracing tools are summarized and compared. Furthermore, several developed experimental methods to determine atmospheric extinction from on-site measurements are presented. Finally, different studies about the effect of atmospheric extinction on the plant yield are summarized.

It can be concluded that during the development of the project, as well as in the optimization of the plant and in the performance forecast, it is not possible to neglect the extinction or its temporal variation, so it is recommended to use specific time series of the place under study.

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	11
Abstract	13
Índice	15
Índice de Figuras	17
Notación	19
1 Introducción	21
2 Objetivos y Metodología	23
3 Fundamentos teóricos	25
3.1 <i>Radiación y su interacción con la atmósfera</i>	25
3.1.1 Atenuación atmosférica y transmitancia	26
3.1.2 Visibilidad	30
3.2 <i>Aerosoles</i>	30
4 Atenuación atmosférica en campos de heliostatos	31
4.1 <i>Atenuación atmosférica en herramientas de simulación</i>	32
4.1.1 Leary and Hankins (L&H)	32
4.1.2 Pitman and Vant-Hull (P&V)	33
4.1.3 Hottel	34
4.1.4 Ballestrín and Marzo	35
4.1.5 Sengupta and Wagner (S&W)	36
4.1.6 Comparación de los modelos y ecuaciones [22]	37
4.2 <i>Métodos experimentales para caracterizar y describir la atenuación atmosférica</i>	40
4.2.1 Experimento Swaihan de Tahboub et ál.	40
4.2.2 Experimento Jebel Hafeet de Tahboub et ál.	41
4.2.3 Método de Elias et ál.	43
4.2.4 Método de Ballestrín et ál.	45
4.2.5 Método del sensor de visibilidad de Hanrieder et ál.	46
4.2.6 Método del transmisómetro de Henrier et ál.	46
4.2.7 Método del contador de partículas de Hanrieder	47

4.2.8	Modelo P&V de Pitman and Vant-Hull	48
4.2.9	Modelo de transmitancia basado en DNI de Hanrieder et al. y Sengupta y Wagner	48
4.2.10	Modelo de AOD de Polo et ál.	50
5	Instrumentación	55
5.1	<i>Sensor de visibilidad FS11 Vaisala</i>	55
5.2	<i>Transmisómetro LPV4 Optec</i>	56
5.3	<i>Fotómetro solar CIMEL CE318</i>	57
5.3.1	Calibración	58
5.3.2	AERONET	58
5.4	<i>Contador de partículas EDM164 Grimm</i>	59
5.4.1	Calibración	59
5.5	<i>Pirheliómetro CHP1 de Kipp & Zonen</i>	60
5.5.1	Calibración	60
6	Efecto de la atenuación atmosférica en centrales de torre	63
6.1	<i>Weinrebe</i>	63
6.2	<i>Sánchez y Romero</i>	63
6.3	<i>Schmitz</i>	64
6.4	<i>Goebele et ál.</i>	64
6.5	<i>Mustafa et ál.</i>	64
6.6	<i>Zhang et ál.</i>	64
6.7	<i>Cardemil et ál.</i>	64
6.8	<i>Liedke et ál.</i>	65
6.9	<i>Polo et ál.</i>	65
6.10	<i>Hanrieder</i>	66
7	Conclusiones	69
	Referencias	71

Índice de Figuras

<i>Figura 1.1. Central de torre CESA1 en PSA en condiciones de día claro (izquierda) y nublado (derecha)</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3.1. Espectro solar con las longitudes de onda correspondientes a cada franja.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.2. Ángulo cenital solar.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3.3. Irradiancia solar en la parte superior de la atmósfera y en la superficie.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3.4. Porcentaje de luz dispersada por la dispersión de Rayleigh en función de la longitud de onda. ...</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.1. Esquema del efecto de la atenuación atmosférica en las centrales de torre.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4.2. Esquema de los diferentes modelos y herramientas de simulación descritos anteriormente [22]. ..</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.3. Transmitancia obtenida con modelos descritos en las Sec. 4.1. para el 18 de Agosto de 2013, 12:00 UTC en PSA, en función del slant range [22]</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.4. Transmitancia para un slant range de 1 km obtenida con distintos modelos descritos en la Sec. 4.1. para un período de tiempo entre el 18 y 22 de agosto de 2013 en PSA. [22]</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.5. Configuración del experimento Swaihan.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.6. Configuración del experimento Jebel Hafeet.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.7. Atenuación a nivel de superficie en Ouarzazate para 500 nm y slant range 1 km causada por moléculas de aire y partículas de aerosol. [25]</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.8. Configuración de las cámaras digitales y el objetivo en el método de Ballestrín.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.9. Comportamiento diario medio de T1km sin corregir medida con FS11 y LPV4 desde el 22/05/2013 hasta 22/05/2014 en PSA.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.10. Comparación del método del contador de partículas con el conjunto de datos de referencia para PSA.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.11. Perfiles de altura de aerosol para PSA empleados para desarrollar TM1, TM2 y TM3.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.12. Evolución del parámetro de turbidez en tres estaciones AERONET diferentes. [32]</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.13. Evolución del exponente de Angström en tres estaciones AERONET diferentes. [32]</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.14. Atenuación atmosférica en función del slant range y la AM para dos casos de AOD. [32]</i>	<i>52</i>

<i>Figura 5.1. Sensor de visibilidad FS11 Vaisala.</i>	56
<i>Figura 5.2. Transmisómetro LPV4 Optec. A la izquierda, la unidad receptora y a la derecha, la unidad transmisora.</i>	57
<i>Figura 5.3. Fotómetro CIMEL C318. A la izquierda, con plataforma fija a la derecha, con plataforma temporal.</i>	58
<i>Figura 5.4. Contador de partículas EDM164 Grimm. A la derecha, un esquema del principio de funcionamiento del mismo.</i>	59
<i>Figura 5.5. CHP1 de Kipp & Zonen sobre un seguidor solar en PSA.</i>	60
<i>Figura 7.1. Histograma de la distribución temporal de la publicación de los artículos.</i>	69

Notación

ABC	Corrección de absorción y banda ancha
ABSORB	Factor definido por usuario en ciertos modelos de transmitancia
AERONET	Aerosol Robotic Network
AM	Masa de aire
AOD	Espesor óptico de aerosol
BLH	Altura de la capa límite
CAL	Constante de calibración del LPV4
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CSP	Energía termosolar de concentración
DELSOL	Herramienta de simulación
DHI	Irradiancia difusa
DLR	Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V.
DNI	Irradiancia directa normal
E	Irradiancia
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasting
EDM164	Environmental Dust Monitor 164 of Grimm
FS11	Sensor de visibilidad de Vaisala
GHI	Irradiancia global horizontal
H	Elevación
h	Altura de la torre
HFLCAL	"Heliostat Field Layout CALculation"
HR	Humedad relativa
L	Radiancia
L&H	Leary & Hankins
LED	Diodo emisor de luz
libRadtran	Librería para transferencia radiativa
LPV4	Transmisómetro de Optec
LUT	look-up table

MAE	Error absoluto medio
MENA	Middle East and North Africa
MIRVAL	Código de Leary & Hankins
MOR	Alcance óptico meteorológico
n	Número de partículas
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ND	Densidad neutra
NREL	National Renewable Energy Laboratory
OD	Espesor óptico
P&V	Pitman & Vant-Hull
pb	Presión barométrica
PHOTONS	Photométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire
PSA	Plataforma Solar de Almería
PWV	Vapor de agua precipitable
RIMA	Red Ibérica de Medida fotométrica de Aerosoles
RMSD	Desviación cuadrática
RT	Transferencia radiativa
S&W	Sengupta & Wagner
SAA	Ángulo azimutal solar
SAM	System Advisor Model
SoFiA	Solar Field Assessment for Central Receiver Systems
SPRAY	Herramienta de trazado de rayos
STRAL	Herramienta de trazado de rayos
SVR	Alcance visual oblicuo
SZA	Ángulo cenital solar
Tamb	Temperatura ambiente
TM	Modelo de transmitancia
UAE	United Arab Emirates
x	<i>slant range</i>
α_{Ang}	Exponente de Angström
β_a	Coefficiente de absorción
β_{Ang}	Coefficiente de turbiedad de Ångström
β_{ext}	Coefficiente de extinción
β_s	Coefficiente de dispersión
λ	Longitud de onda
ρ	Densidad
τ	Espesor óptico
τ_p	Espesor óptico de aerosol
ω_0	Albedo de dispersión simple

1 INTRODUCCIÓN

Según diferentes estudios, la energía solar de concentración (CSP), que se basa en la acumulación de calor para generar vapor y así impulsar una turbina para producir electricidad, puede contribuir de forma "sustancial" a las futuras necesidades energéticas. Este tipo de energía es importante para el mercado eléctrico de los países del sur de Europa y de la región de MENA (Norte de África y Oriente Medio) por la abundancia del recurso solar que presentan. También es una tecnología prometedora para otras regiones como India, Chile o Sudáfrica.

El desarrollo de la tecnología CSP tiene como objetivo principal llegar a ser económicamente competitiva con la generación de electricidad mediante combustibles fósiles, siendo necesario superarlo para poder contribuir de forma representativa en la producción eléctrica futura. La ventaja principal frente a otras renovables como las plantas fotovoltaicas, es la posibilidad de incorporar almacenamiento de la energía térmica, característica que permite una mejor adaptación a las necesidades del mercado.

Las plantas de CSP se deben diseñar y optimizar teniendo en cuenta las condiciones específicas del emplazamiento donde se implemente la misma. Esto es esencial en las regiones áridas debido a que las instalaciones se exponen a condiciones atmosféricas extremas.

Una de las tecnologías CSP con más posibilidades es la de receptor central o comúnmente conocida como de torre. En las centrales de torre, un campo de heliostatos refleja la radiación solar y la concentra en el receptor situado en la parte superior de una torre, llegando a alcanzar altas temperaturas en la superficie del mismo.

La irradiancia directa normal (DNI) es la parte de la radiación solar con importancia para las centrales de receptor central. Las regiones del "cinturón solar" tienen gran potencial para la tecnología mencionada debido a los altos recursos de DNI disponibles. En esta zona predominan las condiciones semiáridas o áridas, fuente principal de partículas de polvo mineral que, junto a las partículas de sal marina, contribuyen considerablemente al aerosol atmosférico. La atenuación atmosférica debida a aerosoles puede reducir la DNI hasta un 30%.

La atenuación atmosférica presenta una fuerte dependencia con el lugar y el tiempo. En la siguiente figura se muestra la Plataforma Solar de Almería (PSA) en un día claro (izquierda) y nublado (derecha). En un día con buena visibilidad, la pérdida de energía por kilómetro será sólo un pequeño porcentaje, sin embargo, esta pérdida aumenta con un alto contenido de vapor de agua o aerosol en la atmósfera.



Figura 1.1. Central de torre CESA1 en PSA en condiciones de día claro (izquierda) y nublado (derecha)

La variabilidad de la atenuación con el lugar y el tiempo podría ser un factor crítico para las centrales de torre. En los 100 metros más bajos de la atmósfera existe una alta densidad de partículas de aerosol, especialmente en las regiones áridas.

En el caso de las plantas de una única torre, el tamaño del campo de heliostatos crece considerablemente y el *slant range*, que es la distancia que recorre la radiación solar que reflejan los heliostatos hacia la parte superior de la torre, puede llegar hasta a 2 km. Es por esto, que la atenuación de la radiación no puede ser despreciada y debe tenerse en cuenta durante el diseño de la planta, limitando la geometría y el tamaño del campo de heliostatos, así como en la evaluación del rendimiento de las mismas. En las centrales cilindroparabólicas, este efecto desempeña un papel menos importante debido a que las distancias entre el receptor y el concentrador puede ser despreciado en comparación con las de torre.

Normalmente, las herramientas de ray-tracing y de optimización, consideran la atenuación sólo para condiciones atmosféricas estándar determinadas. La mayoría permiten la elección entre condiciones de día claro (p.ej. 10% de DNI para *slant range* de 1 km) o día nublado (25% de pérdida de DNI). Recientemente, se han mejorado algunas herramientas permitiendo a los usuarios definir la atenuación y así proporcionar un cálculo más preciso y algunas herramientas permiten la entrada de datos de atenuación dependientes del tiempo pero tales conjuntos de datos específicos generalmente no están disponibles para lugares de interés. Esto último es uno de los mayores desafíos de un proyecto de diseño de planta de torre ya que la información sobre la magnitud en los lugares de interés para la implantación de las mismas es limitada. Disponer de series temporales de atenuación supondría una gran ventaja a la hora de diseñar la planta y decidir entre la tecnología de receptor central, cilindroparabólica o fresnel. Los lugares que presenten una alta atenuación promedio, podrían ser mas adecuados para sistemas de receptor central con un campo de heliostatos de menos extensión o para plantas de canal cilindroparabólico.

La estimación empírica del fenómeno de atenuación no es obvia. Existen algunas aproximaciones para determinar las pérdidas de DNI y la atenuación atmosférica en la capa más baja de la atmósfera. Sin embargo, la mayoría de modelos existentes suponen un coeficiente de extinción independiente del lugar y del tiempo o se requieren medidas adicionales del alcance óptico meteorológico (MOR) que normalmente no están disponibles. También existen instrumentos disponibles comercialmente y documentados para la medición de la transmisión. Estos instrumentos se utilizan frecuentemente en los aeropuertos para estimar la visibilidad atmosférica tomando mediciones a distancias de unos pocos metros y luego extrapolando a distancias mayores. Además, la fuente de luz de estos instrumentos es espectralmente muy diferente a la distribución solar y pensando en un montaje experimental, las largas distancias requeridas para una pérdida significativa de atenuación, la imposibilidad de lograr un heliostato idealmente plano y la incertidumbre de medición inherente de los dispositivos radiométricos hacen necesario el uso de modelos de transmisión atmosférica espectral.

Los costes de una planta de energía se pueden reducir reduciendo la incertidumbre de la simulación de la atenuación ya que implica a su vez una reducción de los márgenes de riesgo en las previsiones de rendimiento de la planta.

2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El objetivo principal de este trabajo es recopilar y compactar los diferentes estudios sobre los modelos y métodos de medida de atenuación atmosférica de la radiación reflejada en campos de heliostatos.

El trabajo se divide en 7 capítulos. En el capítulo 3, se incluyen los fundamentos teóricos que sustentan las bases del fenómeno de atenuación, incluyendo definiciones que serán útiles para la comprensión de capítulos posteriores. El capítulo 4 es el cuerpo principal del trabajo, donde se describe el fenómeno de atenuación específicamente en las centrales de torre y se exponen los diferentes estudios que componen la revisión. Este capítulo se divide en dos partes bien diferenciadas. La primera, hace referencia a los distintos modelos y ecuaciones desarrolladas que se incluyen en las distintas herramientas de simulación y en la segunda, se describen diferentes métodos experimentales llevados a cabo con el fin de describir la atenuación de forma que se pueda reflejar la dependencia con el lugar y el tiempo de la misma. Mucho de los métodos experimentales mencionados, hacen uso de instrumentos de medida in situ por lo que se ha creado el capítulo 5 para describir detalladamente el funcionamiento de estos. Algunos autores han realizado estudios que investigan el efecto de la atenuación sobre el rendimiento energético o la eficiencia óptica de plantas específicas y estos se incluyen en el capítulo 6. Por último, en el capítulo 7 se presentan diversas conclusiones acerca de los temas tratados.

En cuanto a la metodología, para la localización de los documentos bibliográficos se realizaron búsquedas en diferentes bases de datos como Science Direct, Scopus, Google Scholar y Research Gate mediante distintas palabras claves. La búsqueda se realizó en inglés ya que los artículos más relevantes del tema a abordar están redactados en este idioma. Posteriormente, se llevó a cabo una lectura superficial de los documentos obtenidos con el fin de descartar aquellos que no incluyeran contenido importante o que enfocaran el tema desde una perspectiva diferente a la que se busca en este trabajo. Por último, se realizó una lectura detallada de los documentos seleccionados y un trabajo de comprensión de los mismos antes de redactar.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Radiación y su interacción con la atmósfera

La energía solar resulta del proceso de fusión nuclear que tiene lugar en el sol tratándose de la fuente principal de energía en la atmósfera (la energía solar que llega a la superficie terrestre es 10000 veces mayor que la energía consumida actualmente por toda la humanidad [1]). La radiación es transferencia de energía por ondas electromagnéticas que no necesitan un medio material para propagarse, pueden atravesar el espacio interplanetario y llegar a la Tierra desde el Sol.

La longitud de onda y la frecuencia de las ondas electromagnéticas, son importantes para determinar su energía, su visibilidad y su poder de penetración. El conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético y el conjunto de las longitudes de onda emitidas por el sol, espectro solar.

El espectro de radiación solar oscila aproximadamente entre 250 y 4000 nm y las franjas más relevantes del mismo son la radiación ultravioleta (7%), con longitudes de onda inferiores a 400 nm, la parte visible (43%), entre 400 y 760 nm, y la infrarroja(49%), superior a 760 nm.

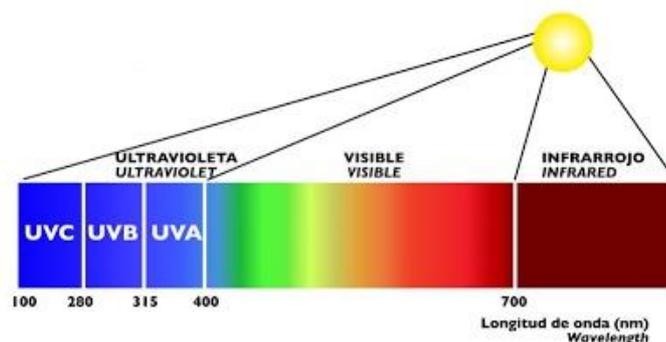


Figura 3.1. Espectro solar con las longitudes de onda correspondientes a cada franja.

La radiación viaja a través de la atmósfera e interfiere con moléculas de aire (nitrógeno, oxígeno, vapor de agua) y partículas (partículas de aerosol o gotas de agua) con lo que esta se absorbe y se dispersa. Para caracterizar la dirección de propagación de un fotón, se emplea un sistema de coordenadas esféricas que describe la distancia radial desde el centro del sistema de coordenadas mediante el ángulo cenital solar (SZA) (θ) y el ángulo azimutal solar (SAA) (ϕ).

Las principales magnitudes radiométricas son la radiancia (L) [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$], que se define como la cantidad de energía radiante que atraviesa un área diferencial en una dirección particular siguiendo un ángulo

sólido particular, y la irradiancia (E) [$W \cdot m^{-2}$], que es la radiancia integrada en un hemisferio. Describe el flujo radiativo por unidad de área incidente en una superficie [2].

A partir de la irradiancia solar, se definen tres componentes distintas: la global horizontal (GHI), la difusa (DHI) y la irradiancia directa normal (DNI) [*todas en* $W \cdot m^{-2}$], siendo esta última la de interés para CSP. En los modelos de transferencia radiativa, DNI se refiere estrictamente a los fotones que no han interactuado con la atmósfera en su trayectoria desde la parte superior de la misma hasta el observador. Sin embargo, la medición de DNI a nivel de suelo siempre incluye todos los fotones de la dirección del sol, tanto si sufren dispersión o no antes de su llegada al instrumento de medida [3]. De acuerdo con la norma ISO 9060 para la especificación y clasificación de los instrumentos de medida para fines de energía solar, se define DNI como la irradiancia recibida desde un pequeño ángulo sólido centrado en el disco solar en un plano normal al haz que proviene del centro del sol.

En herramientas de transferencia radiativa como LibRadtran, se sigue la definición estricta de DNI mencionada anteriormente. El ángulo de apertura considerado en esta herramienta es infinitesimalmente pequeño.

3.1.1 Atenuación atmosférica y transmitancia

La atenuación atmosférica de la radiación al atravesar una capa atmosférica con ausencia de nubes, es la suma de absorción y dispersión de fotones debido principalmente a las partículas de aerosol o vapor de agua presentes en la misma. Normalmente, la mayor parte de la atenuación se debe al fenómeno de dispersión, aunque la absorción no puede despreciarse. La dispersión causada por partículas de aerosol y, en menor medida, por vapor de agua tienen una gran importancia en el proceso de atenuación.

El coeficiente de extinción monocromático para una longitud de onda λ ($\beta_{ext,\lambda}$) se calcula como:

$$\beta_{ext,\lambda} = \beta_{a,\lambda} + \beta_{s,\lambda} \quad (1)$$

Donde el coeficiente de absorción monocromático ($\beta_{a,\lambda}$) y el de dispersión monocromático ($\beta_{s,\lambda}$) se dan ambos en m^{-1} . Los parámetros integrales (de banda ancha) β_{ext} , β_a y β_s se obtienen integrando los espectrales para las longitudes de onda comprendidas entre 250 nm y 4000 nm. El albedo de dispersión simple (ω_0) mide la fracción de atenuación que es causada por el fenómeno de dispersión:

$$\omega_0 = \frac{\beta_s}{\beta_{ext}} \quad (2)$$

La ley de Beer-Lambert-Bouguer, que se aplica para describir la atenuación de la radiación solar a través de la atmósfera teniendo en cuenta tanto la dispersión como la absorción, describe la transmitancia monocromática por distancia recorrida ($T_{x,\lambda}$) como:

$$T_{x,\lambda} = \frac{DNI_{\lambda,x}}{DNI_{\lambda,0}} = \exp(-\beta_{ext,\lambda} \cdot x) \quad (3)$$

Donde $DNI_{\lambda,0}$ es la DNI espectral inicial para la longitud de onda λ y $DNI_{\lambda,x}$ es la DNI espectral después de que los fotones recorran una distancia de espesor x a través del medio. DNI se da en $W m^{-2}$, $\beta_{ext,\lambda}$ en m^{-1} , x en m y la transmitancia es adimensional. La transmitancia para un *slant range* de x km (T_x) sin indicar subíndices de longitud de onda describe la transmitancia integral para un espectro entre 250 y 4000 nm dependiente del *slant range* x .

A. Masa de aire y espesor óptico de aerosoles (AOD)

La masa de aire (AM) define la longitud de la trayectoria óptica a través de la atmósfera en comparación con la longitud si el SZA (θ) fuera cero. Cuantifica la reducción en la potencia de la radiación a medida que pasa a través de la atmósfera y es absorbida por el aire y el polvo. Se define como:

$$AM \approx \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (4)$$

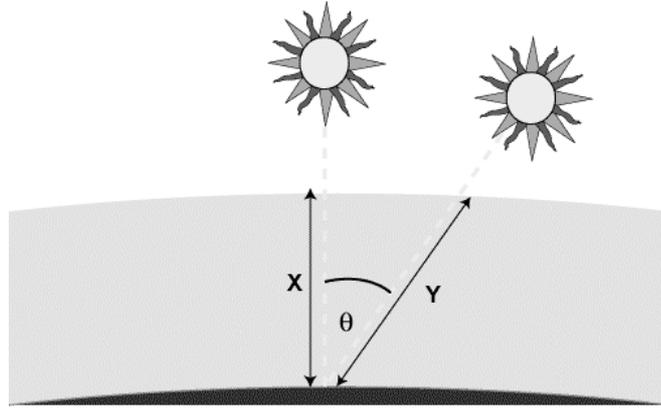


Figura 3.2. Ángulo cenital solar.

Esta ecuación es una aproximación que no considera la curvatura de la superficie terrestre. Cuanto mayor sea la AM, mayor es la distancia que los fotones recorren a través de la atmósfera hasta alcanzar la superficie.

Para describir cuanta energía radiante se transmite en la trayectoria óptica a través de un medio, se utilizan el espesor óptico τ (OD) y el espesor óptico de aerosol τ_p (AOD):

$$\tau(x) = \int_0^x \beta_{ext}(x') dx' \quad (5)$$

$$\tau_p(x) = \int_0^x \beta_{ext,p}(x') dx' \quad (6)$$

Donde x es el espesor del medio dado en m y $\beta_{ext,p}$ hace referencia a la atenuación causada por partículas. τ y τ_p son adimensionales. El AOD representa la atenuación de la radiación como consecuencia de la suma de la absorción y la dispersión espectral de las partículas a lo largo de una columna vertical de la atmósfera y depende de la longitud de onda ($\tau_p(\lambda, x)$). Esta dependencia se puede describir con el exponente de Ångström (α_{Ang}) y el coeficiente de turbiedad de Ångström (β_{Ang}):

$$\tau_p(\lambda, x) = \beta_{Ang} \cdot \left(\frac{\lambda}{100 \text{ nm}} \right)^{-\alpha_{Ang}} \quad (7)$$

α_{Ang} está relacionado con el tamaño de los aerosoles presentes y β_{Ang} representa el espesor óptico de aerosoles a 1000 nm.

Las variaciones en la distribución del tamaño del aerosol influyen en las propiedades radiativas totales del aerosol y, por tanto, en el espectro de la irradiación.

El espectro de DNI varía dependiendo de AM y AOD, ya que los fenómenos de dispersión y absorción en la

atmósfera dependen de la composición atmosférica y de la longitud de onda.

B. Absorción

Uno de los procesos que provoca la atenuación es la "absorción". Si un átomo, molécula o partícula intercepta con una onda electromagnética, parte de la energía electromagnética incidente puede transferirse al mismo y como consecuencia cambia su estado energético. Se trata de un proceso selectivo, que depende de la presencia de las especies absorbentes y de sus bandas de absorción. Este proceso se describe mediante el coeficiente de absorción (β_a).

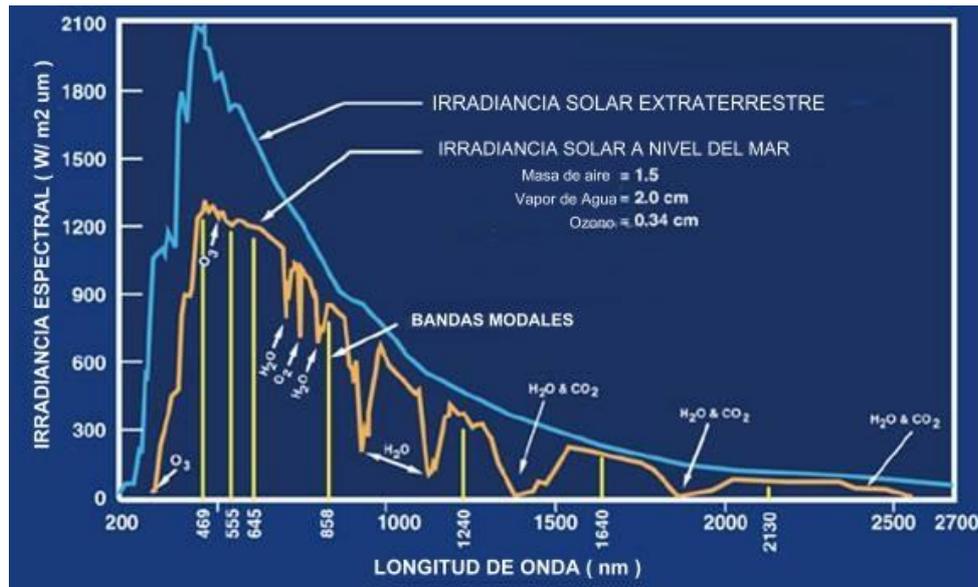


Figura 3.3. Irradiación solar en la parte superior de la atmósfera y en la superficie.

La absorción no es uniforme para todo el espectro debido a que los diferentes gases que absorben la radiación solar provocan la formación de diferentes líneas de absorción en algunas longitudes de onda. En la parte visible y cercana al infrarrojo del espectro solar, el oxígeno molecular tiene tres líneas de absorción principales centradas en 628, 688 y 762 nm que están cerca del pico del espectro de radiación solar. El vapor de agua absorbe la radiación solar en la región cercana al infrarrojo, con bandas de absorción centradas en 940, 1100, 1380, 1870, 2700, 3200 nm. En la zona visible, la contribución del vapor de agua a la absorción es bastante pequeña. El dióxido de carbono absorbe en la región de infrarrojo, a aproximadamente 4300 nm y 15 μm , así como alrededor de 1400, 1600 y 2000 nm.

C. Dispersión

El fenómeno de dispersión se produce cuando una onda electromagnética interactúa con una partícula y se produce la emisión de la energía incidente en todas las direcciones. Se produce de forma continua en todo el espectro solar aunque la intensidad relativa desciende con la longitud de onda.

En la atmósfera, las partículas que pueden dar lugar a la dispersión tienen tamaños comprendidos entre las moléculas de gas ($\sim 10^{-8} cm$) hasta gotas de lluvia ($\sim 1 cm$). Cuando las partículas son pequeñas en comparación a la longitud de onda, éstas tienden a dispersar la misma cantidad de energía en la dirección hacia adelante y hacia atrás mientras que si las partículas son del mismo orden o mayores que la longitud de onda, la dispersión se produce principalmente en la dirección en la que se propaga la radiación incidente. En el primer caso, el proceso se denomina dispersión de Rayleigh y es dominante en las partes altas de la atmósfera mientras que el segundo caso expuesto, que recibe el nombre de dispersión de Mie, se produce en las capas bajas de la atmósfera ya que, dada la naturaleza de las partículas que lo producen, éstas difícilmente se

encuentra por encima de los seis kilómetros en cantidades apreciables.

Dispersión de Rayleigh

La dispersión de Rayleigh resulta de la polarización eléctrica de las partículas. El campo eléctrico oscilatorio de una onda luminosa actúa sobre las cargas de las partículas provocando que oscilen a la misma frecuencia y así la partícula se convierte en un pequeño dipolo radiante cuya radiación visible es la luz dispersada. Si el tamaño de las partículas es mayor que la longitud de onda, la luz no se separa y todas las longitudes de onda no se dispersan.

El grado de dispersión de Rayleigh que sufre un rayo depende del tamaño de las partículas y de la longitud de onda, en concreto, del coeficiente de dispersión (β_s). Rayleigh describió en 1981 que la intensidad de luz dispersada por las pequeñas moléculas de aire es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. Así, las partículas dispersan el azul de la luz solar con mayor intensidad.

La intensidad de la luz dispersada se define como:

$$I = I_0 \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right)^2 \left(\frac{d}{2}\right)^6 \quad (8)$$

Donde R es la distancia a la partícula, θ es el ángulo de dispersión, n es el índice de refracción de la partícula y d es el diámetro de la partícula.

La dispersión de Rayleigh se trata de una dispersión elástica, debida a que la energía de los fotones dispersados no cambia.

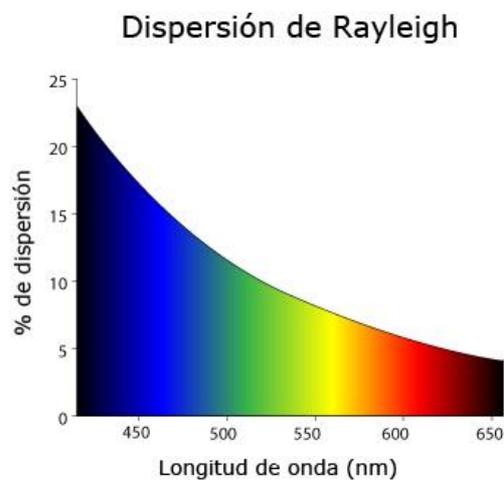


Figura 3.4. Porcentaje de luz dispersada por la dispersión de Rayleigh en función de la longitud de onda.

Dispersión de Mie

Por lo general, las partículas de aerosol, así como las que constituyen las nubes, son de mayor tamaño que la longitud de onda que incide sobre ellas. Según esta teoría, se produce más dispersión hacia delante que en ninguna otra dirección y al aumentar el tamaño de la partícula, la dispersión hacia adelante también lo hace.

La dispersión de Mie es una solución analítica a las ecuaciones de Maxwell para la dispersión de la radiación electromagnética por partículas esféricas. Debido a la dificultad y falta de interés para el objetivo del presente trabajo, el desarrollo de las mismas no se incluye.

D. Vapor de agua precipitable

El vapor de agua precipitable (PWV) o columna de vapor de agua, se define como el agua líquida equivalente al vapor de agua integrado en la columna atmosférica. Se suele dar en $kg \cdot m^{-2}$. En la práctica, casi todo el vapor de agua está en los 5 km más bajos de la atmósfera. Puede determinarse por ejemplo a partir de las medidas del fotómetro de AERONET (Aerosol Robotic Network).

3.1.2 Visibilidad

Existen varias definiciones para describir la visibilidad en diferentes condiciones atmosféricas. Por lo general, la visibilidad se refiere a la definición de un observador humano y por tanto se trata sólo de una estimación aproximada. Otra opción para definirla es a través del alcance óptico meteorológico (MOR). MOR se define como la longitud de la trayectoria a través de la atmósfera sobre la cual la luz de una fuente conocida se reduce a 0,05 de su intensidad original. La fuente de luz estándar se define como una lámpara incandescente a una temperatura de 2700 K. La aproximación de Koschmieder [4] conecta el MOR con el coeficiente de extinción espectral a 550 nm ($\beta_{ext,550nm}$), despreciando la variación espectral del coeficiente de extinción:

$$MOR \approx \frac{-\ln(0,05)}{\beta_{ext,550nm}} \approx \frac{3}{\beta_{ext,550nm}} \approx \frac{-3 \cdot x}{\ln(T_{x,550nm})} \quad (9)$$

Donde x es la distancia recorrida a través del medio y $T_{x,550nm}$ es la transmitancia espectral para la distancia recorrida x a una longitud de onda de 550 nm.

El alcance visual oblicuo (SVR) es el alcance visual de un objeto especificado o de la luz a lo largo de una línea de visión que difiere significativamente de la horizontal. Se define de forma similar al MOR pero con un umbral del 2% en lugar del 5%.

$$SVR \approx \frac{-\ln(0,02)}{\beta_{ext,550nm}} \approx \frac{3,9}{\beta_{ext,550nm}} \approx \frac{-3,9 \cdot x}{\ln(T_{x,550nm})} \quad (10)$$

3.2 Aerosoles

Los aerosoles atmosféricos son partículas sólidas o líquidas suspendidas en la atmósfera con un tamaño comprendido entre 0,001 y 100 μm . La cantidad de aerosoles que se encuentran en suspensión en el aire varía desde menos de $1 \mu g \cdot m^{-3}$, valor que se da en los casquetes polares, hasta los $1000 \mu g \cdot m^{-3}$ que se pueden dar en las tormentas de arena o en los humos cargados de ceniza de los incendios forestales.

Los primeros estudios que se llevaron a cabo sobre la capacidad de los aerosoles de modificar el balance de radiación se realizaron atendiendo a las partículas de origen antropogénicos como los sulfatos no procedentes de fuentes oceánicas.

Pueden absorber o dispersar la radiación solar y, en menor medida, la radiación térmica además de influir en la reflectividad y en el tiempo de vida de las nubes. Aunque estas partículas tienen un pequeño volumen o fracción de masa, tienen una gran influencia en la transferencia de energía radiante a través de la atmósfera. Cada componente del aerol presenta una dispersión específica y espectro de absorción dependientes de la longitud de onda.

Dependiendo de la región bajo estudio, el aerosol atmosférico será una cierta mezcla de diferentes tipos de partículas de distintos orígenes y distribuciones de tamaño. La concentración de partículas varía tanto horizontalmente como verticalmente y normalmente disminuye con la altura.

4 ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA EN CAMPOS DE HELIOSTATOS

De las cuatro tecnologías principales de CSP existentes (cilindro parabólico, disco Stirling, lineal fresnel y torre), la atenuación atmosférica solo juega un papel importante en las centrales de torre. Esto se debe a que mientras que en las otras tres modalidades la distancia entre los colectores solares y el receptor es de escasos metros, en las centrales de receptor central puede ser de hasta 2 km dependiendo de la planta. La radiación que es reflejada por los heliostatos debe atravesar por segunda vez la capa atmosférica inferior que cuenta con un alto contenido de partículas de aerosol y vapor de agua y, por tanto, las pérdidas por atenuación serán mayores.

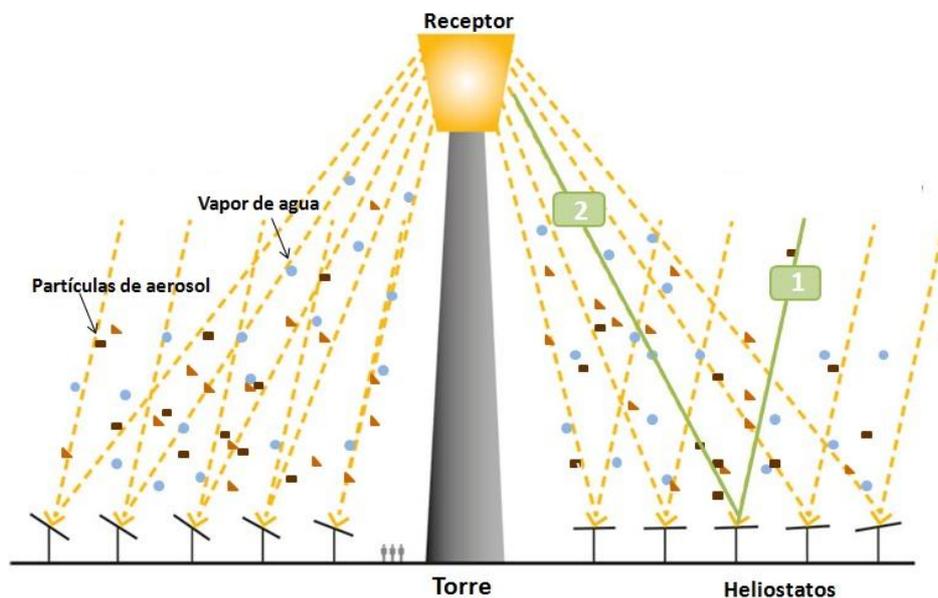


Figura 4.1. Esquema del efecto de la atenuación atmosférica en las centrales de torre.

En la Sec. 4.1 se exponen diferentes ecuaciones y modelos que han sido implementados en diferentes herramientas de simulación para determinar las pérdidas de radiación debidas a la atenuación atmosférica y en la Sec. 4.2 se resumen algunos modelos elaborados con el mismo propósito.

4.1 Atenuación atmosférica en herramientas de simulación

Cuando se realizan simulaciones de una planta de receptor central, el principal punto de interés es el coste de la energía producida y cómo podrían minimizarse. Dos de los parámetros más relevantes en los cálculos del rendimiento son la geometría del campo de colectores y qué parte de la potencia total reflejada llega finalmente al receptor [5].

La irradiancia solar concentrada se puede simular empleando códigos de trazado de rayos (p. ej. MIRVAL [6], SolTRACE [7], STRAL [8] o SPRAY [9]), que se basan principalmente en métodos estadísticos o el método de Monte Carlo para calcular la trayectoria del rayo desde el colector hasta el receptor. Al aumentar el número de rayos lanzados, aumentan el tiempo computacional y la precisión de los resultados. Los métodos de convolución (p. ej. DELSOL [10] o HFLCAL [11]) obtienen la distribución de la densidad de flujo en el receptor de forma analítica utilizando entre otros métodos la óptica de conos.

Hasta ahora, la mayoría de las herramientas de trazado de rayos y de optimización para centrales de torre modelan la atenuación atmosférica para condiciones atmosféricas estándar. Algunas permiten elegir entre diferentes niveles de atenuación, en otras como SolTRACE [7] no se tiene en cuenta de forma directa sino a través del ajuste de la reflectividad de los espejos, aproximación que no describe de forma precisa la dependencia de la atenuación con el *slant range*.

A continuación, se exponen una selección de conjuntos de datos disponibles, modelos y ecuaciones implementados en herramientas existentes.

4.1.1 Leary and Hankins (L&H)

En 1978, Vittitoe y Biggs [12] generaron un conjunto de datos basados en cálculos con LOWTRAN3 e integraciones numéricas de datos de transmitancia espectral.

El conjunto de datos se generó para distintas condiciones: dos elevaciones del lugar (619 m y 1524 m por encima del nivel del mar), dos atmósferas estándar diferentes y tres condiciones de aerosol (sin aerosol, cielo despejado (SVR = 23 km) y cielo brumoso (SVR = 5 km)), sin especificar el tipo de aerosol asumido. Los datos se obtuvieron para tres alturas de la torre (100 m, 300 m y 883 m) y cinco *slant ranges* hasta un máximo de 2 km. A partir del conjunto de datos se realizó un ajuste polinómico para definir el modelo L&H [6]. Existen varias versiones de este modelo en uso.

A. Código MIRVAL

El modelo L&H fue desarrollado originalmente por el Laboratorio Nacional de Sandia para ser incluido en este código [6] que es utilizado para comparar diseños de óptica de heliostato-receptor. El modelo describe la transmitancia con la siguiente ecuación polinómica:

$$T_{x, \text{MIRVAL}} = 1 - \text{ABSORB} (-1,97 \cdot 10^{-8}x^2 + 1,18 \cdot 10^{-4}x + 6,79 \cdot 10^{-3}) \quad (11)$$

Donde x se corresponde con el *slant range* en metros y ABSORB es un factor que puede ser definido por el usuario. Vittitoe y Biggs recomiendan en el manual de MIRVAL establecer un ABSORB de 1 para *slant ranges* de hasta 1 km, alturas del receptor de 100 a 300 m y una elevación del lugar de aproximadamente 600 m. Con esto se tendría un valor de MOR de 27,1 km.

B. Código STRAL

En el software STRAL [8] (desarrollado por el Centro Aeroespacial Alemán (DLR)), una forma de aproximar la atenuación atmosférica es aplicar el modelo L&H como se describe en la siguiente ecuación:

$$T_{x, STRAL} = \begin{cases} 0,99 + 1,97 \cdot 10^{-8}x^2 - 1,18 \cdot 10^{-4}x & x \leq 1km \\ \exp(-0,00011x) & \end{cases} \quad (12)$$

Donde x se introduce en metros. En la ecuación, el factor ABSORB del código MIRVAL se establece en 1 para *slant ranges* menores o iguales a 1 km y se considera una disminución exponencial para distancias mayores a este valor. STRAL también permite introducir una relación de transmitancia definida por el usuario.

C. Código SPRAY

La herramienta de trazado de rayos SPRAY [9] se desarrolló para evaluar el rendimiento óptico de plantas de receptor central y se basa en el código MIRVAL [6]. Hasta ahora, la herramienta cuenta con seis opciones para aproximar la atenuación atmosférica entre el campo de heliostatos y el receptor:

1. Se desprecia la atenuación atmosférica.
2. El modelo L&H se modifica ligeramente para hacer coincidir un valor de transmitancia igual a 1 para un *slant range* de 0 m. El valor del factor ABSORB es 1 por defecto pero el usuario puede modificarlo.

$$T_{x, SPRAY} = \begin{cases} 1 - ABSORB(-1,97 \cdot 10^{-8}x^2 - 1,24 \cdot 10^{-4}x) & x \leq 1km \\ 1 - ABSORB(1 - \exp(-0,00011x)) & \end{cases} \quad (13)$$

3. Ecuación del código STRAL.
4. Ecuación exponencial dependiente del *slant range*:

$$T_{x, SPRAY exp} = \exp(-ABSORB \cdot x) \quad (14)$$

Donde x debe introducirse en metros. El factor ABSORB puede elegirse en función de las condiciones atmosféricas.

5. En SPRAY también se puede seleccionar condición atmosférica brumosa que se describe con la ecuación del modelo DELSOL3 enunciada más adelante.
6. El usuario también puede definir una relación de transmitancia dependiente del *slant range*.

4.1.2 Pitman and Vant-Hull (P&V)

Pitman y Vant-Hull [13] desarrollaron un modelo de transmitancia para estimar la atenuación de la radiación solar que recorre la trayectoria desde el heliostato al receptor. Las ecuaciones del modelo se obtuvieron a partir de ajustes funcionales a los datos de Vittitoe y Biggs [12]. Dado que Vittitoe y Biggs eligieron dos condiciones atmosféricas estándar, tres modelos de aerosoles y dos elevaciones distintas para generar el conjunto de datos, sólo se podrían seleccionar 12 condiciones específicas para aproximar la atenuación si no se realizara el ajuste. Teniendo en cuenta además las tres alturas de torre y los cinco *slant ranges*, se dispondrían de 180 datos como base para los ajustes. En el modelo P&V se incluyen cinco variables físicas: densidad de vapor de agua atmosférico (ρ), coeficiente de difusión de partículas de aerosol para una longitud de onda de 550 nm ($\beta_{s,550}$), la elevación del lugar (H), la altura de la torre (h) y el *slant range* (x). El modelo P&V se obtiene a partir de un conjunto de ajustes usando estas variables, que pueden ser definidas por el usuario para adaptar mejor el modelo a las condiciones reales, y otras diez constantes fijadas. Los ajustes se desvían menos del 1% de los 180 datos obtenidos por Vittitoe y Biggs [13].

Los valores de las variables pueden obtenerse a partir de mediciones in situ de los parámetros meteorológicos y, por tanto, la atenuación puede determinarse de forma más específica para el lugar bajo estudio que con el resto de modelos expuestos hasta ahora. Es posible p.ej. aplicar la aproximación de Koschmieder para obtener el coeficiente de dispersión de partículas de aerosol para 550 nm a partir de mediciones del MOR con sensores de visibilidad o transmisómetros.

A. Código HFLCAL

En el código HFLCAL (Heliostat Field Layout CALculation), desarrollado por el DLR [11], existen varias posibilidades para incluir la atenuación atmosférica. La opción por defecto es la ecuación de STRAL pero pueden elegirse otras opciones, como despreciar dicho fenómeno, aplicar un valor definido por el usuario o utilizar el modelo P&V (incluyendo una entrada adicional de densidad de vapor de agua y coeficiente de difusión).

B. Código Greenius

El software Greenius (herramienta desarrollada por DLR) [14] es un entorno de simulación para calcular y analizar el rendimiento anual de proyectos de energía renovable. Resulta de gran utilidad para realizar simulaciones técnicas y económicas de plantas CSP. El campo solar, la geometría del receptor y sus datos de rendimiento se generaron a partir de HFLCAL por lo que la atenuación atmosférica se incluye de la misma forma que con dicho código.

4.1.3 Hottel

Hottel [15] presentó un modelo para estimar la transmitancia para atmósferas estándar claras. El modelo depende de la elevación del lugar y las condiciones para dos visibilidades distintas (23 y 5 km) basadas en cálculos de LOWTRAN2.

A. Código DELSOL3

Este software (desarrollado por Sandia National Laboratories) [10] se emplea para calcular el diseño óptimo del sistema y el rendimiento de las plantas de receptor central. Las ecuaciones modelo implementadas en DELSOL se desarrollaron para dos condiciones diferentes (despejado y brumoso) en Barstow, CA, USA y se apoyan en el conjunto de datos de Vittitoe y Biggs [12] y la publicación de Hottel [15]. Las ecuaciones resultantes son:

$$T_{x, \text{DELSOL}, \text{clear}} = 1 - 0,01(0,67 + 10,46x - 1,70x^2 + 0,28x^3) \quad (15)$$

$$T_{x, \text{DELSOL}, \text{hazy}} = 1 - 0,01(1,29 + 27,48x - 3,39x^2) \quad (16)$$

Con el *slant range* en m. Para el caso despejado resulta una atenuación de DNI del 10% para un *slant range* de 1 km ($T_{1 \text{ km}} = 0,9$) mientras que en el caso nuboso la atenuación es del 25% ($T_{1 \text{ km}} = 0,75$). Esto corresponde a valores de MOR de 29,3 km y 10,2 km, respectivamente.

DELSOL3 también permite un nivel de atenuación definido por el usuario.

B. SAM (System Advisor Model)

La herramienta System Advisor Model (SAM) [16] desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) está diseñada para simular el rendimiento y los costes financieros de las distintas tecnologías que forman parte del mercado de energía renovable. En SAM, la transmitancia puede incluirse a partir de un polinomio de tercer grado dependiente del *slant range*. Por defecto establece la ecuación para el caso despejado de DELSOL.

C. Código HELIOS

El "Programa de Computación para Modelar el Comportamiento Óptico de Concentradores Solares Reflejantes" de SANDIA que recibe el nombre de HELIOS basado en el conjunto de datos de Vittitoe y Biggs [17], ofrece la opción de elegir entre condiciones despejadas o brumosas para dos localizaciones diferentes: Barstow, CA, EE.UU. (610 m por encima del nivel del mar) y Albuquerque, NM, EE.UU. (1520 m por encima del nivel del mar):

$$T_{x, \text{HELIOS}, \text{clear}, b} = \begin{cases} \exp(-0,17x) & 0,1 > x \\ 1 - 0,01(0,68 + 10,46x - 1,7x^2 + 0,29x^3) & 0,1 \leq x < 2 \end{cases} \quad (17)$$

$$T_{x, \text{HELIOS}, \text{hazy}, b} = \begin{cases} \exp(-0,41x) & 0,1 > x \\ 1 - 0,01(1,29 + 27,48x - 3,39x^2) & 0,1 \leq x < 2 \end{cases} \quad (18)$$

$$T_{x, \text{HELIOS}, \text{clear}, a} = \begin{cases} \exp(-0,14x) & 0,1 > x \\ 1 - 0,01(0,81 + 6,04x - 0,5x^2) & 0,1 \leq x < 2 \end{cases} \quad (19)$$

$$T_{x, \text{HELIOS}, \text{hazy}, a} = \begin{cases} \exp(-0,23x) & 0,1 > x \\ 1 - 0,01(0,90 + 13,80x - 1,18x^2) & 0,1 \leq x < 2 \end{cases} \quad (20)$$

El *slant range* debe introducirse en km. El subíndice a hace referencia a Albuquerque y el b a Barstow.

Las ecuaciones para el caso de Barstow son similares a las descritas en DELSOL3, por ese motivo se incluye en la Sec. 4.1.3, pero no se ha encontrado una conexión directa con el modelo Hottel.

4.1.4 Ballestrín and Marzo

El modelo de Ballestrín y Marzo [18] se basa en simulaciones de transmitancia espectral realizadas con MODTRAN. Se simuló una central de torre a una elevación de 0 m por encima del nivel del mar durante la primavera-verano en un entorno rural. La temperatura ambiente, la presión barométrica y la altura de la torre se ajustaron a 15,15°C, 1013,25 mbar y 100 m, respectivamente. Para simular la transmitancia espectral (en un rango de 300 a 2500 nm) para cinco *slant ranges* distintos (0,15; 0,5; 1; 2 y 4 km) y condiciones despejadas o brumosas (visibilidad de 23 y 5 km, respectivamente), se hizo uso de la base de datos de "Absorción molecular de Transmisión de Alta resolución" (HITRAN). Aquí, la visibilidad se refiere a SVR porque las simulaciones se han realizado con MODTRAN.

Tras ajustar los resultados de las simulaciones, se obtienen las siguientes ecuaciones modelo:

$$T_{x, \text{Ballestrin}, \text{clear}} = 1 - 0,01(0,30 + 15,22x - 1,860x^2 + 0,15x^3) \quad (21)$$

$$T_{x, \text{Ballestrin}, \text{hazy}} = 1 - 0,01(0,78 + 55,49x - 14,79x^2 + 1,54x^3) \quad (22)$$

Donde x se da en km.

Ballestrín y Marzo [18] encontraron discrepancias entre las simulaciones realizadas y las ecuaciones del modelo DELSOL y MIRVAL. Sengupta y Wagner [19] señalan que las diferencias de las simulaciones MODTRAN surgen principalmente de las diferentes elevaciones para las que se realizaron las simulaciones: las simulaciones MODTRAN se han realizado para el nivel del mar mientras que las ecuaciones de DELSOL

y MIRVAL surgen de conjuntos de datos para una localización con un elevación cercana a 610 m sobre el nivel del mar (Bartow, CA, EE.UU.). Además, el código MIRVAL permite escalar la transmitancia según las condiciones atmosféricas locales con el factor ABSORB mientras que Ballestrín y Marzo asumieron que este valor era igual a 1 como se recomienda para *slant ranges* de hasta 1 km, alturas del receptor entre 100 y 300 m y una elevación aproximada de 600 m sobre el nivel del mar [6]. Por tanto, la conclusión de Ballestrín y Marzo de que los códigos DELSOL y MIRVAL son válidos sólo para condiciones atmosféricas específicas es correcta pero como las simulaciones MODTRAN no se han realizado para las condiciones correspondientes, la conclusión de que hay discrepancia es incorrecta.

Las ecuaciones resultantes de este estudio se implementan en el código Tonatiuh [20], herramienta de trazado de rayos que se puede utilizar libremente para diseñar y analizar la eficiencia óptica y energética de las plantas de CSP.

4.1.5 Sengupta and Wagner (S&W)

El modelo de Sengupta y Wagner [19] se basa en las mediciones de DNI en condiciones de cielo despejado para estimar el espesor óptico de aerosol (AOD) en las capas atmosféricas más bajas. La atenuación entre un heliostato y el receptor se estima a partir de dichas mediciones por lo que se trata de un modelo de interés para los operadores de planta debido a su única dependencia con la DNI, datos que normalmente están disponibles para las localizaciones bajo estudio.

Se han realizado simulaciones para varias condiciones de atenuación con el fin de obtener un ajuste lineal para diferentes niveles de AOD. Las simulaciones permiten determinar la transmitancia a partir de la DNI de cielo despejado medido al nivel del suelo (DNI_{means}) y el DNI simulado para una atmósfera libre de aerosol a nivel del suelo (DNI_{sim}).

$$T_{x, S\&W} = \exp\left(\left(9,20 \cdot 10^{-4} \ln\left(\frac{DNI_{means}}{DNI_{clean, sim}}\right) \cos(\theta) - 1,07 \cdot 10^{-5}\right) \cdot x\right) \quad (23)$$

Donde θ es el ángulo zenital solar y x se da en m. Por tanto, la transmitancia para un *slant range* dado se puede obtener a partir de las mediciones de DNI que normalmente están disponibles para el análisis de recursos de CSP.

El método ya está implementado en una versión adaptada en la herramienta de simulación llamada SoFiA [21].

La siguiente figura muestra un esquema a modo de resumen de lo expuesto hasta ahora en este apartado. Los bloques de color verde son modelos y ecuaciones que sólo se derivan de simulaciones de transferencia radiativa, el bloque naranja incluye un modelo para el cual es necesario una entrada adicional de medición de DNI. En la fila inferior se muestran las distintas herramientas de simulación con una breve descripción de las opciones disponibles para describir la atenuación atmosférica. En morado se muestran las herramientas de trazado de rayos y en azul las de convolución.

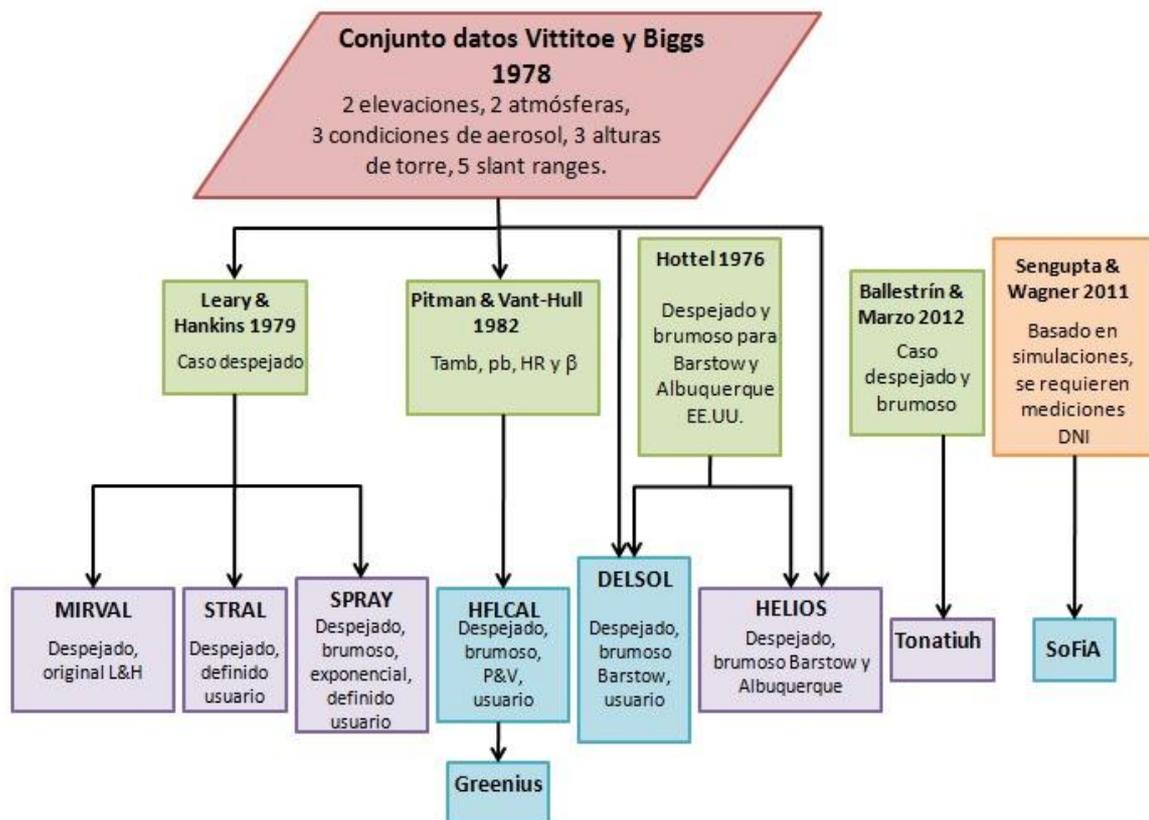


Figura 4.2. Esquema de los diferentes modelos y herramientas de simulación descritos anteriormente [22].

4.1.6 Comparación de los modelos y ecuaciones [22]

En la figura 4.3 se muestra la transmitancia para el día 18 de agosto de 2013, a las 12:00 UTC en función del *slant range* para los distintos modelos descritos. Las ecuaciones modelo para describir la atenuación atmosférica implementadas en DELSOL3, MIRVAL, STRAL, HFLCAL, la del caso despejado de SPRAY y las dos ecuaciones de Ballestrín y Marzo no son dependientes del tiempo.

El modelo P&V se ha simulado para el 18 de agosto de 2013, a las 12:00 UTC en la Plataforma Solar de Almería (PSA). En el modelo, se incluyen las medidas adicionales de Tamb, pb y HR de la PSA y se establece una altura de torre de 215,48 m. La aproximación de Koschmieder se utiliza para convertir las mediciones del MOR realizadas con el sensor de visibilidad FS11 de Vaisala en el coeficiente de extinción. El modelo P&V se basa en la entrada del coeficiente de extinción de partículas de aerosol a 550 nm por lo que, al incluir las mediciones monocromáticas del FS11 (875 nm), se acepta un comportamiento similar del coeficiente de extinción para ambas longitudes de onda.

La ecuación del modelo exponencial de SPRAY está dada para una transmitancia correspondiente a un *slant range* de 600 m calculada con la aproximación de Koschmieder y el MOR corregido obtenido con un FS11 para la misma fecha y hora en la PSA. Las mediciones de MOR del FS11 se basan en un principio de medición monocromática por lo que deben corregirse para el espectro integral o de lo contrario, sólo se podría obtener la transmitancia monocromática con el método exponencial de SPRAY.

La ecuación del modelo MIRVAL, la de STRAL, la del modelo despejado de SPRAY, así como la del modelo despejado de DELSOL se desvían menos de 0,02 entre sí para *slant ranges* de hasta 1,5 km. Lo mismo ocurre

con la ecuación exponencial de SPRAY.

El modelo P&V y el modelo S&W se desvían mas del 5% para la fecha bajo análisis.

Las ecuaciones de Ballestrín y Marzo, así como las ecuaciones del modelo brumoso de DELSOL son modelos más pronunciados y resultan transmitancias mucho más bajas para todos los *slant ranges*.

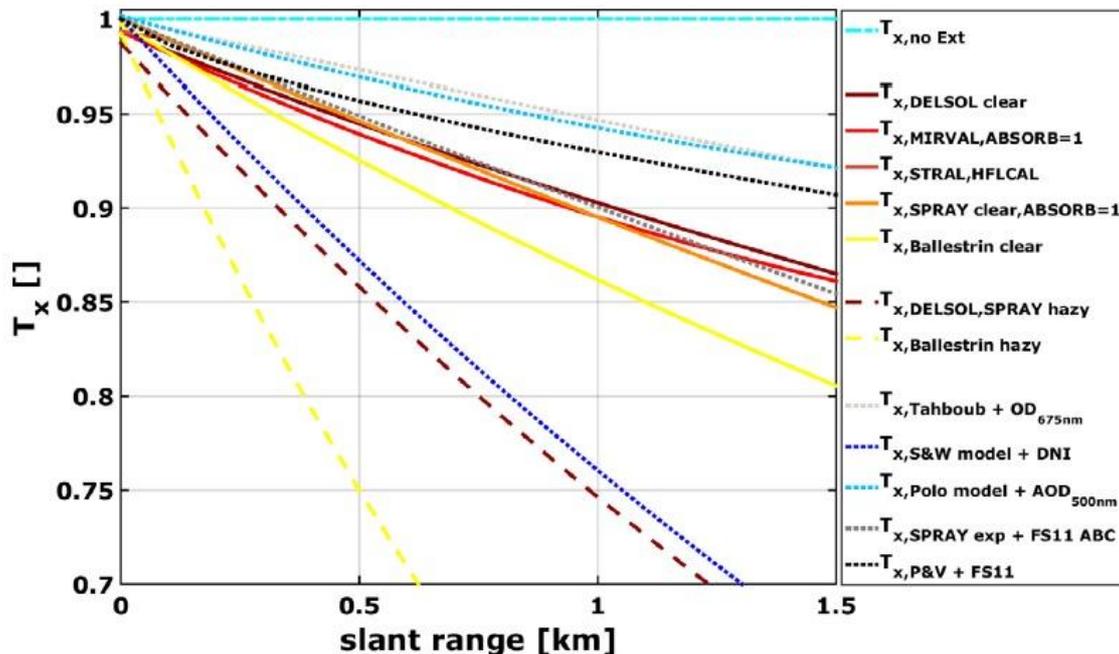


Figura 4.3. Transmitancia obtenida con modelos descritos en las Sec. 4.1. para el 18 de Agosto de 2013, 12:00 UTC en PSA, en función del slant range [22]

La figura 4.4 muestra las ecuaciones descritas para un período de tiempo entre el 18 y el 22 de agosto de 2013 con una resolución temporal de 10 minutos. La ecuación modelo por defecto en MIRVAL, STRAL, HFLCAL, así como el modelo despejado de SPRAY (con el factor ABSORB igual a 1), DELSOL y Ballestrín y Marzo y las del modelo brumoso de DELSOL y Ballestrín y Marzo son estáticas y no se pueden ajustar para la condición atmosférica temporal.

Las ecuaciones modelo despejadas muestran una transmitancia para un *slant range* de 1 km (T_{1km}) de alrededor de 0,90, excepto en el modelo claro de Ballestrín y Marzo que muestra un T_{1km} de 0,86. La ecuación de modelo brumoso de DELSOL3 y SPRAY muestra una transmitancia constante de 0,75 mientras que la ecuación modelo brumoso de Ballestrín y Marzo es de 0,57. T_{1km} en los modelos ajustables (modelo SPRAY exponencial, modelo S&W y modelo P&V) varía con el tiempo entre 0,7 y 0,96. Se puede observar que el modelo SPRAY exponencial en combinación con los datos del FS11 corregidos se encuentra la mayor parte de los intervalos por debajo del modelo P&V. Usando el modelo S&W, el T_{1km} que se obtiene resulta mucho más pequeño que con los otros modelos ajustables. Esto puede explicarse ya que el modelo S&W se desarrolló para un sitio con una elevación más alta que la PSA (Golden, Colorado, USA a aproximadamente 1700 m en comparación con el PSA a 500 m por encima del nivel del mar). Por lo tanto, se simuló un DNI mayor para el caso de una atmósfera de aerosol durante el desarrollo del modelo. Esto da como resultado transmisiones más bajas para el DNI medido real en PSA.

Los modelos ajustables indican que la condición atmosférica en PSA no se puede considerar constante. Las ecuaciones del modelo estático no son capaces de representar variaciones diurnas, mensuales o anuales que probablemente ocurren en la mayoría de lugares bajo estudio. T_{1km} igual a 0.9 podría ser un valor adecuado

para representar la media anual pero esta suposición no es válida para todos los lugares. En los ejemplos se puede observar que las variaciones dependientes del lugar en la atenuación atmosférica sólo pueden considerarse correctamente si se emplean series temporales y no se asumen niveles de atenuación constantes. Tales series de tiempo de atenuación pueden obtenerse de la aplicación de Pitman y Vant-Hull y Sengupta y Wagner, así como de la ecuación del modelo exponencial de SPRAY, pero para aplicar estos modelos a un lugar y tiempo determinados, son necesarias medidas adicionales del coeficiente de extinción, el MOR y DNI.



Figura 4.4. Transmitancia para un slant range de 1 km obtenida con distintos modelos descritos en la Sec. 4.1. para un período de tiempo entre el 18 y 22 de agosto de 2013 en PSA. [22]

Cabe mencionar que en los modelos que se basan originalmente en el conjunto de datos de Vittitoe y Biggs, se asumió implícitamente un perfil exponencial de atenuación para la generación de las ecuaciones del modelo. Para el desarrollo del modelo de Ballestrín y Marzo, se han utilizado perfiles estándar de aerosol y atmósfera de MODTRAN. El modelo de Sengupta y Wagner asume un coeficiente de extinción constante en el primer kilómetro sobre el suelo. El modelo L&H y el modelo despejado y exponencial de SPRAY permiten la entrada del factor ABSORB que se supone homogéneo en todo el *slant range*. En todos los modelos, por lo tanto, es imposible incluir un perfil de atenuación dependiente del lugar y del tiempo que pueda ser interesante en grandes plantas CSP con torres de varios cientos de metros de altura. Hanrieder [22] demostró experimentalmente que la suposición de un perfil de atenuación constante con la altura era válida en los primeros 100 m sobre el suelo para obtener los promedios anuales en PSA. Esto es debido a la mezcla constante de la capa límite inferior. Sin embargo, este no es el caso para todos los sitios.

4.2 Métodos experimentales para caracterizar y describir la atenuación atmosférica

Para describir la dependencia de la atenuación atmosférica con el lugar, es crucial la generación de series temporales. Giuliano, S. [23] enunció que la atenuación horizontal en la capa límite inferior se puede determinar p.ej. con sensores de visibilidad o transmisómetros.

Recientemente, se han realizado estudios e investigaciones para determinar las series temporales de atenuación atmosférica en la capa más baja de la atmósfera con el fin de mejorar las simulaciones de las centrales de receptor central. Estos estudios se resumen a continuación.

4.2.1 Experimento Swaihan de Tahboub et ál.

En la configuración propuesta para el experimento [24], la radiación que llega a un heliostato se refleja de forma horizontal en dirección a cuatro plataformas en línea diseñadas para colocar un pirheliómetro portátil. Cerca del heliostato se coloca una estación radiométrica con un pirheliómetro de referencia y un transmisómetro para medir la DNI y la visibilidad. Estos datos se utilizan en un código de trazado de rayos para simular la propagación de la radiación desde el heliostato a las plataformas.

La radiación del haz reflejado se mide a distintas distancias del heliostato (100, 400, 700 y 1000 m) con el pirheliómetro portátil y los valores obtenidos se comparan con los simulados (suponiendo atenuación nula) pudiendo así determinar la atenuación.

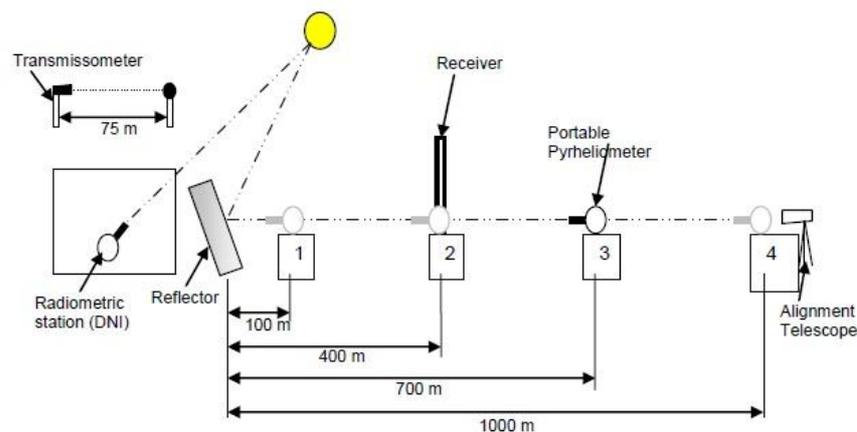


Figura 4.5. Configuración del experimento Swaihan.

Por otra parte, la atenuación también se estima con un modelo analítico para contribuir a la verificación del experimento. Se propone una parametrización analítica de la propagación de la irradiancia directa en un cielo despejado para los primeros 100 m sobre el terreno.

El objetivo es modelar la propagación de la irradiancia en todas las direcciones. Para analizar la dependencia de la dirección de la propagación de la irradiancia en la capa entre el suelo y 100 m se comparan (usando libRadtran) la atenuación de DNI para la misma distancia de propagación y distintos ángulos cenitales solares (SZA) y elevaciones entre 0 y 100 m. La variación que se obtiene es inferior al 1% por lo que se deduce que para una atmósfera dada, cualquiera que sea la dirección, la atenuación sólo depende de la distancia recorrida por la radiación (d_1-d_0) y de la visibilidad.

Basándose en la comparación anterior, se supone una atmósfera homogénea en la capa 0-100 m. La visibilidad, que se obtiene del transmisómetro, se emplea en la ecuación para caracterizar el estado de la atmósfera. Se propone así una parametrización que estima la atenuación a partir de la visibilidad:

$$DNI(d_1) = DNI(d_0) \cdot a^{-(d_1-d_0)} \quad (24)$$

Donde d_0 y d_1 se expresan en km. El parámetro a se ha obtenido empíricamente con simulaciones de libRadtran:

$$\begin{aligned}
 a &= 2 \quad \text{visibilidad} < 3 \text{ km} \\
 a &= 1,55 \quad 3 \text{ km} < \text{visibilidad} < 6 \text{ km} \\
 a &= 1,32 \quad 6 \text{ km} < \text{visibilidad} < 11 \text{ km} \\
 a &= 1,18 \quad 11 \text{ km} < \text{visibilidad} < 20 \text{ km} \\
 a &= 1,09 \quad 20 \text{ km} < \text{visibilidad} < 40 \text{ km} \\
 a &= 1,06 \quad 40 \text{ km} < \text{visibilidad} < 70 \text{ km} \\
 a &= 1,04 \quad 70 \text{ km} < \text{visibilidad}
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

Para evaluar los resultados de la parametrización propuesta, los resultados se comparan con los obtenidos en libRadtran. Se aplica Monte-Carlo para seleccionar al azar 5000 conjuntos de datos definidos por el ángulo cenital solar (SZA) en un rango de 10° a 80° , la visibilidad en un rango de 2 a 100 km y la elevación (z) entre 10 y 100 m. La trayectoria de la radiación se define como:

$$d = \frac{z}{\cos(SZA)} \tag{26}$$

Por tanto, en estas comparaciones d es raramente superior a 0,5 km y sólo alcanza valores altos para grandes SZA que corresponde a bajos niveles de DNI. Para cada conjunto definido por SZA, visibilidad y z , libRadtran calcula DNI para d_0 (de referencia) y d_1 (seleccionada aleatoriamente). El DNI para d_0 y la visibilidad correspondiente se emplean para calcular DNI en d_1 con la parametrización como se ha descrito anteriormente.

Los resultados obtenidos son cercanos a los de libRadtran siendo el error absoluto medio (MAE) y la desviación cuadrática (RMSD) inferiores a $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Sin embargo, estos valores empeoran cuando la distancia desde la referencia aumenta.

Después de realizar el análisis preliminar de los datos recogidos con el método anterior, se encontró que las simulaciones estaban produciendo valores inferiores a las mediciones por diferentes razones como:

- El seguimiento. El heliostato empleado en el experimento corrige su posición cuando la diferencia entre el ángulo de seguimiento real y el ideal es igual o superior a 0,05. En el código de trazado de rayos se utilizó la posición ideal para reducir el tiempo de cálculo. Para abordar este problema, se propone introducir la posición real del heliostato registrando el acimut y el cenit como entrada para el código.
- Número de rayos y resolución del objetivo utilizado en el código. Ambos factores tienen efecto sobre los valores simulados y se está investigando la optimización de los mismos.
- Convexidad del espejo. Se creen que varía con la temperatura y varía durante la realización del experimento. Sin embargo, en el código se introducen los datos obtenidos en el laboratorio a temperatura constante.

4.2.2 Experimento Jebel Hafeet de Tahboub et ál.

Tahboub et ál. [24] han propuesto una configuración experimental en Jabal Hafeet para obtener y validar una relación entre la profundidad óptica atmosférica y el coeficiente de extinción en la capa inferior de la atmósfera.

Jebel Hafeet es la montaña más alta de los Emiratos Árabes Unidos. En este experimento, cuatro pirheliómetros están situados a diferentes altitudes desde 340 m hasta más de 1000 m por encima del nivel del mar para registrar continuamente DNI con alta precisión (los pirheliómetros se limpian diariamente). Se obtiene una relación entre la profundidad óptica atmosférica y la atenuación. En la configuración, el

pirheliómetro 4 se corresponde con el DNI recibido por un heliostato y los otros 3 se corresponden con receptores a diferentes distancias.

Los datos se registraron durante un año con una resolución de diez minutos a partir de febrero de 2012 hasta finales de enero de 2013. La calibración de los mismos se llevó a cabo colocándolos en la estación superior durante varios días y aplicando posteriormente un factor de ajuste a cada uno de los cuatro hasta obtener lecturas idénticas en todos. Para calcular el factor de calibración, se atendió a la diferencia relativa de DNI corregida por temperatura de cada instrumento respecto al valor medio de los cuatro:

$$Diferencia\ relativa = \frac{DNI_n - DNI_{medio}}{DNI_{medio}} \quad (27)$$

A la hora de seleccionar los datos de los pirheliómetros se considera una diferencia relativa límite de $\pm 1\%$. Los datos obtenidos se clasificaron según su valor en intervalos de $50 W \cdot m^{-2}$ y se calculó para cada uno de ellos el porcentaje de puntos con una diferencia relativa superior al 1% excluyendo categorías de irradiancia con un porcentaje de tales puntos superiores al 5%. Así, los datos con irradiancias menores a $50 W \cdot m^{-2}$, equivalente a 965 valores, no se tuvieron en cuenta para el análisis. Para irradiancias superiores a dicho valor, sólo el 3,1% de los datos presentaba un error superior al 1%. El porcentaje de datos seleccionados fue un 96,3% del conjunto original.

También deben suprimirse valores singulares debidos a nubes intermitentes que originan sombras sobre algunos pirheliómetros y otros no y los debidos al bloqueo del sol por objetos cercanos como por ejemplo la sombra producida por la propia montaña sobre algunos pirheliómetros a ciertas horas del día.

Se propone un método para modelar la atenuación basado en la ecuación de Beer-Lambert:

$$DNI_4 = I_0 \cdot \exp\left(\frac{-OD}{\cos(SZA)}\right) \quad (28)$$

Donde DNI_4 es la irradiancia directa normal medida por la estación 4, I_0 es la radiación extraterrestre, OD es la profundidad óptica de la atmósfera y SZA el ángulo cenital solar.

De forma similar, la irradiancia de la estación 4 a la estación n se atenuará de la siguiente forma:

$$DNI_n = DNI_4 \cdot \exp(-\beta_{ext} \cdot d) \quad (29)$$

Donde DNI_n es la irradiancia medida para la estación n (3, 2 o 1), β_{ext} es el coeficiente de extinción entre la estación 4 y la n y d es la distancia de propagación entre la estación 4 y la n igual a :

$$d = \frac{z}{\cos(SZA)} \quad (30)$$

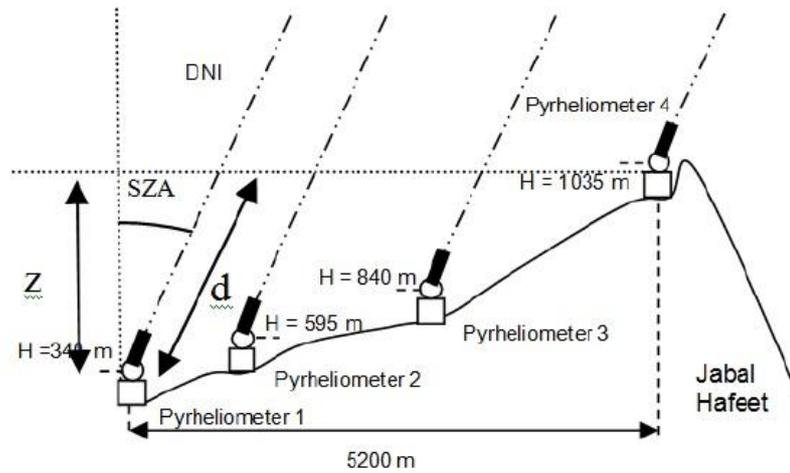


Figura 4.6. Configuración del experimento Jebel Hafeet.

Podría decirse que d se corresponde con el *slant range* (x) en una planta de receptor central.

Considerando la altitud máxima como referencia para la DNI, se calcula el coeficiente de extinción (β_{ext}) y la profundidad óptica atmosférica (OD) para todas las medidas de DNI obtenidas. Se eliminan todos los casos en los que el cambio de DNI de un minuto a otro es mayor del 10% y aquellos donde OD es mayor que 1. El coeficiente de correlación entre β_{ext} y OD es 0,55.

Tras realizar una regresión de los puntos se obtiene la siguiente relación:

$$\beta_{ext} = 0.23 \cdot OD + 0,022 \quad (31)$$

Para validar esta relación, se calculó la DNI de las estaciones 2 y 3 empleando las ecuaciones presentadas y se compararon con los valores reales medidos. Los coeficientes de correlación que se obtienen son de 0,96 y 0,97.

La ecuación resultante para la transmitancia en función de la profundidad óptica atmosférica es:

$$T_{x, Tahboub} = \exp(-(0,23 \cdot OD + 0,022 \cdot x)) \quad (32)$$

Donde x se da en km.

4.2.3 Método de Elias et ál.

Elias et ál. [25] proponen un método para modelar la atenuación atmosférica a nivel de la superficie en Ouarzazate (Marruecos) basado en la profundidad óptica del aerosol (AOD) y la altura de la capa límite (BLH). La BLH fue proporcionada por el Centro Europeo de Pronósticos del Medio Tiempo (ECMWF) y la AOD fue tomada de las estaciones de AERONET.

El método propone utilizar datos de observación para estimar la atenuación en lugares de interés para CSP y con una alta resolución temporal. Se consideran dos lugares para mostrar la aplicabilidad del método en función de la estratificación vertical específica de aerosol y se utilizan datos correspondientes a varios años para exponer la variabilidad interanual y estacional del fenómeno. Los cálculos se realizan a longitudes de onda representativas de 440 y 500 nm.

En el método, se hace la hipótesis de una capa de aerosol única y uniforme (hipótesis UUAL) de altura h , con

lo que la transmitancia se expresaría como:

$$T_x = \exp\left(-\frac{AOD}{h} \cdot x\right) \quad (33)$$

Donde x es el *slant range* en metros. El método propone sustituir h por la altura de la capa límite (BLH) y supone un *slant range* de 1 km:

$$T_{1km} = \exp\left(-1000 \frac{AOD}{BLH}\right) \quad (34)$$

BLH varía con la estación del año. Para validar el método se cuestiona si es posible utilizar la BLH para convertir el AOD en el coeficiente de extinción de aerosol a nivel de la superficie.

La atenuación a nivel de superficie debida a los aerosoles para 500 nm en Ouarzazate se calcula con las ecuaciones propuestas anteriormente obteniéndose cambios interanuales significativos. El aumento de AOD por contribuciones de polvo del desierto se compensa en parte por el aumento simultáneo de BLH que aumentó de menos de 1,5 km en diciembre a 4-5 km en los meses de julio y agosto.

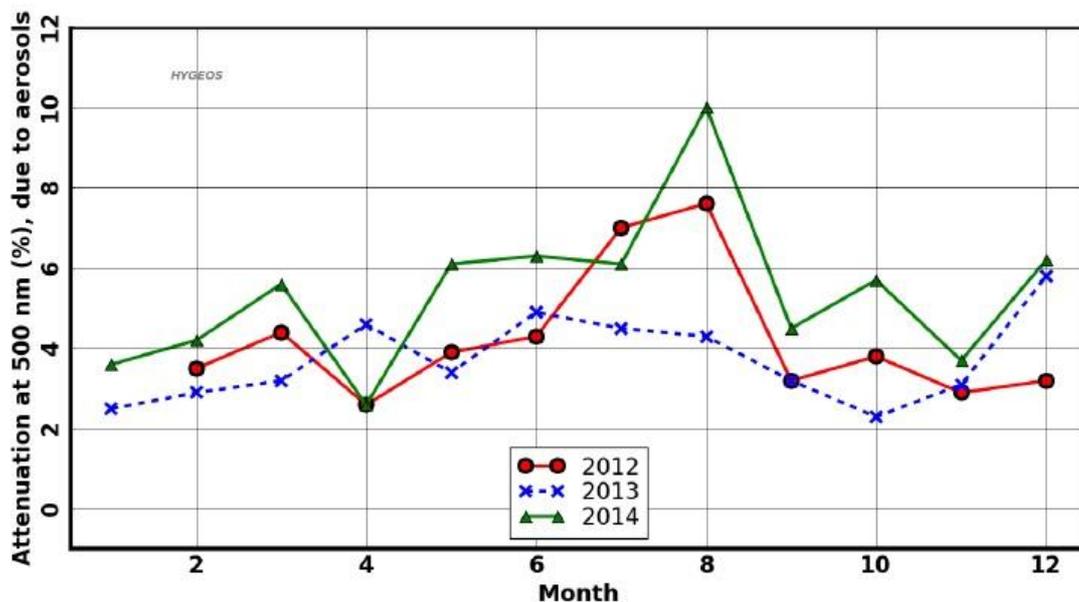


Figura 4.7. Atenuación a nivel de superficie en Ouarzazate para 500 nm y slant range 1 km causada por moléculas de aire y partículas de aerosol. [25]

En la figura 4.7 se observa que mientras que la media anual de la atenuación es del 3,7% en 2013, una estación con contribución de polvo del desierto más larga en 2014 generó una atenuación del 5,4%. El valor mínimo, inferior a un 3%, se observa en invierno y el máximo de más de un 7% en verano. El efecto fue especialmente grande en diciembre de 2013 debido a la combinación del aumento de AOD y disminución de BLH.

Se propone realizar al menos un año de mediciones del coeficiente de extinción de aerosol (con un sensor de visibilidad) para realizar una validación completa del método. Se debe prestar especial atención a los lugares en los que no sea válida la hipótesis de capa de aerosol única y uniforme. De hecho, se demuestra que el método sobreestimaría la atenuación del aerosol a nivel superficial en Banizoumbou (Níger) en la región del Sahel.

4.2.4 Método de Ballestrín et ál.

Ballestrín et ál. [26] están desarrollando un método basado en cámaras digitales llevado a cabo en la Plataforma Solar de Almería (PSA) para medir la atenuación atmosférica. La posibilidad de definir una configuración similar a la de una planta de torre aumenta la fiabilidad del método.

En primer lugar, utilizaron el código MODTRAN para conocer el orden de magnitud a través de simulaciones y así seleccionar los instrumentos de medición adecuados.

Tras diferentes pruebas realizadas en el Laboratorio de Radiometría en PSA para varias cámaras digitales, se seleccionó para la medición de la atenuación una con alta resolución y un rango espectral de 400 a 1000 nm. Sólo el 27% de la atenuación producida entre el heliostato y el receptor tiene lugar para valores fuera del rango elegido, produciéndose un 73% en el rango espectral de la cámara, porcentaje representativo de la atenuación total.

Una vez seleccionada la cámara, el objetivo es tomar simultáneamente imágenes del mismo objetivo a diferentes distancias usando dos cámaras idénticas con lentes adecuadas. La diferencia de intensidad entre dos imágenes tomadas con el mismo tiempo de exposición está relacionada con la distancia relativa entre las dos cámaras y el coeficiente de extinción (β_{ext}) puede obtenerse de la ley de Beer-Lambert:

$$\beta_{ext} = -\frac{\ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}{d_2 - d_1} \quad (35)$$

Donde I_2 e I_1 son las intensidades promedio de las imágenes y d_2 y d_1 las distancias de las cámaras al objetivo. El β_{ext} podría utilizarse junto al *slant range* x para calcular la atenuación para cada heliostato como:

$$\text{Atenuación}_i (\%) = 100(1 - e^{-\beta_{ext} \cdot x_i}) \quad (36)$$

En lugares con buena visibilidad, la metodología podría aplicarse a grandes distancias horizontalmente evitando el uso de la torre ya que la componente vertical podría despreciarse.

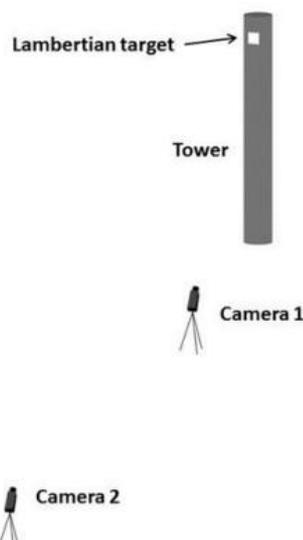


Figura 4.8. Configuración de las cámaras digitales y el objetivo en el método de Ballestrín.

4.2.5 Método del sensor de visibilidad de Hanrieder et ál.

Hanrieder et ál. [27] han desarrollado 4 métodos para determinar la transmisión atmosférica de la radiación con la ayuda de mediciones en superficie. Cada uno de ellos combina simulaciones de RT con el software libRadtran y mediciones in situ de diferentes instrumentos comercialmente disponibles para proporcionar transmitancias dependientes del tiempo y del *slant range*.

El primer método se basa en corregir las mediciones del MOR del sensor de visibilidad FS11 Vaisala para determinar la transmitancia atmosférica en las centrales de receptor central. El FS11 se basa en una emisión monocromática de una fuente de luz en un espectro cercano al infrarrojo y mide la intensidad de los procesos de dispersión en un pequeño volumen de aire causado principalmente por partículas de aerosol. El MOR se puede transformar a T1km con la aproximación de Koschmieder despreciando el hecho de que ésta es válida para 550 nm en lugar de 875 nm (longitud de onda de medición del FS11).

Se precisa de un software ABC para corregir los resultados de T1km por la falta de consideración de la absorción por parte del FS11 así como traducir la medición monocromática en transmitancia integral (entre 250 y 4000 nm) que es la necesaria para evaluar los recursos en un proyecto de CSP. El software ABC utiliza el paquete libRadtran y se requieren datos de temperatura ambiente, humedad relativa y presión barométrica del lugar. Además, existe la opción de incluir los datos del fotómetro solar de la red AERONET. Los factores de corrección varían con el lugar donde se apliquen ya que el espectro solar así como las condiciones moleculares y de absorción de aerosoles serán diferentes.

El instrumento es adecuado para ser montado en ambientes hostiles como regiones desérticas debido a su baja demanda de mantenimiento y consumo de energía.

En PSA, se han colocado dos FS11 Vaisala, uno está en funcionamiento desde verano de 2012 a una altura de 2,5 m y otro instalado desde verano de 2013 en la parte superior de la torre CESA1. Los datos se recogen con una frecuencia de muestreo de 15 segundos y se guardan como promedio de 1 minuto durante las 24 horas del día. Las mediciones obtenidas mediante el FS11 corregidas, se consideran los datos más precisos y completos establecidos en PSA por lo que se utilizarán como conjunto de datos de referencia para futuras evaluaciones. Este conjunto se constituye de 19107 valores de transmitancia entre el 22/05/2013 y el 22/05/2014, con una resolución temporal de 10 minutos y SZA inferiores a 85°.

La incertidumbre absoluta que se estima para las mediciones del FS11 corregidas por el ABC es de 0,04 para T1km igual a 0,9 (valor típico para atmósferas despejadas) y una resolución temporal de diez minutos. La incertidumbre cae a 0,02 para los promedios anuales.

4.2.6 Método del transmisómetro de Henrier et ál.

El segundo método [27] para obtener la transmitancia atmosférica en las centrales de torre, emplea el transmisómetro LPV4 de Optec [28] aplicando también el software ABC. Funciona enviando un haz de energía (por lo general un láser) a través del medio de propagación. Un receptor determina cuánta energía está llegando del detector y determina el coeficiente de extinción. La atenuación atmosférica es un fenómeno dependiente de la longitud de onda. La longitud de onda empleada por el LPV4 es 532 ± 10 nm, que está en el centro de la banda de ondas visibles, por lo que es necesario corregir para obtener una transmitancia integral. Como la longitud de onda emitida (532 nm) es más representativa del espectro solar y la absorción atmosférica se considera en la medición del transmisómetro, la corrección ABC es por consiguiente menor que para el FS11. Sin embargo, el LPV4 exige grandes esfuerzos de mantenimiento, ya que debe limpiarse al menos una vez por semana.

Desde verano de 2012 también hay instalado en PSA un transmisómetro LPV4 que funciona 24 horas al día situado a 485 m del receptor, que se acerca al límite de máxima distancia disponible con campo de visión libre en PSA. La trayectoria de medición es casi horizontal y de 2,5 m (transmisor) y 3 m (receptor) por encima de la superficie.

La incertidumbre absoluta de este método se estima alrededor de 0,07 para T1km igual a 0,9 y una resolución temporal de diez minutos. Se supone que la incertidumbre para los promedios anuales está en torno a 0,054. De todos modos, hay que mencionar que la incertidumbre del conjunto de datos de transmitancia determinado

se puede disminuir significativamente si el emisor y la unidad receptora están montados a una distancia mayor que la que se ha montado en el estudio descrito (485 m en PSA). Si se asegura el mantenimiento diario, el método es aplicable para determinar la atenuación atmosférica durante el funcionamiento de la planta. Para la evaluación de recursos, su aplicación es complicada debido al alto esfuerzo de mantenimiento.

En la siguiente figura se muestra el comportamiento diario medio de T1km no corregida obtenida tanto con el LPV4 como con el FS11 durante un año.

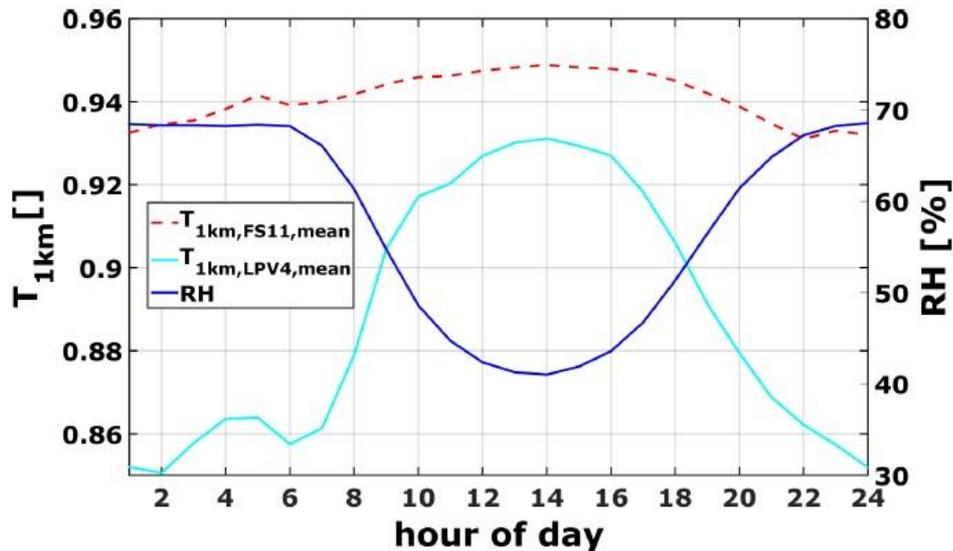


Figura 4.9. Comportamiento diario medio de T1km sin corregir medida con FS11 y LPV4 desde el 22/05/2013 hasta 22/05/2014 en PSA [27].

El patrón diario y estacional de la atenuación es dependiente en gran medida de la humedad relativa (RH en la gráfica). Además, el aplanamiento de la capa límite atmosférica durante la noche, provoca una mayor concentración de aerosol cercana al suelo, lo que produce una transmitancia menor durante la noche. Como el efecto de la humedad relativa no se incluye en las medidas realizadas por el FS11, se observa un comportamiento más constante a lo largo del día

4.2.7 Método del contador de partículas de Hanrieder

Hanrieder desarrolló un tercer método [27] empleando instrumentos de medición in situ utilizando las medidas de distribución de tamaño de aerosol del contador de partículas EDM164 de Grimm [29] que se combinaron con simulaciones de transferencia radiativa realizadas con libRadtran [30].

Las partículas pequeñas con diámetros de menos de $1\mu\text{m}$ son altamente absorbentes y por tanto contribuyen notablemente a la atenuación. Como el EDM164 sólo es capaz de detectar partículas con diámetros mayores de $0,25\mu\text{m}$, el efecto de absorción de las partículas más pequeñas tiene que aproximarse artificialmente.

En PSA, se colocaron dos contadores de partículas EDM164 a 1m y 87 m de altura respectivamente. Las distribuciones de tamaño de partícula se recogen con una frecuencia de muestreo de seis segundos y se almacenan con una resolución temporal de un minuto.

Para evaluar el método, se examinó un conjunto de datos tomados desde el 22/05/2013 hasta 22/05/2014 que suman un total de 48502 puntos. Tras obtener la transmitancia para un *slant range* de 1 km (T1km), se compara con el conjunto de datos de referencia del FS11 explicado anteriormente. Tras seleccionar los puntos en los que los datos de referencia también están disponibles y excluyendo aquellos para SZA menores de 85° , quedan 14746 puntos disponibles para el análisis.

En la siguiente figura se muestra una comparación entre los resultados del conjunto de datos de referencia y el método descrito en esta sección para PSA.

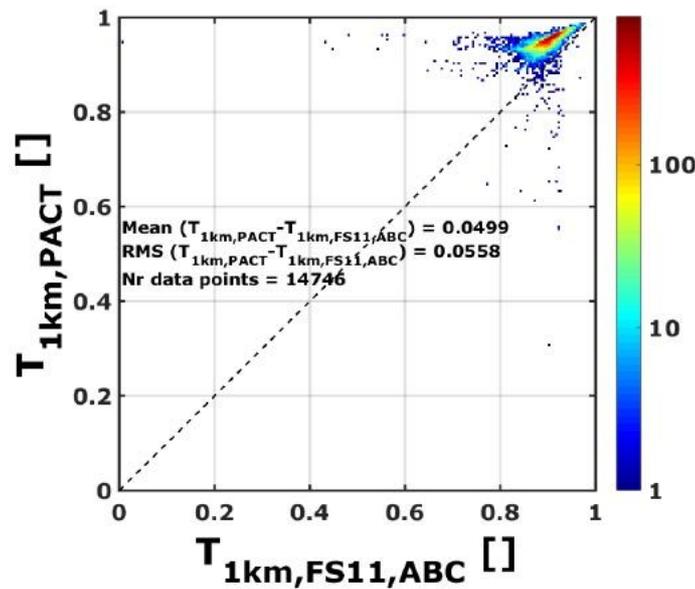


Figura 4.10. Comparación del método del contador de partículas con el conjunto de datos de referencia para PSA [27].

La diferencia media para las T1km obtenidas de ambos métodos representa aproximadamente un 0,0499. La mayor transmitancia obtenida con el EDM164 puede explicarse con la aproximación de las partículas muy pequeñas así como el desconocimiento sobre la mezcla de aerosol exacta. Se observa que ambos métodos se aproximan más para valores de T1km mayores por lo que se concluye que el método describe de forma adecuada los casos de atmósfera despejada. Los puntos más dispersos se pueden explicar por los distintos lugares y alturas de ambos sensores (FS11 a 2,5 m y EDM164 a 1 m).

Debido a las suposiciones que deben hacerse en relación con la mezcla de partículas de aerosol predominante y el perfil de altura de aerosol presente, el método no resulta lo suficientemente exacto. La incertidumbre absoluta del método aumenta con la disminución de T1km, siendo igual a 0,051 para valores de T1km iguales a 0,9 y llegando hasta 0,6 para T1km cercanos a 0.

4.2.8 Modelo P&V de Pitman and Vant-Hull

Este modelo [13] puede usarse combinando medidas de sensores de visibilidad o transmisómetros para obtener datos de transmitancia en función del lugar y el tiempo. Hay que tener en cuenta que las variaciones temporales del espectro no están incluidas en el modelo y, por tanto, el sensor utilizado para obtener el coeficiente de dispersión debe elegirse cuidadosamente.

4.2.9 Modelo de transmitancia basado en DNI de Hanrieder et al. y Sengupta y Wagner

Los métodos expuestos anteriormente por Hanrieder se basan en mediciones de MOR o distribuciones del tamaño de partículas. Ya que estos datos podrían no estar disponibles para cada lugar de interés, sería apropiado un método que se base en datos que están generalmente disponibles para los emplazamientos en los que se instalan las plantas CSP. Además, se evitarían los costes de instrumentación adicional.

Sengupta y Wagner [19] presentaron el modelo S&W que se describe detalladamente en la Sec 4.1.5. Este modelo exige mediciones de DNI, así como información sobre la temperatura ambiente, presión barométrica y humedad relativa.

A partir de este, Hanrieder presenta una versión mejorada [31]. Las mediciones de DNI dependen en gran medida de la concentración de partículas de aerosol así como del contenido de vapor de agua precipitable (PWV) en la atmósfera. El modelo S&W se desarrolló para un sólo nivel de PWV en un lugar específico mientras que en el modelo mejorado se consideran diferentes niveles de PWV, así como las variaciones del tipo de aerosol con la altura. El método se basa en cálculos de transferencia radiativa que deben realizarse específicamente para el lugar de interés, en este caso PSA.

Como ya se ha descrito el modelo S&W se basa en la siguiente ecuación:

$$T_x = \exp\left(\left(a \cdot \ln\left(\frac{DNI_{meas}}{DNI_{clean, sim}}\right) \cdot \cos(\theta) - b\right) \cdot x\right) \quad (37)$$

El *slant range* debe darse en m. Para ajustar el modelo de acuerdo con el PWV real in situ, se emplea una tabla look-up (*LUT: Estructura de datos que contiene toda una serie de valores previamente calculados, a los que se accede sin la necesidad de realizar un cálculo adicional*) para los parámetros a y b. Además, se implementan tres perfiles diferentes de altura y se proponen tres modelos distintos de transmitancia (TM1, TM2 y TM3). Los cálculos de RT se realizan aplicando las siguientes variaciones:

PWV varía de 0 a 30 mm (10 mm de resolución) para los tres casos y diferentes AODs (0; 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; y 1). El PWV de la columna atmosférica puede calcularse mediante la T_{amb} y la presión de saturación que se obtiene a su vez con la T_{amb} y HR. Para los cálculos de RT se aplican tres perfiles de altura de aerosol:

- Perfil de atenuación constante: Todas las partículas de aerosol se encuentran homogéneamente mezcladas en una capa de 1 km de espesor sobre la superficie. Este es el perfil empleado por S&W. Es el perfil incluido en cálculos de RT para obtener TM1.
- Perfil estándar: La distribución del aerosol con la altura se adopta del perfil estándar de Shettle. Es el utilizado para obtener TM2.
- Perfil de LIVAS: Perfil de distribución de aerosoles para 532 nm que es proporcionado por la base de datos LIVAS presentada por Amiridis para PSA. Este perfil se modifica ligeramente para incluirlo en los cálculos de TM3.

En la siguiente figura se muestran los perfiles ajustados al mismo AOD de 0,18 y un PWV de 23 mm para poder realizar una comparación equitativa. El perfil de atenuación constante y el estándar se representan para el β_{ext} de 500 nm mientras que el perfil LIVAS emplea 532 nm. En el caso del perfil LIVAS se observa una disminución repentina del coeficiente de extinción para una altura de 876 m pero se atribuye a errores sistemáticos por lo que se mantiene constante desde 876 m al nivel del suelo (perfil modificado LIVAS, empleado para TM3).

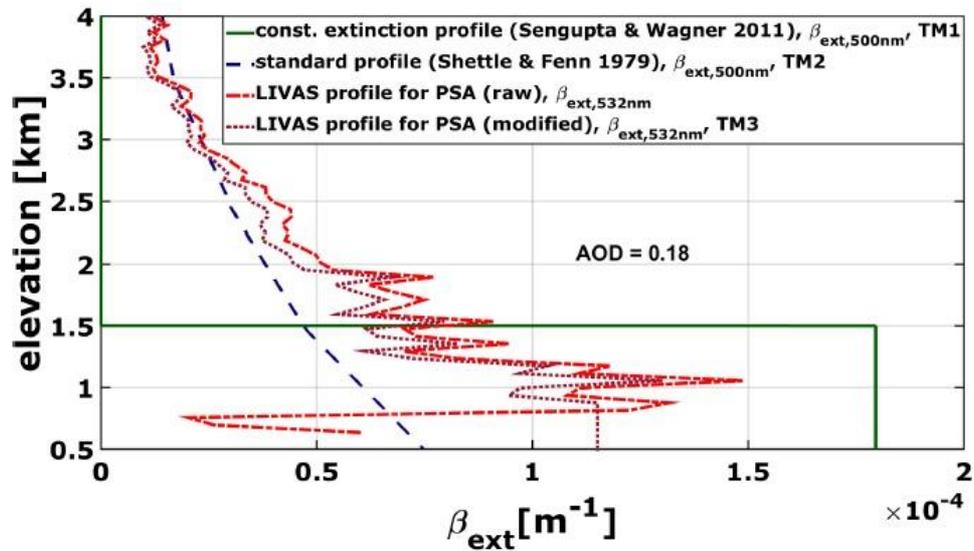


Figura 4.11. Perfiles de altura de aerosol para PSA empleados para desarrollar TM1, TM2 y TM3 [27].

Con las simulaciones de RT y los tres perfiles presentados, se producen tres modelos de transmitancia diferentes (TM1, TM2 y TM3) y sus correspondientes LUT. Con la ayuda de uno de los modelos, se puede calcular la transmitancia para un *slant range* con mediciones de DNI, HR, Tamb y pb para PSA.

Las mediciones de DNI se realizan con el pirheliómetro CHP1 de Kipp y Zonen y para validar las TM desarrolladas se utilizó un conjunto de datos de 1 año a partir del 22/05/2013. Las mediciones de HR, Tamb y pb se toman con los sensores CS100 y CS215.

La incertidumbre estimada del método varía alrededor de 0,04 para T1km igual a 0,9 y 1 minuto de resolución temporal. En el método se incluye una corrección lineal adicional para los niveles de turbidez, lo que mejora el rendimiento de los modelos.

Hay que mencionar que para otros lugares con condiciones climatológicas diferentes, se recomienda obtener los parámetros del modelo para el lugar específico.

4.2.10 Modelo de AOD de Polo et ál.

En el método de Polo et ál. [32], se considera una distribución vertical homogénea de partículas de aerosol en los primeros 3 km por encima del suelo y que no hay presencia de partículas de aerosol por encima de dicha altura. Con esta hipótesis, se puede obtener el rango de variabilidad de la carga de aerosol atmosférico para las condiciones climatológicas de interés en la red AERONET. Se trata de una red de fotómetros solares que miden las propiedades ópticas de aerosol en más de 800 estaciones terrestres en todo el mundo.

De AERONET se toman las medidas de AOD a 340, 380, 440, 500, 675, 870 y 1020 nm y se estiman los parámetros de turbidez (β) y el exponente de Angström (α) mediante:

$$AOD(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (38)$$

En la siguiente figura se muestra el promedio mensual de los parámetros de Angström obtenidos a partir del espesor óptico de aerosol (AOD) en tres estaciones AERONET de regiones de interés para CSP (Railroad-Valley, Jaipur y Tamanrasset) que oscilan entre atmósferas bastantes claras y nubosas.

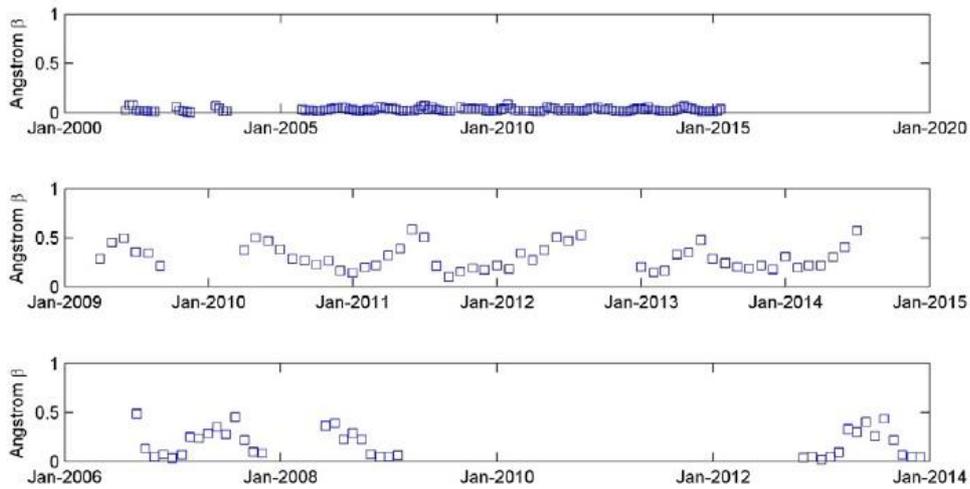


Figura 4.12. Evolución del parámetro de turbidez en tres estaciones AERONET diferentes. [32]

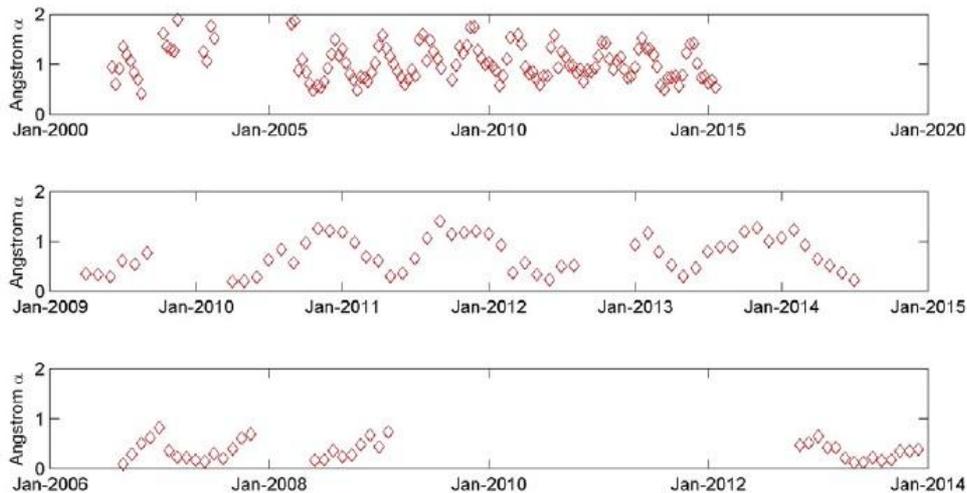


Figura 4.13. Evolución del exponente de Angström en tres estaciones AERONET diferentes. [32]

A partir de esta información, se seleccionaron cinco casos diferentes para las condiciones de carga de aerosol que cubren la mayor parte de las condiciones esperadas según la base de datos AERONET:

- **Caso #1:** $\beta=0,03$; $\alpha=1,20$; $AOD(550\text{ nm})=0,06$
- **Caso #2:** $\beta=0,06$; $\alpha=1,30$; $AOD(550\text{ nm})=0,13$
- **Caso #3:** $\beta=0,20$; $\alpha=0,35$; $AOD(550\text{ nm})=0,25$
- **Caso #4:** $\beta=0,30$; $\alpha=0,70$; $AOD(550\text{ nm})=0,45$
- **Caso #5:** $\beta=0,60$; $\alpha=0,30$; $AOD(550\text{ nm})=0,72$

Así, los casos para analizar la variabilidad de la atenuación atmosférica en plantas de torre incluyen tres parámetros principales: *slant range* (12 valores entre 150 m y 3 km), AM (entre 1 y 4) y AOD para 550 nm.

La validez de la suposición de homogeneidad vertical disminuye al aumentar el *slant range*. Sin embargo, en la práctica, el campo de heliostatos se distribuye en un radio menor de 1,5 km.

Se calcularon las transmitancias espectrales con libRadtran para un ángulo cenital igual a 0 (Demostraron que los cálculos de transmitancia espectral para trayectorias oblicuas son equivalentes a la vertical con diferencias menores a un 1%) y alturas correspondientes a los *slant ranges* seleccionados introduciendo para cada caso los parámetros de Anströng obtenidos. Para obtener la transmitancia integral, se incluye la reflectancia espectral del heliostato medida en el laboratorio con un espectrofotómetro para posteriormente, a partir de esta, calcular la atenuación atmosférica.

En la siguiente figura se muestran a modo de ejemplo la atenuación atmosférica obtenida en función del *slant range* y la AM para dos casos de los cinco seleccionados:

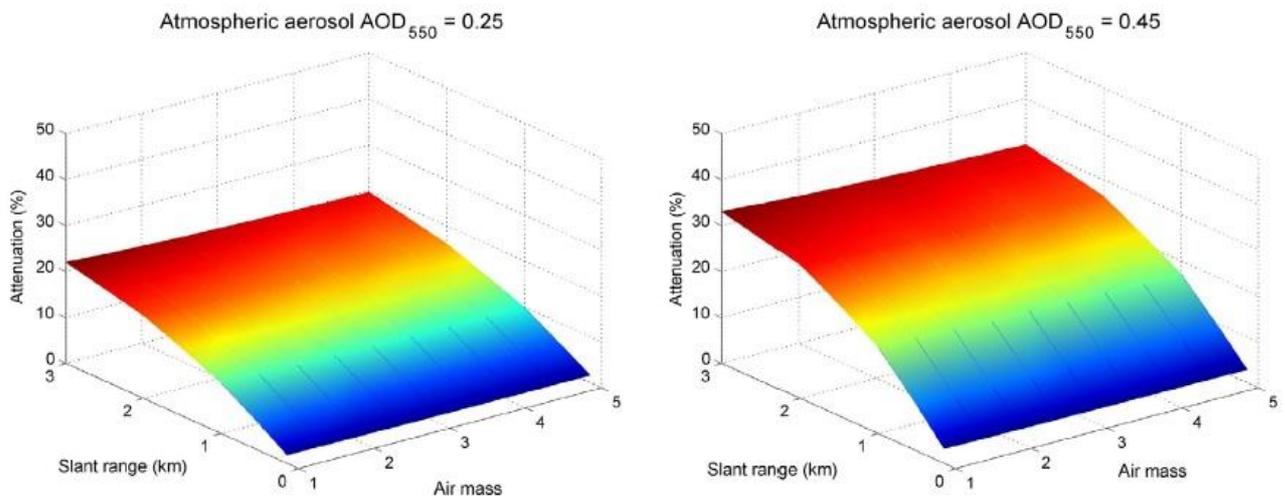


Figura 4.14. Atenuación atmosférica en función del *slant range* y la AM para dos casos de AOD. [32]

Las pérdidas por atenuación para un *slant range* de 1 km son inferiores al 5% para atmósferas limpias y alrededor del 20% en condiciones más desfavorables. La AM tiene poca influencia en la atenuación comparada con los otros dos parámetros y aumenta con el *slant range*.

La pérdida por atenuación puede expresarse a partir de un polinomio de tercer orden en función del *slant range*:

$$T_{x, \text{Polo}} = 1 - (ax^3 + bx^2 + cx + d) \quad (39)$$

Para tener en cuenta los resultados de los cálculos expuestos anteriormente, se generaron polinomios para cada caso de AM y AOD, obteniendo un total de 25. Cada coeficiente puede ser representado también por un polinomio de tercer orden en función del AOD.

$$\begin{aligned} a &= 3,13 \cdot AOD^3 - 1,96 \cdot AOD^2 + 1,60 \cdot AOD - 0,133 \\ b &= -14,74 \cdot AOD^3 + 2,49 \cdot AOD^2 - 11,85 \cdot AOD - 0,544 \\ c &= 28,32 \cdot AOD^3 - 7,57 \cdot AOD^2 + 48,74 \cdot AOD - 0,371 \\ d &= -2,61 \cdot AOD^3 + 3,70 \cdot AOD^2 - 2,64 \cdot AOD + 0,179 \end{aligned} \quad (40)$$

Donde x viene dado en km.

	Medidas/Instrumentos	Incertidumbre (T1km=0,9)	Ecuación desarrollada	Ventajas	Desventajas
Sawaihan	Heliostato, pirheliómetro	Alta	No	Medición de banda ancha	Alta incertidumbre, alto coste y mantenimiento, mediciones en cortos plazos
Jebel Hafeet	Pirheliómetro	-	Si	Perfil de altura parcialmente considerado	Alto coste y mantenimiento, mediciones en cortos plazos
Elias et ál.	AOD, BLH	-	Si	No son necesarias mediciones in situ si se toma la AOD desde satélite	No validado hasta el momento, suposición sobre perfil de altura AOD
Ballestrín et ál.	Cámaras digitales	-	No	Medición a lo largo del camino óptico heliostato-receptor	Sólo descripción teórica, no validado
FS11	Tamb, pb, HR, MOR (sensor visibilidad)	0,04	Si	Bajo mantenimiento y coste, mediciones continuas, ideal para lugares aislados	FS11 cubre volumen de aire pequeño, se necesita corrección ABC
LPV4	Tamb, pb, HR, MOR (transmisómetro)	0,07	Si	Mediciones continuas, menor incertidumbre a mayor distancia receptor-emisor	Mantenimiento diario, corrección ABC
Contador de Partículas	Tamb, pb, HR, contador de partículas	0,05	Si	Mediciones continuas	Alta incertidumbre para T1km baja
P&V	MOR, Tamb, pb, HR	-	Si	Mediciones continuas	No se considera variación del espectro solar con AM, AOD...Suposiciones de perfil de altura de AOD
DNI	DNI, Tamb, pb, HR	0,04	Si	Bajo mantenimiento y coste, mediciones continuas, ideal para lugares aislados	Suposición perfil altura AOD y composición de aerosol en RT
Polo et ál.	AOD	-	Si	Bajo mantenimiento y coste, mediciones continuas	Suposición perfil altura AOD y composición de aerosol en RT, mantenimiento semanal

5 INSTRUMENTACIÓN

Una forma de determinar la atenuación atmosférica es medir la relación entre la irradiancia incidente y la transmitida después de recorrer una trayectoria a través de la atmósfera [33].

Los transmisómetros miden directamente la transmitancia atmosférica entre dos puntos del espacio evaluando el coeficiente medio de extinción β_{ext} teniendo en cuenta tanto la dispersión como la absorción. El principio de funcionamiento se basa esencialmente en que el transmisómetro dirija un haz de luz colimado hacia un fotodetector de un receptor diseñado para únicamente recibir la luz que proviene de la fuente emisora. El coeficiente de extinción se determina a partir de la cantidad de luz perdida en el trayecto del emisor al receptor.

Otro método empleado es el uso de sensores de visibilidad que determinan el MOR mediante la aproximación de Koschmieder [13]. El sensor mide la cantidad de luz dispersada por las partículas en suspensión y calcula el coeficiente de extinción para, a partir del mismo, calcular el alcance óptico meteorológico MOR.

A continuación, se describen los principios de funcionamiento de los transmisómetros y sensores de visibilidad para el caso concreto del FS11 de Vaisala y LPV4 de Optec, respectivamente.

En secciones anteriores, se han expuesto cuatro métodos para obtener la atenuación atmosférica a partir de mediciones, lo que permite introducir datos de atenuación dependientes del tiempo y el lugar en las herramientas de optimización de plantas. En los siguientes apartados, se describen los instrumentos que se emplean en los métodos anteriormente desarrollados, sus principios de funcionamiento y las especificaciones de los mismos.

5.1 Sensor de visibilidad FS11 Vaisala

El sensor de visibilidad FS11 Vaisala [34] es un instrumento comercialmente disponible para medir el MOR. Consiste en un transmisor que lanza a través de un diodo emisor de luz (LED) un haz de luz infrarroja pulsada (con frecuencia de 2,2 kHz) con una longitud de onda pico de 875 nm. Una lente concentra el haz a un pequeño volumen de aire y un receptor detecta los fotones dispersados en un ángulo de dispersión (42°). Incorpora una función de fase de dispersión que transforma dispersión de la dirección del ángulo en un coeficiente de dispersión (β_s).

El sensor funciona basándose en la hipótesis de que la atenuación tiene lugar principalmente debido a la dispersión y que la absorción no tiene un papel relevante en dicho fenómeno. Para asumir esta aproximación, es necesario calibrar el sensor. Cada FS11 está calibrado a través de una cadena de referencia. La respuesta de dispersión del dispositivo de calibración puede trazarse claramente hasta un sensor de visibilidad de referencia FS11, que se encuentra en operación continua en el campo de pruebas al aire libre de Vaisala junto a transmisómetros y otra instrumentación de referencia.

El diseño "cabeza abajo" de las cabezas ópticas del receptor y del transmisor hace que los ejes ópticos de los

mismos estén ligeramente orientados hacia abajo para evitar la suciedad alta así como las gotas de lluvia y rocío en las ventanas de entrada. El sensor está previsto de salida de datos en serie RS-232 para la conexión sencilla y fiable a una amplia gama de sistemas de seguimiento y control.

El FS11 incluye una nueva técnica de compensación de contaminación de la ventana asegurando una gran precisión con las mínimas necesidades de mantenimiento. El sistema monitorea la reflectancia total de la superficie de la ventana mediante un fotodiodo situado en la carcasa del transmisor y compensa automáticamente los errores de medición causados por la suciedad de la misma.

El rango de medición del MOR cubre de 5 m a 75 km. Esto corresponde a una transmitancia para un *slant range* de 1 km (T1km) de $3 \cdot 10^{-261}$ a 0,961.



Figura 5.1. Sensor de visibilidad FS11 Vaisala.

5.2 Transmisómetro LPV4 Optec

La versión 4 del transmisómetro de larga trayectoria de Optec (LPV4) [28] mide el coeficiente de extinción (β_{ext}) a partir de un transmisor y una unidad receptora, los cuales pueden situarse a una distancia de hasta 20 km.

El transmisómetro está constituido por una lámpara LED pulsada con un espectro centrado en $532 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ (parte verde). La salida del LED se mantiene constante mediante un método de retroalimentación óptica en el que se utiliza un cuadrado de vidrio transparente en el haz principal para reflejar el 9% de la luz a un fotodiodo de silicio colocado en el lado. Delante del detector se coloca un filtro de banda estrecha con una longitud de onda central de 532 nm y un ancho de banda de 10 nm de forma que sólo esa longitud de onda se mide y se regula.

El receptor consiste en un fotodiodo de silicio que mide la señal modulada del transmisor. Delante del fotodiodo se coloca un filtro similar al empleado para la retroalimentación en la unidad transmisora. La señal emitida desde el transmisor se amplifica ópticamente en la unidad receptora con una lente refractora. Tanto la lente como el cabezal del fotómetro están protegidos por un blindaje que garantiza una correcta alineación.

Un filtro de densidad neutra (ND) con transmitancia 0,0156 se puede colocar en la unidad receptora para evitar la saturación si la trayectoria de trabajo es muy corta (menos de 3 km).

Al medir el coeficiente de extinción espectral para 532 nm ($\beta_{ext, LPV4}$), el LPV4 no sólo tiene en cuenta el

efecto de la dispersión (como hace el FS11) sino que también incluye los procesos de absorción.

$$\beta_{ext, LPV4} = -\frac{\ln\left(\frac{R_W}{CAL}\right)}{P_W} \quad (41)$$

Siendo R_W la lectura en bruto del LPV4, CAL la constante de calibración y P_W la longitud de la trayectoria durante el funcionamiento. La constante de calibración tiene en cuenta las transmitancias de todos los componentes ópticos, la eficiencia del receptor y la irradiancia emitida.

La transmitancia monocromática puede calcularse a partir de la ley de Beer-Lambert-Bouguer:

$$T_{x, LPV4} = \exp(-\beta_{ext, LPV4} \cdot x) \quad (42)$$

El rango de medición para el $\beta_{ext, LPV4}$ está entre 0,01 y 6,5535 km^{-1} que corresponde a un intervalo de transmitancia de 0,002 a 0,990 para un *slant range* de 1 km. Esto equivale a un MOR de 458 m a 300 km empleando la aproximación de Koschmieder. Otra salida disponible del LPV4 es el SVR.



Figura 5.2. Transmisómetro LPV4 Optec. A la izquierda, la unidad receptora y a la derecha, la unidad transmisora.

5.3 Fotómetro solar CIMEL CE318

Algunos métodos que se han detallado en secciones anteriores para determinar la transmitancia atmosférica se desarrollan incluyendo los datos de un fotómetro solar que muestra mejor las condiciones del aerosol en el lugar bajo estudio.

El fotómetro solar CIMEL CE318 es un instrumento diseñado para la medida autónoma y automática de la radiancia solar directa con medidas realizadas cada 15 minutos. A partir de estas, se pueden obtener el espesor óptico de aerosoles y el vapor de agua precipitable. A mitad de los 90, la NASA creó la red internacional AERONET dedicada al estudio climatológico de los aerosoles a escala global. Esta red adoptó el fotómetro CIMEL como su estándar de medida.

Se compone de un cabezal de sensores en el que se incluye un doble colimador de 1,2° de ángulo de visión. En la cabeza sensora se ubica una rueda de filtros con hasta 9 posiciones para conmutar entre diferentes longitudes

de onda. Dentro de una caja resistente a la interperie, se ubican la unidad de control y una batería. Además, cuenta con un panel fotovoltaico y un sensor de lluvia. En general, el conjunto mínimo de longitudes de onda utilizadas para las medidas de espesor óptico de aerosol (AOD) son: 440, 670, 870 y 1020 nm. También se usa un canal de 940 nm para determinar el vapor de agua precipitable y pueden obtenerse otras características de los aerosoles con las medidas del fotómetro, como las distribuciones de tamaño.

El instrumento se comunica automáticamente con el software ASTPWin de CIMEL que se ejecuta en un ordenador donde se cargan los datos transmitidos a la Red Ibérica de Medida Fotométrica de Aerosoles (RIMA).



Figura 5.3. Fotómetro CIMEL C318. A la izquierda, con plataforma fija a la derecha, con plataforma temporal.

5.3.1 Calibración

El fotómetro solar CIMEL C318 se envía una vez al año al centro de calibración de RIMA (Valladolid, España). Durante el proceso, se determinan los coeficientes de calibración para los canales AOD y el canal PWV mediante comparación con fotómetros solares de referencia. Los instrumentos de referencia se recalibran típicamente cada 2-3 meses en el Observatorio Mauna Loa en Hawaii empleando la técnica de la gráfica de Langley. Ésta, muestra el logaritmo de la medida de los instrumentos (tensión) para cada longitud de onda frente a la AM entre 5 y 2.

5.3.2 AERONET

La red Aerosol Robotic Network (AERONET) se compone de mediciones solares de fotómetros solares, incluyendo desde finales de 2015 más de 900 estaciones en todo el mundo. La red está coordinada por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y Photométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire (PHOTONS). La red ibérica RIMA fue creada en 2004 y tiene como objetivo caracterizar aerosoles para estudios climáticos. La estación de AERONET en PSA es Tabernas_PSA-DLR y funciona desde febrero de 2011, situada al sudoeste de PSA. Los conjuntos de datos están disponibles gratuitamente en tres niveles de calidad:

- Nivel 1: no han sido revisados ni filtrados.
- Nivel 1,5: filtrado de datos con nubes.
- Nivel 2: filtrado de nubes, control de calidad y se les ha aplicado una calibración probada.

5.4 Contador de partículas EDM164 Grimm

El contador de partículas EDM164 [35] es un instrumento óptico que mide las concentraciones de partículas en el aire con diámetros entre $0,25 \mu\text{m}$ y $32 \mu\text{m}$ en 31 canales de diferentes tamaños ($0,25; 0,28; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,58; 0,65; 0,7; 0,8; 1; 1,3; 1,6; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 5; 6,5; 7,5; 8,5; 10; 12,5; 15; 17,5; 20; 25; 30$ y $32 \mu\text{m}$)

La salida proporcionada por el instrumento es el número de partículas de cada diámetro con una frecuencia de muestreo de 6 segundos. Una bomba de aire transporta un caudal de aproximadamente $1,2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ desde la entrada de aire a la celda de medición.

En el primer canal ($0,25 \mu\text{m}$) se registran partículas con diámetros entre $0,25$ y $0,28 \mu\text{m}$. Del mismo modo, en el canal de $0,28 \mu\text{m}$ se recuentan diámetros entre $0,28$ y $0,3 \mu\text{m}$ y así sucesivamente.

El EDM164 también puede calcular la suspensión total de partículas (TSP) o el número de partículas con diámetro inferior a cierto valor (PM).

El principio de funcionamiento se basa en la dispersión de la luz en la célula de medición óptica. Un diodo láser de 655 nm ilumina un volumen definido por el que pasa una partícula. La señal dispersada se recoge en un ángulo de 90° mediante un espejo reflector con un ángulo de apertura de 30° y es reflejada por el espejo a un detector fotodiodo siendo la cantidad de luz láser reflejada proporcional al tamaño de la partícula. Para obtener el tamaño de la partícula a partir de la intensidad de luz reflejada, se hace una suposición acerca de la función de fase de dispersión que se incluye en el software de procesamiento interno. Por simplicidad, también se asume que las partículas presentan una forma esférica.

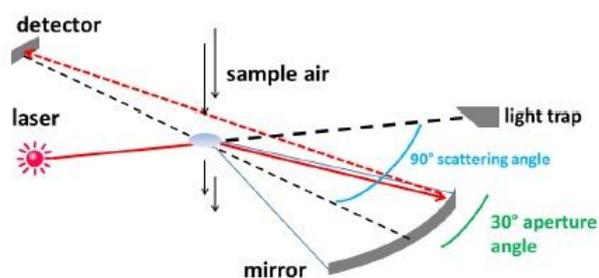


Figura 5.4. Contador de partículas EDM164 Grimm. A la derecha, un esquema del principio de funcionamiento del mismo.

5.4.1 Calibración

Se calibra una vez al año por el fabricante [36]. Para ello, se usan partículas de látex monodisperso de poliestireno y polvo dolomita polidisperso comparando la respuesta del instrumento con un dispositivo de referencia.

Los canales de tamaño están relacionados con umbrales electrónicos. Cuando una partícula de calibración de tamaño conocido pasa el rayo láser, la magnitud de la señal electrónica en el detector causada por los fotones dispersos se clasifica en un canal de tamaño de partícula. Los conteos en cada canal se comparan

simultáneamente entre el instrumento de referencia y el de prueba. La comparación se basa en un valor medio para cada canal y los umbrales se ajustan en consecuencia y se realiza aproximadamente 10 veces hasta que la desviación entre el instrumento de referencia y el calibrado esté por debajo de cierto valor límite.

El caudal de la muestra se calibra a $1,2 L \cdot \text{min}^{-1} \pm 5\%$. Además, también se calibran las mediciones PM que requieren una precisión después del proceso de calibración del 5%.

Según el fabricante, la incertidumbre de las mediciones del contador de partículas para todos los canales de tamaño es del 5%.

5.5 Pirheliómetro CHP1 de Kipp & Zonen

Los pirheliómetros son radiómetros diseñados para medir la irradiación que resulta del flujo radiante solar de un pequeño ángulo sólido en un plano perpendicular al eje óptico del instrumento. El CHP1 de Kipp & Zonen [37], se clasifica como un pirheliómetro de "Primera Clase" según la norma ISO-9060 [38] (Energía solar. Especificación y clasificación de instrumentos para medir la radiación solar hemisférica y solar directa). Para ello, tiene en cuenta factores como la sensibilidad, la estabilidad del factor de calibración, error máximo debido a las variaciones de temperatura ambiente, errores debidos a la respuesta espectral del receptor, ángulo de apertura, constante de tiempo del sistema y efectos del equipo auxiliar.

El CHP1 ha de estar acoplado sobre una montura ecuatorial y provisto de un mecanismo de seguimiento del disco solar. Este instrumento utiliza una termopila ennegrecida que se sitúa detrás de una abertura como un elemento sensor que está protegido con una ventana de entrada. La superficie de la termopila orientada hacia la ventana de entrada se calienta dependiendo de la potencial total absorbida por el revestimiento negro. El calor generado provoca una diferencia de temperatura con respecto al lado frío de la termopila y esta diferencia se convierte en una señal de voltaje que es proporcional a la irradiancia absorbida. Se utiliza una constante de calibración para convertir la tensión de salida medida en la irradiación entrente.

Cubre un rango espectral de 280-4000 nm y el ángulo de apertura total es 5° mientras que el ángulo de inclinación es 1° . La medición se corrige para la temperatura del instrumento con la ayuda de una resistencia Pt-100.



Figura 5.5. CHP1 de Kipp & Zonen sobre un seguidor solar en PSA.

5.5.1 Calibración

La calibración se realiza anualmente. Para ello, se exponen al mismo campo de radiación un pirheliómetro de referencia, que puede ser del mismo modelo o uno de cavidad absoluta como se define en la ISO-9060 [38], y el pirheliómetro a calibrar. Pueden aplicarse dos tipos diferentes de calibración: Puede realizarse en campo,

con mediciones simultáneas del pirheliómetro en prueba y el de referencia o exponerse de uno en uno a una fuente de luz artificial en un laboratorio. En este caso, la referencia y el instrumento de prueba deben ser idénticos para evitar errores debidos a la respuesta espectral distinta de ambos.

La incertidumbre de la medición de DNI con el CHP1 puede estimarse en 1%.

6 EFECTO DE LA ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA EN CENTRALES DE TORRE

Cúanta energía se pierde o cuánto se reduce la eficiencia óptica o el rendimiento de la planta debido a la atenuación atmosférica depende del lugar donde se instala la central, las condiciones meteorológicas y también el tamaño y diseño del campo de heliostatos. Se dispone de poco información acerca de qué tan fuerte puede ser la influencia de la atenuación atmosférica sobre el rendimiento, siendo hasta ahora pocos los estudios publicados que investigan este efecto sobre el rendimiento energético o la eficiencia óptica. A continuación, se resumen alguno de estos estudios y para mejor comprensión, en adelante, la potencia térmica se indica con el índice "th" y la energía eléctrica con el subíndice "el" en las unidades.

6.1 Weinrebe

Weinrebe [39] simuló un campo de heliostatos de membrana tensionada ASM150 circular a 35° de latitud N alrededor de un receptor central. Para tener en cuenta la atenuación atmosférica, se aplicó la ecuación del modelo claro de DELSOL. La potencia nominal en el receptor volumétrico de la planta simulada es de 108,1 MWth (en el punto de diseño, 21 de junio, mediodía), la altura de la torre es 130 m y los heliostatos se encuentran a una distancia entre 90 y 520 m del centro de la torre. Se obtuvo como resultado una reducción del rendimiento óptico en el punto de diseño debido a la atenuación del 3,7%.

6.2 Sánchez y Romero

Sánchez y Romero [40] analizaron una planta de receptor central en el sur de España a 37,4° N de latitud que fue optimizada con WinDELSOL (DELSOL3 en un entorno Windows). La potencia en el punto de diseño (22 de marzo, mediodía solar) es de 30 MWth. El receptor es plano y está inclinado 35° respecto al eje vertical. La simulación dió como resultado una reducción anual del rendimiento óptico del 3,8% debido a la atenuación. Para el punto de diseño, se calcula una reducción del rendimiento óptico del 4,8%. En ambos casos, no se describe cómo se ha tenido en cuenta la atenuación. Como comparación, la reducción de rendimiento óptico anual en este estudio debida al factor coseno es de 15,1%, para sombras 2,42% y de bloqueos 3,7%.

6.3 Schmitz

Schmitz [41] analizó una central de torre con un concentrador secundario y un receptor cilíndrico a 40° de latitud N. El concentrador secundario provoca la necesidad de un campo de heliostatos elíptico orientado hacia el norte debido al cono de visión reducido que da lugar a grandes distancias de los heliostatos al receptor. Por esto, la atenuación atmosférica es más relevante en este caso. La atenuación se parametriza con la ecuación del modelo L&H ligeramente modificada y la simulación se llevó a cabo con HFLCAL. Como resultado, la variación de la potencia concentrada por el concentrador secundario en el receptor para el punto de diseño (21 de junio a mediodía) de 25 MWth a 800 MWth dio lugar a una pérdida debido a la atenuación de aproximadamente 3% a 11%. Para 150 MWth, se obtuvo una pérdida del 5%.

6.4 Goebele et ál.

Goebel [42] estimó para el clima español y californiano una reducción del 1% en el rendimiento energético de una central de torre debido a la atenuación atmosférica. Según el estudio, el efecto puede suponer hasta un 10% de reducción del rendimiento energético, en comparación con el caso en el que se desprecia la atenuación, en las regiones con alta carga de aerosol (p.ej. UAE). No se dan especificaciones sobre la planta de torre considerada en el estudio.

6.5 Mustafa et ál.

Mustafa [43] simuló la eficiencia y la potencia de la planta PS10 (Abengoa) en el sur de España (37,1 MWth, campo norte) y la misma configuración de planta para Asuán en el sur de Egipto (50,5 MWth, campo norte). Para describir la atenuación se empleó la ecuación del modelo claro de DELSOL3. Se simularon 12 días de referencia (el día 21 de cada mes) que dio como resultado casi la misma reducción anual de la eficiencia óptica para ambas localizaciones, igual a un 4,6%. En un segundo paso, se ajustó la configuración de la planta de Egipto para reducir las pérdidas del factor coseno. El campo de heliostatos se extendió en la dirección norte y la altura de la torre se aumentó de 116 a 160 m, aumentando así la potencia a 52,6 MWth. La pérdida de eficiencia óptica anual resultante debido a la atenuación para este caso en Egipto fue un 5,1%.

6.6 Zhang et ál.

Zhang [44] simuló una planta de receptor central de 8,5 MWth a $40,4^\circ$ de latitud N, con un campo de heliostatos orientado al norte, un receptor de cavidad y una torre de 118 m. Aplicaron la ecuación del modelo claro de DELSOL3 y se obtuvo una reducción del rendimiento óptico medio anual de aproximadamente 3,07%.

6.7 Cardemil et ál.

En el estudio de Cardemil [45] se simuló una central de torre de 50MWel, altura de torre de 100 m y localización en Brasil (Bom Jesus de Lapa $13,2^\circ$ S, $43,3^\circ$ W, 440 m sobre el nivel del mar) aplicando tres modelos diferentes de atenuación atmosférica: la ecuación del modelo claro de DELSOL3, el modelo P&V y el modelo de S&W. Los detalles sobre la configuración del campo, el receptor y el heliostato no se indican en la publicación.

Para la ecuación del modelo claro de DELSOL se utilizó un MOR de 29,3 km. Para el modelo P&V se asumió un MOR constante de 23 km ya que no se dispone de series de datos temporales y se ha obtenido β_s con la aproximación de Koschmieder. Para el modelo S&W se asumió un MOR constante de 15 km que se calculó a partir de un DNI medio de $990 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ medido el 29 de octubre entre las 12 y 13 h en Bom Jesus de Lapa. No se especifica que $DNI_{clean, sim}$ se asume.

El resultado fue un 4% menor con la ecuación de DELSOL que para los otros dos modelos debido a la mayor T1km. El resultado demostró que condiciones atmosféricas diferentes suponen diferencias en el diseño óptimo de la planta.

6.8 Liedke et ál.

Liedke investigó el efecto de la atenuación atmosférica simulando una planta de receptor externo y campo de heliostatos con orientación norte ubicada en Qatar (20,057° N, 51,007° E) empleando HFLCAL [11]. Para las simulaciones se ha variado el tamaño del campo de heliostatos y la altura de la torre (206 y 339 m) de forma que el rango de potencias obtenido ha oscilado de 50 MWth a 350 MWth para el punto de diseño (21 de marzo, mediodía solar). Para esto, se han asumido dos niveles de atenuación constantes ficticios.

Por un lado, se escogió la ecuación estándar del modelo claro de MIRVAL que se corresponde con un MOR de 27,1 km (T1km igual a 0,9 según la aproximación de Koschmieder). Por otra parte, se definió un caso brumoso con un SVR de 12 km (MOR igual a 9,2 km) que se transformó en β_s con la aproximación de Koschmieder (T1km igual a 0,72) para utilizarse en el modelo P&V [13]. Se tomó una SVR de 12 km debido a que es la visibilidad que generalmente se registra en un aeropuerto cercano al lugar (aeropuerto Doha) aunque no está claro si dicha visibilidad se define de acuerdo con MOR, SVR u otra definición. Para el modelo P&V, se han incluido como entrada adicional el promedio anual de Tamb, pb y HR.

El estudio muestra que para una planta de 50 MWth y la ecuación estándar del modelo MIRVAL, se produce una reducción del calor anual relativo entregado al bloque de potencia del 3,3%. Para el caso brumoso con un MOR de 9,2 km se obtuvo una pérdida de 7,4%. Para el tamaño creciente del campo de heliostatos, las pérdidas por atenuación obtenidas llegan hasta un 6,7% y 15,5% para 350 MWth y los dos modelos, respectivamente. Para 150 MWth se determina una pérdida del rendimiento anual del 4,8% y 10,9% para el caso claro y el brumoso.

6.9 Polo et ál.

Polo [32] modeló con el código de trazado de rayos SAM la pérdida de rendimiento debida a la atenuación atmosférica para Tamanrasset (Argelia) y dos plantas a modo de ejemplo. La planta más grande se inspira en la planta Invanpah 1 de Brightsource, tiene una potencia de diseño de 126 MWel, sin capacidad de almacenamiento, campo circular y agua/vapor como fluido de transferencia de calor. La más pequeña, está diseñada de acuerdo con la planta Gemasolar de Torresol, con 19,9 MWel de potencia, 12 h de almacenamiento, campo norte y sales fundidas como fluido de transferencia de calor. La atenuación atmosférica se obtuvo de las mediciones de AOD y simulaciones de transferencia radiativa usando su propio modelo descrito en el capítulo 4. En lugar de varios niveles de AOD, sólo se han simulado dos niveles (AOD de 550 nm igual a 0,1 (claro) y 0,7 (brumoso)) y se mantienen constante a lo largo de las simulaciones en lugar de considerar series temporales. De acuerdo con el modelo desarrollado, dichos niveles corresponden a T1km de 0,96 y 0,71 y un MOR de 77,6 y 8,9, respectivamente.

Para Invanpah 1, se obtiene una pérdida del 0,89% de la eficiencia óptica promedio diaria asumiendo la condición de atmósfera clara. Para las condiciones brumosas, se obtiene una reducción de 5,86%.

En la planta Gemasolar, la reducción de la eficiencia óptica promedio diaria es de aproximadamente 0,25% para el caso claro y 1,94% para el brumoso.

No se da información acerca de la pérdida de potencia total debido a la atenuación pero el estudio muestra que la producción de energía diaria puede reducirse significativamente en períodos con altas cargas de aerosol y vapor de agua.

6.10 Hanrieder

Hanrieder [27] realizó simulaciones de trazado de rayos con SPRAY para una planta de torre situada en PSA. La planta fue diseñada para una potencia térmica de 162 MW_{th}, lo que corresponde a una potencia máxima a utilizar por el bloque de potencia de aproximadamente 27 MW_e suponiendo una eficiencia de 0,38. La planta bajo simulación cuenta con un campo orientado hacia el norte y un receptor de cavidad de sales fundidas. Para demostrar los errores de cálculo en la estimación anual del rendimiento, se han realizado cuatro simulaciones, incluyendo por un lado las ecuaciones del modelo estándar para describir la transmitancia y por otro lado, series temporales de transmitancia en combinación con la ecuación del modelo exponencial de SPRAY. La serie temporal se obtuvo del método del sensor de visibilidad FS11 expuesto en el capítulo 4.

Las simulaciones mostraron una pérdida en el rendimiento anual de la planta alrededor del 7% debido a la atenuación para el modelo exponencial. Para la ecuación estándar SPRAY, el rendimiento se subestima en aproximadamente 0,4%.

La siguiente tabla resume el tamaño de las plantas incluidas en los estudios expuestos así como la latitud de cada lugar, el receptor y la configuración del campo de heliostatos. Además, se señala la hipótesis aplicadas para considerar la atenuación con el MOR resultante. En la última columna, se indica el efecto de este fenómeno, especificando si la pérdida obtenida se expresa como rendimiento óptico anual (o en el punto de diseño), la eficiencia óptica promedio diaria o en reducción anual del rendimiento de la planta.

	Potencia	Lat [°N]	Receptor y campo	Modelo	MOR	Influencia atenuación
Weinrebe	108 MWth	35	Volumétrico, circular	DELSOL3 claro	29,3	3,8% rend óptico en punto de diseño
Sánchez y Romero	30 MWth	37,4	Plano, 35° inclinado, campo norte	Desconocido	-	4,8% rend óptico en punto de diseño, 3,8% anual
Schmitz	25-800 MWth	40	Concentrador secundario, campo norte	L&H modificado	27,1	3-11% pérdida de potencia, para 150MWth 5%
Mustafa	37,1 MWth	37,2	Receptor de vapor saturado, campo norte	DELSOL3 claro	29,3	4,6% rend óptico anual
	52,6 MWth	23,5				5,1% rend óptico anual
Zhang	8,5 MWth	40,4	De cavidad, campo norte	DELSOL3 claro	29,3	3,1% rend óptico anual
Cardemil	50 Mwel	-13,2	Desconocido	DELSOL3 claro	29,3	4% menor para el modelo claro DELSOL comparado con otros
				P&V	23	
				S&W	15	
Liedke	50-350 MWth	25,1	Receptor externo, campo norte	MIRVAL	27,1	3.3%-6,7% rend óptico en punto de diseño, 4,8% para 150 MWth
				P&V	9,2	7,2%-15,5% rend óptico en punto de diseño, 10,9% para 150 MWth
Polo	126 Mwel	22,8	De cavidad, campo circular	AOD=0,1; AOD=0,7	77,6;8,9	0,89% eficiencia óptica promedio diaria; 5,86%
	19,9 Mwel		De cavidad, campo norte			0,25% eficiencia óptica promedio diaria; 1,94%
Hanrieder	162 MWth, 27Mwel	37,1	De cavidad, campo norte	SPRAY claro	27,1	7,4% rend anual
				DELSOL3	10,2	18,2% rend anual
				Series temporales	Variable	7% rend anual

7 CONCLUSIONES

Se ha realizado una revisión bibliográfica que resume y compara las ecuaciones modelo más comunes que se emplean en herramientas de ray-tracing para estimar la atenuación de la radiación entre el campo de heliostatos y el receptor de una planta de torre. Además, se presentan varios métodos experimentales para determinar datos de atenuación dependientes del lugar y del tiempo y se cuestiona su aplicabilidad durante la evaluación de los recursos solares o durante el funcionamiento de la planta. Por último, se presentan diferentes estudios que investigan el efecto de la atenuación sobre el rendimiento o la eficiencia óptica de plantas específicas.

Tras una selección previa, se han revisado 16 artículos sobre modelos de atenuación, 6 sobre métodos de determinación experimental y 10 sobre estimaciones del efecto sobre centrales termosolares. En la siguiente figura se muestra la distribución temporal de la fecha de publicación de los mismos.

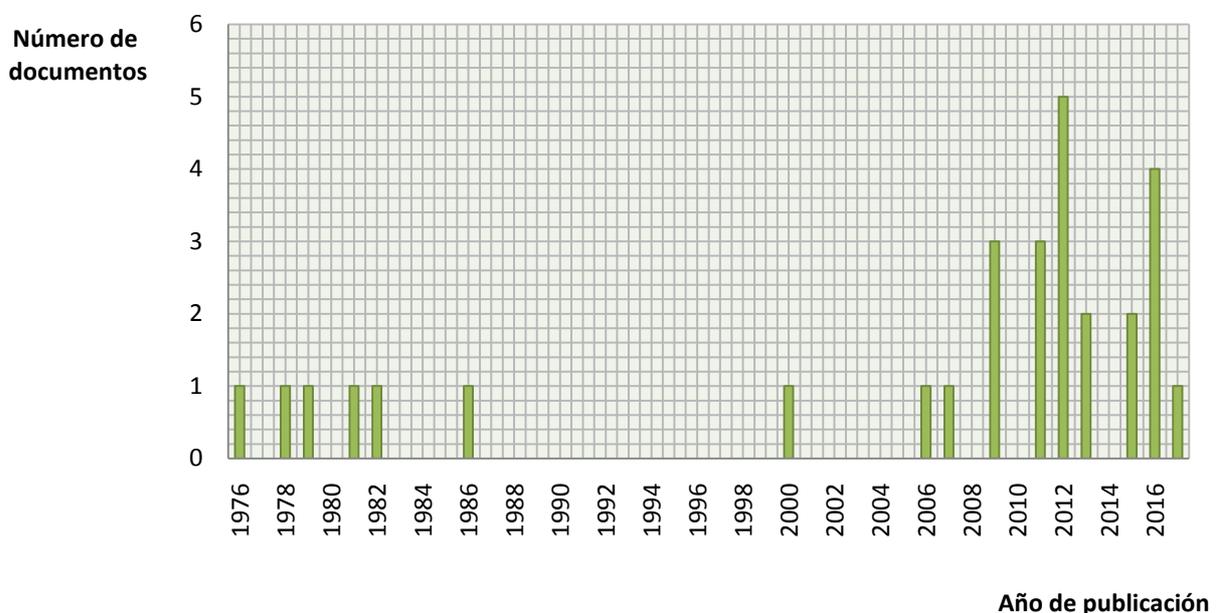


Figura 7.1. Histograma de la distribución temporal de la publicación de los artículos.

En el histograma de la figura 7.1 se observa que el 43,75% del total corresponden a artículos publicados en los últimos 5 años y de este porcentaje, el 71,5% son artículos sobre métodos experimentales o estimación del efecto. El aumento del número de artículos durante los últimos años es un indicador del interés que suscita este problema debido a que se trata de un fenómeno relevante para el rendimiento de la planta y su diseño y, por tanto, una buena estimación del mismo podría contribuir a reducir los costes de los proyectos.

En cuanto a los diferentes modelos de atenuación analizados, la mayoría se basan en el conjunto de datos generados por Vittitoe y Biggs que a su vez se obtuvieron de cálculos con LOWTRAN3 e integraciones numéricas de datos de transmitancia espectral. Estos datos se generaron para condiciones muy específicas (2 elevaciones, 3 condiciones de aerosol...) que podrían no corresponderse con el caso bajo estudio por lo que los códigos podrían llevar a valores erróneos de transmitancia y conducir a una sobrestimación del rendimiento anual de la planta. Se observa una evolución en los diferentes modelos estudiados que se refleja en un mayor abanico de opciones por parte del usuario para modelar la transmitancia, como ocurre en el código SPRAY, que permite seleccionar hasta 6 opciones diferentes para aproximar la atenuación o el modelo P&V, que incluye datos meteorológicos que pueden obtenerse a partir de mediciones in situ, con lo que la atenuación podría determinarse de forma más específica para el lugar bajo estudio. Cabe destacar como modelo de interés el de S&W debido a su única dependencia con DNI, datos que normalmente están disponibles.

A pesar de que como se ha mencionado, varias herramientas permiten implementar configuraciones de atenuación definidas por el usuario e incluso series temporales, normalmente la información sobre el lugar y la dependencia con el tiempo no está a disposición durante la fase de planificación.

Recientemente, se han realizado estudios e investigaciones para determinar mediante métodos experimentales las series temporales de atenuación atmosférica en la capa más baja de la atmósfera con el fin de mejorar las simulaciones de las centrales de torre. Estos modelos se basan p.ej en mediciones de DNI, AOD, MOR o Tamb que pueden obtenerse in situ, reduciendo significativamente la incertidumbre de la estimación del fenómeno estudiado así como la variabilidad del mismo a lo largo de la vida útil de la planta. También existen comerciales disponibles para determinar la transmitancia como los transmisómetros o sensores de visibilidad que se utilizan en algunos de los métodos expuestos en este trabajo.

Se podría recomendar que durante el desarrollo del proyecto y durante la optimización de la planta se utilicen mediciones in situ en lugar de ecuaciones modelo estándar, especialmente en sitios con alta carga de aerosoles o vapor de agua. En lugares con alto contenido en estos componentes, la pérdida anual del rendimiento de la planta puede representar un alto porcentaje debido a atenuación atmosférica. En sitios con atmósferas claras, las estimaciones estándar utilizadas hasta ahora en las simulaciones de trazado de rayos podrían ser lo suficientemente precisas, ya que la reducción real del rendimiento podría no diferir significativamente de la estimación.

Para identificar si una atmósfera es clara, se puede utilizar el método basado en el DNI y otras mediciones generalmente disponibles de la Sec. 4.2.9. Para determinar la atenuación en detalle de los lugares con atmósfera brumosa, es recomendable aplicar los métodos que utilizan mediciones de MOR (p.ej. con la aproximación de la Sec. 4.2.5 o 4.2.6), junto a otras mediciones como DNI, Tamb, pb y HR que normalmente están disponibles durante la fase de evaluación de recursos de un proyecto o durante la operación de la planta.

La generación de mapas geográficos de atenuación y la creación de años meteorológicos representativos de los datos de atenuación, necesarios para investigar la variabilidad de la misma, sigue siendo una necesidad abierta de investigación futura.

Referencias

- [1] Agencia Estatal de Meteorología. Aemet. [Online]. <http://www.aemet.es/>
- [2] W. Zdunkowsko, T. Trautmann, and A. Bott, *Radiation in the Atmosphere* -: Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-87107-5, 2007.
- [3] P. Blanc et al., "Direct normal irradiance related definitions and applications: The circumsolar issue," *Solar Energy*, no. 110, pp. 561–577, 2014.
- [4] H. Koschmieder, "Theorie der horizontalen Sichtweite.," *Beiträge zur Physik*, no. 12171, pp. 33-53, 171-181, 1924.
- [5] Pierre García, Alain Ferriere, and Jean-Jacques Beziau, "Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system applications: A comparative review," *Solar Energy*, pp. 189-197, 2008.
- [6] P. Leary and J. Hankins, "A user's guide for MIRVAL - A computer code for comparing design of heliostat-receiver optics for central receiver solar power plants.," 1979.
- [7] T. Wendelin, "SolTRACE: A New Optical Modeling Tool for Concentrating Solar Optics," , Kohala Coast, Hawaii, USA, 2003.
- [8] B. Belhomme, R. Pitz-Paal, P. Schwarzbözl, and S. Ulmer, "A New Fast Ray Tracing Tool for High-Precision Simulation of Heliostat Fields," no. 131, 2009.
- [9] R. Buck, *Solar Power Raytracing Tool SPRAY*.: Manual Version 5.20, 2011.
- [10] B. Kistler, *User's Manual for DELSOL3: A Computer Code for Calculating the Optical Performance and Optimal System Design for Solar Thermal Central Receiver Plants.*, 1986.
- [11] P. Schwarzbözl, M. Schmitz, and R Pitz-Paal, "Visual HFLCAL - A software tool for layout and optimization of heliostat fields," 2009.
- [12] C. Vittitoe and F. Biggs, "Terrestrial Propagation Loss," *Amer. Sec. ISES meeting*, 1978.
- [13] C. Pitman and L. Vant-Hull, "Atmospheric transmission model for a solar beam propagating between a heliostat and a receiver.," *ASES Progress in Solar Energy*, pp. 1247-1251, 1982.
- [14] J. Dersch, P. Schwarzbözl, and R. Richert, "Annual Yield Analysis of Solar Tower Power Plants With GREENIUS.," *Journal of Solar Energy Engineering*, no. 133, p. 9, 2011.

- [15] H. Hottel, "A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres.," *Solar Energy*, no. 18, p. 6, 1976.
- [16] NREL. (2016) SAM. [Online]. <https://sam.nrel.gov/>
- [17] C Vittitoe and F Biggs, "A User's Guide to Helios: A Computer Program for Modeling the Optical Behavior of Reflecting Solar Concentrators," , 1981.
- [18] J. Ballestrín and A. Marzo, "Solar radiation attenuation in solar tower plants," *Solar Energy*, no. 86, pp. 388-392, 2012.
- [19] M. Sengupta and M. Wagner, "Estimating atmospheric attenuation in receiver systems," in *Proceedings of the ASME 2012 6th International Conference on Energy Sustainability*, San Diego, CA, USA, 2012.
- [20] M. Blanco, A. Mutuberria, P Garcia, R. Gastesi, and V. Martin, "Preliminary validation of Tonatiuh," in *SolarPACES*, Berlin, Germany, 2009.
- [21] C. Gerting, A. Delgado, C. Hidalgo, and R. Ron, "SoFiA - A novel simulation tool for Central Receiver Systems," in *SolarPACES*, Las Vegas, USA, 2013.
- [22] N. Hanrieder et al., "Atmospheric extinction in solar tower plants – A review," *Solar Energy*, 2017.
- [23] S. Giuliano et al., Pre-Feasibility-Studie für Solarturm-Kraftwerke mit Flüssigsalz-Kreislauf -, 2010, German Aerospace Center (DLR), Institute of.
- [24] Z. Tahboub et al., "Solar beam attenuation experiments -Abu Dhabi," in *SolarPACES*, Marrakech, Morocco, 2012.
- [25] T. Elias et al., "Poster presentation: Aerosols attenuating the solar radiation collected by solar tower plants: the horizontal pathway at surface level," in *SolarPACES*, Capetown, South Africa, 2015.
- [26] J. Ballestrín et al., "Measurement of Solar Extinction in Tower Plants with Digital Cameras.," in *SolarPACES*, Capetown, South Africa, 2015.
- [27] N Hanrieder, Determination of Atmospheric Extinction for Solar Tower Plants, 2016, RWTH Aachen, DLR.
- [28] OPTEC, I., Model LPV-3 and model LPV-4. Long Path Visibility, 2011.
- [29] A. Grimm, Environmental dust monitor EMD164. Manual, 2012.
- [30] B. Mayer and A. Kylling, Technical note: the libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and example of use. *Atmos. Chem. Phys.* 5, 1855–1877, 2005.
- [31] N Hanrieder, M Sengupta, Y Xie, S Wilbert, and R Pitz-Paal, "Modelling beam attenuation in solar tower plants using common DNI measurements," *Solar Energy*, no. 129, pp. 244-255, 2016.

- [32] J. Polo, J. Ballestrín, and E. Carra, "Sensitivity study for modelling atmospheric attenuation of solar radiation with radiative transfer models and the impact in solar tower plant production," *Solar Energy*, no. 134, pp. 219-227, 2016.
- [33] C. Bohren and D. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles.*: Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH&Co, 2004.
- [34] Vaisala, User's guide: Present Weather Sensor FS11P, 2010, Manual.
- [35] Grimm, Aerosol Technik GmbH, Environmental Dust Monitor EDM164, 2012, Manual.
- [36] Grimm, Calibration protocol, 2013.
- [37] Kipp and Zonen, CHP1 Pyrheliometer Instruction Manual (version 0811)., 2008, Manual.
- [38] ISO-9060, "Solar energy - Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation.," 1990.
- [39] G. Winrebe, Technische ökologische und ökonomische Analyse von solarthermischen, 2000, PhD thesis. Universität Stuttgart.
- [40] M. Sánchez and M. Romero, "Methodology for generation of heliostat field layout in central receiver systems based on yearly normalized energy surfaces," *Solar Energy*, no. 80, pp. 861-874, 2006.
- [41] M. Schmitz, Systematischer Vergleich von solarthermischen Turmreflektor und-Turmreceiversystemen, 2007, PhD thesis. RWTH Aachen, DLR.
- [42] O. Goebel, F. Luque, A. Alobaidli, and I. Salbidegoita, "Beam attenuation test for central tower power plants in a high density aerosol atmosphere - setup + methodology," in *SolarPACES*, Granada, Spain, 2011.
- [43] M. Mustafa, S. Abdelhady, and A. Elweteedy, "Analytical Study of an Innovated Solar Power Tower (PS10) in Aswan," *International Journal of Energy Engineering*, no. 2.6, pp. 273-278, 2012.
- [44] H. Zhang, Z. Wang, X. Wei, and Z. Lu, "Design of Heliostats Field for the Scale of 1MW Solar Power Tower Plant," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Asia-Pacific. Shanghai, 2012.
- [45] J. Cardemil, A. Starke, V. Scariot, I. Grmas, and S. Colle, "Evaluating solar radiation attenuation models to assess the effects of climate and geographical location on the heliostat field efficiency in Brazil," in *SolarPACES*, Las Vegas, USA, 2013.
- [46] Spectral Sciences, I. (2016) MODTRAN. [Online]. <http://modtran.spectral.com/>
- [47] C. Gertig, A. Delgado, C. Hidalgo, and R Ron, "SoFiA - A novel simulation tool for Central Receiver Systems," in *SolarPACES*, Las Vegas, USA, 2013.