



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES-
JURIQUILLA**

**INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES
INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**Sistema de evaluación rápida de
flujo solar concentrado con
enfriamiento por aire**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero en Energías Renovables

P R E S E N T A

Emiliano Hernández Figueroa

TUTOR DE TESIS

Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes

CO-TUTORA

Dra. Argelia Balbuena Ortega

Temixco, Mor., abril de 2024





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



OF/IER/LIER/024/2024
ASUNTO: Notificación de jurado y
fecha para examen profesional.

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
Presente

Por medio de la presente le informo que el día viernes 26 de abril de 2024, a las 10:00 h, en el Instituto de Energías Renovables, el **C. EMILIANO HERNÁNDEZ FIGUEROA**, con número de cuenta 316125538 de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, llevará a cabo la presentación de su trabajo de titulación y examen profesional titulado:

***“Sistema de evaluación rápida de flujo solar
concentrado con enfriamiento por aire”***

Debido a que el alumno ha cumplido con los requisitos que establece el Reglamento General de Exámenes, el Comité Académico de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, le asigna el Jurado de Examen Profesional integrado por los siguientes académicos.

PRESIDENTA: DRA. HEIDI ISABEL VILLAFÁN VIDALES
VOCAL: DRA. NAGHELLI ORTEGA ÁVILA
SECRETARIO: DR. CAMILO ALBERTO ARANCIBIA BULNES
SUPLENTE: ING. JOSÉ DE JESÚS QUIÑONES AGUILAR
SUPLENTE: DR. LEOPOLDO MARTÍNEZ MANUEL

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente,
“Por mi raza hablará el espíritu”
Temixco, Mor., a 2 de abril de 2024

Dr. Jorge Alejandro Wong Loya
Coordinador de la LIER
IER-UNAM

JAWL´mfp.



Priv. Xochicalco s/n,
Col. Centro,
62580 Temixco, Morelos, México
T. 01 (777) 362 00 90
(52) 55 56 22 97 00

ier.unam.mx

« Pero pregunta a las bestias, que te instruirán, a las aves del cielo, que te lo dirán, sino a los reptiles, que te informarán, te lo contarán los peces del mar, ¿quién no sabe entre todos ellos que todo esto lo hizo la mano de Dios, que su mano retiene el hálito de los vivientes, el espíritu de todo ser humano? »

– Job 12, 7-10 –

Al que es, que era y que viene. ¡Viva Cristo Rey!

A mis amorosos padres, Emiliano y María Mireya.

A mis hermanas María Mireya y Aida.

AGRADECIMIENTOS

A Argelia, por su tiempo, paciencia, confianza, cariño y por darme la oportunidad de incursionar al maravilloso mundo de la óptica y la termografía experimental.

A Camilo, por su visión, disponibilidad, paciencia y ese estilo tan particular de dar ánimo a sus estudiantes y hacerles saber lo importantes que son.

A Charly, por su invaluable tiempo, experiencia y apoyo en el Horno Solar del IER.

Una vez más, a mis padres Emiliano y María Mireya, mis hermanas María Mireya y Aida, y a mi familia, por sus amor, sus llamadas, apapachos, porras y el hogar que me permitió convertirme en lo que soy.

Al jurado de Examen Profesional, a la Dra. Heidi, al Ing. José de Jesús Quiñones, a la Dra. Naghelli y el Dr. Leopoldo por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo y sus muy atinados comentarios y correcciones.

A a quienes en algún momento me ayudaron a hacer mediciones, apretar tuercas, encontrar una referencia o ver los problemas desde un ángulo diferente, en especial a la Dra. Enue y Helena.

Al padre Antonio, por ser el abrazo de Dios en los momentos de prueba y confusión.

A Bertha y Lulú, por abrirme las puertas de su casa, por todo su cariño y apoyo.

A mi comunidad Neocatecumenal, por acogerme en sus corazones y lograr que me enamore de Temixco.

Al personal de la biblioteca y del taller mecánico del IER, por su disponibilidad y profesionalismo.

Al CONAHCYT, por el apoyo otorgado a través del proyecto de investigación de Ciencias de Frontera - CONACYT 552287 y el apoyo para desempeñarme como ayudante de investigador SNI.

A los muchos amigos que me regaló el IER, por ser mi segundo hogar en esta aventura llamada licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables.

ABSTRACT

The periodic evaluation of solar concentration systems is of crucial importance to ensure their optimal operation and identify possible faults or misalignments. This work presents the experimental evaluation of a rapid air-cooled flux measurement system to characterize the high flux solar furnace at the Institute of Renewable Energies (HoSIER) of the National Autonomous University of Mexico (UNAM).

As a first step, a method was developed to assess the “lambertianity” of a surface with a model that describes reflected light as the sum of two contributions, one diffuse and the other specular, with dispersion. The model adequately fitted the experimental measurements and justified the use of a sandblasted aluminum plate with a lambertian fraction of 80 %, as a diffuse target.

The second part involved the implementation of the “camera-target” method, calibrated with a radiometer, at HoSIER. This method has been widely used for its simplicity and adaptability to solar systems of different scales and technologies.

Peak concentrations, flux maps, and radiative powers were obtained for different input flux percentages under two operating conditions of the furnace. Based on the results, a maximum concentration peak of 10 860.1 suns and a power of 16.04 kW were estimated, representing a decrease in HoSIER’s concentration capacity compared to 2015. Air cooling kept the aluminum receiver plate below its melting point, with temperature peaks above 400 °C and maximum surface thermal gradient up to 284 °C; this feature remains one of the main areas for system improvement.

Finally, an error propagation analysis was performed, obtaining a maximum relative error of 8.7 % for the value of a pixel in the flux map and less than 0.1 % for the calculated power. The main limitations of the system are identified concerning its components and data handling.

RESUMEN

La evaluación periódica de los sistemas de concentración solar es de suma importancia para garantizar su funcionamiento óptimo y reconocer posibles fallas o desalineaciones. En este trabajo se presenta la evaluación experimental de un sistema de medición rápida de flujo con enfriamiento por aire para caracterizar al horno solar del Instituto de Energías Renovables (HoSIER) de la UNAM.

Como primer paso, se desarrolló un método para evaluar la «lambertianidad» de una superficie con un modelo que describe a la luz reflejada como la suma de dos aportaciones, una difusa y otra especular con dispersión. El modelo se ajustó adecuadamente a las mediciones experimentales y justificó el uso de una placa de aluminio *sandblastada*, con fracción de lambertianidad del 80 %, como blanco difuso.

La segunda parte consistió en la implementación del método «cámara-blanco», calibrado con un radiómetro, en el HoSIER. Este método ha sido ampliamente utilizado por su simplicidad y adaptabilidad a sistemas solares de distintas escalas y tecnologías.

Se obtuvieron las concentraciones pico, mapas de flujo y potencia radiante para diferentes porcentajes de flujo solar de entrada en dos condiciones de operación del horno. Con los resultados, se estimó un pico máximo de concentración de 10 860.1 soles y una potencia de 16.04 kW, lo que representa una disminución en la capacidad de concentración del HoSIER respecto al año 2015. El enfriamiento por aire mantuvo a la placa de aluminio del receptor por debajo de su punto de fusión, con picos de temperatura superiores a los 400 °C y un gradiente térmico en la superficie de hasta 284 °C; esta característica permanece como una de las principales áreas de mejora del sistema.

Finalmente, se realizó un análisis de propagación de error, obteniendo un error relativo máximo de 8.7 % para el valor de un pixel en el mapa de flujo y menor al 0.1 % para la potencia calculada. Se identifican las principales limitaciones del sistema en cuanto a sus componentes y al manejo de datos.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	IV
Abstract	v
Resumen	VI
1. Introducción	1
1.1. Justificación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos particulares	2
1.3. Estructura de la tesis	2
2. Marco teórico	4
2.1. Fundamentos de la radiación térmica	4
2.1.1. Ángulos sólidos	6
2.1.2. Potencia emisiva e intensidad radiativa	6
2.1.3. Direccionalidad de la intensidad radiativa de un cuerpo negro	8
2.1.4. Potencia emisiva direccional y hemisférica de un cuerpo negro	9
2.1.5. Radiosidad	10
2.2. La ley de la reflexión	10
2.3. Conceptos básicos de radiación solar	12

2.3.1.	Irradiancia espectral de referencia AM 1.5	12
2.4.	Antecedentes	13
2.4.1.	La estadística de superficies reflejantes y errores ópticos	13
2.4.2.	Medición de flujo solar concentrado	14
2.4.3.	Radiómetros tipo Gardon	15
2.4.4.	Error sistémico en la calibración de radiómetros Gardon	16
2.4.5.	El método cámara-blanco	17
2.4.6.	Sobre el diseño de un sistema de medición de flujo	19
2.4.7.	El horno solar del IER-UNAM	19
3.	Determinación de la «lambertianidad» de placas de aluminio	23
3.1.	¿Por qué se busca una superficie lambertiana?	23
3.2.	El material para el receptor del SERFluSol	23
3.3.	Preparación de muestras	24
3.3.1.	Muestras N	24
3.3.2.	Muestras S	26
3.4.	Metodología	26
3.4.1.	Nivelación y alineación	28
3.4.2.	Ángulos de medición	30
3.4.3.	Secuencia de medición típica	31
3.4.4.	Características de los resultados experimentales	31
3.5.	Manejo de datos para el cálculo de aportación difusa y especular	32
3.6.	Cálculo de aportación difusa y especular	34
3.7.	Montaje experimental final	36
3.8.	Resultados	37
3.8.1.	Indicadores de aportaciones, fracción de lambertianidad, bondad del ajuste y gráficos	37
4.	Metodología: Prototipos y evaluación del SERFluSol	41
4.1.	Sistema de evaluación rápida de flujo solar concentrado con enfriamiento por aire	41

4.2. El receptor	41
4.2.1. Reflectancia solar del blanco lambertiano	42
4.2.2. Características del medidor Gardon	43
4.2.3. Zonas de la placa y ejes de referencia	44
4.2.4. Enfriamiento por aire	45
4.3. Prototipos del receptor	45
4.3.1. Receptor v.0.1.	45
4.3.2. Receptor v.0.2.	45
4.3.3. Receptor v.0.3.	47
4.4. Equipos de enfriamiento y monitoreo	47
4.5. Cámara CCD	49
4.6. Corridas experimentales en el Horno Solar	49
4.6.1. Secuencia de medición típica	51
4.7. Obtención del mapa de flujo radiativo	52
4.7.1. Empate del par de imágenes por curvas de luminosidad normalizada	53
4.7.2. De una matriz de luminosidades a un mapa de flujo radiativo	54
4.7.3. Cálculo de potencia	56
4.8. Termografía del receptor	56
5. Resultados: Evaluación del SERFluSol y desempeño del receptor	58
5.1. SERFluSol	58
5.2. Jornadas experimentales	59
5.3. Soles concentrados por el HoSIER	59
5.4. Resultados del método cámara-blanco	61
5.5. Cálculo de la potencia concentrada	67
5.6. Actualización de las condiciones de operación del HoSIER	70
5.7. Enfriamiento por aire	70
5.8. Termografía	71
5.8.1. Sobre el EPDf	74

5.9. Análisis y propagación de error	75
6. Discusión y conclusiones	78
6.1. Propuestas de trabajos futuros	79
A. Algunos desarrollos y resultados adicionales	80
A.1. Indicadores, fracciones de Lambertianidad y coeficientes de determinación del modelo de cada muestra	80
A.2. Relación entre el porcentaje de energía concentrada y el porcentaje de apertura angular del atenuador	81
A.3. Incertidumbre de las mediciones del Gardon y apertura del atenuador	82
A.4. Corrección del factor de escala del Gardon 1	83
A.5. Diagrama de flujo del SERFluSol	84
B. Nomenclatura	87
B.1. Símbolos	87
B.2. Subíndices	88
B.3. Superíndices	89

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

Las diferentes tecnologías de concentración solar existentes permiten el aprovechamiento de este recurso renovable en forma de calor o energía eléctrica; además de los sistemas convencionales de concentración, en el último siglo se han diseñado y construido instalaciones conocidas como hornos solares.

Los hornos solares brindan un ambiente controlado para la experimentación con energía solar concentrada en procesos termodinámicos, de química solar y procesamiento de materiales para la obtención de combustibles solares y otros productos de alto valor a partir de biomasa, normalmente catalogada como de «deshecho».

El monitoreo recurrente de las condiciones de operación de un horno solar es esencial para asegurar su correcto funcionamiento evitar su deterioro. Adicionalmente, la obtención de mapas de flujo solar concentrado permite detectar desalineaciones, averías y/o suciedad en alguno de los componentes del horno solar del IER (HoSIER). En particular, la medición *in situ* de la potencia solar entregada por un horno solar posibilitaría un mejor control experimental, abriendo la posibilidad de hacer balances de energía y reducir la incertidumbre de los resultados.

Es necesario un sistema de medición de bajo impacto en el desarrollo de campañas experimentales, capaz de entregar mapas de irradiancia y la potencia solar concentrada por el HoSIER, que sea fácil de operar, compacto y que no sea demandante en cuestión de tiempo de instalación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Implementar un sistema de medición rápida basado en el uso de un radiómetro y un blanco difuso o lambertiano enfriado por aire para la obtención de mapas de flujo solar y la medición de la potencia concentrada por el horno solar del Instituto de Energías Renovables (HoSIER) de la UNAM.

1.2.2 Objetivos particulares

- Caracterizar superficies con respecto a su reflexión, directa y difusa, y elegir la óptima para ser un blanco «lambertiano».
- Diseñar un receptor que integre a un radiómetro Gardon, un blanco lambertiano y un sistema de enfriamiento por aire.
- Proponer una secuencia de medición para la obtención de imágenes fotográficas con las que se obtendrán mapas de irradiancia y la potencia solar.
- Actualizar las características del flujo radiativo concentrado que entrega el HoSIER.

1.3 Estructura de la tesis

De manera general, la tesis está conformada por un capítulo de introducción y antecedentes; un capítulo de metodología y resultados de la parte óptica; seguido por un capítulo de metodología y otro de resultados del trabajo realizado en el HoSIER; finalizando con un capítulo de discusión y conclusiones. A continuación se describen a manera de resumen cada uno de los capítulos de la tesis.

En el [capítulo 2](#) se introducen los principios básicos de radiación térmica, así como algunos conceptos necesarios para la descripción direccional de la luz reflejada por una superficie; además, se desarrolla brevemente el estado del arte de los dispositivos y técnicas de medición de flujo solar concentrado, se introduce brevemente el concepto de un horno solar y las características del HoSIER.

En el [capítulo 3](#) se describe la metodología utilizada para caracterizar a una superficie candidata para ser utilizada como el blanco del receptor de acuerdo con su comportamiento reflectivo, específicamente su «lambertianidad». Esto, a través de un modelo que describe a la luz reflejada por una superficie como la suma de dos aportaciones, una difusa y otra especular con dispersión. Se presentan los ajustes del «modelo de aportaciones» difusa y especular para placas de aluminio con diferente acabado, se presentan los indicadores de lambertianidad del material y se justifica su elección.

El [capítulo 4](#) se describe a grandes rasgos en qué consiste el Sistema de Evaluación Rápida de Flujo Solar Concentrado (SERFluSol) con enfriamiento por aire y las características de sus componentes principales. Así mismo, se describe el proceso para la obtención de un primer prototipo de receptor con enfriamiento por aire, la metodología seguida durante las campañas experimentales en el Horno Solar y la calibración del método cámara-blanco con un radiómetro Gardon para la obtención de mapas de flujo radiativo y potencia concentrada. Se presenta también la metodología para el análisis termográfico de distintas propuestas de enfriamiento.

En el [capítulo 5](#) se describe al SERFluSol y se presenta su diagrama de flujo. Se resumen los resultados de las jornadas experimentales en las que se evaluó el sistema, a saber: mapas de irradiancia solar concentrada y potencias concentradas para diferentes porcentajes de apertura angular del atenuador, temperaturas de operación del prototipo del receptor, análisis termográfico de distintas propuestas de enfriamiento, estimación de la concentración y potencias máximas que puede obtener el HoSIER, comparación con su última caracterización en 2015 y estimación del error global de los resultados obtenidos.

Finalmente, en el [capítulo 6](#) se discuten los resultados de este trabajo, se reconocen las principales aportaciones, los límites del sistema, se resumen las conclusiones del proyecto y se proponen trabajos futuros.

Adicionalmente, se incluyen en los apéndices resultados secundarios valiosos para la operación del horno solar y del SERFluSol, así como la lista de la nomenclatura utilizada en la tesis.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentos de la radiación térmica

Se puede entender como «radiación» a la emisión o transmisión de energía en la forma de ondas electromagnéticas a través del vacío o algún medio material [1, 2]. Las ondas electromagnéticas o fotones se propagan a gran velocidad; dicha velocidad se conoce como «velocidad de la luz» y cambia dependiendo del medio de propagación de acuerdo con la [ecuación \(2.1\)](#), donde n es el índice de refracción del medio y $c_o = 2.998 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ es la velocidad de la luz en el vacío.

$$c = \frac{c_o}{n} \quad (2.1)$$

Las ondas electromagnéticas pueden ser definidas por su frecuencia (ν), longitud de onda (λ), número de onda (κ) o frecuencia angular (ω), magnitudes relacionadas entre sí como muestra la [ecuación \(2.2\)](#) [1].

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c}{\lambda} = c\kappa \quad (2.2)$$

La radiación electromagnética ha sido clasificada por su comportamiento en diferentes categorías, como se muestra en la [figura 2.1](#) [3]. La luz visible para los seres humanos es radiación electromagnética y abarca aproximadamente el rango de longitudes de onda que va desde los 400 nm a los 700 nm en el vacío. La radiación emitida por un medio a causa de su propia temperatura es definida como «radiación térmica» y comprende el rango de longitudes de onda (en el vacío) de los 0.1 μm a 100 μm [1]. Este tipo de radiación es de gran relevancia para el fenómeno de transferencia de calor. La radiación térmica es un fenómeno de largo alcance, limitado por las características del medio de propagación.

Considérese a la radiación incidente en un medio de grosor finito como se muestra en la [figura 2.2](#). Parte de la radiación es reflejada, otra parte es absorbida y el resto transmitida por el medio. En

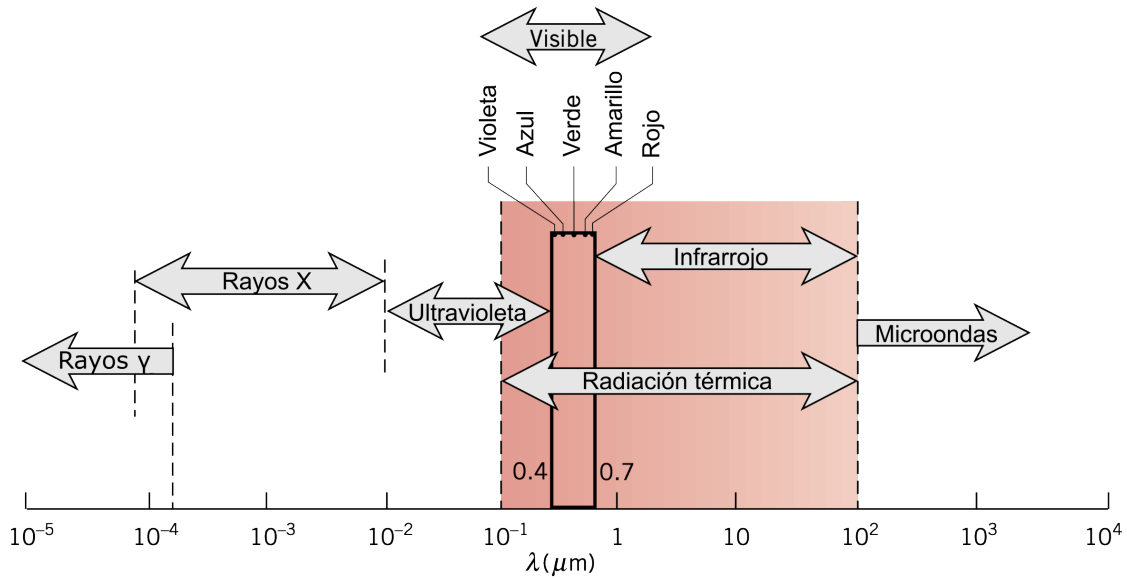


Figura 2.1: Espectro electromagnético y longitud de onda en el vacío (figura tomada de [3]).

función de la radiación total incidente, se pueden definir tres propiedades:

$$\text{reflectancia, } \rho \equiv \frac{\text{energía radiativa reflejada}}{\text{radiación total incidente}} \quad (2.3a)$$

$$\text{absortancia, } \alpha \equiv \frac{\text{energía radiativa absorbida}}{\text{radiación total incidente}} \quad (2.3b)$$

$$\text{transmitancia, } \tau \equiv \frac{\text{energía radiativa transmitida}}{\text{radiación total incidente}} \quad (2.3c)$$

Como toda la radiación debe ser reflejada, absorbida o transmitida, por conservación de la energía, las tres propiedades anteriores son siempre menores a 1 siguiendo la relación [1]

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.4)$$

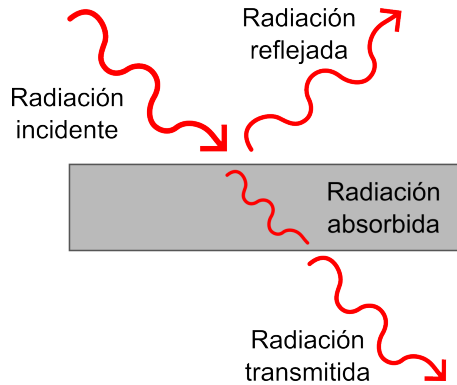


Figura 2.2: Reflexión, absorción y transmisión de una sección.

Si un medio es lo suficientemente grueso como para no transmitir radiación ($\tau = 0$) se le denomina «opaco», por lo que $\rho + \alpha = 1$.

Se le llama «cuerpo negro» a un cuerpo ideal capaz de absorber toda la radiación incidente sobre él sin reflejar o transmitir alguna parte, i.e., un absorbedor perfecto para la radiación incidente [4] en todas las longitudes de onda y todos los ángulos de incidencia. Para un cuerpo negro $\tau = \rho = 0$, por lo que $\alpha = 1$. El concepto de cuerpo negro sirve como punto de referencia para analizar absorbedores reales.

Además de ser un absorbedor perfecto, un cuerpo negro es un emisor perfecto en todas las direcciones y en todas las longitudes de onda. Usando el concepto de cuerpo negro, se sigue que el límite teórico de la energía que puede emitir una superficie con una temperatura $T > 0$ K es la energía emitida por un cuerpo negro a esa temperatura en el vacío, principio por el cual se puede definir una cuarta propiedad radiativa llamada «emisividad», que relaciona a la energía emitida por un cuerpo real contra la energía que emitiría un cuerpo negro con la misma temperatura.

$$\varepsilon = \frac{\text{energía emitida por una superficie}}{\text{energía emitida por una superficie negra a la misma temperatura}} \quad (2.5)$$

En un objeto real, la reflectancia (ρ), absortancia (α), transmitancia (τ) y emisividad (ε) pueden ser función de la temperatura, longitud de onda (o frecuencia) y la dirección.

2.1.1 Ángulos sólidos

Un ángulo sólido es el segmento de área de una esfera unitaria imaginaria que ocupa un objeto si es visto desde el centro de la esfera. Siguiendo la explicación de [1], considérese el punto P en una superficie dA que irradia en todas las direcciones posibles hacia afuera de un hemisferio unitario, como se muestra en la [figura 2.3](#). El ángulo sólido infinitesimal de un área dA_j vista desde P se define como la proyección de la superficie en un plano normal a la dirección del vector \hat{s} dividida por el cuadrado de la distancia S que hay entre dA_j y P ; como se muestra en la [ecuación \(2.6\)](#), donde la proyección del área se relaciona con dA_j por el coseno del ángulo de inclinación θ_j , siendo el ángulo sólido igual al segmento de área dA_j'' . En el sistema internacional de unidades, un ángulo sólido se expresa en la unidad adimensional llamada estereorradián (sr).

$$d\Omega = \frac{dA_{jp}}{S^2} = \frac{\cos \theta_j dA_j}{S^2} = dA_j'' \quad (2.6)$$

Por conveniencia, el ángulo sólido infinitesimal puede definirse en coordenadas esféricas en función del ángulo polar θ , el ángulo azimutal o circunferencial ψ y el radio unitario como muestra la [ecuación \(2.7\)](#). Si el ángulo sólido es integrado hacia afuera de la superficie como se muestra en la [ecuación \(2.8\)](#), i.e. en todo su hemisferio, se tiene que $\Omega = 2\pi$ sr. De esta manera, la magnitud de un ángulo sólido para una superficie plana se encuentra entre 0 y 2π sr.

$$d\Omega = dA_j'' = (1 \cdot \sin \theta d\psi) (1 \cdot d\theta) = \sin \theta d\psi d\theta \quad (2.7)$$

$$\int_{\psi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \sin \theta d\theta d\psi = 2\pi \quad (2.8)$$

2.1.2 Potencia emisiva e intensidad radiativa

Entendiendo como «flujo» a la energía en tránsito por unidad de tiempo y unidad de área ($\frac{W}{m^2}$), se define a la «potencia emisiva», e , como el flujo calórico radiativo emitido por una superficie en función

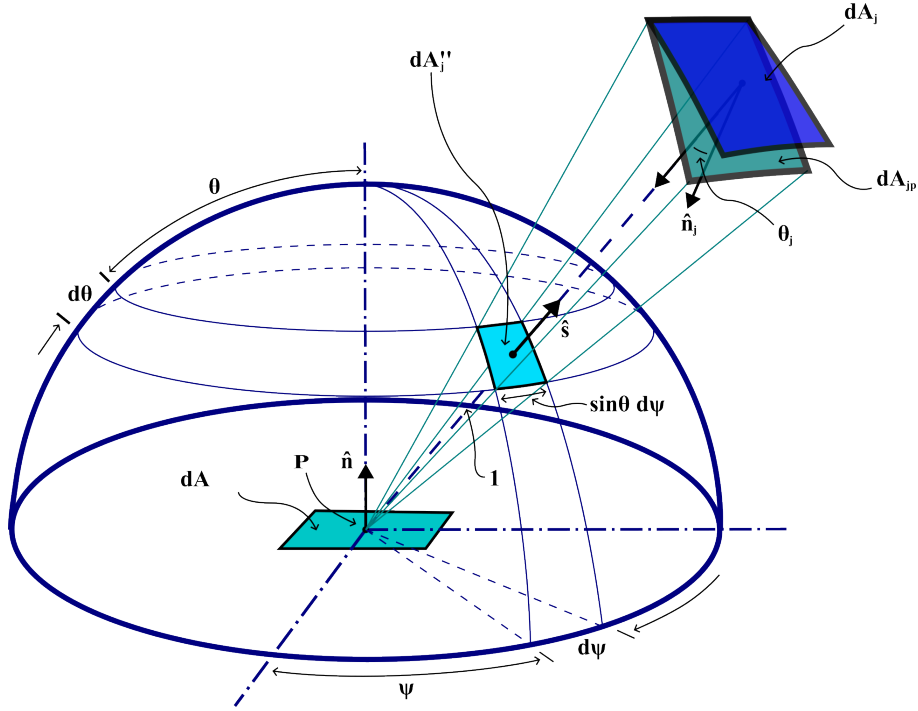


Figura 2.3: Esquema de la definición del ángulo sólido en un hemisferio unitario (figura adaptada de [1]).

de su temperatura [1]. La potencia emisiva de un cuerpo puede no ser uniforme espectralmente, y es conveniente expresarla en función de su frecuencia, longitud de onda o número de onda. Por su definición, la potencia emisiva total y espectral están relacionadas como

$$e(T) = \int_0^{\infty} e_{\lambda}(T) d\lambda \quad (2.9)$$

Donde el subíndice λ denota a una cantidad espectral. A pesar de su utilidad, la potencia emisiva es inadecuada para describir la dependencia direccional de un campo radiativo. Por otra parte, un concepto que toma en cuenta la direccionalidad es el de «intensidad radiativa», denotada como i' y que es definida como el flujo radiativo por unidad de ángulo sólido y unidad de área normal a la dirección de emisión que incide sobre una superficie [1, 4]. El apóstrofe junto a i indica que se trata de una magnitud direccional. La intensidad radiativa puede definirse espectralmente como

$$i' = i(\hat{\mathbf{s}}) = i(\theta, \psi) = \int_0^{\infty} i_{\lambda}(\theta, \psi) d\lambda \quad (2.10)$$

Donde $\hat{\mathbf{s}}$ es el vector unitario de una dirección arbitraria de emisión, que puede ser definido en coordenadas esféricas.

Por definición, la energía radiante emitida por un diferencial de superficie dA en una dirección $\hat{\mathbf{s}}$ y contenida en un ángulo sólido infinitesimal $d\Omega = \sin\theta d\theta d\psi$ puede expresarse como muestra la ecuación (2.11), donde dA_p es el área proyectada y se relaciona con dA por el coseno del ángulo θ .

$$dq'_{\lambda} = i'_{\lambda}(\theta, \psi) dA_p d\Omega = i'_{\lambda}(\theta, \psi) dA \cos\theta \sin\theta d\theta d\psi \quad (2.11)$$

El total del flujo radiativo espectral emitido por dA , i.e., la potencia por unidad de área, se obtiene integrando la expresión anterior en todas las direcciones posibles y dividiéndola por dA , obteniendo

$$q''_{\lambda} = e_{\lambda} = \int_{\psi=0}^{2\pi} \int_0^{\pi/2} i'_{\lambda}(\theta, \psi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\psi \quad (2.12)$$

En otras palabras, la potencia emisiva proveniente de un área diferencial dA es igual a la integral de la intensidad radiativa i' en todas las direcciones del hemisferio o un ángulo sólido de 2π sr.

2.1.3 Direccionalidad de la intensidad radiativa de un cuerpo negro

El comportamiento direccional de la intensidad radiativa se puede analizar con una variación de la ley de Kirchhoff [1]. Considérese un área negra dA suspendida en el centro de un contenedor esférico e isotérmico como muestra la figura 2.4. La superficie interior del contenedor refleja toda la radiación proveniente de dA excepto en una pequeña área dA_s . El diferencial de área dA_s también refleja a la radiación proveniente de dA , excepto por un pequeño intervalo de longitud de onda $d\lambda$, en el cual se comporta como un cuerpo negro.

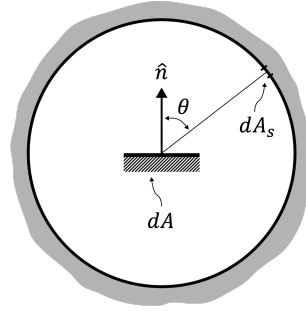


Figura 2.4: Ley de Kirchhoff sobre la direccionalidad de la intensidad radiativa de un cuerpo negro (figura adaptada de [1]).

Por tratarse de un área infinitesimal, toda la radiación emitida por dA , a excepción de la radiación absorbida por dA_s , es reflejada por la esfera y reabsorbida por dA . Por su definición, el flujo neto espectral de energía emitido por dA hacia la esfera sería

$$dq'_{\lambda b} = i'_{\lambda b}(\theta, \psi) (dA \cos \theta) d\Omega_s d\lambda = i'_{\lambda b}(\theta, \psi) (dA \cos \theta) \left(\frac{dA_s}{S^2} \right) d\lambda \quad (2.13)$$

donde $d\Omega_s$ es el ángulo sólido con el que dA_s es vista desde dA , S es la distancia entre dA y dA_s , y el subíndice b denotan un comportamiento de cuerpo negro.

En la superficie interior de la esfera, solo el área correspondiente a dA_s emite radiación, y lo hace en el intervalo de longitud de onda $d\lambda$. Toda la energía emitida por dA_s volverá a sí misma excepto por la interceptada por dA . El flujo neto de la energía emitida por dA_s hacia dA es

$$dq'_{\lambda b, n} = i'_{\lambda b, n} dA_s d\Omega d\lambda = i'_{\lambda b, n} dA_s \left(\frac{dA \cos \theta}{S^2} \right) d\lambda \quad (2.14)$$

donde el subíndice n denota una emisión en la dirección normal y $d\Omega$ es el ángulo sólido con que dA es vista desde dA_s .

Al tratarse de un contenedor isotérmico, los dos flujos netos deben ser iguales, por lo que

$$dq'_{\lambda b} = dq'_{\lambda b, n} \quad (2.15a)$$

$$i'_{\lambda b}(\theta, \psi) (dA \cos \theta) \left(\frac{dA_s}{S^2} \right) d\lambda = i'_{\lambda b, n} dA_s \left(\frac{dA \cos \theta}{S^2} \right) d\lambda \quad (2.15b)$$

$$i'_{\lambda b}(\theta, \psi) = i'_{\lambda b, n} \quad (2.15c)$$

De donde se concluye que la intensidad radiativa de un cuerpo negro es independiente de la dirección de emisión.

2.1.4 Potencia emisiva direccional y hemisférica de un cuerpo negro

La intensidad radiativa está definida por unidad de área normal a la dirección de la emisión. Sin embargo, una cantidad direccional definida en función del área real o elemental (no proyectada) de emisión resulta útil sobre todo para mediciones experimentales. Se define como «potencia emisiva direccional», e' , a la energía emitida por unidad de tiempo, por unidad de área elemental y por unidad de ángulo sólido centrado en la dirección de emisión (θ, ψ) [4].

En función de la potencia emisiva direccional y la intensidad radiativa, la energía emitida por un cuerpo negro de área dA en el intervalo de longitud de onda $d\lambda$, puede ser expresada como

$$dq'_{\lambda b} = e'_{\lambda b}(\theta, \psi) dA d\Omega d\lambda = i'_{\lambda b} dA \cos \theta d\Omega d\lambda \quad (2.16)$$

De donde se obtiene que la potencia emisiva direccional de un cuerpo negro está relacionada con la intensidad radiativa por el coseno del ángulo polar θ y es independiente al ángulo azimutal, como se muestra en la ecuación (2.17) y se esquematiza en la figura 2.5.

$$e'_{\lambda b}(\theta, \psi) = i'_{\lambda b} \cos \theta = e'_{\lambda b}(\theta) \quad (2.17)$$

La ecuación anterior es conocida como la «Ley del coseno de Lambert» [1, 4]. Las superficies con potencias emisivas direccionales que siguen esta relación son denominadas «difusas» o «lambertianas». Un cuerpo negro es siempre difuso y sirve como estándar para comparar las propiedades direccionales de las superficies reales que pueden o no seguir la ley del coseno.

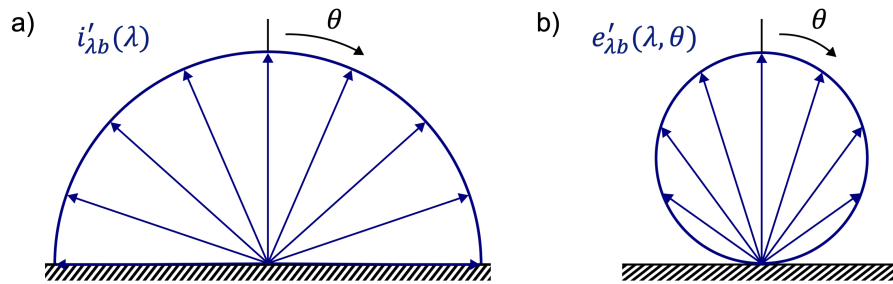


Figura 2.5: a) Distribución angular de la intensidad radiativa. b) Potencia emisiva de un cuerpo negro.

La emisión espectral de un área negra (difusa) dA por unidad de tiempo y de área superficial puede expresarse en función de la potencia emisiva direccional y la intensidad radiativa como

$$e'_{\lambda b}(\theta) d\Omega = e'_{\lambda b}(\theta) \sin \theta d\theta d\psi = i'_{\lambda b} \cos \theta \sin \theta d\theta d\psi \quad (2.18)$$

Realizando una integración hemisférica de la expresión anterior se obtiene la potencia emisiva espectral del hemisferio, i.e., la energía emitida por el área dA por unidad de tiempo y unidad de área en un intervalo de longitud de onda $d\lambda$. Como se muestra en la [ecuación \(2.19\)](#), la potencia emisiva espectral es proporcional a la intensidad radiativa espectral de una superficie difusa por un factor constante de π .

$$e_{\lambda b} = i'_{\lambda b} \int_{\psi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta d\psi = \pi i'_{\lambda b} \quad (2.19)$$

2.1.5 Radiosidad

Un concepto más referente a los flujos radiativos es la «radiosidad», que representa a toda la energía radiante que sale de una superficie por unidad de área. Lo que diferencia a la radiosidad respecto a la potencia emisiva es que la primera incluye a la porción reflejada de la radiación mientras que la última hace referencia únicamente a la emitida [3], como representa la [figura 2.6](#). La radiosidad se relaciona con la intensidad radiativa asociada a la emisión y reflexión como se muestra en la [ecuación \(2.20\)](#).

$$j_{\lambda} = \int_{\psi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} i'_{\lambda, e+r}(\theta, \psi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\psi \quad (2.20)$$

Donde la radiosidad total es la integración en todas las longitudes de onda posibles

$$j = \int_0^{\infty} j_{\lambda} d\lambda \quad (2.21)$$

De forma análoga a la expresión (2.19), con la diferencia de que no se trataría de un cuerpo negro ya que $\rho \neq 0$, se puede definir una radiosidad direccional espectral y relacionarla con $i'_{\lambda, e+r}$ como

$$j'_{\lambda}(\theta) d\Omega = j'_{\lambda}(\theta) \sin \theta d\theta d\psi = i'_{\lambda} \cos \theta \sin \theta d\theta d\psi \quad (2.22)$$

Si una superficie en cuestión refleja y emite perfectamente de manera difusa, i.e., $i_{\lambda, e+r}$ es independiente de θ y ψ ; integrando la [ecuación \(2.20\)](#) se sigue que

$$j_{\lambda} = \pi i_{\lambda, e+r} \quad (2.23)$$

Al igual que en (2.19), la radiosidad espectral es proporcional a la intensidad radiativa espectral correspondiente a la emisión y reflexión de una superficie difusa por un factor constante de π sr.

2.2 La ley de la reflexión

Para facilitar la visualización de la energía radiante es conveniente representar la dirección del flujo como una línea en el espacio; a estas líneas, rectas en un medio homogéneo, se les denomina «rayos». Los rayos, más que tratarse de una representación física son una representación matemática de la luz.

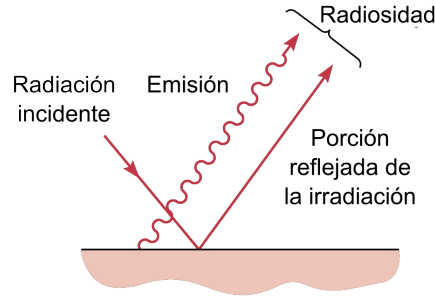


Figura 2.6: Radiosidad superficial (figura tomada de [3]).

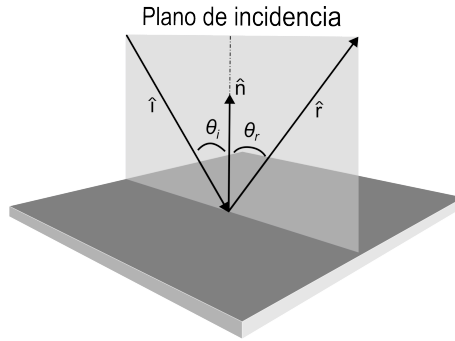


Figura 2.7: Esquematización de los dos postulados de la ley de la reflexión. Igualdad del ángulo del rayo incidente y el rayo reflejado respecto al vector normal a la superficie; contención del rayo incidente, el rayo reflejado y el vector normal en el plano de incidencia.

La ley de la reflexión descrita desde la antigüedad y desarrollada posteriormente con el electromagnetismo y la física cuántica, consta de dos partes (ver figura 2.7): la primera parte establece que el ángulo de un rayo incidente respecto a la normal de una superficie reflejante lisa es igual al ángulo del rayo reflejado; la segunda parte establece que el rayo incidente, la dirección normal a la superficie y el rayo reflejado están en un mismo plano, llamado «plano de incidencia» [5]. Las ecuaciones (2.24a) y (2.24b), en donde \hat{i} es la dirección del rayo incidente, \hat{n} es la dirección normal a la superficie reflectora y \hat{r} es la dirección del rayo reflejado, expresan de manera vectorial las dos partes de la ley de la reflexión.

$$\hat{i} \cdot \hat{n} = \hat{r} \cdot \hat{n} \quad (2.24a)$$

$$(\hat{i} \times \hat{r}) \cdot \hat{n} = 0 \quad (2.24b)$$

Una superficie real no es completamente lisa, tiene irregularidades que en algunos casos solo son perceptibles microscópicamente. Para superficies con irregularidades pequeñas en comparación con la longitud de onda del haz incidente, la luz reemitida se combina en un haz bien definido en lo que es denominado «reflexión especular». Por otro lado, cuando las rugosidades de una superficie son grandes en comparación a la longitud de onda, la luz sigue la ley de reflexión para pequeñas secciones de superficie con direcciones normales diferentes, por lo que el haz es reflejado aparentemente en todas direcciones en un proceso de «reflexión difusa». No existen las superficies que reflejen de forma perfectamente especular ni perfectamente difusa, como presenta la figura 2.8; en cambio, el comportamiento reflectivo de las superficies reales puede entenderse como una combinación de estas dos condiciones.

2.3 Conceptos básicos de radiación solar

Entendiendo «radiación solar» como a la energía electromagnética emitida por el sol que llega a la tierra a través del espacio, es preciso definir algunas magnitudes relevantes para este trabajo:

Irradiancia, [W/m²]. Es la energía radiante por unidad de tiempo (o potencia radiante) incidente en una superficie por unidad de área de la superficie [6].

Irradiación, [J/m²]. Es la energía incidente por unidad de área de una superficie, obtenida de la integración de la irradiancia en un período específico de tiempo, usualmente una hora o un día [6].

Insolación. Es un término aplicado específicamente a la irradiación solar [6].

Además de estos conceptos, son útiles los conceptos de flujo, potencia emisiva y radiosidad, definidos anteriormente. A partir de este punto, en el documento se utilizará la palabra «flujo», como en «mapa de flujo» o «flujo concentrado», para hacer alusión al flujo radiativo con unidades de $\frac{W}{m^2}$, a menos de que se inique otra cosa.

2.3.1 Irradiancia espectral de referencia AM 1.5

Durante su trayecto a través de la atmósfera, la radiación proveniente del sol se ve afectada por la dispersión y absorción debido a las moléculas presentes en el aire como el vapor de agua, ozono, dióxido de carbono, nubes y polvo [7]; en consecuencia, la distribución espectral de la radiación solar cambia después de atravesar la atmósfera.

Una medida conveniente de la ruta de la radiación solar a través de la atmósfera es la denominada «razón de masa de aire» (*air mass ratio*, AM). La razón de masa de aire se define como [6] la proporción de la masa de atmósfera que debe atravesar la radiación solar directa en un ángulo determinado, respecto a la masa que atravesaría si el sol estuviera en su cenit.

Al nivel del mar y para ángulos cenitales entre 0° y 70° una aproximación adecuada de la razón de masa de aire [6], m , esta dada por

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2.25)$$

donde θ_z es el ángulo cenital solar. En la [figura 2.9](#) se muestran la irradiancia espectral extraterrestre, directa y global bajo condiciones de Masa de Aire 1.5. usada como referencia por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASMT, por sus siglas en inglés) para evaluar espectralmente tecnologías fotovoltaicas selectivas [8].

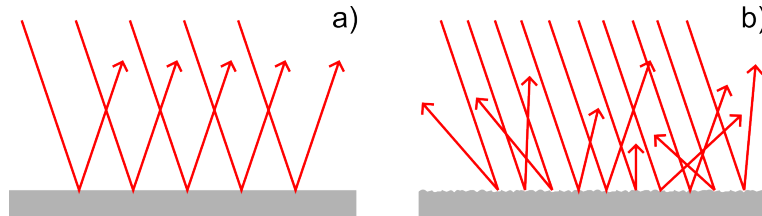


Figura 2.8: a) Reflexión especular. b) Reflexión difusa.

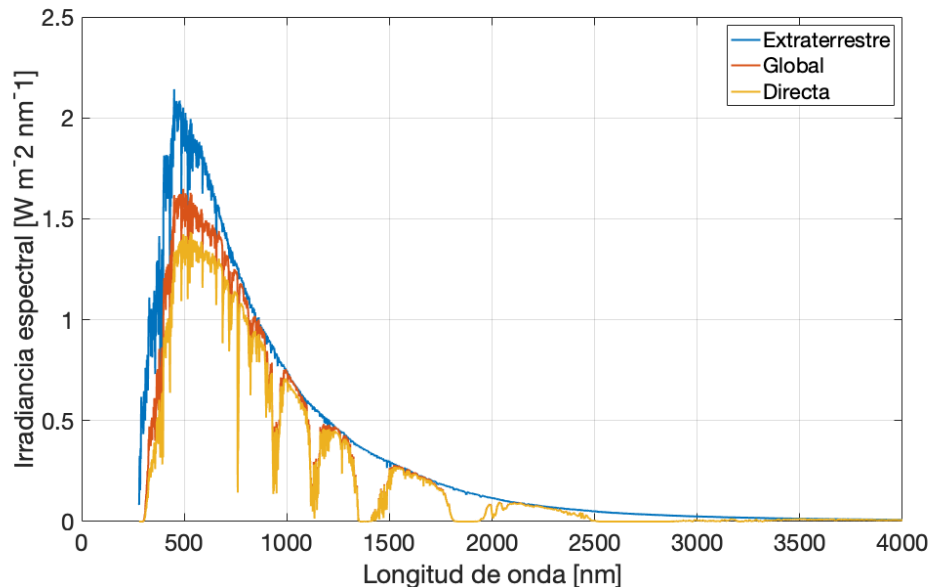


Figura 2.9: Distribución de la irradiancia espectral de referencia ASTM G173-03 extraterrestre, directa, y global para una superficie inclinada orientada 37° hacia el sol, bajo condiciones de Masa de Aire 1.5 (gráfica construida con datos de [8]).

Los espectros, denominados como ASTM G173-03, representan la irradiancia espectral solar terrestre sobre una superficie plana con una inclinación de 37° orientada hacia el ecuador, para una relación de Masa de Aire de 1.5 (ángulo cenital solar de 48.19° S), bajo una serie de condiciones atmosféricas especificadas [8]. Para muchas de las aplicaciones prácticas de la energía solar, es aceptable asumir un espectro constante [7].

2.4 Antecedentes

2.4.1 La estadística de superficies reflejantes y errores ópticos

En contraste con una superficie perfectamente lisa, que sigue la Ley de Reflexión, las superficies reales tienen irregularidades que van desde ondulaciones macroscópicas a rugosidades microscópicas. Rabl [7] resume la conveniencia de realizar un análisis estadístico diferenciado de los errores ópticos de las superficies. En el caso de superficies reflejantes con aplicaciones solares, algunos factores que contribuyen al error óptico son [7]: errores de contorno, falta de specularidad perfecta, errores de seguimiento, deformación y desplazamiento del receptor; estos factores son estadísticamente independientes y pueden ser descritos por las desviaciones estándar de sus distribuciones.

En ese sentido, Butler y Petit [9,10] encontraron experimentalmente en materiales altamente reflejantes que el perfil de dispersión del haz reflejado ajusta a una distribución normal y en otros casos, a la suma de dos distribuciones normales. Propusieron una distribución normal ya que las propiedades reflectivas de un material pueden ser descritas en función de su rugosidad, y en este mismo sentido la altura promedio y la distribución de la inclinación de las imperfecciones en una superficie pueden ser caracterizadas por una distribución normal [9]. Reconocer al perfil de dispersión como una distribución

normal permite describir las propiedades de un material reflector con una desviación estándar, que es normalmente utilizada por programas de trazado de rayos.

2.4.2 Medición de flujo solar concentrado

Los sistemas termosolares de concentración redirigen la radiación solar hacia un receptor, de menor área que el concentrador, para alcanzar altas temperaturas. Dicho receptor debe maximizar la eficiencia térmica, i.e., transformar la mayor cantidad de radiación concentrada en energía térmica aprovechable, lo que se logra reduciendo al mínimo las pérdidas térmicas por conducción, convección y radiación. La medición de la radiación solar concentrada en el foco de un sistema de concentración es sumamente importante para determinar y monitorear las condiciones en las que opera el receptor, así como identificar cambios en la alineación del sistema óptico o el deterioro de sus componentes.

A lo largo de los años, varios enfoques se han propuesto para la medición de flujo solar concentrado. De acuerdo con varios autores [11, 12] las técnicas pueden ser clasificadas como de medición indirecta, directa y mediciones asistidas por simulación. Los métodos directos utilizan calorímetros o radiómetros que entregan una señal proporcional al flujo radiativo, mientras que los métodos indirectos usan típicamente cámaras digitales para medir la radiación solar reflejada por una superficie. En ambas técnicas de medición, se han propuesto dos tipos básicos de receptores: los receptores externos, cuya superficie iguala más o menos la superficie de apertura; y los receptores de cavidad, cuya apertura no es idéntica a la del absorbedor [11]. La simulación de la distribución del flujo solar, por su parte, puede ser alternativa o complementaria a las técnicas de medición directa e indirecta, siendo sus principales ventajas: la viabilidad de un análisis tridimensional de la distribución de flujo, la capacidad de predecir cambios en la distribución de flujo antes de que sean observados en un dispositivo real y la facilidad para realizar estudios paramétricos [12].

Como un resumen del estado del arte de la medición de flujo concentrado a escala de prototipo, Röger et al. [11] enumeran cinco métodos principales:

1. Uso de cámara digital y un objetivo difuso montado en un blanco móvil.
2. Uso de cámara digital sin objetivo difuso y obtención de imágenes a partir de un receptor externo.
3. Uso de cámara digital, blanco estacionario en forma de tiras y foco móvil.
4. Sensores de medición directa montados en una barra móvil.
5. Sensores de medición de flujo fijos o distribuidos en el receptor.

Los calorímetros son dispositivos que determinan el flujo solar concentrado a través de la medición del calor transferido a un fluido de enfriamiento que pasa a través de ellos [12]. Para su adecuado funcionamiento la correcta medición de temperaturas, la determinación de todos los flujos calóricos presentes y la reducción de pérdidas son esenciales. Un tipo de calorímetro de cavidad cónica (CAVICAL) fue presentado por Pérez-Rábago et al. [13], quienes midieron la potencia térmica concentrada por el sistema DEFRAC (Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Altamente Concentrados) del CIE-UNAM (ahora Instituto de Energías Renovables). El monitoreo de la temperatura interna con termopares fue comparado con un modelo de CFD (*computational fluid dynamics*) numérico desarrollado en FLUENT. Este mismo dispositivo fue utilizado para cuantificar a la potencia concentrada por el horno solar de la Plataforma Solar de Almería (PSA) [14].

Otro enfoque fue presentado por Estrada et al. [15] con un calorímetro de placa plana circular refrigerado con agua, utilizado para medir la potencia concentrada por el DEFRAC. La estimación de

pérdidas y distribución de temperaturas fue analizada teórica y experimentalmente. Una optimización posterior de este calorímetro mostró la importancia de los materiales utilizados en los calorímetros; Jaramillo et al. [16] sustituyeron la placa circular del receptor, originalmente de acero inoxidable, por una de cobre; obteniendo así una temperatura media menor en la superficie de la placa del calorímetro, menos pérdidas por convección y radiación, y un incremento de la transferencia de calor al fluido de trabajo (agua), aumentando la precisión del calorímetro.

Los calorímetros han sido comparados ampliamente con otros sistemas de medición de flujo solar encontrando concordancia entre ambos. Por ejemplo, Groer y Neumann [17] describieron al calorímetro de doble cono SUNCATCH y lo compararon en una jornada experimental con un radiómetro Kendall y el sistema FATMES del horno solar del Centro Aeroespacial Alemán (DLR, *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) en Colonia, Alemania (que será abordado más adelante). Destacaron que los calorímetros necesitan condiciones estacionarias durante las mediciones, lo que prologa el tiempo de medición, descartándolos como dispositivos idóneos para mediciones rápidas; por ejemplo, la respuesta de SUNCATCH en condiciones estacionarias se obtuvo 75 segundos después del inicio de la medición, comportamiento que fue confirmado más tarde por Kaluza y Neumann [18].

Por otra parte, los radiómetros son instrumentos que generan una señal eléctrica que varía con la radiación incidente y que, en particular, pueden ser utilizados para medir la radiación solar. Actualmente, dos tipos principales de radiómetros se encuentran comercialmente disponibles: los radiómetros Kendall y los radiómetros Gardon [12]. Las ventajas de los radiómetros son su rápida respuesta y medición en tiempo real. En general, estos dispositivos son integrados a sistemas de medición más grandes.

Existen, además, los llamados microsensores de flujo calórico, que por su tamaño (menos de 2 mm de grosor) tienen un efecto mínimo en el sistema evaluado. Tienen una respuesta entre 2 y 6 μ s y miden a la par temperatura y flujo en su cara receptora [19]. A diferencia de los radiómetros, refrigerados generalmente por agua, los microsensores no disponen de un disipador térmico activo por lo que son más sensibles a las condiciones de montaje, especialmente en aplicaciones con tiempos de medición prolongados o niveles de flujo elevados.

Para la calibración del sistema presentado en este trabajo fue utilizado un radiómetro Gardon.

2.4.3 Radiómetros tipo Gardon

El radiómetro de lámina circular o tipo *Gardon* [20] es un tipo de radiómetro que produce una *fem* proporcional al promedio de la intensidad radiativa que recibe en su superficie receptora. El Gardon está conformado por una lámina circular fina de constantán soldada en su circunferencia a un bloque de cobre que se mantiene a una temperatura constante mediante refrigeración. Un esquema de las partes fundamentales del medidor Gardon se muestra en la [figura 2.10](#).

El transductor del Gardon es una termocupla conformada por un cable fino de cobre soldado al centro de la lámina de constantán y el bloque de cobre. Cuando la radiación incide sobre la cara receptora del Gardon, ésta calienta; la diferencia de temperatura entre el centro de la lámina y su circunferencia genera una *fem* relacionada linealmente con la intensidad del flujo radiativo incidente sobre la lámina. Los medidores Gardon se caracterizan por tener constantes de tiempo menores a 1 segundo [20,21], lo que los hace idóneos para el monitoreo del flujo concentrado. Este tipo de radiómetro ha sido utilizado ampliamente para la evaluación de sistemas de concentración solar como parte del método cámara-blanco (que se discutirá en la [subsección 2.4.5](#)).

La confianza en las mediciones de flujo está determinada por los sensores del sistema, cuya precisión

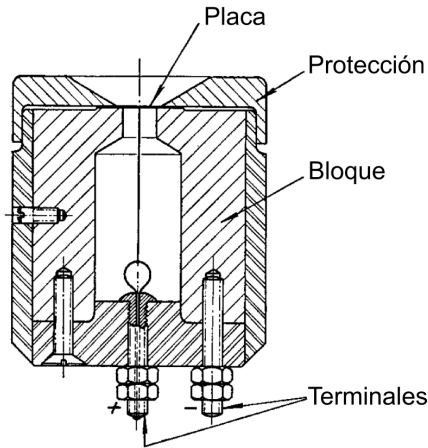


Figura 2.10: Sección de un radiómetro tipo Gardon y sus partes fundamentales (figura tomada de [20]).

está limitada actualmente en el caso de los Gardon a $\pm 3\%$ por la calibración del fabricante [12, 22]. Estudiar y reducir esos límites es el objetivo de muchas investigaciones ya que representaría un paso adelante en cuanto a la medición de potencia solar concentrada [12].

A lo largo de los años se han realizado varias campañas para comparar dispositivos de medición de flujo. Por ejemplo, Kaluza y Neumann [18] reportaron los resultados de la campaña experimental Intercomp 2000, realizada en el horno solar de DLR y en la cual se compararon radiómetros Kendall, Gardon (o HyCal) y el dispositivo SUNCATCH. Encontraron que el desempeño de todos los radiómetros HyCal fue problemático y obtuvieron desviaciones promedio pronunciadas respecto al radiómetro Kendall y SUNCATCH, que en cambio, encontraron buena correspondencia entre sí con una desviación promedio de 0.4%. Para uno de los radiómetros con el revestimiento deteriorado, sometido junto con los demás a las mediciones, se obtuvo una sobreestimación del flujo con una desviación media de de 9.3% que no pudo ser explicada. A pesar de sus ventajas, concluyeron que las mediciones de los radiómetros no fueron precisas y recomiendan recalibrar para aplicaciones solares.

2.4.4 Error sistémico en la calibración de radiómetros Gardon

Ballestrín et al. [23] y Ulmer et al. [24] identificaron de forma independiente un error sistémico en el factor de escala de los radiómetros Gardon cuando son usados con radiación solar concentrada. Con mediciones de superficies revestidas con *Zylonyte* y grafito coloidal, Ballestrín et al. [23] encontraron que un radiómetro revestido con *Zylonyte* sobreestima la irradiancia solar por 3.6%, por lo que el factor de escala proporcionado por el fabricante debe ser multiplicado por un factor adimensional de 0.965. Mientras que, para un sensor con revestimiento de grafito coloidal, la sobreestimación de la irradiancia solar es de 27.9% y el factor de escala debe ser multiplicado por un factor de 0.782. Por su parte, Ulmer et al. [24] identificaron de manera teórica y con validación experimental un error sistémico de +9.4% introducido por la calibración del sensor en el sistema PROHERMES.

El método de calibración de los Gardon, efectuado por la compañía Vatell, utiliza un «cuerpo negro» de cavidad dual a una temperatura de 850 °C [23]. A esa temperatura, la distribución espectral de emisión de un cuerpo negro es significativamente diferente a la distribución solar. El origen del error sistémico es la diferencia entre la potencia absorbida por el revestimiento del Gardon ante un cuerpo negro y ante la radiación solar.

Ballestrín et al. [25] presentaron un método alternativo al de Vatell para calibrar a los radiómetros de placa circular para aplicaciones solares, usándolos como calorímetros. Este método fue validado en condiciones fuera de laboratorio en el horno solar CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas) de la PSA [26], disminuyendo la incertidumbre en el cálculo del factor de escala a menos del 1% y repetibilidad de 0.6%.

En contraste con los resultados de Ballestrín et al. [25], Guillot et al. [21] encontraron buena concordancia (1%) entre dos Gardon, uno perteneciente al PSI (*Paul Scherer Institute*) calibrado por Vatell y otro proveniente del CIEMAT-PSA con un factor de escala corregido para aplicaciones solares. A pesar de que el Gardon del PSI incluía el error sistemático en su calibración, su respuesta coincidió con el error estadístico de $\pm 3\%$.

2.4.5 El método cámara-blanco

El método cámara-blanco es un método indirecto en el cual el perfil luminoso del flujo solar, concentrado sobre un blanco difuso, es capturado utilizando una cámara digital de alta resolución CCD (*charged coupled device*) o CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*); este tipo de cámaras se utiliza en particular porque tienen una respuesta lineal a la luminosidad, aunque las cámaras CCD son preferidas por su alto rango dinámico y la calidad de su señal [11]. Para una determinación fiable del flujo, Ballestrín et al. [12] recomiendan el uso de un blanco con reflectancia dentro del 5% de la reflectancia lambertiana ideal.

Las imágenes capturadas por la cámara, que son un mapa de la intensidad de flujo radiativo, deben ser transformadas a escala de grises y calibradas utilizando un dispositivo de medición absoluta. El procedimiento para obtener un mapa de flujo con el método cámara-blanco es descrito a detalle por Levêque et al. [27] quienes utilizaron el método cámara blanco para evaluar el desempeño de un simulador solar de alto flujo, como lo han hecho también otros autores [28, 29]. Los dispositivos más utilizados para calibrar las imágenes obtenidas con el método cámara-blanco han sido radiómetros Gardon [30–32], Kendall [33] y calorímetros [34, 35]; regularmente son embebidos en la superficie del receptor o se instalan lo más cerca posible de él.

El método cámara-blanco se ha utilizado como método principal en muchos sistemas de medición de flujo. En el horno solar del DLR en Colonia, Neumann y Groer [33] presentaron el sistema FATMES (*Flux and Temperature measurement System*) con el que capturaron el *spot* (mancha solar) concentrado en un blanco rotatorio con un revestimiento difuso; la rotación del blanco estaba en sincronía con una cámara digital para lograr una corta exposición a la luz concentrada, por lo que no fue necesaria refrigeración adicional en el receptor. Unos años más tarde Neumann y Schmitz [36] presentaron para el horno solar del DLR el sistema SCATMES (*Scanning Camera and Target Measurement System*) cuyo blanco móvil segmenta al área de flujo concentrado a manera de escáner, permitiendo la aplicación del método en un receptor grande sin la necesidad de un blanco del mismo tamaño. Además, propusieron la utilización de un blanco lambertiano traslúcido como alternativa para evitar sombreamientos y lograr capturar el mapa de flujo incluso por detrás del arreglo experimental.

Otros sistemas como el PROHERMES (*Programmable Heliostat and Receiver Measuring System*) [19, 37] se han basado fundamentalmente en el método cámara-blanco. En este sistema, el blanco lambertiano se encuentra en el extremo de una barra móvil que rota enfrente del receptor para realizar una medición. La serie de imágenes capturadas del *spot* son combinadas en una sola y son calibradas con dos medidores de flujo cercanos a la apertura del receptor. Entre las ventajas del sistema PROHERMES se destacan que está compuesto por pocos elementos y genera un impacto mínimo en la operación del receptor.

El método cámara-blanco también ha sido utilizado en concentradores de disco parabólico [35] e incluso en colectores de canal parabólico [38] para la evaluación de la distribución de flujo en la región focal y la detección pérdidas ópticas.

Alternativas, simplificaciones y sistemas híbridos han sido desarrollados a partir del método cámara-blanco. Una alternativa al uso de medidores absolutos es la calibración de la imagen gris con el cálculo de la potencia total entregada por el sistema, haciendo la suposición de que toda ella impacta en la superficie del receptor, como lo hicieron Ulmer, et al. [39] para la caracterización de dos sistemas de disco-Stirling, el sistema DISTAL II de la PSA y el sistema EURODISH. Por su parte, Ho y Khalsa [40] propusieron un método denominado PHLUX (*photographic flux mapping method*) capaz de producir un mapa de flujo a partir de la fotografía del *spot*, la irradiancia normal directa y la reflectividad del receptor. La imagen de luminosidades es calibrada con imágenes grabadas del sol, permitiendo escalar la magnitud de cada pixel. Sin embargo, los errores relativos totales asociados a la irradiancia obtenida con el método pueden ser de hasta 20%-40%.

Ebert et al. [30] utilizaron el método cámara-blanco, junto con simulación de trazado de rayos para medir el flujo incidente en el receptor de una torre solar a partir del desbordamiento alrededor de la apertura del receptor. Fueron capaces de calcular la potencia solar recibida, potencia térmica en el receptor y la eficiencia térmica con incertidumbres aceptables incluso para condiciones de viento. En 2002, Ballestrín [34] propuso un sistema que combina métodos directos, como son los microsensores de medición de flujo, y el método cámara-blanco calibrado con un calorímetro en la torre SSPS-CRS de la PSA. Identificó como principales ventajas de este sistema sus bajas incertidumbres globales ($< \pm 6\%$) y el uso de un blanco que no necesita ser enfriado por agua. Posteriormente, Ballestrin y Monterreal [19] validaron el sistema independiente de microsensores con el método cámara-blanco del sistema ProHERMES 2.A. Concluyeron que un sistema que combina los dos tipos de medición, una directa y la otra indirecta, se enriquece globalmente si las mediciones son hechas con ambas metodologías en conjunto. Además, trabajar con los dos sistemas permite detectar cambios independientes de calibración.

En trabajos más recientes, Ballestrín et al. [31] propusieron simplificar el método fotografiando directamente la superficie de receptores de torres solares, para evitar el uso de partes móviles, obteniendo resultados prometedores en los experimentos realizados en el horno solar de la PSA.

El método cámara-blanco no se limita a la caracterización de un sistema de concentración, sino que puede ayudar en la mejora de receptores. Por ejemplo, Cisneros-Cárdenas et al. [32] usaron el método cámara-blanco, calibrado con un radiómetro de placa circular, para generar «volúmenes efectivos», que son volúmenes en cuya superficie la densidad radiativa es homogénea. Los volúmenes efectivos son el primer paso para generar «isosuperficies» que pueden asistir en el diseño de receptores para evitar flujos pico, altos gradientes de temperatura y sus consecuencias.

Entre las ventajas del método cámara-blanco se reconoce su flexibilidad y sencillez [12], además de su alta resolución espacial, tiempos de medición cortos y la posibilidad de calibrar usando un solo medidor de flujo [11]. Uno de los principales retos del método es el sobrecalentamiento potencial del blanco lambertiano, mitigado comúnmente con enfriamiento por agua o la implementación de sistemas con barras u objetivos móviles para «escanear» el área focal, mientras una cámara toma una serie de fotografías. Sin embargo, estas soluciones tienden a incrementar la complejidad del diseño del sistema de medición, y también su costo. Otro aspecto a considerar, como lo señalaron Röger et al. [11], es el posible deterioro del blanco lambertiano y el radiómetro, lo que hace indispensable una recalibración periódica de cualquier sistema; sin embargo, no dejan de reconocer que la calibración de los medidores de flujo radiativo, en especial del Gardon, suele ser la fuente principal de incertidumbre.

2.4.6 Sobre el diseño de un sistema de medición de flujo

La presencia de flujos radiativos no uniformes en sistemas de concentración solar es innegable y debe ser tomada en cuenta en el diseño de sistemas de medición de flujo. En este sentido, He et al. [41] identificaron como principales consecuencias de los flujos no uniformes en las diferentes tecnologías de potencia solar de concentración: los altos gradientes de temperatura, que provocan estrés térmico en el receptor, deformación o la falla del material; así como las altas temperaturas locales, que pueden provocar la descomposición del fluido de trabajo y el daño del revestimiento del receptor, lo que afecta su eficiencia térmica.

He et al. [41] concluyeron que «la distribución del flujo solar concentrado y la capacidad del fluido de refrigeración para remover calor deben coincidir lo mejor posible». Para diseñar nuevos receptores y sistemas de medición de flujo conviene atender a los dos grupos de soluciones que propusieron, a saber: optimizar la transferencia del fluido de refrigeración y hacer que coincida con la distribución de flujo (enfoque pasivo), y homogeneizar la distribución de flujo para que coincida con la habilidad de transferir calor del fluido (enfoque activo).

Como punto de referencia para nuevos conceptos de medición de flujo concentrado, Röger et al. [11] proponen un catálogo de requerimientos que consideran «necesarios» y «deseables», resumidos en la [tabla 2.1](#).

Tabla 2.1: Requerimientos a considerar en nuevos conceptos de sistemas para medición de flujo concentrado [11].

Requerimientos necesarios	Requerimientos deseables
Medir la cantidad deseada	Baja incertidumbre en la medición
Escalabilidad a grandes receptores	Alta fiabilidad y disponibilidad
Alta seguridad operativa	
Estabilidad suficiente de la temperatura	

Recomiendan, además, que los sistemas tenga baja susceptibilidad a cargas operacionales y condiciones ambientales; que su complejidad técnica sea baja y sea fácil de operar; y no menos importante, que los costos de inversión, mantenimiento y de operación sean bajos, lo que puede lograrse maximizando el uso de piezas estándar.

2.4.7 El horno solar del IER-UNAM

Los hornos solares son dispositivos ópticos capaces de alcanzar grandes concentraciones solares, comúnmente compuestos por un heliostato con seguimiento automatizado, que refleja la radiación solar directa hacia un concentrador; un espejo concentrador, continuo o segmentado, encargado de redirigir a la radiación solar proveniente del heliostato hacia el punto focal del sistema; y un atenuador, a modo de persiana veneciana, instalada entre el heliostato y el concentrador, y que regula la cantidad de radiación solar que llega al concentrador, controlando la potencia solar del horno [42].

Ya en los años 50, Bliss [43] destacó como las principales ventajas de un horno solar bien diseñado que puede proveer una atmósfera limpia de trabajo, sin impurezas químicas extrañas o efectos eléctricos, además de que la intensidad de la radiación concentrada puede ser controlada rápidamente y de manera precisa; lo que hace a este tipo de sistemas superiores a tecnologías convencionales de alta temperatura.



Figura 2.11: Horno solar del Instituto de Energías Renovables de la UNAM. A la izquierda, vista exterior, helióstato y atenuador abierto; a la derecha, interior del edificio, concentrador y mesa de experimentos

El Horno Solar del Instituto de Energías Renovables de la UNAM (HoSIER), ubicado en Temixco, Morelos, fue desarrollado como parte del proyecto del Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar (LACyQS). Se propuso como una herramienta de investigación y desarrollo de dispositivos que utilicen la radiación concentrada en procesos de química solar y el procesamiento de materiales, como los reactores termo-químicos para la obtención de combustibles solares [42]. Tiene la función de brindar servicios tanto a la comunidad académica nacional e internacional, como a la industria y otros sectores de la sociedad.

Los componentes ópticos principales del horno solar, diseñados por Riveros-Rosas et al. [44,45], son: un helióstato con seguimiento en los ángulos de rotación acimutal y de elevación, compuesto por 30 espejos de segunda superficie con un área total de 81 m^2 ; un concentrador con un área total de 38.5 m^2 , segmentado en 409 facetas o espejos hexagonales de primera superficie, apotema de 40 cm, reflectancia de 0.91, organizados en cinco grupos con diferentes distancias focales y montados en una estructura esférica; y un atenuador de 45 persianas de acero inoxidable arenado dispuestas de manera vertical, con aperturas angulares de 0 a 100 %, donde el grosor de todas las persianas representa el 1.5 % del área total de la ventana para una apertura angular del 100 %. El *sandblasting* o arenado es una técnica de tratamiento de superficies, ya sea para limpieza o acabado, que consiste en la proyección de un chorro de material granulado (como puede ser arena) a presión sobre una superficie. Por su parte, el concentrador y el foco se encuentran dentro de un edificio equipado con un laboratorio de química y el sistema de control y monitoreo del horno. El HoSIER es un sistema óptico con configuración «en eje», i.e., la posición relativa del helióstato y el concentrador comparten el eje óptico con el punto focal, que está ubicado a 3.68 m del concentrador.

Además de sus componentes ópticos principales, dos sistemas esenciales del horno son: una mesa 3D con resolución milimétrica sobre la que son montados prototipos y experimentos; y el sistema de adquisición de datos compuesto por un adquisidor Keysight 34972A y una placa de conexiones para termopares, radiómetros, medidores de presión, etc. Los equipos y dispositivos que hacen posible el funcionamiento del HoSIER son clasificados en tres subsistemas:

1. Esenciales (atenuador, helióstato, mesa 3D, sistema de medición de potencia, y cámaras y sensores necesarios para el control de los subsistemas, sistemas de alimentación y análisis de gases).
2. De seguridad (paros de emergencia, monitores de observación y equipo de seguridad).
3. Flexibles (sistemas de adquisición de datos, sistemas de refrigeración y otros sistemas o equipos)

adaptables a las necesidades de cada experimento).

Para su operación, el horno solar cuenta con un programa de control SCADA (acrónimo de *Supervisory Control And Data Acquisition*) diseñado en LabVIEW. Dicho programa monitorea el estado de los componentes del horno solar en tiempo real y le permite al operador modificar la apertura angular del atenuador, corregir la posición del helióstato para ajustar la posición del *spot* concentrado, controlar la velocidad de los motores del helióstato, mover la mesa de experimentos, entre otras funciones.

La caracterización óptica y térmica del HoSIER fue realizada por Pérez-Enciso [42] utilizando el método cámara-blanco, simulación por trazado de rayos y la técnica de calorimetría de agua fría. Para el método cámara-blanco implementado en dicho estudio, se utilizó una cámara CCD y se diseñó un receptor de placa plana lambertiana refrigerada (PPLR) que consistió en dos placas de aluminio rectangulares ensambladas de forma paralela y refrigeradas por un flujo de agua que pasaba entre ellas; la superficie receptora de la PPLR fue sometida al proceso de arenado.

Para calibrar el método cámara-blanco, se utilizó un radiómetro tipo Gardon embebido en la PPLR. Se obtuvo, para una irradiancia directa de $908 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, un flujo radiativo pico de $15.88 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2}$ y una concentración de 17 489 soles [42].

Además, mediante la comparación del mapa de intensidad de flujo capturado con una cámara CCD y la simulación del *spot* por trazado de rayos en el software SolTrace, se estimó un error óptico global del HoSIER de 2 mrad, un error menor al límite máximo de 4 mrad que definieron Riveros-Rosas et al. [44, 45].

Para la caracterización térmica del horno, Pérez-Enciso [42] construyó un calorímetro de cavidad cónica, denominado CAVICAL-2 (diseñado a partir de su predecesor de menor escala, llamado CAVICAL [13, 14]) y se apoyó con modelaciones de transferencia de calor, simulaciones de trazado de rayos y de CFD.

Al identificar a la técnica de calorimetría como más confiable, Pérez-Enciso [42] comparó las mediciones de potencia obtenidas por el método cámara-blanco con las potencias obtenidas con el CAVICAL-2, encontrando que el método cámara-blanco sobreestima la potencia concentrada respecto a la obtenida con el calorímetro en un 18.5%. Por otro lado, en dicho estudio se puntualizó que «la medición de potencia con CAVICAL-2 requiere el uso exclusivo de la mesa de experimentos del horno, de manera que si se quisiera medir la potencia antes de algún experimento, parte de la campaña tendría que ser dedicada a la instalación y desinstalación tanto del calorímetro como del dispositivo experimental». Por esta razón, el receptor de PPLR, más pequeño y ligero, es la mejor alternativa para una medición rápida.

Finalmente, a través de la fundición de tungsteno, se estimó la temperatura máxima alcanzada por el horno en al menos 3680 K.

La ficha técnica del HoSIER y los valores máximos de desempeño en condiciones óptimas de operación reportados por Pérez-Enciso en el año 2015 se resumen en la [tabla 2.2](#).

Tabla 2.2: Ficha técnica del HoSIER y valores máximos en condiciones óptimas de operación (tabla tomada de [42]).

Parámetro	Helióstato	Concentrador	Atenuador	Mesa de experimentos	Desempeño
Dimensiones	9 m × 9 m	6.2 m × 6.2 m	6.3 m × 6.7 m	-	-
Área de espejos	81 m ²	38.5 m ²	42.2 m ²	-	-
Número de facetas o elementos	30	409	47	-	-
Material reflectivo	Aluminio	Aluminio	-	-	-
Reflectancia	0.91	0.91	-	-	-
Distancia focal	-	3.68 m	-	-	-
Tiempo de cerrado	-	-	2 s	-	-
Desplazamiento	Tipo azimutal	-	De 0 a 90°	±0.12 m en los 3 ejes	-
Área de montaje	-	-	-	Base circular de 0.5 m de diámetro	-
Capacidad de carga	-	-	-	250 kg	-
Factor de horno óptimo	-	-	-	-	0.68
Potencia máxima	-	-	-	-	25 kW
Pico máximo de concentración	-	-	-	-	18000 soles
Diámetro del <i>spot</i> a 95 %	-	-	-	-	0.072 m
Temperatura máxima medida	-	-	-	-	3680 K
Error óptico global	-	-	-	-	2 mrad

CAPÍTULO 3

DETERMINACIÓN DE LA «LAMBERTIANIDAD» DE PLACAS DE ALUMINIO

3.1 ¿Por qué se busca una superficie lambertiana?

Una superficie lambertiana ideal emite/refleja intensidad radiativa en todas direcciones con la misma magnitud, por lo que una superficie real que se acerque a la «lambertianidad» reflejaría a un haz de luz incidente con una intensidad radiativa similar en todas las direcciones de un hemisferio.

El blanco del sistema que se implementará en el Horno Solar del IER recibirá la luz solar concentrada desde diferentes direcciones. La imagen del *spot* en el blanco será vista por una cámara ubicada en el eje focal; con una superficie lambertiana se busca que el reflejo de cada faceta contribuya de manera equivalente a la imagen resultante, independientemente de su ángulo de incidencia.

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para evaluar la distribución angular de la radiación reflejada por muestras del material candidato para ser el blanco lambertiano del receptor. Se comparan dos tipos de acabado de la superficie y se obtiene su fracción de lambertianidad a través de un modelo.

3.2 El material para el receptor del SERFluSol

La última caracterización del HoSIER [42] fue el punto de partida para definir las características idóneas del material para el receptor del SERFluSol.

Por la magnitud de energía radiante que recibirá y atendiendo a las recomendaciones de He et

al. [41], se busca un material que tolere altas temperaturas sin deteriorarse (para abarcar el rango completo de aperturas angulares del atenuador) y que propicie su homogeneización en toda la placa; un punto de fusión y conductividad térmica altos cumplirían este requisito. Por otro lado, se busca un material resistente a los cambios de temperatura; en este sentido, un calor específico alto indica que se necesita más energía para elevar la temperatura del material en comparación con otro que tenga un calor específico bajo. Se propone, además, un diseño de receptor compacto, fácil de transportar e instalar, por lo que una baja densidad es otra característica idónea. Por último, se prefiere que el material sea asequible, de bajo costo y fácil manufactura.

En resumen, se consideran prioritarias cinco características para el material del receptor lambertiano: calor específico, conductividad térmica y punto de fusión altos, baja densidad y precio asequible.

El aluminio destaca en las cinco características comparado contra otros metales como el cobre, zinc, níquel y el acero [3, 46] a excepción de su punto de fusión (660 °C para aluminio puro). Por su disponibilidad en el HoSIER y apostando por el éxito del enfriamiento por aire, el aluminio fue elegido como material para la superficie lambertiana del receptor del SERFluSol.

3.3 Preparación de muestras

Las dimensiones propuestas para la placa lambertiana del receptor fueron 30 cm × 25 cm, estimadas a partir del tamaño del *spot* de 7.2 cm de diámetro reportado por Pérez-Enciso [42] y considerando el área necesaria para las mediciones con el método cámara-blanco (detalladas en la [subsección 4.2.3](#)).

Para evaluar las propiedades reflectivas de la placa en condiciones de laboratorio y determinar su lambertianidad fue necesario utilizar placas de dimensiones menores a la placa final del receptor. Las superficies de las placas muestra N y S, descritas a continuación, fueron sometidas a dos tipos de acabado con los que se buscó alcanzar una reflexión lambertiana.

3.3.1 Muestras N

Las muestras N fueron obtenidas de dos placas de aluminio de 1/8 de espesor, la placa N1 con dimensiones de 12 cm × 13.1 cm y la placa N2 con dimensiones de 12.2 cm × 13.7 cm; una de las caras en ambas placas fue sometida a un proceso de lijado con una lijadora de acabado Makita BO 4556.

Se utilizaron tres lijas de agua Fandeli de diferente calibre, C-99 120 (grano grande), A-99 220 (grano mediano) y A-99 320 (grano chico), que serán llamadas L1, L2 y L3, respectivamente. En las dos placas se hizo un lijado preliminar con L1 y un segundo lijado exhaustivo para el acabado, con L2 para la placa N1 y con L3 para N2. En ambas placas la dirección del lijado fue unidireccional. En la [figura 3.1](#) se muestran las placas N antes y después del lijado.

Las placas N1 y N2 fueron cortadas en cuatro placas más pequeñas para facilitar la medición en varias zonas de su superficie; en la [figura 3.2](#) se muestran esquemáticamente las zonas que dieron nombre a cada una de las muestras. Se obtuvieron de esta manera ocho muestras, las placas N1 Z1, N1 Z2, N1 Z3 y N1 Z4 con dimensiones aproximadas de 12.1 cm × 3.2 cm, y las placas N2 Z1, N2 Z2, N2 Z3 y N2 Z4 de aproximadamente 12.2 cm × 3.4 cm.

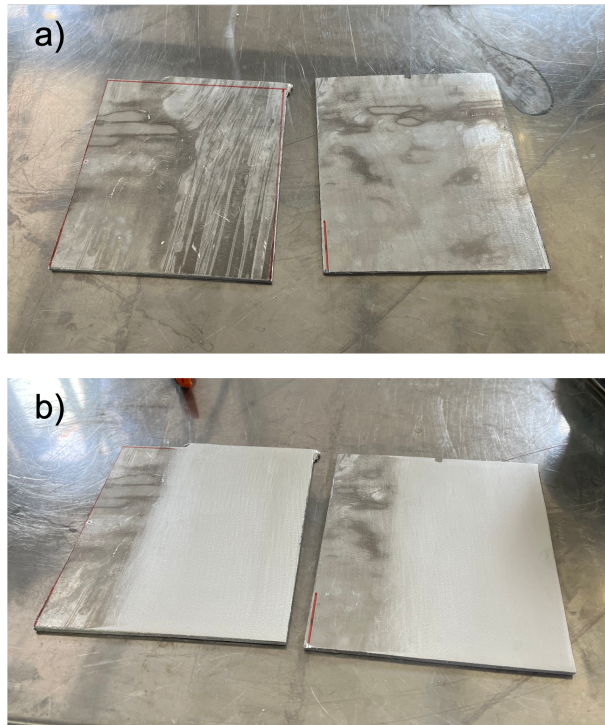


Figura 3.1: Placas N; a) antes y b) después del lijado a máquina. Aluminio de 1/8.

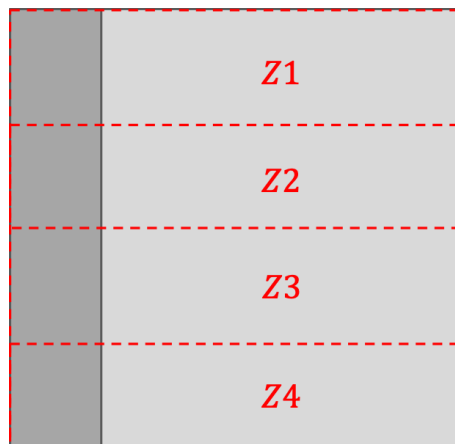


Figura 3.2: Zonas definidas en las placas N y guía de corte (línea de guión roja) para la obtención de las muestras pequeñas.

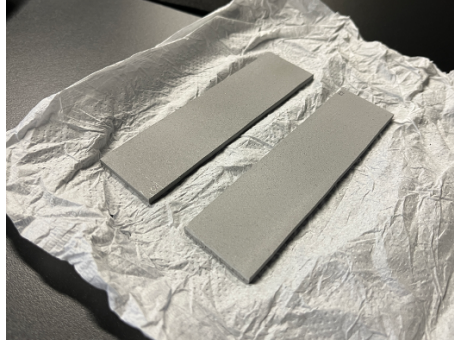


Figura 3.3: Muestras de aluminio de 1/8 sometidas a proceso de arenado.

3.3.2 Muestras S

El proceso de «arenado» (*sand-blasting*) es ampliamente conocido y utilizado en la industria mecánica para el tratamiento y limpieza de superficies, en su mayoría metales. A simple vista las superficies arenadas reflejan la luz de forma difusa, lo que inspiró la idea de evaluar sus características ópticas.

Dos placas de aluminio de 1/8 de espesor fueron sometidas al proceso de *sand-blasting* con arena abrasiva Garnet en el taller «Oskorp» de *sandblast* y pintura electrostática en Huitzilac, Morelos. Las muestras mostradas en la [figura 3.3](#), nombradas S1 y S2, recibieron el tratamiento por ambos lados de la placa; sus dimensiones son aproximadamente 12.2 cm × 3.2 cm.

3.4 Metodología

En esta sección se describe la metodología experimental para medir la luz monocromática reflejada por las muestras N y S en diferentes ángulos al utilizar módulos láser como fuentes luminosas.

En la [figura 3.4](#) se muestra esquemáticamente el arreglo experimental utilizado, cuyas partes principales son: un módulo láser, un espectrómetro BLACK-Comet-CXR-SR con un rango espectral de medición de 200-1080 nm y rejilla holográfica, un receptor de cable de fibra óptica estándar SMA-905, una base giratoria graduada con orificios de montaje, postes de soporte y la muestra.

Para comprobar que el comportamiento óptico y la lambertianidad de las superficies es independiente de la longitud de onda de la luz incidente se realizaron mediciones con dos módulos láser, uno rojo (641.5 nm) y uno verde (533.5 nm). Este aspecto es esencial ya que la luz que recibirá el receptor no será monocromática, sino radiación solar que no es uniforme en el espectro electromagnético (ver [figura 2.9](#)).

Para describir la posición del láser y el receptor durante los experimentos se definen dos ángulos, el ángulo de incidencia θ_i y el ángulo de medición del haz reflejado $\theta_{r,m}$.

La base rotatoria se fijó a una mesa de trabajo mediante tres «pies» como se muestra en la [figura 3.5](#), haciendo coincidir los orificios de montaje; el 0° y 180° de la graduación, fueron alineados al «norte» y «sur» de la mesa, respectivamente. Uno de los tres pies, fijado al norte de la base rotatoria, fue el punto de referencia para rotar la base.

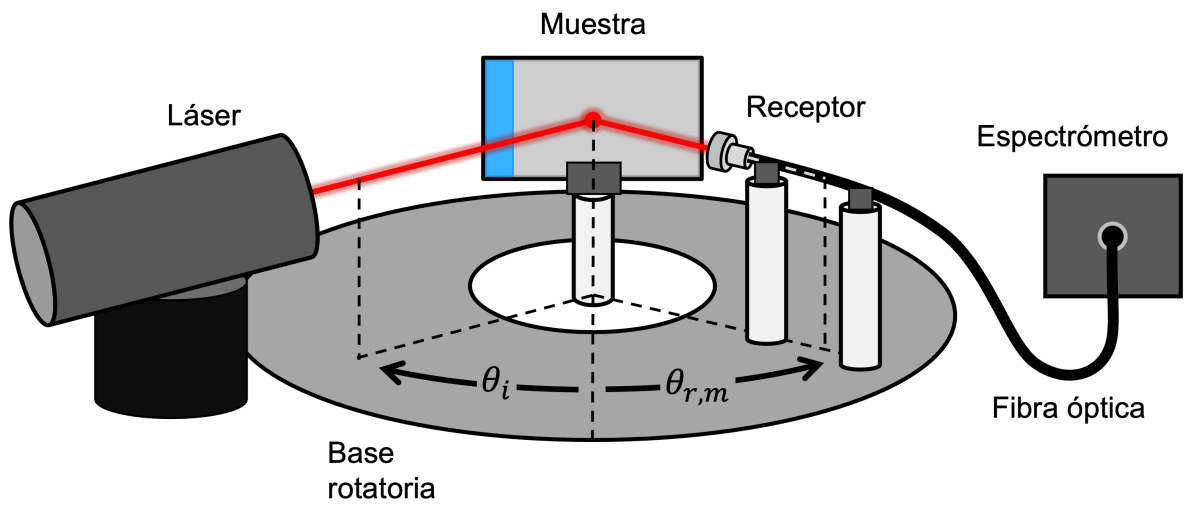


Figura 3.4: Esquema del arreglo experimental, ángulo de incidencia y ángulo de medición del haz reflejado.

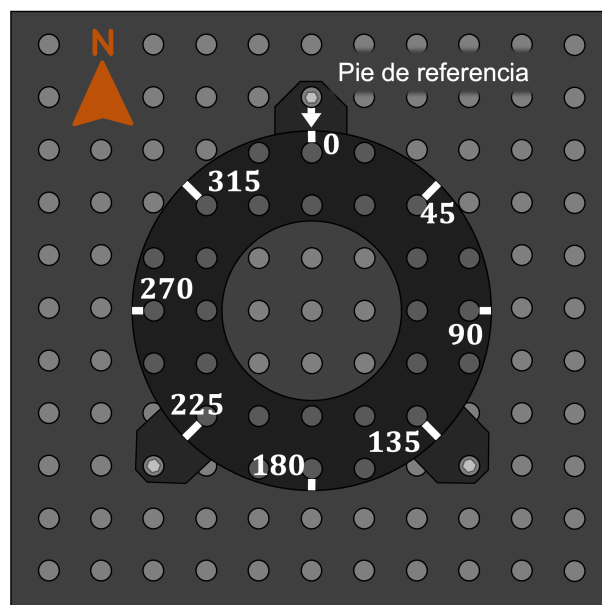


Figura 3.5: Base rotatoria fijada a la mesa de trabajo. El pie al norte es el punto de referencia para cambiar el ángulo de la base.

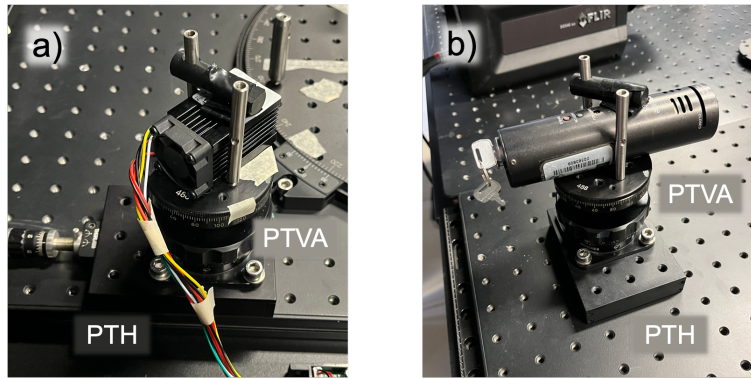


Figura 3.6: Montaje del a) láser verde, y b) láser rojo, en la plataforma de traslación horizontal (PTH) y vertical-azimutal (PTVA).

En el hueco central de la base rotatoria se ensamblan un porta-poste de pedestal y un poste de soporte, en la parte superior de este último se fija un accesorio en forma de pinza, capaz de sostener a una de las placas muestra. Preliminarmente, la pinza se alinea de manera que la cara a evaluar quede mirando hacia el «sur». Posteriormente la muestra se alineará para que la superficie lijada esté en el plano de incidencia.

Sobre la mesa de trabajo se montan en orden ascendente una plataforma de traslación horizontal (PTH), una plataforma de traslación vertical-azimutal (PTVA) y un módulo láser, como muestra la [figura 3.6](#). La función de estas plataformas es lograr un ajuste fino de la posición del láser durante la nivelación y alineación.

La posición de las plataformas sobre las que se monta el láser en la mesa de trabajo, respecto a la muestra en el centro de la base rotatoria, se elige aproximando el ángulo de incidencia deseado con ayuda de los orificios de la mesa de trabajo. Para un ajuste preliminar de la posición, el láser se hace incidir sobre la muestra aproximadamente en su centro respecto al eje vertical.

El montaje del receptor consta de varios elementos, entre ellos un porta-poste de pedestal que se fija a la base giratoria, postes de soporte, abrazaderas de poste en ángulo recto y un soporte anular con una lente de concentración. El «brazo» de postes sostiene al soporte anular que se acerca lo más posible al punto incidente del láser en la muestra y en el que se inserta el receptor de fibra óptica. El ensamble, como se muestra en la [figura 3.7](#), permite la libre rotación de la base rotatoria en ángulos de medición de 0° a 90° . El soporte anular y el receptor de fibra óptica no son montados al brazo de postes hasta la alineación final.

3.4.1 Nivelación y alineación

El primer elemento del arreglo experimental en ser alineado fue el módulo láser, seguido del receptor y terminando con la placa muestra.

Para nivelar el láser, éste se hace incidir sobre el extremo graduado de una escuadra de carpintería a diferentes distancias (S), procurando que incida siempre perpendicularmente a la superficie de la escuadra. El láser está nivelado si, para todas las distancias, el punto de incidencia se mantiene en la misma medida de la escuadra, i.e., está a la misma altura, h_n , como se muestra en la [figura 3.8](#). En caso de que el rayo no esté nivelado, se utilizan pequeñas calzas en la parte delantera o trasera del

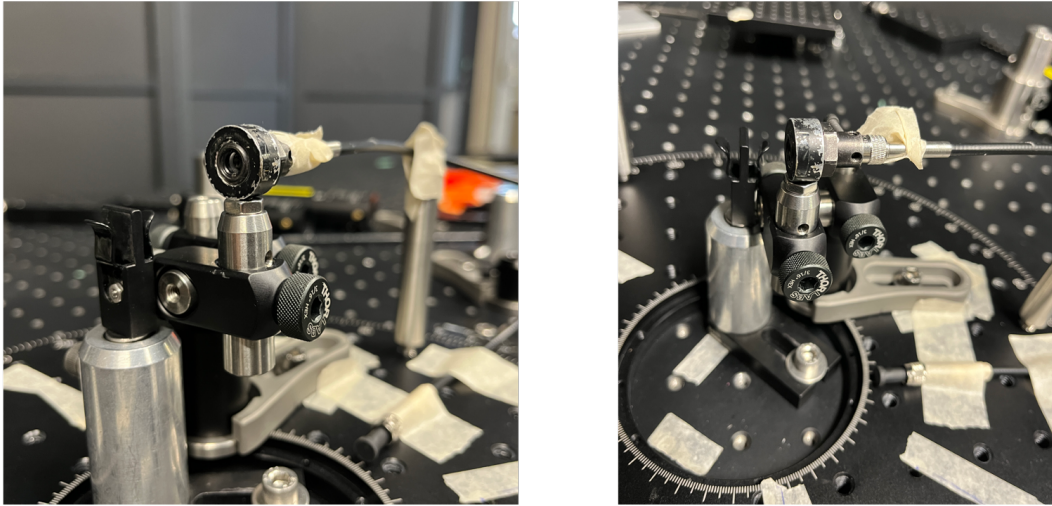


Figura 3.7: Receptor de fibra óptica dentro del soporte anular, sujeto al ensamble de postes y abrazaderas.

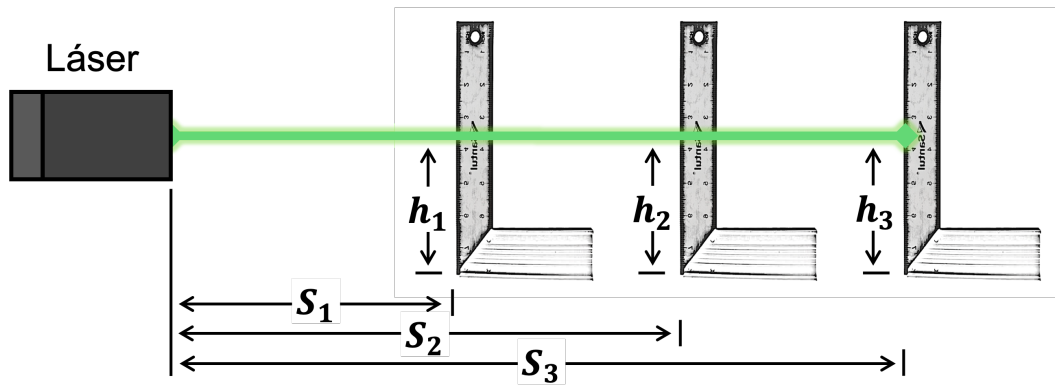


Figura 3.8: Esquema de la metodología de nivelación de un láser. El láser está correctamente nivelado si $h_1 = h_2 = h_3 = h_n$, para $S_1, S_2, S_3 \dots S_n$.

módulo para hacer los ajustes necesarios.

Para alinear el láser a un ángulo de incidencia determinado, la base giratoria es colocada a un ángulo de medición $\theta_{r,m} = 270^\circ - \theta_i$. La escuadra se coloca sobre la diagonal del ángulo de incidencia, tomando como referencia los orificios de montaje de la base, como se muestra en la [figura 3.9](#). Con el láser encendido, se ajusta la dirección con la PTH y la PTVA a modo que el *spot* quede siempre partido a la mitad en el filo de la escuadra. El láser está alineado si incide en el receptor y si para diferentes posiciones de la escuadra el *spot* queda partido a la mitad

Uno de los módulos láser utilizados es alimentado por una fuente de corriente continua Hewlett-Packard 6177C, conectada a una placa de control; los cables y la placa de control fueron fijados a la mesa de trabajo para evitar una desalineación.

Para montar el soporte anular y el receptor de fibra óptica, la base giratoria es colocada a un ángulo de medición $\theta_{r,m} = 270^\circ - \theta_i$, se enciende el módulo láser y se ajusta el brazo de postes del receptor a la altura y orientación requeridas para que el haz incida sobre la lente del soporte anular y pase a

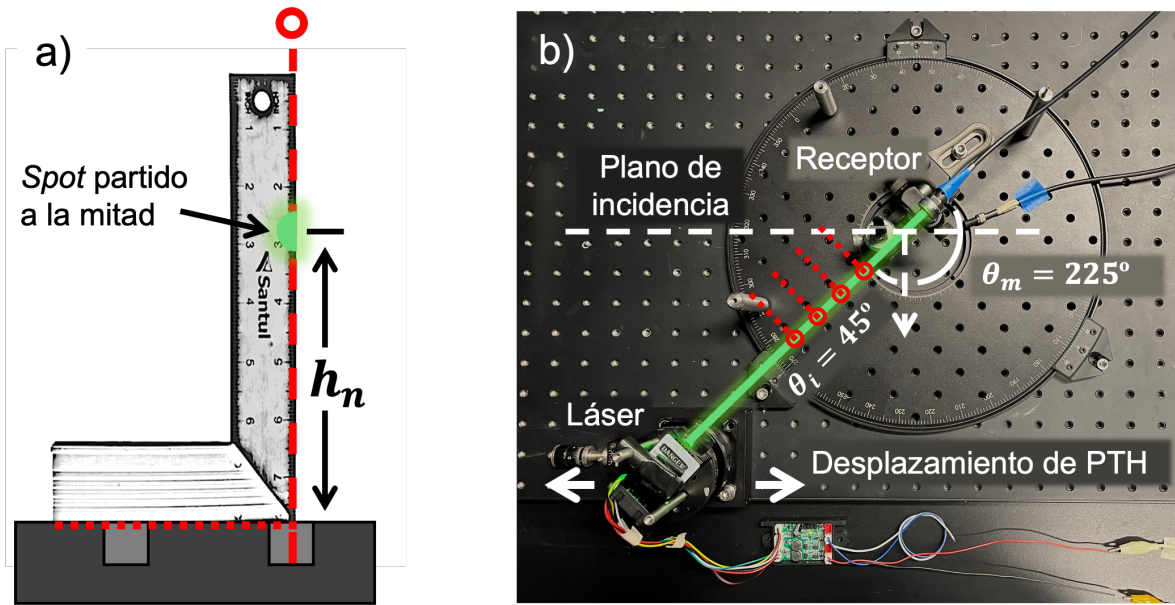


Figura 3.9: a) Vista lateral de la escuadra alineada al centro de un orificio de la base rotatoria, con el spot láser partido a la mitad y a una altura constante h_n . b) Vista superior de la mesa de trabajo con el láser alineado a un ángulo de incidencia $\theta_i = 45^\circ$. La base rotatoria y el receptor se encuentran a un ángulo de medición $\theta_{r,m} = 135^\circ$. Se indica la dirección de desplazamiento de la PTH para lograr la alineación deseada.

través de ella. La lente del soporte anular refleja en cierta medida el *spot* del láser, la reflexión del *spot* se utilizó como referencia de apoyo para la alineación. Una vez que el reflejo del láser coincide con la boquilla del módulo, la lente está alineada y se inserta el receptor de fibra óptica en el soporte anular.

Finalmente, la muestra montada en la pinza del soporte central se alinea con la escuadra de carpintería de manera que la cara sobre la que incide el láser coincida con el plano de incidencia (el plano se ilustra en la [figura 3.9.b](#) visto desde arriba).

3.4.2 Ángulos de medición

La reflexión de la superficie de una placa de aluminio lijada o arenada sigue siendo parcialmente especular a pesar de su acabado, aunque en menor proporción respecto a una lámina pulida. La fracción de la luz reflejada de manera especular tiene un ángulo «máximo» de reflexión, ($\theta_{r,s}$), al que se llamará «ángulo de reflexión especular», por la ley de la reflexión este ángulo tendría igual magnitud que el ángulo de incidencia. Sin embargo, la divergencia de esta componente especular no se compara con la de la fuente, sino que se encuentra ensanchada. Siguiendo los resultados obtenidos por Pettit [9], el perfil dispersión de la componente especular reflejada se representa mediante una distribución Gaussiana relativamente estrecha y con media en $\theta_{r,s}$, como se discutirá más adelante.

Para caracterizar la distribución angular de la radiación reflejada por las placas muestra se eligieron ángulos de medición tomando como referencia a $\theta_{r,s}$, que es la dirección en donde las mediciones máximas del espectrómetro serían obtenidas. Para $\pm 15^\circ$ alrededor de $\theta_{r,s}$ se realizaron mediciones cada 1° , mientras que fuera de este rango las mediciones se realizaron cada 2° . En la [tabla 3.1](#) se resumen

los $\Delta\theta_{r,m}$ utilizados en las mediciones experimentales. Los $\Delta\theta_{r,m}$ propuestos, no mayores a 2° , son esenciales para obtener un buen ajuste e identificar errores de alineación. El arreglo experimental final permite hacer mediciones desde $\theta_{r,m} = 0^\circ$ hasta $\theta_{r,m} = 90^\circ$ sin obstrucciones.

Tabla 3.1: Deltas de ángulos de medición para cada rango de $\theta_{r,m}$.

Ángulos de medición	$\Delta\theta_{r,m}$
$0^\circ \leq \theta_{r,m} \leq (\theta_{r,s} - 15^\circ)$	2°
$(\theta_{r,s} - 15^\circ) \leq \theta_{r,m} \leq (\theta_{r,s} + 15^\circ)$	1°
$(\theta_{r,s} + 15^\circ) \leq \theta_{r,m} \leq 90^\circ$	2°

3.4.3 Secuencia de medición típica

Los pasos a seguir para obtener las mediciones del espectrómetro se describen a continuación:

1. La base rotatoria se coloca en un ángulo de medición $\theta_{r,m} = 0^\circ$, con el receptor en el plano de incidencia (ver [figura 3.4](#)).
2. Se monta la muestra en el pilar central y se comprueba su alineación con una escuadra, cuidando que el extremo de la muestra más próximo al receptor no interfiera con el giro.
3. Se hace una captura de datos con el láser apagado, esta medición es el ruido de fondo del espectrómetro.
4. Se enciende el módulo láser. Si se trata del láser verde, se ajusta el voltaje de alimentación a $10.93\text{ V} \pm 0.05\text{ V}$.
5. Se captura la lectura del espectrómetro con el software SpectraWiz para cada $\theta_{r,m}$, cambiando el ángulo de medición de acuerdo a los $\Delta\theta_{r,m}$ de la [tabla 3.1](#).
6. Se retira a la muestra del pilar central para hacer una captura de datos del láser directo en un ángulo de medición $\theta_{r,m} = 180 - \theta_i$.

3.4.4 Características de los resultados experimentales

Los resultados obtenidos del espectrómetro a través del software SpectraWiz v.5.33. consisten en series de pares de datos en los que se corresponde una longitud de onda (λ_m) con una magnitud que se denotará como q'_{λ_m} , con unidades de watt sobre metro cuadrado, y que será definida más adelante. Para cada ángulo de medición, $\theta_{r,m}$, se hizo una captura de datos con el espectrómetro. El archivo exportado en formato IRR almacena los datos de la medición en un rango de longitud de onda y un $\Delta\lambda_m$ definidos por el usuario.

Las lecturas del espectrómetro nunca son cero, aún con todas las fuentes luminosas apagadas, mostrando la presencia de un «ruido de fondo». El ruido de fondo debe de ser tomado en cuenta y restado de las mediciones experimentales para analizar únicamente la aportación de la luz reflejada.

Al orientar al receptor hacia la muestra, la curva de magnitudes q'_{λ_m} medida por el espectrómetro puede entenderse como la energía radiante por unidad de tiempo, por unidad de área proyectada en

la dirección de la medición $(\theta_{r,m}, \psi)$, cada una relacionada con una longitud de onda λ_m ; donde ψ es el ángulo azimutal del receptor, que se mantuvo constante en el arreglo experimental utilizado. Por economía del lenguaje y sus unidades, se les llamará «flujos» a las magnitudes con el símbolo q , siendo los valores q'_{λ_m} los valores de flujo radiativo medidos por el espectrómetro, denotados como magnitudes direccionales.

A diferencia de una radiosidad direccional espectral, el flujo q'_{λ_m} medido por el espectrómetro no está expresado por unidad de ángulo sólido, sino que es una magnitud absoluta. Por las condiciones del experimento, se sabe que el receptor, visto desde el área que refleja al *spot* láser, ocupa un ángulo sólido igual al área del receptor dividida por el cuadrado de la distancia que lo separa de la muestra. Siendo constantes tanto el área del receptor como la distancia en todas las mediciones, el ángulo sólido del receptor, que será denotado como Ω_m , es una constante experimental.

3.5 Manejo de datos para el cálculo de aportación difusa y especular

El manejo de datos comienza desde la exportación en el software SpectraWiz. Por la cantidad de archivos generados, la clave de la muestra y ángulo de medición son incluidos en el nombre del archivo IRR. Para su análisis, los archivos IRR fueron importados a un cuaderno de Wolfram Mathematica v.13.2. con una estructura de lista como ilustra la [ecuación \(3.1\)](#) para una muestra X , donde el subíndice n en el ángulo de medición θ_{m_n} es el número de mediciones realizadas para la muestra, mientras que k es el número de pares de datos de cada archivo IRR. Para obtener la lectura del espectrómetro sin ruido de fondo se debe hacer la resta $q'_{\lambda_m,k} - q'_{ruido,k}$, donde $q'_{ruido,k}$ son los valores medidos por el espectrómetro con el módulo láser apagado.

$$\begin{aligned}
NX_ZX = & \{ \{ \theta_{m_1}, \{ \{ \lambda_{m,1}, q'_{\lambda_{m,1}} \}, \{ \lambda_{m,2}, q'_{\lambda_{m,2}} \}, \{ \lambda_{m,3}, q'_{\lambda_{m,3}} \}, \dots, \{ \lambda_{m,k}, q'_{\lambda_{m,k}} \} \} \}, \\
& \{ \theta_{m_2}, \{ \{ \lambda_{m,1}, q'_{\lambda_{m,1}} \}, \{ \lambda_{m,2}, q'_{\lambda_{m,2}} \}, \{ \lambda_{m,3}, q'_{\lambda_{m,3}} \}, \dots, \{ \lambda_{m,k}, q'_{\lambda_{m,k}} \} \} \}, \\
& \{ \theta_{m_3}, \{ \{ \lambda_{m,1}, q'_{\lambda_{m,1}} \}, \{ \lambda_{m,2}, q'_{\lambda_{m,2}} \}, \{ \lambda_{m,3}, q'_{\lambda_{m,3}} \}, \dots, \{ \lambda_{m,k}, q'_{\lambda_{m,k}} \} \} \}, \dots, \\
& \{ \theta_{m_n}, \{ \{ \lambda_{m,1}, q'_{\lambda_{m,1}} \}, \{ \lambda_{m,2}, q'_{\lambda_{m,2}} \}, \{ \lambda_{m,3}, q'_{\lambda_{m,3}} \}, \dots, \{ \lambda_{m,k}, q'_{\lambda_{m,k}} \} \} \} \}
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Las mediciones experimentales directas del haz láser rojo, mostradas en la [figura 3.10](#), asemejan a una distribución normal en lugar de ser un pico ideal, por esta razón es conveniente proponer un rango de longitudes de onda en el que se calcule un valor promedio y representativo del flujo reflejado; dicho rango es definido en la [ecuación \(3.2\)](#) con el promedio de las desviaciones estándar de funciones normales ajustadas a cada serie de datos de láser directo, $\sigma_{l,prom}$, alrededor de $\lambda_{l,max}$ que es la longitud de onda experimental del módulo láser, i.e., la longitud de onda para la cual el flujo medido es máximo.

$$\Delta\lambda_{m,prom} = \{ (\lambda_{l,max} - \sigma_{l,prom}), (\lambda_{l,max} + \sigma_{l,prom}) \} \tag{3.2}$$

Se calculó un flujo representativo de cada ángulo de medición, obteniendo el promedio de los flujos $q'_{\lambda_{m,k}}$ con longitudes de onda dentro del rango $\Delta\lambda_{m,prom}$ y que cumplieran la condición mostrada en la [ecuación \(3.3\)](#), con la que se selecciona a flujos con magnitudes mayores a 3/4 de la resta entre los flujos máximo y mínimo, respecto al mínimo; una representación esquemática de los valores que cumplen la condición se muestra en la [figura 3.11](#).

$$\text{mín}(q'_{\lambda_m}) + \frac{3}{4} [\text{máx}(q'_{\lambda_m}) - \text{mín}(q'_{\lambda_m})] \leq q'_{\lambda_{m,k}} \leq \text{máx}(q'_{\lambda_{m,k}}) \tag{3.3}$$

De esta manera, se calculó un valor representativo para cada ángulo $\theta_{r,m}$, obteniendo una lista de datos de flujo espectral contra ángulo de medición, con los que se pueden hacer los cálculos necesarios

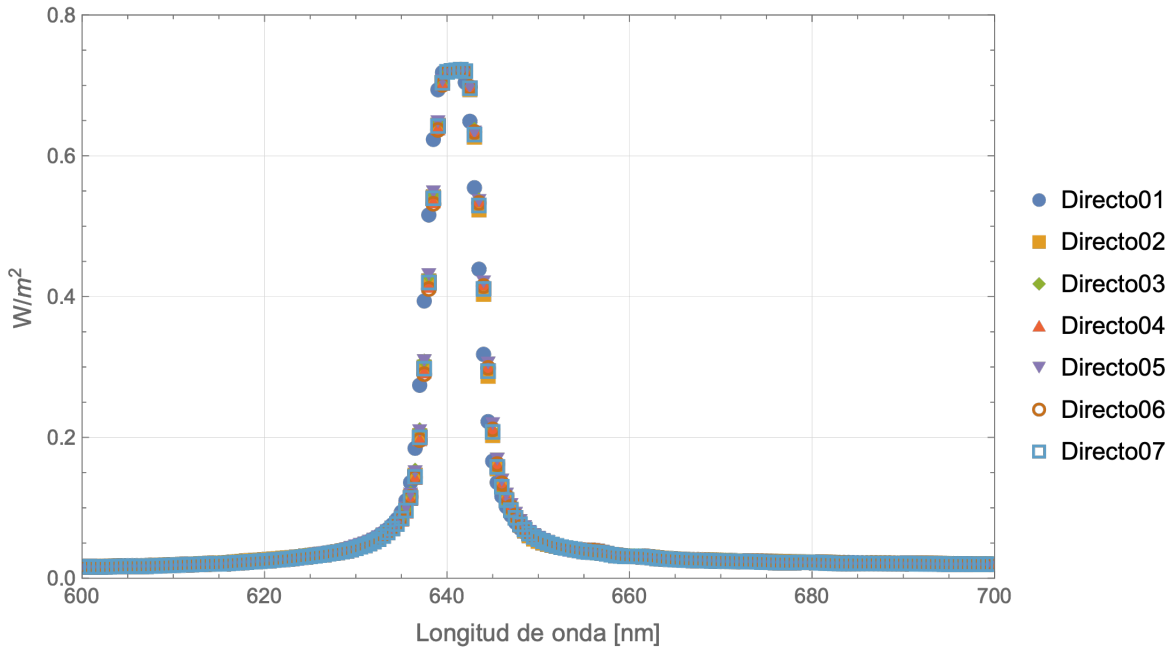


Figura 3.10: Datos experimentales de la medición directa del láser rojo.

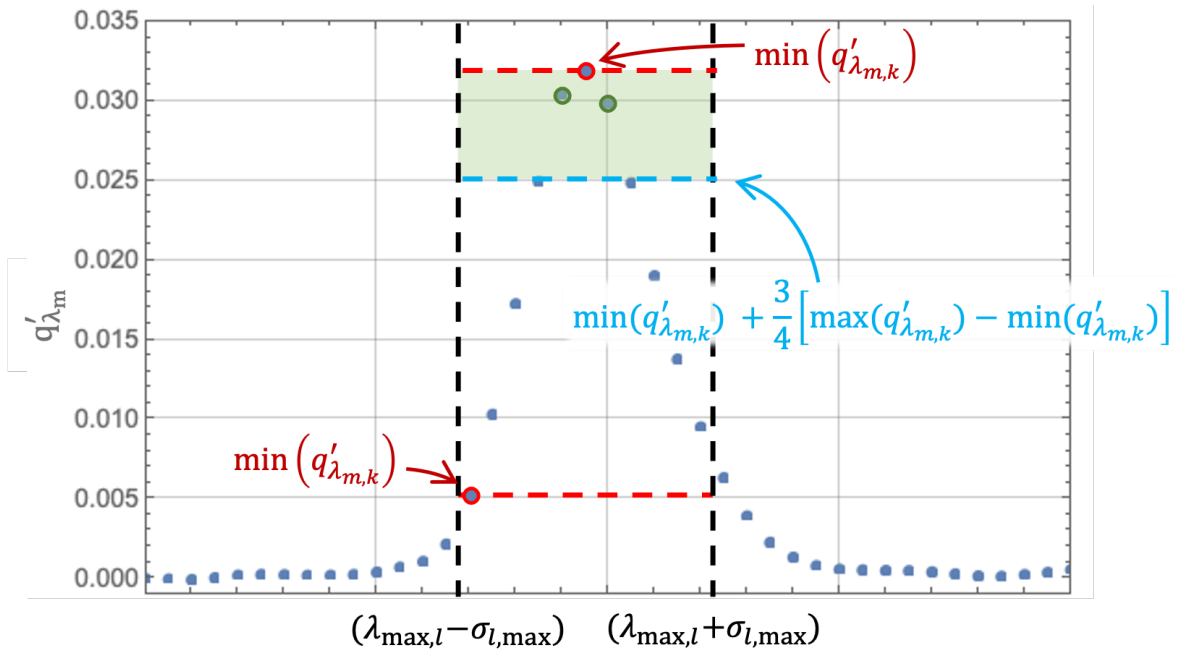


Figura 3.11: Representación esquemática de la condición de selección de datos para el cálculo de un flujo representativo; los datos dentro de la zona verde corresponden al 25% de valores con mayor magnitud, respecto al mínimo y máximo de $q'_{\lambda_m,k}$ dentro del rango $\Delta\lambda_{m,\text{prom}}$, cumpliendo la condición para ser promediados.

para determinar la aportación difusa y especular de la luz reflejada por la superficie. La estructura de esta última serie de datos para n ángulos de medición se muestra en la [ecuación \(3.4\)](#).

$$q'_{\lambda,m} = \{\{\theta_{r,m_1}, q'_{\lambda,m_1}\}, \{\theta_{r,m_2}, q'_{\lambda,m_2}\}, \{\theta_{r,m_3}, q'_{\lambda,m_3}\}, \dots, \{\theta_{r,m_n}, q'_{\lambda,m_n}\}\} \quad (3.4)$$

Cabe destacar, que al utilizar una fuente de luz monocromática como lo es un módulo láser, los flujos promedio, q'_{λ,m_n} , son magnitudes espectrales, mediciones válidas para el pequeño intervalo de longitud de onda alrededor de $\lambda_{l,\max}$.

3.6 Cálculo de aportación difusa y especular

Para poder determinar la fracción de lambertianidad de una superficie se propuso un modelo, al que se llamará «modelo de aportaciones», el cual puede identificar cuánta de la luz reflejada por una superficie es difusa y cuánta es especular. Por la claridad que implica el uso de radiosidades direccionales espectrales para la descripción del fenómeno, se definirá al modelo en función de esas magnitudes y posteriormente se expresará en función de flujos direccionales q' .

El modelo tiene la forma:

$$j'_{\lambda,m}(\theta_{r,m}, \psi) = j'_{\lambda,d}(\theta_{r,m}, \psi) + j'_{\lambda,s}(\theta_{r,m}, \psi) \quad (3.5)$$

Donde $j'_{\lambda,m}(\theta_{r,m}, \psi)$ es la radiosidad espectral total proveniente de una superficie, ψ es el ángulo circunferencial o azimutal y los subíndices d y s denotan a una radiosidad direccional espectral de naturaleza difusa y especular, respectivamente.

Para el término espectral del modelo se propone, siguiendo los resultados encontrados por Pettit [9], que un haz de luz reflejado por una superficie real presenta una dispersión alrededor de la dirección especular. El modelo de esta dispersión es una distribución normal de la intensidad, con una magnitud máxima $i'_{\lambda,\max,s}$ en la dirección especular y que cambia con el ángulo de medición del haz reflejado. Por su parte, y siguiendo la ley del coseno de Lambert, la radiosidad direccional espectral del término correspondiente a la reflexión difusa cambiaría con el coseno del ángulo de medición, siendo máxima en la dirección normal de la muestra con una intensidad radiativa $i'_{\lambda,d}$.

Desarrollando la [ecuación \(3.5\)](#) en términos de intensidades radiativas para un ángulo circunferencial que permanece constante, se obtiene el modelo de aportaciones, como se muestra en la [ecuación \(3.6\)](#).

$$j'_{\lambda,m}(\theta_{r,m}, \psi = 0^\circ) = i'_{\lambda,d} \cdot \cos(\theta_{r,m}) + i'_{\lambda,\max,s} \cdot \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\theta_{r,m} - \theta_{r,s})^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (3.6)$$

Donde $(\theta_{r,s})$ es la dirección especular, $i'_{\lambda,d}$ es el valor de la intensidad radiativa espectral en la dirección normal a la muestra, e $i'_{\lambda,\max,s}$ es la intensidad radiativa emitida en la dirección del ángulo de reflexión especular. El segundo término contiene a una distribución normal o Gaussiana centrada en el ángulo de reflexión especular, con una desviación estándar σ_s . La radiosidad total que sería medida por el espectrómetro, $j'_{\lambda,m}$, es el resultado de la suma algebraica de las radiosidades correspondientes a cada tipo de reflexión.

La relación entre el flujo $q'_{\lambda,m}$ y la radiosidad direccional espectral, $j'_{\lambda,m}$, radica en el ángulo sólido de la medición del espectrómetro. Las unidades de $q'_{\lambda,m}$ son watts por unidad de área por unidad de longitud de onda ($\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ nm}}$), mientras que las de la radiosidad están expresadas, además, por unidad de ángulo sólido. Cada magnitud $q'_{\lambda,m}$ medida por el espectrómetro es resultado de una medición absoluta de la radiosidad $j'_{\lambda,m}$ en el ángulo sólido de la medición, Ω_m . En otras palabras, la relación entre el

flujo medido por el espectrómetro y la radiosidad direccional puede expresarse de forma diferencial como muestra la [ecuación \(3.7a\)](#); recordando que el ángulo de la medición es una constante, el flujo medido por el espectrómetro es el producto de la radiosidad espectral y el ángulo sólido de la medición ([ecuación \(3.7b\)](#)).

$$q'_{\lambda,m} = \int_{\Omega_m} j'_{\lambda,m} d\Omega \quad (3.7a)$$

$$q'_{\lambda,m} = j'_{\lambda,m} \cdot \Omega_m \quad (3.7b)$$

Multiplicando la [ecuación \(3.6\)](#) por Ω_m en ambos lados de la igualdad se obtiene el modelo bidimensional de aportaciones con unidades de Watt por metro cuadrado, como muestra la [ecuación \(3.8\)](#), donde q'_λ es el flujo radiativo medido por el espectrómetro, y $q'_{\lambda,d}$ y $q'_{\lambda,\max,s}$ son un cambio de variable de las intensidades $i'_{\lambda,d}$ e $i'_{\lambda,\max,s}$ multiplicadas por el ángulo sólido constante Ω_m , como muestran las ecuaciones [\(3.9a\)](#) y [\(3.9b\)](#). Los datos de entrada del modelo son los pares de datos experimentales $q'_{\lambda,m}$ y $\theta_{r,m}$, además del ángulo de reflexión especular, $\theta_{r,s}$. El ajuste del modelo a una serie de datos entrega las constantes $q'_{\lambda,d}$, $q'_{\lambda,\max,s}$ y σ_s .

$$q'_\lambda(\theta_{r,m}) = q'_{\lambda,d} \cdot \cos(\theta_{r,m}) + q'_{\lambda,\max,s} \cdot \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\theta_{r,m} - \theta_{r,s})^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (3.8)$$

$$q'_{\lambda,d} \equiv \Omega_m \cdot i'_{\lambda,d} \quad (3.9a)$$

$$q'_{\lambda,\max,s} \equiv \Omega_m \cdot i'_{\lambda,\max,s} \quad (3.9b)$$

Para obtener la aportación especular y difusa de la luz reflejada por la placa es necesaria la integración de los dos términos del modelo en todas las direcciones posibles de reflexión, i.e., una integración en el ángulo sólido total del hemisferio. En las ecuaciones [\(3.10\)](#) y [\(3.11\)](#) se integran por separado los términos del modelo, obteniendo dos indicadores de la aportación difusa y especular denotados como $q_{\lambda,d}$ y $q_{\lambda,s}$, respectivamente; el diferencial de ángulo sólido es expresado en función del ángulo de medición y el ángulo circumferencial. Por utilizar un módulo láser como fuente luminosa, estos indicadores son cantidades espectrales.

$$q_{\lambda,d} = \int_{\psi=0}^{2\pi} \int_{\theta_{r,m}=0}^{\pi/2} q'_{\lambda,d} \cdot \cos \theta_{r,m} \sin \theta_{r,m} d\theta_{r,m} d\psi = \pi \cdot q'_{\lambda,d} \quad (3.10)$$

$$q_{\lambda,s} = \int_{\psi=0}^{2\pi} \int_{\theta_{r,m}=0}^{\pi/2} q'_{\lambda,\max,s} \cdot \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\theta_{r,m} - \theta_{r,s})^2}{2\sigma_s^2}\right] \sin \theta_{r,m} d\theta_{r,m} d\psi \quad (3.11)$$

Con la integración, los indicadores quedan expresados en unidades de potencia por ángulo sólido entre unidad de área ($\frac{\text{W sr}}{\text{m}^2}$), de ahí la conveniencia de obtener una fracción de lambertianidad, en la que el ángulo sólido de la medición, Ω_m , se cancele. Se define a la «fracción de lambertianidad» como el cociente del indicador de aportación difusa y el total de la aportación, como se muestra en la [ecuación \(3.12\)](#), donde $0 \leq F_d \leq 1$. La fracción de lambertianidad representa de forma cuantitativa qué tan difuso es el reflejo proveniente de una superficie, siendo 100 % lambertiana para $F_d = 1$ y 100 % especular para $F_d = 0$.

$$F_d = \frac{q_{\lambda,d}}{q_{\lambda,d} + q_{\lambda,s}} \quad (3.12)$$

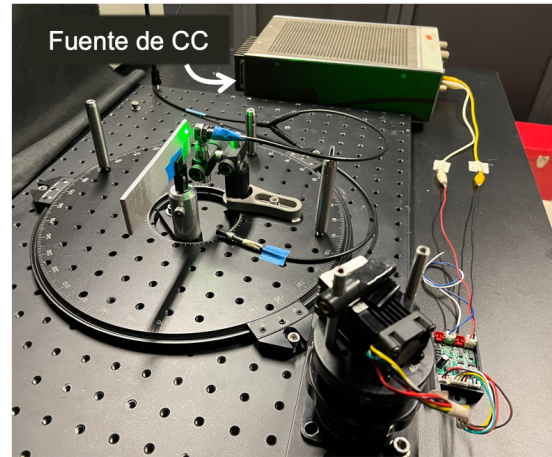
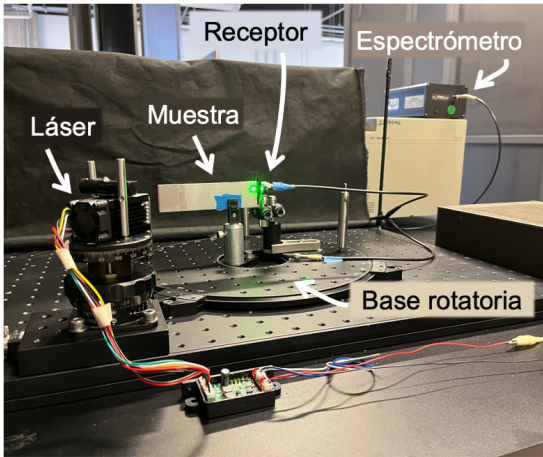


Figura 3.12: Arreglo experimental final con láser verde montado y una muestra de la placa N.

3.7 Montaje experimental final

Para todas las mediciones, el ángulo de incidencia del láser fue de $45^\circ \pm 0.5^\circ$. Para el experimento con láser verde la distancia del *spot* al receptor montado fue de $9.5 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$, la distancia del módulo láser al punto de incidencia en la placa fue de $212 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ y se suministraron $10.93 \text{ V} \pm 0.05 \text{ V}$ al módulo láser. Para el experimento con láser rojo, la distancia del *spot* al receptor montado fue de $9 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ y la distancia del módulo láser al punto de incidencia en la placa fue de $191 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$. En la [figura 3.12](#) se muestra el montaje experimental final utilizando el módulo láser verde.

De acuerdo con las mediciones de láser directo, la longitud de onda del láser rojo es de 641.5 nm con una desviación estándar de 2.83 nm , mientras que la longitud de onda del láser verde es de 533.5 nm con una desviación estándar de 1.98 nm .

Una diferencia significativa entre los dos módulos láser utilizados fue la forma de su *spot*. El *spot* rojo tiene una forma elíptica con dimensiones de $8 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, mientras que el *spot* verde es circular, con dimensiones de $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, como se muestra en la [figura 3.13](#). Las dimensiones del *spot* verde y rojo tienen una incertidumbre de $\pm 0.5 \text{ mm}$.

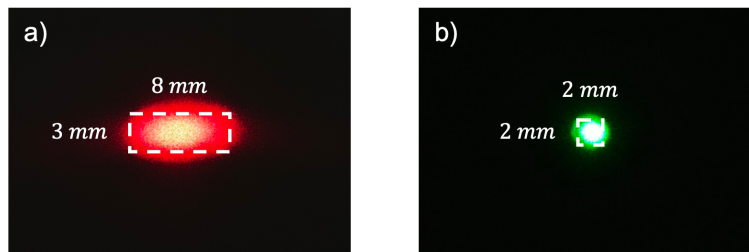


Figura 3.13: Forma y dimensiones ($\pm 0.5 \text{ mm}$) del *spot* de láser a) rojo, y b) verde, bajo condiciones experimentales.

La forma del *spot* no representa ninguna preocupación, ya que el ángulo de aceptación del receptor

de fibra óptica permanece constante, además, para los dos láseres, la cantidad de luz que recibe el receptor está limitada por el soporte anular.

3.8 Resultados

En el experimento con láser verde se utilizaron cuatro muestras de la placa N y las dos muestras S por ambos lados; en el experimento con láser rojo se utilizaron solo dos muestras de la placa N y las mismas muestras S.

Los valores de flujo medidos por el espectrómetro y graficados contra el ángulo de medición para las muestras N se muestran en la [figura 3.14](#). Los resultados en ambos experimentos, muestran claramente una distribución normal, aunque para más de una serie de datos el pico máximo no coincide con el ángulo esperado $\theta_{r,s} = 45^\circ$, i.e. el ángulo ideal de reflexión especular, lo que puede ser consecuencia de la suma de errores de alineación en la muestra, el receptor y el láser. Es destacable que los flujos cercanos a 0° son ligeramente mayores comparados con los cercanos a los 90° , este «desnivel» de la curva Gaussiana es causado por la componente difusa, un coseno.

En la [figura 3.15](#) se muestran los resultados de flujo contra el ángulo de medición. Aprovechando que las muestras S fueron arenadas por ambos lados, se realizó más de una medición por placa. En la notación de la clave de muestra, «C» indica la medición en una «cara», para S1 se realizaron tres mediciones, dos en una misma cara, mientras que para S2 se realizó solo una medición por cara. Por la semejanza de los resultados con una función cosenoidal, se puede predecir para las muestras S que la reflexión difusa es predominante en comparación con las muestras N. A simple vista, se reconoce que las muestras arenadas S se acercan a la lambertianidad más que las muestras lijadas a máquina.

3.8.1 Indicadores de aportaciones, fracción de lambertianidad, bondad del ajuste y gráficos

Por mínimos cuadrados, se ajustó el modelo de la [ecuación \(3.8\)](#) a la serie de resultados de cada muestra, obteniendo los coeficientes necesarios para calcular los indicadores de aportación difusa y especular, $q_{\lambda,d}$ y $q_{\lambda,s}$ siguiendo las integraciones de las ecuaciones [\(3.10\)](#) y [\(3.11\)](#). Como un indicador de la bondad del ajuste se obtuvo el coeficiente de determinación, R^2 .

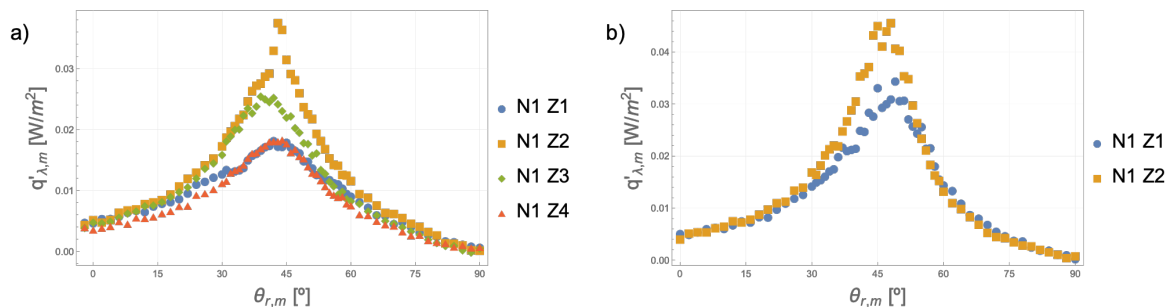


Figura 3.14: Valores representativos del flujo medido por el espectrómetro contra el ángulo de reflexión para las muestras N con a) láser verde, y b) rojo.

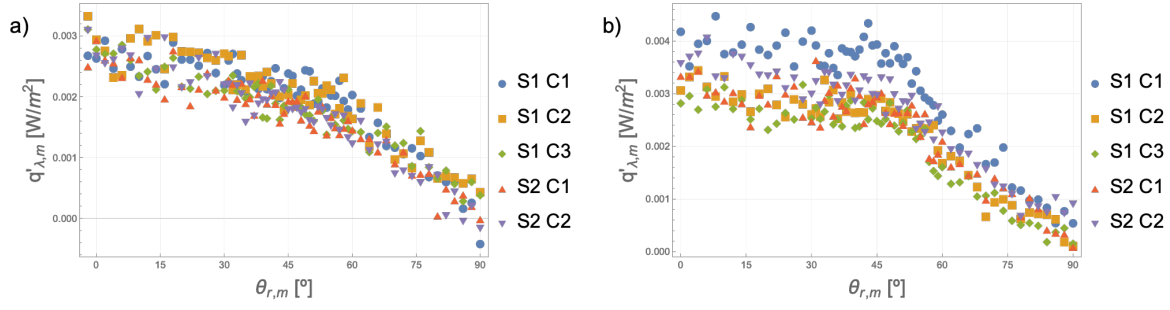


Figura 3.15: Valores representativos del flujo medido por el espectrómetro contra el ángulo de reflexión para las muestras S con a) láser verde, y b) rojo.

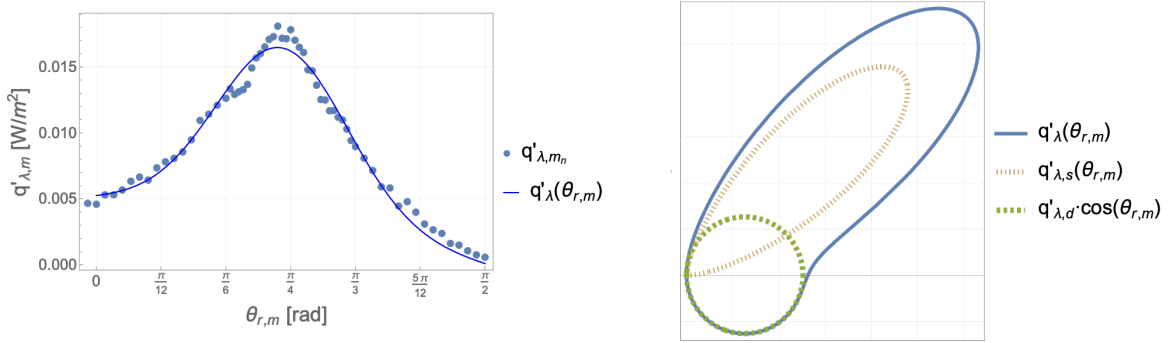


Figura 3.16: Resultados para la muestra N1 Z1 con láser verde. A la izquierda, ajuste del modelo de aportaciones ($R^2 = 0.9959$); a la derecha, gráfica polar en la que el origen representa el punto de incidencia del haz láser, el eje y representa el plano de reflexión, el eje x la dirección normal a la muestra y las distribuciones muestran cualitativamente la diferencia entre la aportación difusa y la especular.

En las figuras 3.16 y 3.17 se muestran como ejemplo los resultados experimentales para las muestras N1 Z1 y la curva del modelo de aportaciones sobre puesta. Se incluye, además, una gráfica polar del modelo de aportaciones, q'_{λ} , con los términos de aportación difusa y especular, $q'_{\lambda,d} \cdot \cos(\theta_{r,m})$ y $q'_{\lambda,s}$ (ecuación (3.13)) graficados por separado. La finalidad de la representación polar es identificar a simple vista cuál de los dos términos del modelo tiene mayor peso en la reflexión total. En estas gráficas polares el origen representa el punto de incidencia del haz láser, el eje y representa la vista superior del plano de la muestra mientras que el eje x representa la dirección normal al área de la placa, siendo xy el plano de reflexión; el modelo se grafica en un rango de ángulos de reflexión de $-90^\circ \leq \theta_{r,m} \leq 90^\circ$.

$$q'_{\lambda,s}(\theta_{r,m}) = q'_{\lambda,\max,s} \cdot \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(\theta_{r,m} - \theta_{r,s})^2}{2\sigma_s^2} \right] \quad (3.13)$$

En las figuras 3.18 y 3.19 se muestran como ejemplo los resultados experimentales para las muestras S1 C1; respecto a la forma del modelo de N1 Z1 los papeles de los términos de aportación se invierten, la circunferencia de aportación difusa es ahora más grande que la curva de aportación especular.

El ángulo de reflexión especular proporcionado al código de ajuste como una variable conocida fue definido inicialmente como $\theta_{r,s} = 45^\circ$, obteniendo un modelo inapropiado para los datos de las muestras N, que no se dispersan alrededor de la dirección ideal de reflexión. En la tabla 3.2 se muestran los

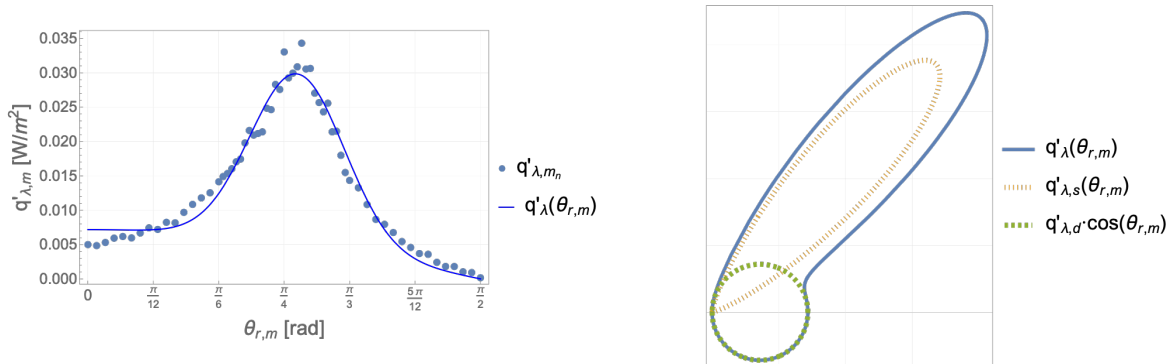


Figura 3.17: Resultados para la muestra N1 Z1 con láser rojo. A la izquierda, ajuste del modelo de aportaciones ($R^2 = 0.9922$); a la derecha, gráfica polar.

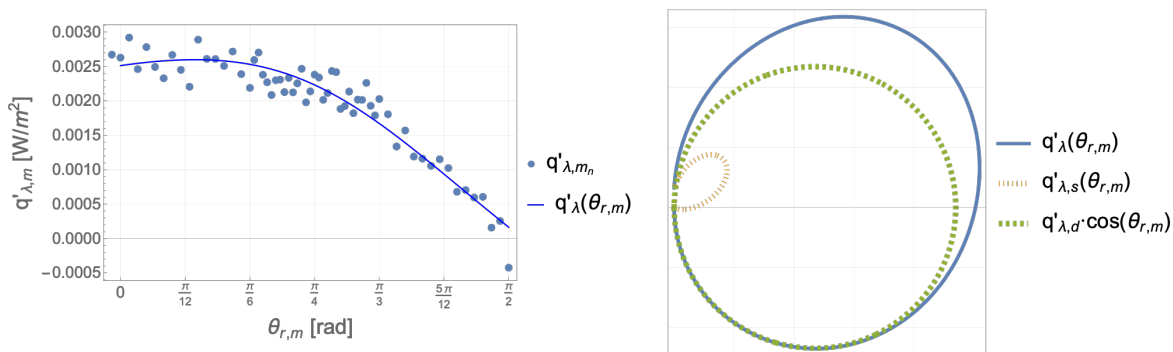


Figura 3.18: Resultados para la muestra S1 C1 con láser verde. A la izquierda, ajuste del modelo de aportaciones ($R^2 = 0.9902$); a la derecha, gráfica polar en la que el origen representa el punto de incidencia del haz láser, el eje y representa el plano de reflexión, el eje x la dirección normal a la muestra y las distribuciones muestran cualitativamente la diferencia entre la aportación difusa y la especular.

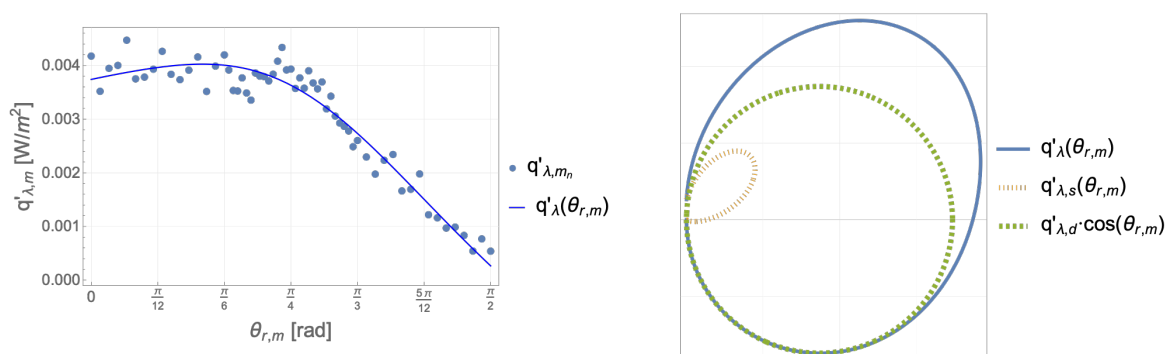


Figura 3.19: Resultados para la muestra S1 C1 con láser rojo. A la izquierda, ajuste del modelo de aportaciones ($R^2 = 0.9933$); a la derecha, gráfica polar.

ángulos de reflexión especular elegidos como variable para el ajuste de cada muestra, con estos ángulos se obtuvo el coeficiente de determinación más cercano a 1. Para las muestras S sí se definió $\theta_{r,s} = 45^\circ$.

Con las constantes obtenidas para cada muestra, se obtuvieron los indicadores de aportación difusa y especular, las fracciones de lambertianidad y el coeficiente de determinación, R^2 , que representa la bondad del ajuste del modelo. En el [apéndice A](#) se agrupan los resultados para cada muestra en las tablas [A.1](#), [A.2](#), [A.3](#) y [A.4](#).

Tabla 3.2: Ángulo de reflexión especular proporcionado como variable conocida para el ajuste del modelo de aportaciones.

Muestra	$\theta_{r,s}$ [°]	
	Verde	Rojo
N1Z1	43	48
N1Z2	43	46
N1Z3	41	
N1Z4	43	

Tabla 3.3: Fracción de lambertianidad promedio de las muestras N y S para cada experimento. Desviación estándar y error relativo de $F_{d,prom}$.

	Muestras N		Muestras S	
	Rojo	Verde	Rojo	Verde
$F_{d,prom}$	0.2959	0.3220	0.8003	0.8078
σ	0.0029	0.0084	0.0954	0.1157
α	0.0097	0.0262	0.1192	0.1432

Para obtener una fracción de lambertianidad se promedió F_d para cada experimento, encontrando así que la superficie de placa N, sometida al lijado a máquina, refleja aproximadamente el 30% de la luz de forma lambertiana mientras que una placa sometida al proceso de arenado refleja alrededor del 80% de la luz de forma difusa. En la [tabla 3.3](#) se muestran a detalle los promedios de F_d así como su desviación estándar, σ , y el error relativo, α , definido como:

$$\alpha = \frac{\sigma}{F_{d,prom}} \quad (3.14)$$

Se reconoce, además, que los promedios de fracción de lambertianidad del experimento con láser rojo y verde para las mismas muestras no difieren significativamente, indicando que en el espectro visible la longitud de onda de la fuente luminosa no influye en las propiedades reflectivas de la superficie y puede esperarse que la radiación solar tenga el mismo comportamiento.

Con base en los resultados obtenidos, se considera a una placa de aluminio con acabado arenado como principal candidato para ser utilizado como el blanco del receptor del SERFluSol.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA: PROTOTIPOS Y EVALUACIÓN DEL SERFLUSOL

4.1 Sistema de evaluación rápida de flujo solar concentrado con enfriamiento por aire

El sistema de evaluación rápida de flujo solar concentrado (SERFluSol) con enfriamiento por aire permite obtener el mapa de flujo y la potencia de la radiación solar concentrada por el Horno Solar del IER-UNAM con el método «cámara-blanco». En la [figura 4.1](#) se muestran esquemáticamente los elementos principales del SERFluSol, que son: el receptor, cámara CCD y equipos de enfriamiento y monitoreo. Adicional al sistema, se muestra la cámara termográfica utilizada para evaluar la distribución de temperaturas en el blanco lambertiano del receptor para diferentes configuraciones de enfriamiento por aire.

El mapa de flujo de la mancha de radiación solar concentrada se obtuvo calculando la relación entre los valores de luminosidad de las fotografías del blanco lambertiano, tomadas con la cámara CCD, y el flujo leído por el medidor Gardon que se relaciona con la integral del flujo incidente en su cara receptora. Este procedimiento será descrito más adelante.

4.2 El receptor

El receptor está compuesto por un blanco lambertiano, un radiómetro de lámina circular o medidor Gardon y una estructura de soporte. El blanco lambertiano es una placa de aluminio de 1/8 de espesor sometida al proceso de arenado, que cambia las propiedades ópticas de la superficie de manera que refleja al menos un 80 % de la luz de forma difusa, de acuerdo con los resultados presentados en el [capítulo 3](#). El blanco lambertiano recibe la mancha concentrada por el HoSIER para luego ser fotografiado con la cámara CCD.

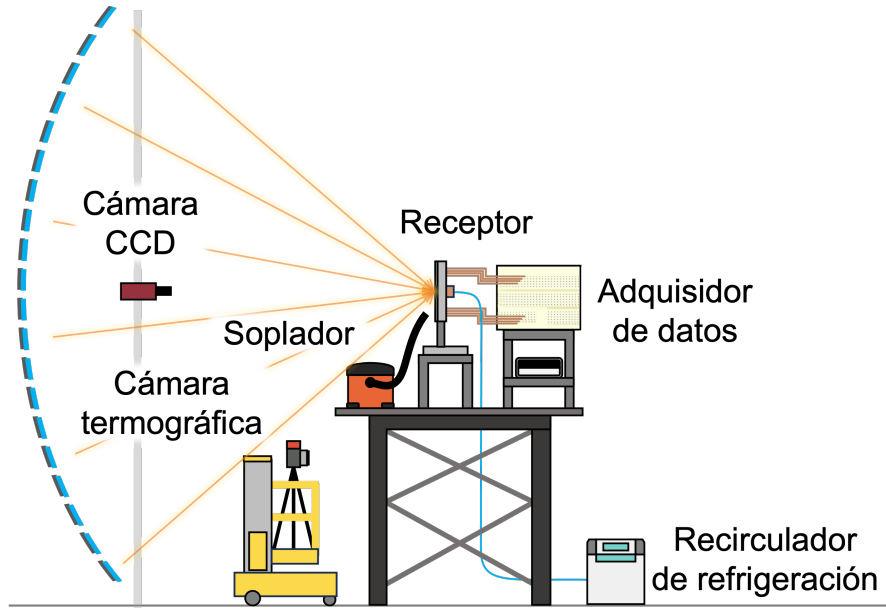


Figura 4.1: Esquema de los elementos principales del SERFluSol dentro del edificio del HoSIER y ubicación de la cámara termográfica. El receptor se encuentra alineado en el punto focal del concentrador.

Debido a la deformación causada por los estreses térmicos, se utilizaron dos placas de aluminio en los prototipos del receptor, una para las versiones de prueba (v.0.1 y v.0.2) y otra para la versión final (v.0.3); ambas de forma rectangular, con dimensiones de $221 \text{ mm} \times 276 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ y $220 \text{ mm} \times 329 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$, respectivamente. Para unir las placas a las estructuras de soporte se realizaron perforaciones en las placas, además de un orificio de $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diámetro que enmarca a la cara receptora del medidor Gardon.

4.2.1 Reflectancia solar del blanco lambertiano

Para estimar la fracción de radiación solar reflejada y absorbida por el receptor y considerando que ésta no es uniforme en el espectro visible, se calculó la «reflectancia solar» de la placa arenada, magnitud que representa la fracción de luz solar que será reflejada por ella mientras que el resto será absorbida. La ecuación (4.1) muestra la operación integral para obtener la reflectancia solar, ρ_G , donde ρ_λ es la reflectancia espectral de la superficie y g_λ es la irradiancia espectral solar.

$$\rho_G = \frac{\int \rho_\lambda g_\lambda d\lambda}{\int g_\lambda d\lambda} \quad (4.1)$$

La reflectancia espectral de las placas de aluminio se obtuvo para ocho muestras con un espectrofotómetro UV-Vis/NIR Jasco V-670 en un rango de longitudes de onda de 250 nm–2500 nm. En la figura 4.2 se muestran las curvas de reflectancia obtenidas para las ocho muestras. Para el cálculo se tomaron como referencia los datos de NREL de irradiancia espectral directa en condiciones de Masa de Aire 1.5 [8].

Para longitudes de onda entre 280 nm y 2500 nm, la reflectancia solar media del blanco lambertiano es $\rho_{G,m} = 34.68 \%$, con una desviación estándar de 2.48 % y un error relativo de 0.07.

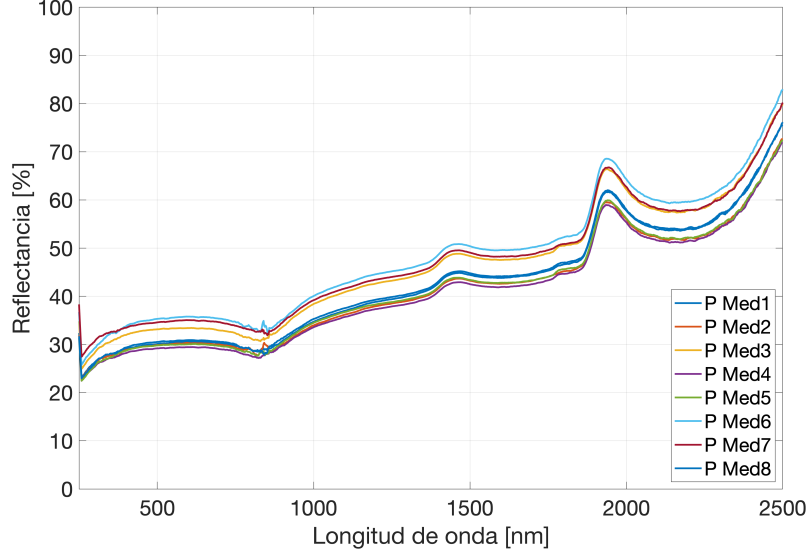


Figura 4.2: Curva experimental de reflectancia de la placa arenada del receptor.

4.2.2 Características del medidor Gardon

Se utilizaron dos Medidores Gardon (Vatell TG-1000-1) (figura 4.3) para los experimentos en el horno solar. El Gardon 1, calibrado en 2009, se utilizó en los primeros prototipos del SERFluSol previniendo el daño del segundo radiómetro en caso de algún problema con el enfriamiento por aire; las mediciones obtenidas con el Gardon 1, por su antigüedad y el deterioro de su revestimiento, son consideradas como poco fiables. Sin embargo, con los resultados de las jornadas experimentales fue posible proponer un nuevo «factor de escala» para rehabilitar el radiómetro, como se mencionará más adelante. El segundo medidor (Gardon 2), calibrado en 2021, se usó en los experimentos finales de este trabajo. En la tabla 4.1 se resumen los datos de los radiómetros: el factor de escala, que relaciona la lectura de la *fem* con el flujo radiativo, el tipo de revestimiento de la lámina de constantán, la emisividad y el diámetro de la cara receptora.

Tabla 4.1: Datos de calibración de los radiómetros utilizados.

Características	Gardon 1	Gardon 2
Fecha de calibración	06/15/2009	05/20/2021
Factor de escala [$\frac{W}{cm^2 mV}$]	29.51	168.9
Revestimiento	Pyromark 1200	Grafito Coloidal
Emisividad	0.95	0.82
Diámetro de cara receptora [mm]	25.36	25.32

Para suministrar el flujo de enfriamiento requerido por el Gardon se utilizó un recirculador de refrigeración de agua Julabo FL1201. La temperatura del agua fue ajustada a 16 °C en todos los experimentos; de acuerdo con su hoja técnica, el caudal típico del recirculador es de 2.8 $\frac{L}{min}$.

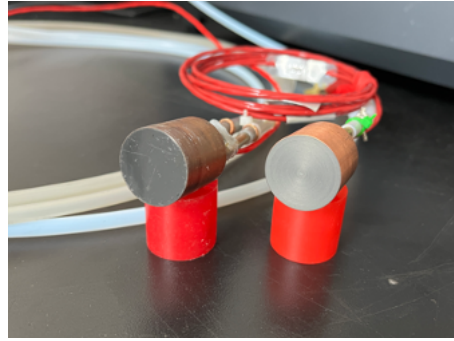


Figura 4.3: Medidores Gardon; Gardon 1 a la izquierda, Gardon 2 a la derecha.

4.2.3 Zonas de la placa y ejes de referencia

El método «cámara-blanco» requiere la captura de pares de imágenes de una misma mancha de radiación solar concentrada; en la primera imagen, la mancha debe incidir en un blanco lambertiano liso; en la segunda, una sección del área de la mancha es ocupada por el medidor Gardon insertado en el blanco lambertiano; de este modo, se obtienen dos mapas de intensidad de la distribución de flujo y se puede relacionar a la sección de la mancha ocupada por el Gardon con las intensidades correspondientes a la misma área en la fotografía con el blanco liso.

En la placa del receptor se definieron dos zonas, una zona lisa en la que se toma la foto de la mancha solar completa, «Zona de Placa», y una zona que incluye al Gardon, en la que se obtiene la medición de referencia que servirá para el cálculo del mapa de flujo, «Zona del Gardon», como se muestra en la [figura 4.4.a](#). Para facilitar la descripción de los componentes en el receptor se definieron tres ejes de referencia sobre la placa, con origen en el centro del Gardon; las direcciones \hat{x} , \hat{y} y \hat{z} se esquematizan en la [figura 4.4.b](#).

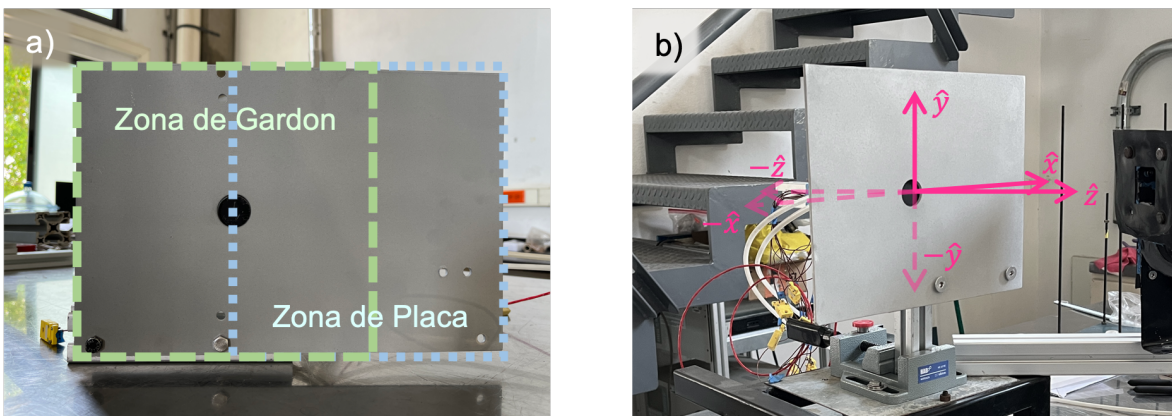


Figura 4.4: a) «Zona del Gardon» y «Zona de Placa». b) Ejes de referencia de la placa lambertiana.

4.2.4 Enfriamiento por aire

El enfriamiento por aire es uno de los objetivos principales del SERFluSol, pues éste simplifica el proceso de montaje del receptor al no ser necesario un sistema de refrigeración adicional para refrigerar la placa lambertiana.

Para generar el flujo de enfriamiento del receptor se utilizaron tres sopladores de aire diferentes: un soplador centrífugo IMESA S265 R8D, un soplador centrífugo Dayton 1TDN3 (4C760) y una aspiradora de 22.5L RIDGID WD06700. Los sopladores fueron instalados junto al receptor en la mesa de experimentos con diferentes configuraciones a medida que se perfeccionó al receptor, como se describe en la [sección 4.3](#).

El punto de fusión del aluminio es aproximadamente 660 °C. En el HoSIER, con las facetas limpias y un porcentaje máximo de apertura angular del atenuador se han alcanzado temperaturas por encima de los 3400 °C [42], incluso a porcentajes bajos es típico lograr altas temperaturas de operación. El principal propósito del enfriamiento por aire, en conjunto con la secuencia de obtención de imágenes, es salvaguardar la integridad del receptor para todo el rango de aperturas.

4.3 Prototipos del receptor

La disposición de los elementos del receptor, a saber: el soporte de la placa, del medidor Gardon, los termopares de monitoreo y los sopladores de aire, fue modificada a medida que avanzó el proyecto. A continuación se describen las tres distintas versiones del receptor.

4.3.1 Receptor v.0.1.

En el primer prototipo de receptor se utilizó el Gardon 1. La estructura de soporte consistió en un perfil de aluminio estructural que sostenía a la placa por el borde inferior, además de un par de perfiles en dirección $-\hat{z}$ (ver [figura 4.4](#)) a los que se fijó el medidor Gardon con una abrazadera en forma de «U». Dos filas de seis termopares se fijaron a la cara posterior de la placa, en las direcciones $-\hat{x}$ y \hat{y} (ver [figura 4.5.a](#)); la distancia entre termopares en una misma fila fue de 15 mm.

La estructura se colocó sobre una base metálica en la mesa de experimentos del horno, a la que se fijaron dos sopladores de aire, el soplador centrífugo IMESA (SCI) apuntando al centro de la cara posterior de la placa (en dirección \hat{z}) y el soplador centrífugo Dayton (SCD) apuntando a la cara anterior con un ángulo aproximado de 30° en el plano xz de los ejes de referencia, como se muestra en las figuras [4.5.b](#) y [4.8.a](#).

4.3.2 Receptor v.0.2.

Con la segunda versión del receptor se buscó con una estructura menos robusta pensando en facilitar el flujo de aire y así mejorar la transferencia de calor por convección forzada. En esta versión del receptor también se utilizó el Gardon 1. La estructura de soporte se simplificó, conservando solo dos perfiles como soporte de la placa y el Gardon, como se observa en la [figura 4.6.a](#).

Se utilizó la segunda placa de aluminio arenado, con dimensiones de 220 mm \times 329 mm \pm 0.5 mm.

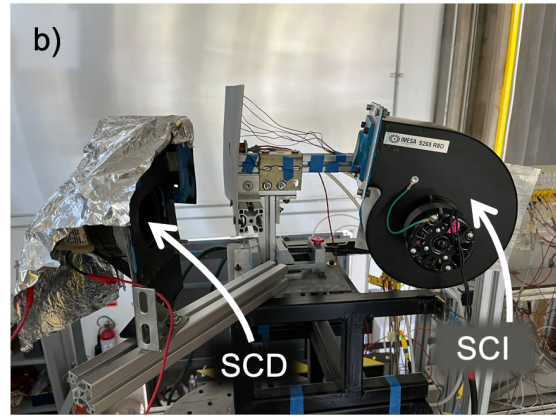
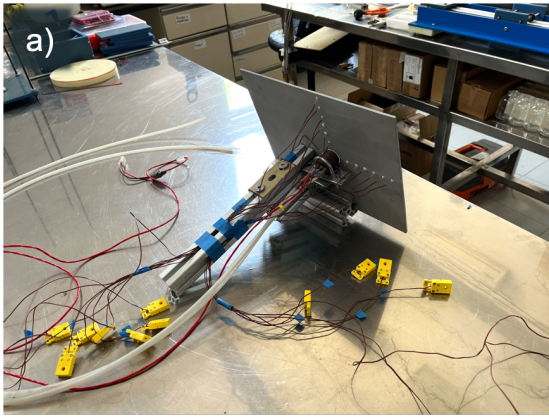


Figura 4.5: Receptor v.0.1. a) Estructura de soporte e instrumentación de la versión 0.1. del receptor. b) Receptor montado en la mesa de experimentos del horno enfriado por el SCD y SCI.

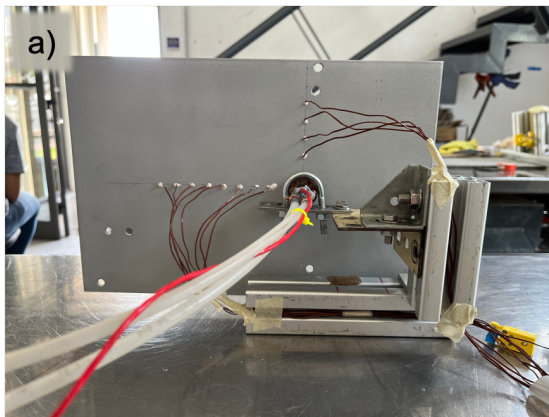


Figura 4.6: Receptor v.0.2. a) Estructura de soporte simplificada de la versión 0.2. del receptor. b) Receptor enfriado por el SCD y SCI, montados en la mesa de experimentos del horno.

Dos filas de termopares se fijaron en la cara posterior de la placa, ocho en la dirección \hat{x} y cuatro en \hat{y} , conservando la distancia de 15 mm. El número de termopares en \hat{x} se aumentó respecto al receptor anterior para cubrir el área de la placa sobre la que se desplaza la mancha solar concentrada para la captura de imágenes, procedimiento que será detallado en la [sección 4.6](#).

Como se muestra en las figuras 4.6.a y 4.8.b, dos sopladores se fijaron nuevamente a la base metálica. El SCI se colocó apuntando a la cara posterior como en la versión 0.1., mientras que el SCD se colocó apuntando al Gardon aproximadamente a 150° en el plano xz , i.e., en dirección opuesta al de la versión 0.1.

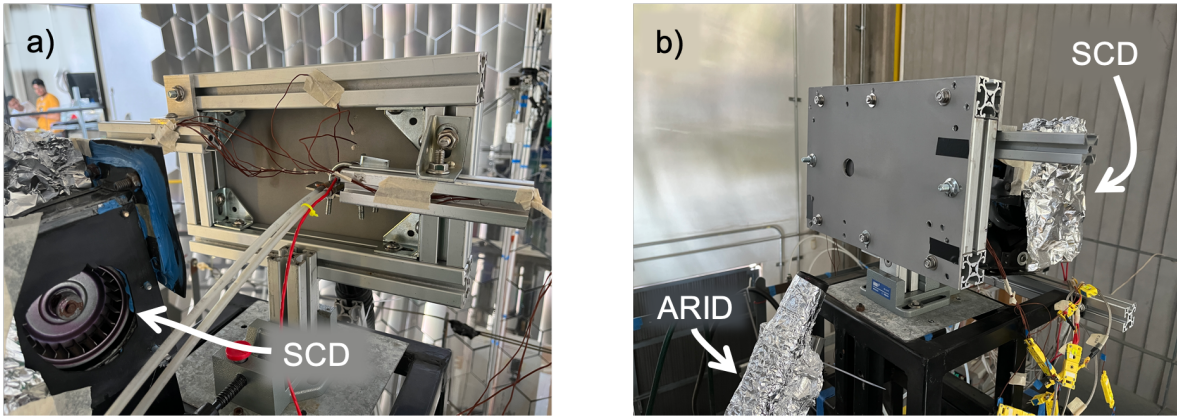


Figura 4.7: Receptor v.0.3. a) SCD apuntando a la cara posterior del receptor, el marco de aluminio estructural sostiene a los termopares y al medidor Gardon. b) Boquilla de la ARID apuntando al centro de la cara anterior de la placa lambertiana; tres trozos de cinta de aislar negra fueron colocados en los bordes para la calibración termográfica.

4.3.3 Receptor v.0.3.

A pesar de que la estructura de la versión 0.2. facilitó el flujo de aire para el enfriamiento de la placa, ésta se deformó después de las mediciones con porcentajes de apertura angular del atenuador cercanas a 40%. Se reconoció como prioridad la necesidad de una estructura que le permitiera a la placa soportar los esfuerzos mecánicos provocados por el gradiente térmico en su superficie. Para dar robustez al receptor y evitar la deformación de la placa se construyó un marco de aluminio estructural (ver figura 4.7.a) que, además, fungió como disipador de calor.

El SCD se colocó apuntando a la cara posterior de la placa enmarcada y, como segundo soplador, la boquilla de la aspiradora RIDGID (ARID) se dirigió al centro de la placa en un ángulo aproximado de 155° en el plano yz , como muestran la figura 4.7 y figura 4.8.c. En la cara anterior de la placa se colocaron tres trozos de cinta de aislar negra, éstas fueron las áreas de referencia para determinar el valor de la emisividad de la placa lambertiana durante el análisis termográfico (sección 5.8).

El receptor se colocó en la mesa de experimentos del HoSIER, a 3.68 m del concentrador, en el punto focal. Para una alineación final, se abrió el atenuador del HoSIER a un 15% y se ajustó la posición de la mesa de experimentos, procurando que ésta pudiera desplazarse libremente para ubicar la mancha en la zona del Gardon y de Placa.

Para la configuración de la versión 0.3. de receptor se utilizó la misma placa de la versión 0.2. y una configuración similar de termopares, siete en la dirección \hat{x} y dos en \hat{y} , conservando la distancia de 15 mm como se muestra en la figura 4.9.

4.4 Equipos de enfriamiento y monitoreo

El monitoreo de la temperatura de la placa durante los experimentos, se realizó con termopares tipo K. Los termopares fueron fijados a la cara posterior de la placa con cemento para altas temperaturas OMEGA[®] en perforaciones de aproximadamente $1 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ de profundidad.

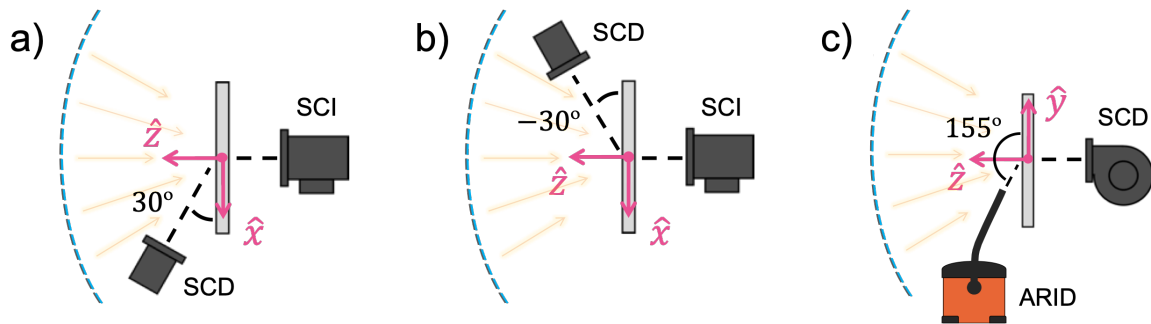


Figura 4.8: Esquema de las configuraciones de los sopladores de aire para los prototipos del receptor. a) Vista superior de la versión 0.1. del receptor; el SCI apuntando a la cara posterior y el SCD a la anterior. b) Vista superior de la versión 0.2. del receptor; el SCI en la cara posterior y el SCD en la anterior con un ángulo diferente a la versión 0.1. c) Vista lateral de la versión 0.3. del receptor; el SCD en la cara posterior y la ARID, a manera de soplador, en la cara anterior.

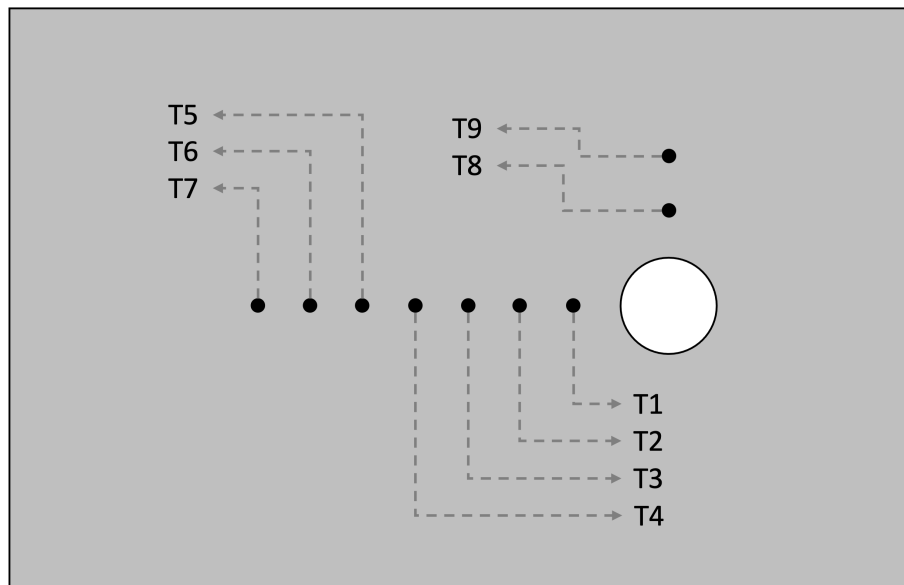


Figura 4.9: Esquema de termopares en la cara posterior de la placa de la versión 0.3. del receptor. La distancia entre los termopares es de 15 mm tanto en la fila y en la columna.

Los equipos de enfriamiento utilizados fueron los sopladores de aire, en una configuración diferente para cada versión del receptor, y el recirculador de refrigeración. Para monitorear la temperatura del flujo de enfriamiento del recirculador, dos termopares tipo K AEROPAK[®] fueron ensamblados a las mangueras de refrigeración del Gardon. Por último, un termopar tipo K se colocó en un costado del Gardon lo más cerca posible a su cara receptora, como se muestra en la [figura 4.10](#).

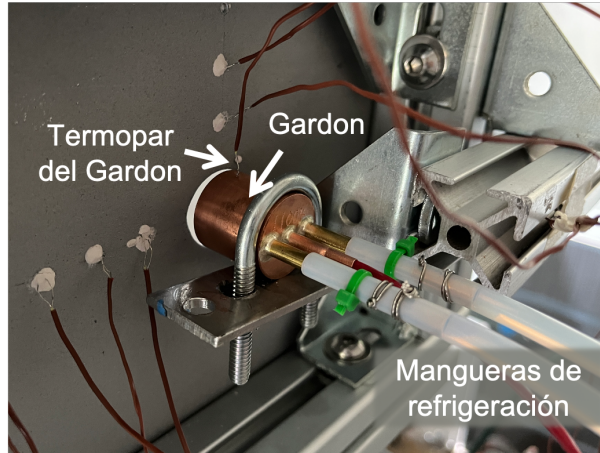


Figura 4.10: Montaje del medidor Gardon en el receptor, mangueras de refrigeración y termopar de monitoreo.

La adquisición de datos se llevó a cabo con un equipo Keysight 34972A, al que fueron conectados los termopares, el dispositivo Gardon y un Pirheliómetro Eppley sNIP para la medición de irradiancia solar directa.

4.5 Cámara CCD

Se utilizó una cámara CCD de la marca Allied Vision Technologies modelo Pike F145B, con una resolución de 1388×1038 y un sensor Sony ICX285. La cámara recibe su nombre por el tipo de sensor con el que captura imágenes, un sensor compuesto por diminutas celdas fotoeléctricas conocido como «dispositivo de carga acoplada» (*Charge-Coupled Device*).

La cámara fue montada sobre el eje óptico del HoSIER, a $2.87 \text{ m} \pm 0.005 \text{ m}$ del punto focal. El cuadro de la cámara se ajustó de manera que capturara a la placa receptora. Para evitar la saturación de las imágenes, que ocurriría incluso con velocidades de obturación altas, se montaron cuatro filtros Schneider de densidad neutral al objetivo de la cámara. Los filtros de densidad neutral reducen uniformemente la transmitancia de la luz en el espectro visible, lo que los hace idóneos para aplicaciones solares.

4.6 Corridas experimentales en el Horno Solar

Se realizaron tres corridas experimentales para evaluar al SERFluSol, la primera fue el 11 de mayo, la segunda el 12 de mayo y la tercera el 15 de agosto de 2023. En ellas se utilizó la versión 0.3. del

receptor; en la jornada del 11 de mayo se utilizó el Gardon 1, mientras que para la del 12 de mayo y 15 de agosto se utilizó el Gardon 2.

Se propuso una jornada experimental con simetría respecto al medio día solar en la que se utilizaron porcentajes de apertura angular del atenuador de 22 % a 42 %, primero en orden ascendente y después descendente. Se buscaron días con cielos despejados e irradiancias directas cercanas a los $800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. La jornada del 15 de agosto no fue simétrica respecto al medio día solar porque las condiciones meteorológicas no lo permitieron.

La tercera corrida experimental no estaba contemplada originalmente para el presente trabajo; sin embargo, se consideró valioso hacer nuevas mediciones de flujo ya que a finales de mayo se redujeron sombreamientos provocados por equipo de laboratorio y se removió el polvo de las facetas del concentrador del HoSIER. Además, alrededor de esas fechas una serie de días lluviosos contribuyó accidentalmente a la limpieza del heliostato. Con una tercera jornada experimental, se buscó evaluar el efecto de la limpieza de los elementos ópticos del horno en el flujo y la potencia concentrada.

Para las corridas experimentales del 11 y 12 de mayo la aspiradora del enfriamiento delantero se utilizó con una boquilla recta, mientras que para la jornada del 15 de agosto ésta se modificó con un difusor, pues ya se conocía que esta era la mejor forma de enfriamiento para la versión 0.3. del receptor, como se desarrollará en la [sección 5.8](#).

Los porcentajes de apertura angular para la caracterización del SERFluSol fueron elegidos considerando tres factores. En primer lugar, se consideraron aperturas que empíricamente no alcanzan temperaturas superiores al punto de fusión del aluminio ($660 \text{ }^\circ\text{C}$) ni la temperatura máxima soportada por el revestimiento del Gardon 1, Pyromark 1200, que es $538 \text{ }^\circ\text{C}$ [47]. En segundo lugar, se priorizaron los porcentajes de apertura angular utilizados típicamente en los experimentos del HoSIER, que oscilan entre el 15 % y 50 %. En tercer lugar, se tomaron como base los resultados de un experimento previo, con el cual se encontró una relación entre el porcentaje de apertura angular del atenuador y el porcentaje de energía concentrada por el HoSIER (ver el apéndice [A.2](#)). El porcentaje de energía concentrada se define respecto a la concentración máxima que lograría el Horno, para un porcentaje de apertura angular del 100 %.

De esa manera, se eligieron seis porcentajes de apertura angular para la caracterización del SERFluSol con los que se obtuviera entre un 5 % y 30 % de energía concentrada. Los porcentajes de apertura angular del atenuador, introducidos en programa SCADA del HoSIER, y el porcentaje de energía concentrada que les corresponde se muestran en la [tabla 4.2](#).

Tabla 4.2: Porcentajes de apertura angular utilizados para la evaluación del SERFluSol y porcentaje de energía correspondiente.

$\%_{Ap}$	$\%_E$
22	4.88
26	9.03
30	13.48
34	18.21
38	23.20
42	28.41

4.6.1 Secuencia de medición típica

La obtención del mapa de flujo depende en gran medida de una correcta relación entre las imágenes capturadas con la cámara CCD y el flujo medido por el Gardon. Se propuso una secuencia de medición con la que se obtiene un patrón en las lecturas del radiómetro y que facilita la identificación del momento en que las fotografías fueron capturadas, tanto en la zona de Placa como en la zona de Gardon. La secuencia típica de captura de imágenes para i número de mediciones se describe a continuación:

1. Alineación de la mancha concentrada al centro del Gardon a 15% de apertura angular del atenuador.
2. Obturación, apertura del atenuador al porcentaje deseado, ($\%_{Ap,i}$) y desplazamiento de la mesa de experimentos para posicionar la mancha solar al centro de la zona de placa.
3. «Fotografía de placa» con un tiempo de exposición $t_{exp,i}$, ajustado manualmente en el software de control de la cámara CCD, Vimba Viewer v.2.5.0.
4. Desplazamiento del receptor para posicionar la mancha solar nuevamente al centro de la zona del Gardon.
5. «Fotografía de Gardon» con el mismo tiempo de exposición, $t_{exp,i}$.
6. Cierre del atenuador por pasos.
7. Enfriamiento de la placa hasta que su temperatura esté por debajo de los 50 °C.

En la [tabla 4.3](#) se muestran los pasos del cierre del atenuador para cada porcentaje de apertura angular; cada paso de cierre se realiza con una diferencia de 4 segundos. De esta forma manera que se buscó reducir la caída abrupta de temperatura del blanco lambertiano y, en consecuencia, reducir los estreses mecánicos que provocan la deformación de la placa.

Tabla 4.3: De izquierda a derecha, pasos de cierre del atenuador desde el porcentaje de apertura angular de una medición, $\%_{Ap,i}$.

$\%_{Ap,i}$	Pasos de cierre del atenuador del HoSIER							
22	18	15	0					
26	22	18	15	0				
30	26	22	18	15	0			
34	30	26	22	18	15	0		
38	34	30	26	22	18	15	0	
42	38	34	30	26	22	18	15	0

Durante las jornadas experimentales, el sistema de adquisición de datos del HoSIER, a través de un programa de Agilent Vee Pro v.9.3., registró las temperaturas de placa, agua de refrigeración, superficie lateral del Gardon, así como las salidas de voltaje del pirheliómetro y del radiómetro, con un paso de tiempo o *timestep* de 3 segundos. Los datos capturados se almacenaron en un archivo de texto que fue exportado en formato *csv* para su análisis en MATLAB R2022b.

Para cada porcentaje de apertura angular, $\%_{Ap,i}$, se registró el tiempo de exposición con el que fueron tomadas las imágenes de Placa y Gardon, $t_{exp,i}$; el *timestep* del momento en que se abre el atenuador al porcentaje de apertura deseado, $ts_{\%_{Ap,i}}$; el *timestep* del momento en que se tomó la

fotografía de placa, $ts_{pl,i}$; y el *timestep* del momento en que se tomó la fotografía de Gardon, $ts_{G,i}$. Los *timesteps* fueron utilizados en vez de la marca de tiempo por la facilidad que implica su uso durante el análisis de datos.

Las fotografías obtenidas con la cámara CCD son imágenes de 8 bits en escala de gris con dimensiones de 768×492 píxeles, almacenadas en formato TIF; cada pixel de la imagen tiene un valor numérico entero con una magnitud entre 0 (negro) y 255 (blanco) que representa su luminosidad. El procedimiento para relacionar el momento en que fue tomada cada fotografía de Placa y de Gardon con el intervalo correspondiente de datos de irradiancia y flujo radiativo se detallará en breve.

4.7 Obtención del mapa de flujo radiativo

En esta sección se describe el procedimiento y secuencia de cálculos para la obtención de un mapa de flujo a partir del par de imágenes capturadas con la cámara CCD y las mediciones del medidor Gardon.

Una vez importados los resultados experimentales a MATLAB, las lecturas del Gardon fueron graficadas. Conociendo el *timestep*, $ts_{\%Ap,i}$, del momento en que fue abierto el atenuador para cada porcentaje de apertura angular, es fácil identificar la curva generada por la secuencia de medición. En la [figura 4.11](#) se muestra una curva de medición típica para un porcentaje de apertura $\%Ap,i$ que puede dividirse en seis zonas, correspondientes a los primeros seis pasos de la secuencia de captura de imágenes.

La primera zona corresponde a la alineación de la mancha al centro del Gardon con una apertura angular del 15%; la segunda zona muestra la apertura del atenuador a $\%Ap,i$ y el recorrido de la mancha a la zona de placa; la zona 3, que inicia con el *timestep* $ts_{pl,i}$ y termina con un incremento en las lecturas del Gardon, corresponde al ajuste del tiempo de exposición de la cámara CCD y la captura de la «fotografía de placa»; la zona 4 refleja el recorrido de la mancha a la zona del Gardon y nuevamente la alineación de ser necesaria; la zona 5, que inicia en el *timestep* $ts_{G,i}$ y termina con la caída de la medición del Gardon por el cierre del atenuador, corresponde a la estabilización de la posición de la mancha y la captura de la «fotografía de Gardon»; y finalmente, la zona 6 corresponde al cierre de pasos del atenuador con la mancha aún alineada sobre el Gardon.

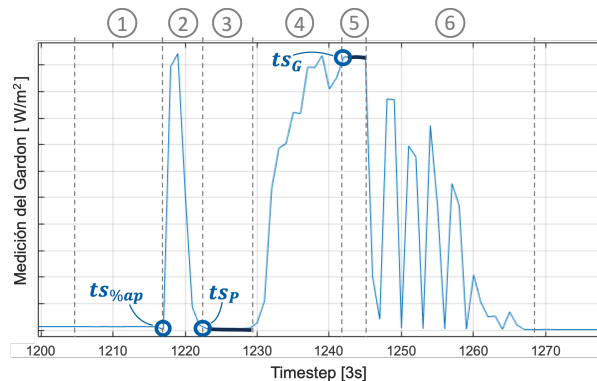


Figura 4.11: Curva típica de medición del Gardon para un porcentaje de apertura angular $\%Ap,i$. Las zonas 1 a 6 se relacionan con los pasos de la secuencia típica de captura de imágenes. Se señala la posición de los tres *timesteps* característicos de la medición. $Timestep = 3$ s.

El flujo obtenido por el radiómetro y representativo de la fotografía de Gardon se obtiene promediando las lecturas de la zona 5 de la curva típica, valor que será denotado como $q_{G,i}$. Así mismo, se promedian los valores de irradiancia directa para las zonas 3 y 5, que serán denotadas como $I_{pl,prom}$ y $I_{G,prom}$, respectivamente.

4.7.1 Empate del par de imágenes por curvas de luminosidad normalizada

En principio, la única diferencia entre la mancha de la fotografía de placa y de Gardon para un mismo $\%_{Ap,i}$ es que en la segunda imagen una sección del blanco lambertiano es ocupada por la cara receptora del radiómetro; sin embargo, la posición de la mancha cambia de una fotografía a la otra debido a alteraciones en la irradiancia, cargas de viento sobre el heliostato o posibles variaciones en el sistema mecánico y óptico. Para determinar qué sección de la mancha fue medida por el Gardon se propuso un método para el empate de imágenes por curvas de nivel de luminosidad normalizada. Un valor de «luminosidad normalizada» es definido como el valor de intensidad de un pixel arbitrario, dividido entre la irradiancia promedio del momento en que fue tomada la fotografía de placa o Gardon. La normalización de la luminosidad se propone para despreciar el efecto de las variaciones de la irradiancia entre dos fotografías de la mancha para una misma medición.

Para el empate, las imágenes de placa y de Gardon fueron importadas como matrices a un script de MATLAB. La mancha fotografiada es considerablemente regular y presenta una forma parecida a una Gaussiana, con una luminosidad máxima que disminuye en dirección radial desde su centro. Si se seleccionan pixeles con un mismo valor de luminosidad éstos toman la forma de una curva cerrada como ilustra en rojo la [figura 4.12](#), una curva de luminosidad.

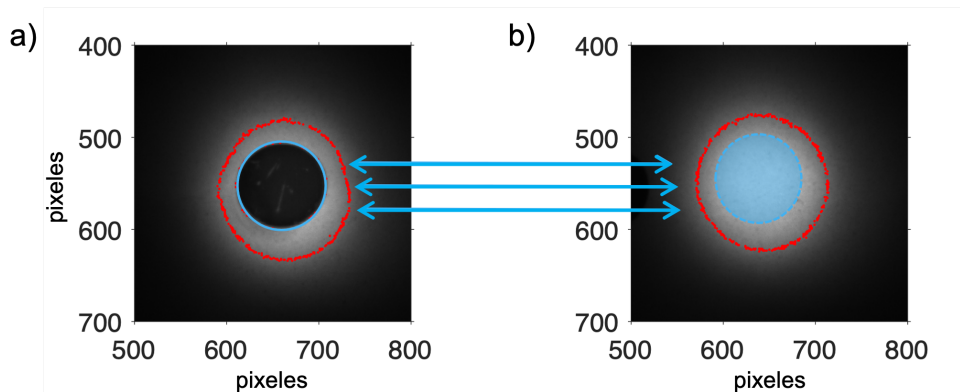


Figura 4.12: a) Fotografía de Gardon. b) Fotografía de placa. La curva roja está compuesta por pixeles con valores equivalentes de luminosidad normalizada; el área receptora del Gardon (delimitada con la circunferencia azul) se corresponde con la sección de la mancha del mismo tamaño, señalada con un círculo del mismo color en la fotografía de placa.

Ya que la mancha es prácticamente la misma durante una medición, el desfase horizontal y vertical (Δx y Δy , ver [figura 4.13](#)) de dos curvas de nivel con la misma luminosidad puede ser entendido como el desfase de la posición de la mancha entre imágenes. Si se conoce a Δx y Δy es posible relacionar la posición del radiómetro en la «fotografía de Gardon» con la posición que tendría en la «fotografía de placa» y así conocer los valores de luminosidad correspondientes a la medición del Gardon.

Idealmente, las curvas de nivel para cualquier luminosidad normalizada serían idénticas. Para elegir un par de curvas de nivel y utilizarlas en el empate de imágenes se propusieron tres condiciones:

- Semejanza en la morfología al estar centradas en un mismo origen de coordenadas.
- Afinidad entre el radio promedio de las curvas.
- Afinidad en la desviación estándar de los radios de cada curva.

Una vez elegido el par de curvas de nivel, se encuentran las coordenadas de los píxeles correspondientes a la superficie receptora del radiómetro en la «fotografía de Gardon». Δx y Δy son obtenidas mediante la resta algebraica de la coordenada extrema de la curva de luminosidad en x y y respectivamente. Utilizando a Δx y Δy (diferentes para cada medición), se calculan las coordenadas de los píxeles que ocuparía el Gardon en la «fotografía de Placa» si estuviera en ella, concluyendo el empate de imágenes. El conjunto de luminosidades de la «fotografía de Placa» correspondientes a la superficie del Gardon, esquematizados en la [figura 4.12.b](#) como un círculo azul de área A_G [pix²], será llamado $L_{pl,G}$, y el número de elementos que lo conforman se denotará como $n_{px,G}$.

4.7.2 De una matriz de luminosidades a un mapa de flujo radiativo

Atendiendo las recomendaciones de J. Ballestrín, et al. [23] sobre la corrección del factor de escala de los radiómetros Gardon y considerando que R.A. Pérez Enciso [42] encontró una sobreestimación de la potencia del HoSIER con el método cámara-blanco, se decidió aplicar factores adimensionales de corrección a las lecturas del radiómetro, como se muestra en las ecuaciones (4.2a) y (4.2b), donde F_{G1} y F_{G2} son los factores de escala del los Gardon, y V_{G1} y V_{G2} son las señales de voltaje entregadas al adquirente de datos.

$$q_{G1} \left[\frac{W}{m^2} \right] = (0.965) \cdot F_{G1} \left[\frac{W}{m^2 V} \right] \cdot V_{G1} [V] \quad (4.2a)$$

$$q_{G2} \left[\frac{W}{m^2} \right] = (0.782) \cdot F_{G2} \left[\frac{W}{m^2 V} \right] \cdot V_{G2} [V] \quad (4.2b)$$

La magnitud del flujo medida por el radiómetro está estrechamente relacionada con la integral del flujo incidente en su área receptora, A_G ; análogamente la integral de las luminosidades $L_{pl,G}$ por unidad de área A_G sería proporcional al flujo medido por el Gardon.

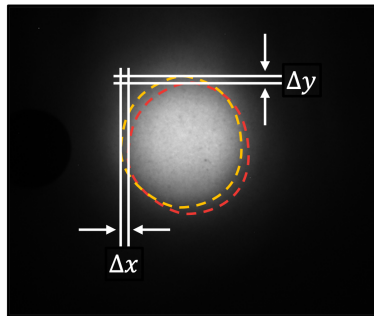


Figura 4.13: Desfase en x y y de las curvas de luminosidad de la imagen de Gardon (línea roja) y de placa (línea amarilla).

Las cámaras CCD tienen una respuesta lineal a la luminosidad, lo que las hace idóneas para el método cámara-blanco. Para anular la dependencia de los valores de luminosidad con el tiempo de exposición de la cámara CCD, éstos deben ser expresados por unidad de tiempo de exposición, como se expresa en la [ecuación \(4.3\)](#), donde L_{GS} es el valor de luminosidad que tiene un pixel de las fotografías de la cámara CCD en «escala de grises» (GS), t_{exp} es el tiempo de exposición con el que se tomó la fotografía y L es el valor en escala de gris por unidad de tiempo de exposición del pixel L_{GS} .

$$L \left[\frac{GS}{s} \right] = \frac{1}{t_{\text{exp}}[s]} \cdot L_{GS} [GS] \quad (4.3)$$

Reescribiendo la [ecuación \(4.3\)](#) para las luminosidades $L_{pl,G}$, se obtiene la [ecuación \(4.4a\)](#), donde ahora los valores de luminosidad ya no dependen del tiempo de exposición de la cámara. En la [ecuación \(4.4b\)](#) se propone una relación entre la integral de las luminosidades L_G y el flujo q_G medido por el radiómetro en el momento que se tomó la fotografía de Gardon; donde A_G con unidades de pixeles cuadrados es el área receptora del radiómetro en la fotografía y K es una constante de transformación entre el valor L_{GS} de un pixel y una magnitud de flujo en unidades de Watt sobre metro cuadrado. La unidad pixel al cuadrado (pix^2) se utiliza de manera análoga a una unidad de área dentro de la fotografía.

$$L_G \left[\frac{GS}{s} \right] = \frac{1}{t_{\text{exp}}[s]} \cdot L_{pl,G} [GS] \quad (4.4a)$$

$$q_G \left[\frac{W}{m^2} \right] = K \left[\frac{W}{m^2} / \frac{GS}{s} \right] \cdot \frac{\int_{A_G} L_G dA}{A_G} \left[\frac{GS}{s} \right] \quad (4.4b)$$

Aproximando el diferencial dA a la unidad mínima de área en la fotografía como $dA \approx \Delta A = 1 \text{ pix}^2$ y expresando al área A_G , correspondiente a la cara receptora del Gardon en la fotografía, en función del número de pixeles cuadrados que la conforman, $n_{px,G}$ ([ecuación \(4.5a\)](#)), la expresión integral ([4.4b](#)) se puede aproximar a una sumatoria como muestra la [ecuación \(4.5b\)](#).

$$\frac{dA}{A_G} \approx \frac{\Delta A}{A_G} = \frac{1 \text{ pix}^2}{n_{px,G} \cdot 1 \text{ pix}^2} \quad (4.5a)$$

$$q_G \left[\frac{W}{m^2} \right] \approx K \left[\frac{W}{m^2} / \frac{GS}{s} \right] \cdot \frac{\sum L_G \left[\frac{GS}{s} \right]}{n_{px,G}} \quad (4.5b)$$

Despejando de ([4.5b](#)), se obtiene la expresión ([4.6](#)) para la constante de conversión, K , en donde todas las variables son obtenidas experimentalmente a través de la secuencia de medición típica del SERFluSol.

$$K \left[\frac{W}{m^2} / \frac{GS}{s} \right] = \frac{n_{px,G} \cdot q_G \left[\frac{W}{m^2} \right]}{\sum L_G \left[\frac{GS}{s} \right]} \quad (4.6)$$

A partir de la fotografía de placa, i.e., una matriz de luminosidades que se denotará como L_{pl} , el mapa de flujo Q en unidades de Watt sobre metro cuadrado y el mapa C , en unidades de soles concentrados, son obtenidos con la constante de conversión K como muestran la [ecuación \(4.7a\)](#) y ([4.7b](#)), donde $I_{pl,\text{prom}}$ es la irradiancia directa promedio del momento en que se tomó la fotografía de placa y t_{exp} el tiempo de exposición de la cámara CCD.

$$Q \left[\frac{W}{m^2} \right] = K \left[\frac{W}{m^2} / \frac{GS}{s} \right] \cdot \frac{L_{pl}[GS]}{t_{\text{exp}}[s]} \quad (4.7a)$$

$$C [\text{soles}] = K \left[\frac{W}{m^2} / \frac{GS}{s} \right] \cdot \frac{L_{pl}[GS]}{t_{\text{exp}}[s] \cdot I_{pl,\text{prom}} \left[\frac{W}{m^2} \right]} \quad (4.7b)$$

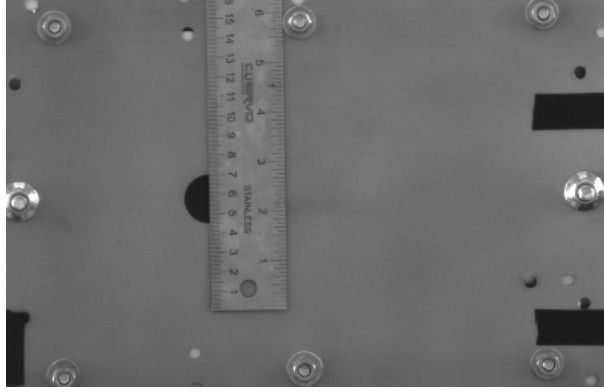


Figura 4.14: Receptor encuadrado por la cámara CCD y escala de referencia.

4.7.3 Cálculo de potencia

La relación entre el tamaño real del receptor y sus dimensiones en la fotografía de la cámara CCD es indispensable para el cálculo de la potencia concentrada. Para obtener esta relación, se tomó una fotografía del receptor con una escala sobrepuesta a su superficie, como se muestra en la [figura 4.14](#). Con esta imagen se obtuvo la equivalencia entre pixeles y metros, c_{mpx} , para cada jornada experimental.

La potencia concentrada sobre la placa, P , puede ser definida como la integral del mapa de flujo, Q , en el área de la placa, A_{pl} como muestra la [ecuación \(4.8\)](#). Aproximando la expresión integral como una sumatoria, la potencia solar concentrada es cuantificada mediante la [ecuación \(4.9\)](#), donde c_{mpx} , la equivalencia entre pixeles y metros, es conocida.

$$P = \int_{A_{pl}} Q dA \quad (4.8)$$

$$P[\text{W}] \approx \sum Q \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \cdot 1 [\text{pix}^2] \cdot c_{mpx}^2 \left[\frac{\text{m}}{\text{pix}} \right]^2 \quad (4.9)$$

4.8 Termografía del receptor

Una cámara termográfica es un tipo de cámara equipada con un sensor que detecta radiación en una porción del infrarrojo y la relaciona con un valor de temperatura. Para fines prácticos, una cámara termográfica bien calibrada permite visualizar en una imagen plana la temperatura de un objeto. Para visualizar la distribución de temperaturas sobre el blanco lambertiano durante una medición típica y proponer mejoras en la disposición de los sopladores se utilizó una cámara termográfica FLIR T300. La cámara termográfica utilizada detecta radiación en un rango de longitud de onda de 7500 nm–13 000 nm; conociendo la distribución espectral de la radiación solar ([subsección 2.3.1](#)) se puede concluir que un análisis termográfico del receptor mide efectivamente la temperatura de la placa sin que interfiera el reflejo de la mancha concentrada. La cámara se montó en una plataforma de trabajo aéreo entre la mesa de experimentos y el concentrador del HoSIER, como se muestra en la [figura 4.1](#), para capturar las imágenes al nivel del receptor.

En la jornada experimental del 11 de mayo se llevó a cabo la termografía del receptor. Para una

apertura angular del atenuador de 30% se posicionó a la mancha sobre la zona del Gardon durante 90 segundos y se tomaron imágenes termográficas cada 10 segundos, además de una fotografía en el momento en que se abrió el atenuador e inmediatamente después de cerrarlo. Estas condiciones no fueron las típicas de una medición, ya que el receptor está casi siempre en movimiento a excepción del momento de la captura de imágenes. Se propuso este tiempo como escenario límite en que el receptor tendría que soportar la radiación concentrada por el horno. Se probaron cuatro situaciones de enfriamiento utilizando la configuración de sopladores de la versión 0.3. del receptor (ver figuras 4.7.b y 4.8.b): sin enfriamiento por aire (sopladores apagados), enfriamiento posterior de la placa, enfriamiento posterior y anterior directo (boquilla circular de la aspiradora), enfriamiento posterior y anterior con un difusor en la boquilla.

El objetivo de este análisis fue proponer una primera configuración de enfriamiento por aire que lograra aminorar las diferencias de temperaturas en la placa lambertiana y que logre mantener a las temperaturas por debajo del punto de fusión del aluminio. Las imágenes IR fueron analizadas con el software FLIR ResearchIR Max v.4.40.8.28. El procedimiento para encontrar la emisividad de la placa y la obtención de curvas de temperatura se desarrolla en la [sección 5.8](#).

CAPÍTULO 5

RESULTADOS: EVALUACIÓN DEL SERFLUSOL Y DESEMPEÑO DEL RECEPTOR

5.1 SERFluSol

El principal resultado de este trabajo es la integración del Sistema de Evaluación Rápida de Flujo Solar concentrado con enfriamiento por aire al HoSIER, por lo pronto a nivel de prototipo.

De manera general, el proceso de obtención de un mapa de flujo (Q o C) y de la potencia concentrada (P), a un porcentaje determinado de apertura angular del atenuador, se obtiene en tres pasos: la medición típica, la obtención de resultados intermedios y finalmente el cálculo de Q y P .

De la medición típica se obtienen tres tipos de datos: los provenientes del adquisidor del horno, los que son capturados manualmente y los que son obtenidos por adquisición de imágenes. Los datos provenientes del adquisidor del horno incluyen la lectura en voltaje del Gardon, las temperaturas de los termopares del receptor ($V_{n,G}$) y la irradiancia instantánea obtenida por el pirheliómetro del HoSIER ($I_{n,inst}$), donde n es el número de datos obtenidos durante una medición típica. Los datos capturados manualmente son los *timesteps* característicos de la medición y los tiempos de exposición utilizados en la cámara CCD. Los datos obtenidos de la adquisición de imágenes son las fotografías de placa, Gardon y de escala. La relación entre los datos obtenidos durante una medición típica y los resultados intermedios (irradiancia y flujo promedio, imágenes con píxeles en escala de gris, c_{mpx} , etc.), el cálculo que lleva hasta la obtención de los mapas de flujo y potencias concentradas, así como los dispositivos mínimos esenciales para el funcionamiento del SERFluSol se esquematizan en la [figura 5.1](#). Las flechas no representan un cálculo específico, sino la dependencia de una variable respecto a otra. En el apéndice [A.5](#) se resume en una tabla el significado de la notación utilizada en el diagrama, que corresponde con la notación utilizada en el [capítulo 4](#).

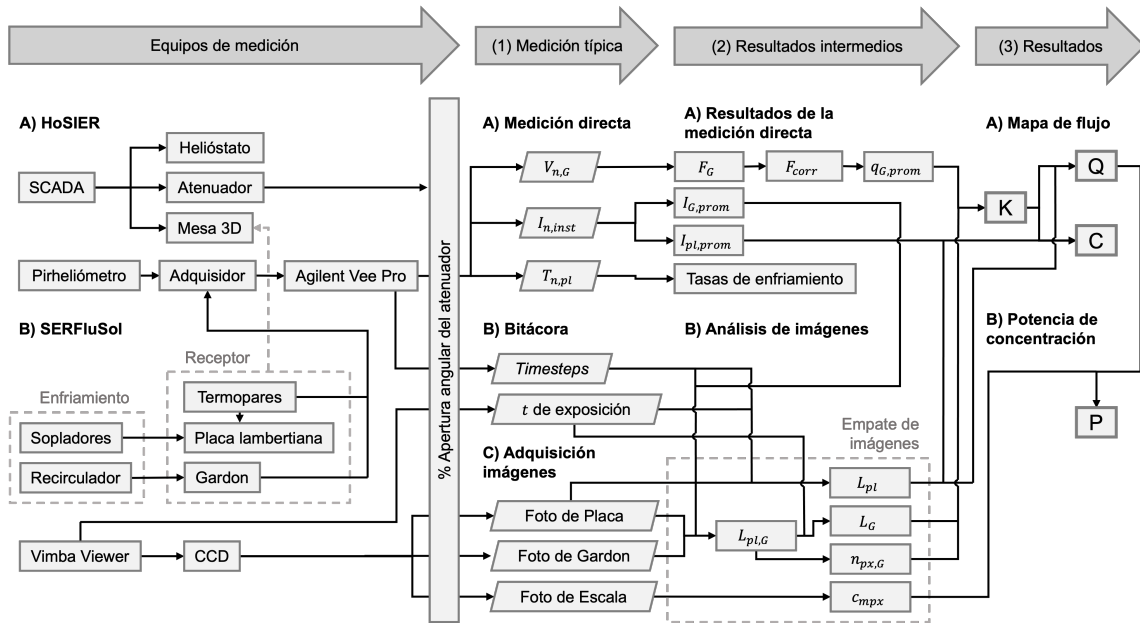


Figura 5.1: Diagrama de flujo del SERFluSol integrado al HoSIER.

5.2 Jornadas experimentales

Por economía de lenguaje se hará referencia a la jornada del 11 de mayo, 12 de mayo y 15 de agosto como «primera jornada», «segunda jornada» y «tercera jornada» o «jornada 1», «jornada 2» y «jornada 3», respectivamente.

La irradiancia directa durante las tres jornadas experimentales fue cercana a los $800 \frac{W}{m^2}$ (condiciones de sol claro o «clear sun conditions» [48]). En la figura 5.2 se muestran las irradiancias instantáneas capturadas por el pirheliómetro del HoSIER durante las jornadas experimentales. De las tres jornadas, únicamente la tercera no se realizó con simetría respecto al medio día solar, por las condiciones meteorológicas.

La última jornada experimental, para 12 aperturas del atenuador y en la que la secuencia típica de medición ya había sido mecanizada, tuvo una duración de 48.35 min.

5.3 Soles concentrados por el HoSIER

En la figura 5.3 se muestran los resultados experimentales de las mediciones promedio del Gardon expresadas en unidades de «soles concentrados» para cada porcentaje de apertura angular del atenuador. Los datos de las tres jornadas experimentales muestran un comportamiento aparentemente lineal que se dispersa a medida que aumenta el porcentaje de apertura angular, diferenciando a cada jornada.

El error relativo de las concentraciones obtenidas con el Gardon 2 es menor a 5.5 % a excepción de las obtenidas para $\%_{Ap} = 22$ y $\%_{Ap} = 26$ que tienen un error relativo de 16.8 % y 7.6 %, respectivamente.

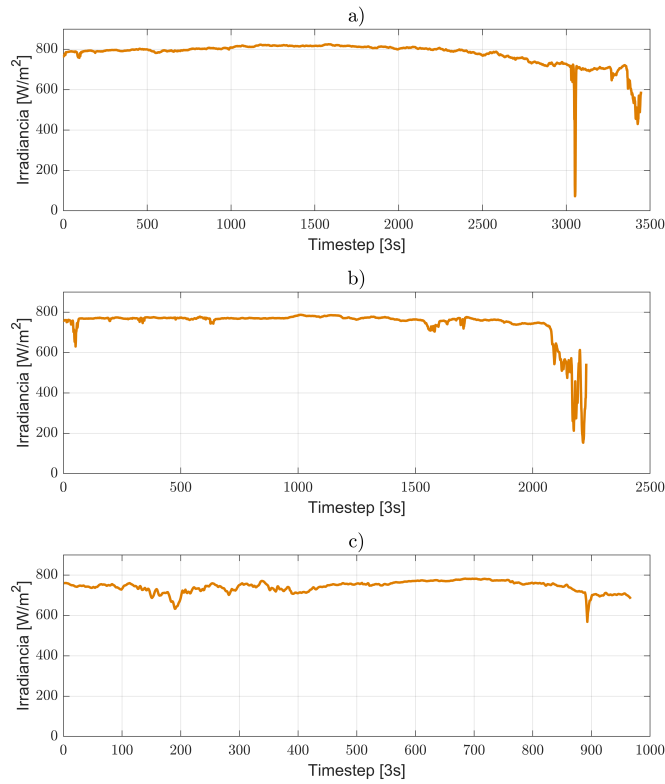


Figura 5.2: Irradiancias de las jornadas experimentales. $Timestep = 3\text{ s}$. a) 11 de mayo, jornada 1. b) 12 de mayo, jornada 2. c) 15 de agosto, jornada 3.

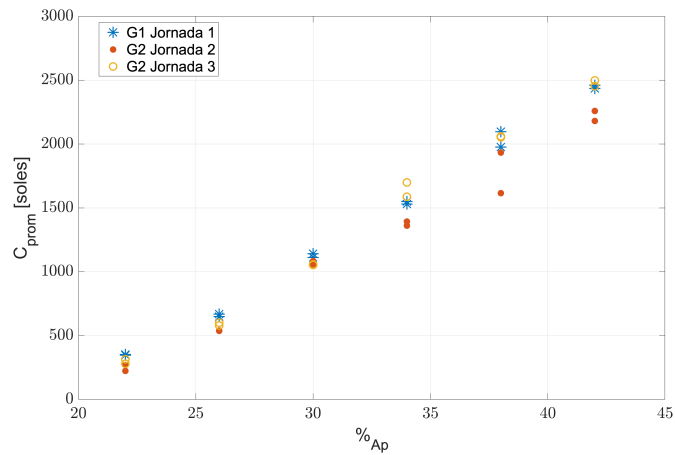


Figura 5.3: Flujos promedio del Gardon en unidad de soles concentrados, graficados contra porcentaje de apertura angular del atenuador, $\%_{Ap}$, para las tres jornadas experimentales. El par puntos de C_{prom} en cada porcentaje es consecuencia del diseño experimental, simétrico respecto al medio día solar para porcentajes de apertura angular del atenuador de 22 % a 42 % primero en orden ascendente y después descendente.

La fidelidad de las lecturas del Gardon se analizó con datos obtenidos durante la segunda jornada, en la que se evaluó la repetibilidad de una medición. El cálculo del error relativo se desarrolla en el apéndice A.3.

Cabe mencionar que el porcentaje de apertura angular del atenuador representado en las gráficas es el demandado por el operador del HoSIER y no el porcentaje de apertura angular real o actual del horno. De la bitácora de operación del HoSIER se obtuvieron las aperturas actuales promedio del atenuador, encontrando que el error relativo del porcentaje de apertura angular real es menor a 2%. Solo para la apertura $\%_{Ap} = 22\%$ el error fue mayor, igual a 3.52%. El análisis de los errores relativos se detalla en el apéndice A.3. A pesar de que la apertura angular real del atenuador nunca es igual a la apertura demandada por el operador, conviene utilizar esta última al ser la variable con la que se maneja el horno. En cálculos que requieren la apertura angular real del atenuador, como la estimación de potencias a un $\%_{Ap} = 100$, se utilizarán las aperturas angulares presentadas en la tabla A.6.

La primera y segunda jornada experimental fueron realizadas bajo las mismas condiciones del HoSIER en cuestión de sombreamientos, suciedad del helióstato y las facetas, alineación de las facetas y posición de la cámara CCD. De las concentraciones obtenidas en la primera jornada se podía esperar una subestimación respecto a las de la segunda; el deterioro de la superficie receptora del Gardon 1 causaría que una mayor porción de la radiación incidente fuera reflejada en comparación con un radiómetro con un revestimiento en buenas condiciones, sin embargo, las concentraciones de la jornada 1 fueron mayores hasta por 279 soles respecto a las de la jornada 2 para un porcentaje de apertura angular de 42%. Aunque no se pueden explicar estos resultados, concuerdan con los resultados obtenidos por J. Kaluza y A. Neumann [18] para un radiómetro con el revestimiento dañado.

Con las mediciones obtenidas en las primeras dos jornadas se propuso calcular un nuevo factor de escala para Gardon 1, que compense la sobreestimación a causa del deterioro del revestimiento; el nuevo factor de escala es $F_{G1,corr} = 26.45 \left[\frac{W}{cm^2 mV} \right]$. El procedimiento completo de este cálculo se resume en el apéndice A.4.

Las condiciones del HoSIER para la jornada 3 cambiaron respecto a las de las primeras dos jornadas. Como parte de una limpieza general del HoSIER a finales de mayo de 2023 se realizó la limpieza de las facetas del concentrador, se reubicaron equipos que provocaban sombreamientos en la parte inferior del concentrador y la estructura de soporte de la cámara CCD fue modificada. Así mismo, las lluvias en verano contribuyeron a remover el polvo y suciedad del helióstato, cambiando inevitablemente las condiciones de la radiación reflejada. Las concentraciones de la tercera jornada respecto a la segunda fueron en promedio mayores por un $11.05\% \pm 7.8\%$ con una diferencia máxima de 282.37 soles para un mismo porcentaje de apertura angular. Este resultado resalta el efecto del polvo y el sombreamiento en el desempeño del horno.

5.4 Resultados del método cámara-blanco

La secuencia de medición típica junto al registro de los *timesteps* en una bitácora demostró ser fundamental para el manejo de datos e identificación de las mediciones del Gardon en cada porcentaje de apertura angular.

Para cada par de imágenes, se realizó el empate por curvas de luminosidad normalizada atendiendo a las tres condiciones propuestas en la subsección 4.7.1, a saber: forma, radio promedio y desviaciones estándar semejantes. Un *output* típico del script de empate por curvas de luminosidad se muestra en la figura 5.4; en la figura 5.4.a y 5.4.b se sobreponen las curvas (línea roja) a las fotografías de Gardon y placa; en figura 5.4.c, se hacen coincidir a las curvas en el origen de coordenadas y se comprueba

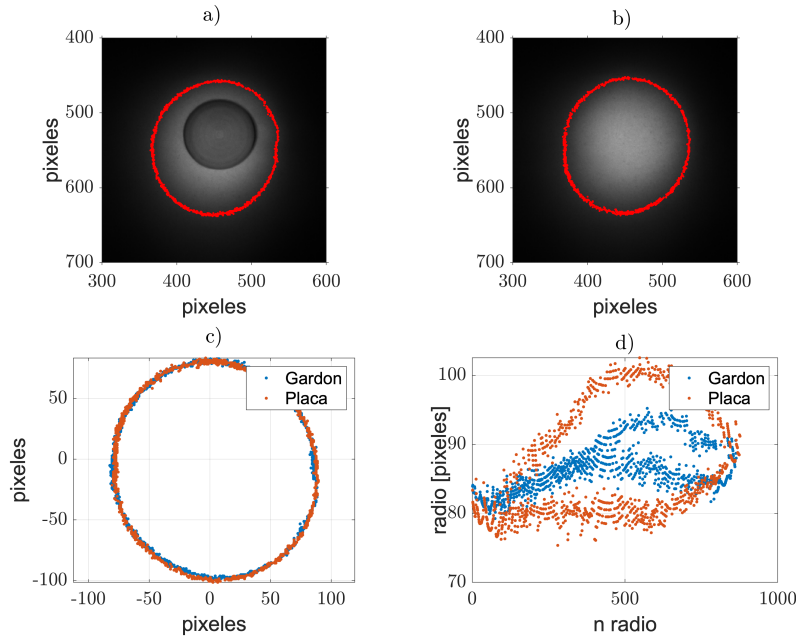


Figura 5.4: En rojo, curva de luminosidad para el empate de imágenes. a) Mancha en Gardon, b) Mancha en la zona de placa, c) Curvas de luminosidad superpuestas para comprobación de la similitud de forma, d) Radios de los puntos de las curvas de cada fotografía respecto a su centroide. Jornada experimental 2, 42% de apertura angular del atenuador.

similitud de forma; finalmente, el script calcula el radio de cada punto en la curva respecto su centroide en el origen de coordenadas (figura 5.4.d) y entrega su valor promedio y desviación estándar, que sirven como apoyo para elegir al par de curvas de luminosidad más parecidas.

Con una curva de luminosidad seleccionada, se calculó el desfase de la posición del área receptora del radiómetro (Δx y Δy) y se hizo la corrección de posición obteniendo $L_{pl,G}$; a modo de ejemplo, un par de fotografías después de esta corrección se muestra en la figura 5.5.

Para cada par de imágenes, fue calculada la constante de transformación K . Una forma de comprobar la linealidad de la respuesta de la cámara CCD es la comparación de los valores en escala de gris del Gardon dividido entre el tiempo de exposición de la fotografía y la medición de flujo; en la figura 5.6 se grafican dichas magnitudes y un ajuste lineal. Las constantes de transformación promedio, su desviación estándar y error relativo para las tres jornadas experimentales se resumen en la tabla 5.1. La obtención de una K diferente para cada jornada experimental se debe a que el revestimiento del Gardon, la distancia al receptor, la configuración del objetivo y otros factores cambiaron de una jornada a otra. Los resultados confirman la linealidad de la respuesta de la cámara CCD respecto al flujo radiativo incidente en el receptor.

A partir de las fotografías, transformadas a matrices con valores en escala de gris sobre tiempo de exposición, se obtuvieron los mapas de flujo para cada jornada experimental como se muestran en las figuras 5.7, 5.8 y 5.9.

Se puede destacar la uniformidad de la mancha solar concentrada en todas las mediciones para los flujos cercanos al máximo, sin embargo, es evidente en los resultados de las tres jornadas una ligera deformación en el extremo superior izquierdo de las curvas de nivel de concentraciones menores, en

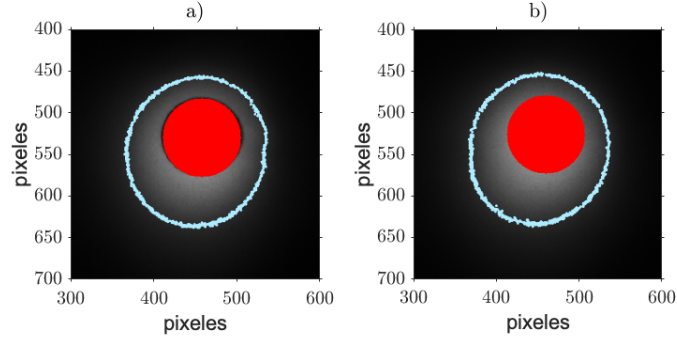


Figura 5.5: a) Fotografía de Gardon. b) Fotografía de placa. En rojo, posición de los píxeles que abarca la cara receptora del radiómetro en ambas fotografías después de la corrección del desfase. La curva de luminosidad para el empate se muestra en azul claro. Jornada experimental 2, 42% de apertura angular del atenuador.

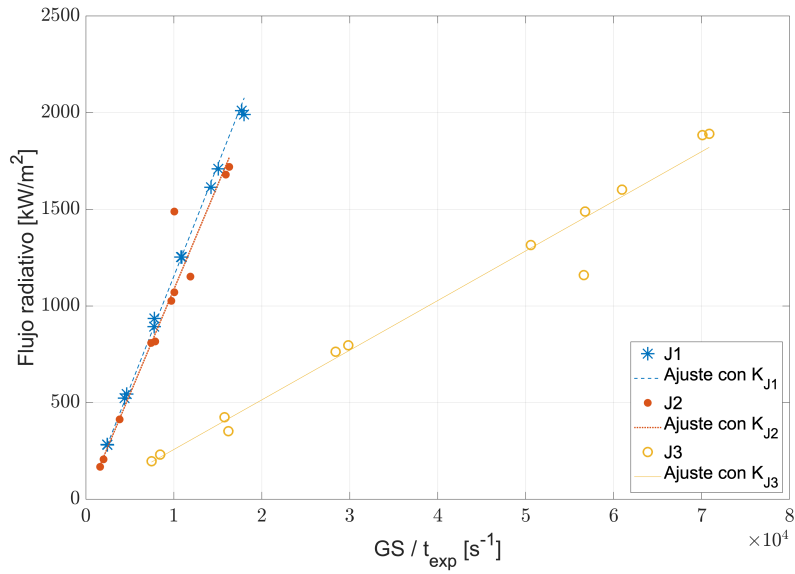


Figura 5.6: Relación entre la radiación incidente medida por el Gardon y el valor en escala de gris (GS) dividido por el tiempo de exposición (t_{exp}) de la cara del radiómetro, visto por la cámara CCD, para las tres jornadas experimentales. La relación por el factor K entre las dos variables confirma la linealidad de la respuesta de la cámara CCD respecto al flujo incidente en el receptor.

Tabla 5.1: Constantes de transformación de mapas en escala de gris a mapas de flujo para cada jornada, desviaciones estándar (σ) y error relativo (α).

Jornada	$K_{\text{prom}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} / \frac{\text{GS}}{\text{s}} \right]$	$\sigma \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} / \frac{\text{GS}}{\text{s}} \right]$	α
1	115.34	2.56	0.02
2	104.92	3.29	0.03
3	26.61	0.41	0.015

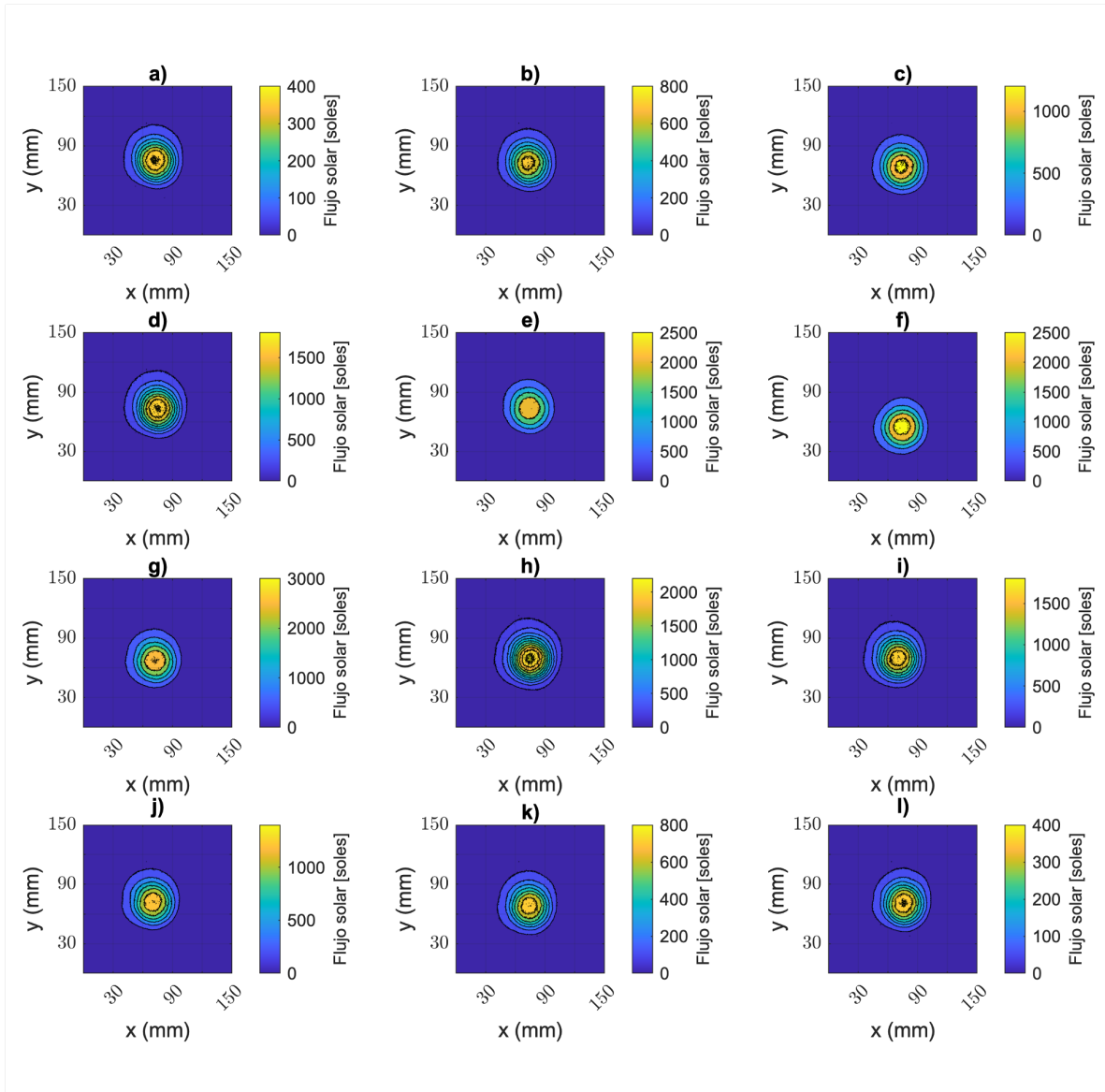
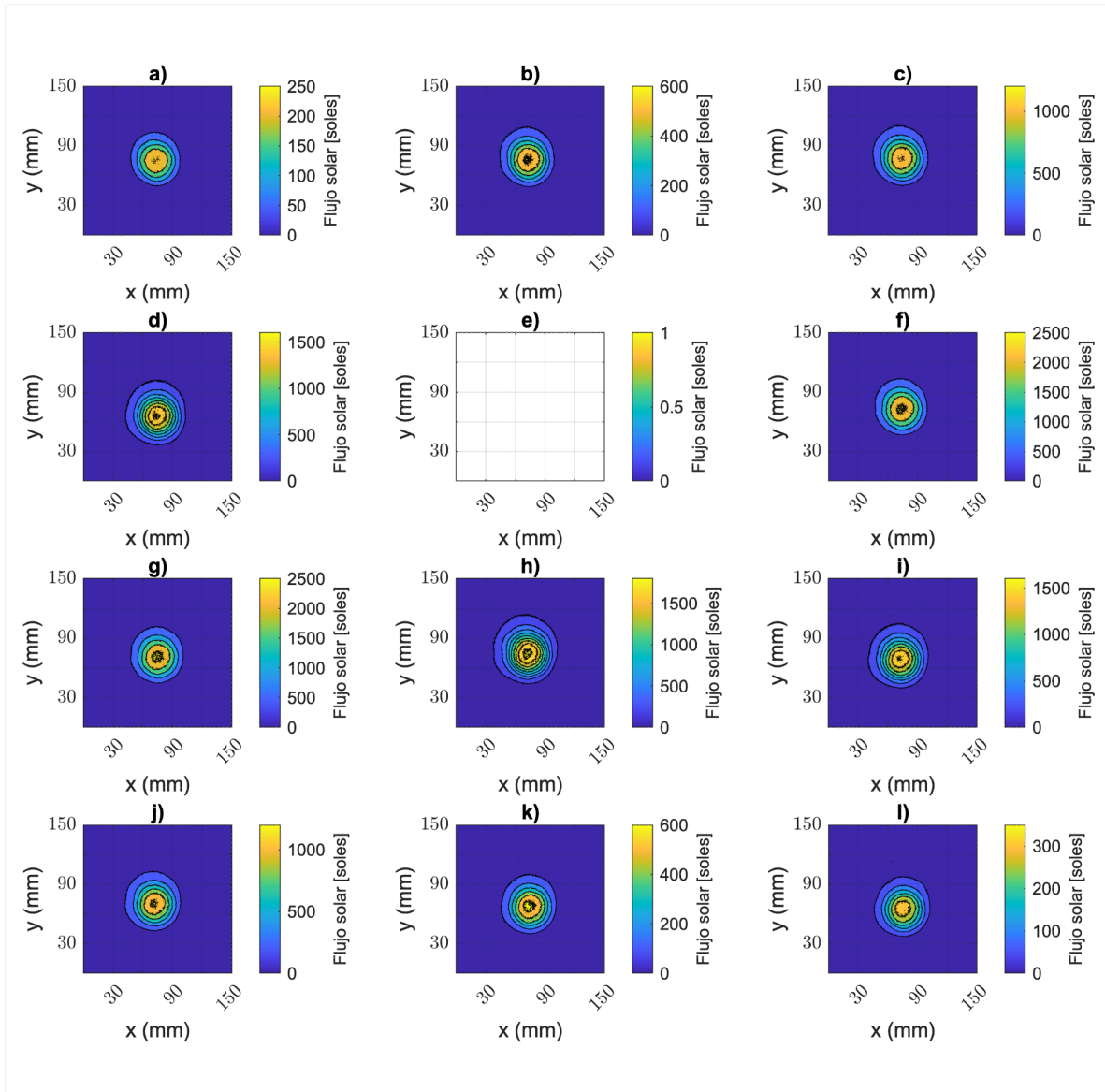


Figura 5.7: Mapas de flujo en unidades de soles para los diferentes porcentajes de apertura angular de la primera jornada experimental, medidor Gardon 1.



a) 22%	b) 26%	c) 30%	d) 34%	e) 38%	f) 42%
g) 42%	h) 38%	i) 34%	j) 30%	k) 26%	l) 22%

Figura 5.8: Mapas de flujo con unidades de soles para los diferentes porcentajes de apertura angular de la segunda jornada experimental, medidor Gardon 2.

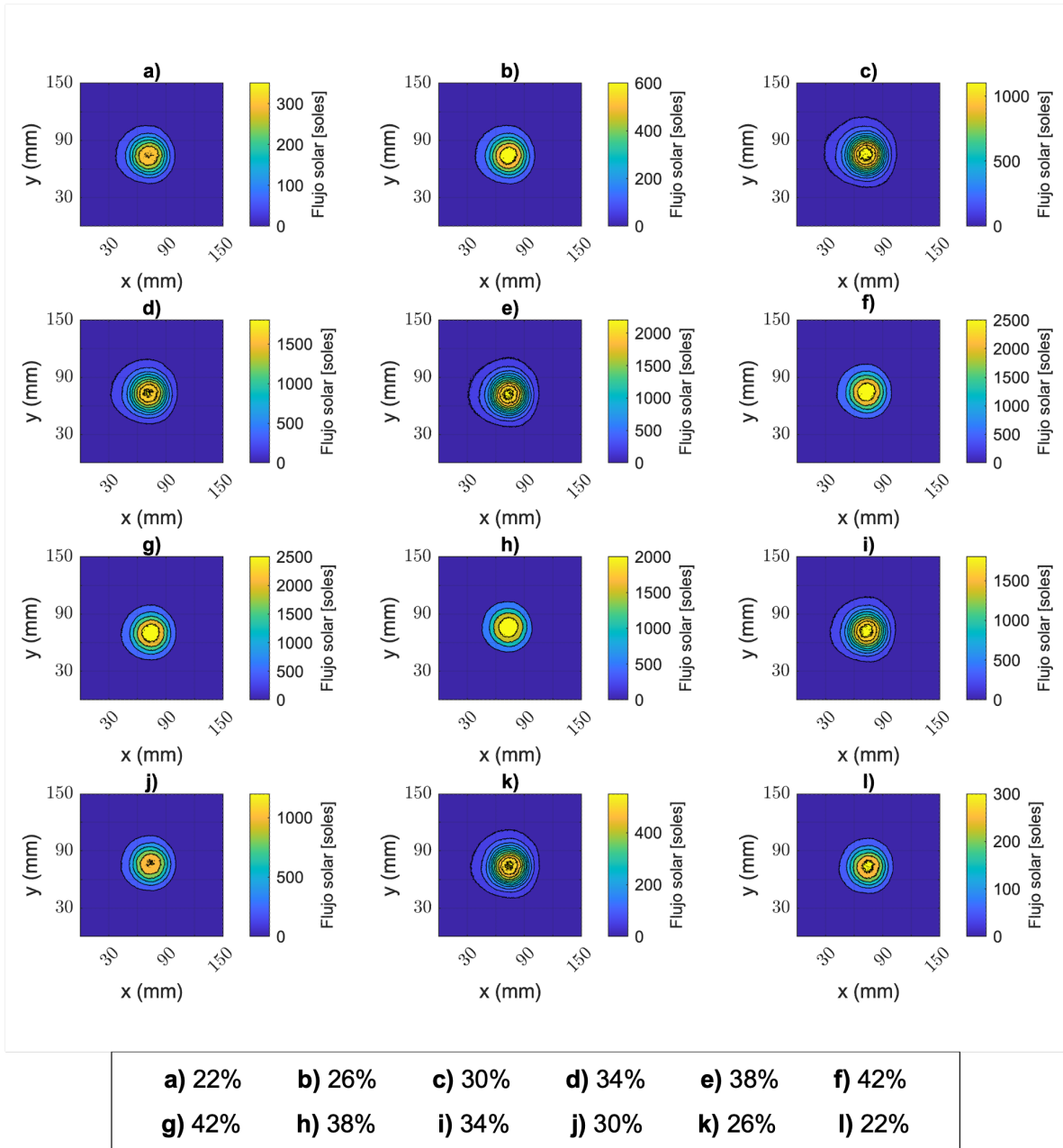


Figura 5.9: Mapas de flujo con unidades de soles para los diferentes porcentajes de apertura angular de la tercer jornada experimental, medidor Gardon 2.

especial para porcentajes de apertura angular pequeños.

El mapa de flujo de la [figura 5.8.e](#) no fue obtenido por un error en la captura de imágenes. Este error reitera la relevancia de una correcta secuencia de medición; sin una secuencia adecuada para la captura de imágenes y el registro manual de los datos que no son registrados por el sistema de adquisición del HoSIER, la obtención de mapas de flujo y potencias sería retrasada o entorpecida.

Para estimar la concentración máxima que lograría el HoSIER a un porcentaje de apertura angular del 100% se ajustó un modelo lineal (ver [ecuación \(5.1\)](#)) a los valores pico de los mapas de flujo de la tercera jornada, de los que se obtiene una concentración máxima de 10 860.1 soles; esta estimación representa el 62.1% de la concentración máxima obtenida por R. A. Pérez Enciso en 2015 [\[42\]](#).

$$C_G [\text{soles}] = 136.41 \%_{Ap} - 2780.9, \quad R^2 = 0.9903 \quad (5.1)$$

5.5 Cálculo de la potencia concentrada

En las primeras dos jornadas experimentales, el cuadro de la cámara CCD capturó todo el receptor y parte del fondo, error que se corrigió en la tercer jornada ajustando el cuadro de manera que el blanco lo cubriera en su totalidad. Se propuso analizar la potencia para distintas secciones de la «fotografía de placa» con la finalidad de descartar la aportación del fondo pero también para estimar el tamaño mínimo del receptor para una medición adecuada de la potencia.

Para definir fracciones de la «fotografía de placa» se tomaron como referencia las coordenadas de la cara receptora del Gardon, A_G . La imagen de placa se dividió en 50 secciones o recortes partiendo del contorno de A_G con incrementos en x y y hasta abarcar toda la fotografía de Placa. Para cada sección de la imagen se calculó la potencia siguiendo la ecuación [ecuación \(4.9\)](#), de donde Q cambia con cada fracción.

Los resultados típicos de este cálculo se muestran en la [figura 5.10](#). Donde el valor mínimo de las fracciones de potencia (mostrada como una línea de puntos y guiones) corresponde al cálculo de la potencia con los valores grises correspondientes a la sección medida por el Gardon, L_G ; y el valor máximo (mostrada como una línea quebrada) es la potencia calculada considerando a todos los píxeles en la «fotografía de placa». El incremento en x y y de la fracción de imagen es expresado en unidades de «diámetros de Gardon», lo que facilita la comparación preliminar de las potencias para diferentes jornadas experimentales.

Como criterio para determinar el área mínima del receptor se propuso un análisis del incremento porcentual de la potencia. El cálculo de incremento porcentual para cada fracción de la fotografía de placa se muestra en la [ecuación \(5.2\)](#), donde P_{frac} es la potencia calculada con la fracción n de la fotografía de placa, y n va aumentado a medida que el tamaño de la fracción de imagen se acerca a la fotografía de placa.

$$\text{Inc \%} = 100 \cdot \frac{P_{frac}(n+1) - P_{frac}(n)}{P_{frac}(n)} \quad (5.2)$$

Como se observa en la [figura 5.10](#), el incremento de una potencia respecto a la potencia anterior es menor a medida que incrementa el área de cálculo. Para elegir las dimensiones del receptor, se propusieron dos valores de tolerancia de incremento porcentual: 3% y 1% respecto a la fracción anterior.

De la fracción de imagen con las que se obtienen potencias con una tolerancia del incremento porcentual de 3% y 1%, se obtuvieron los radios correspondientes del área circular de la mancha. En la [figura 5.11](#) se grafican dichos radios.

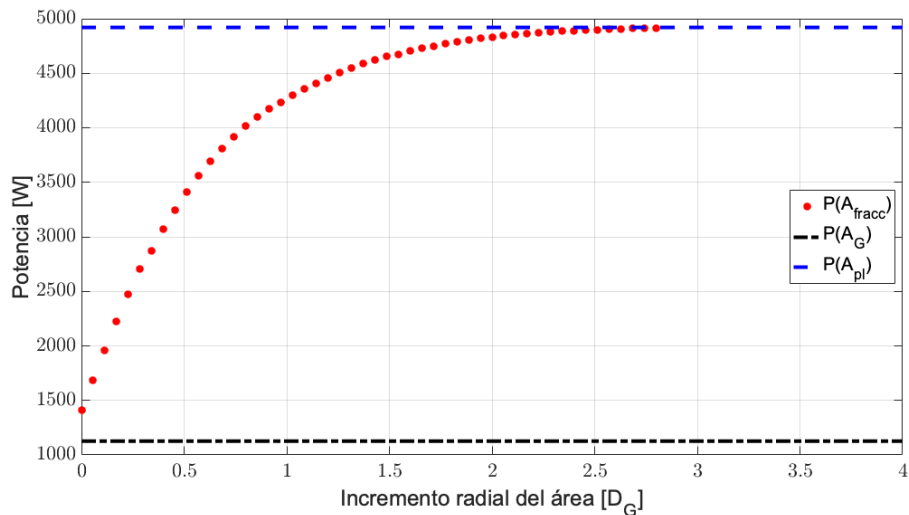


Figura 5.10: Cálculo de potencia para diferentes fracciones de la fotografía de placa. La línea de puntos y guiones (negra) es la potencia obtenida con los valores grises correspondientes a la sección de la mancha medida por el Gardon, con el área A_G ; la línea quebrada (azul) es la potencia calculada considerando a todos los pixeles en la «fotografía de placa», o el área total de la placa A_{pl} . Tercera jornada experimental, 42 % de apertura angular del atenuador.

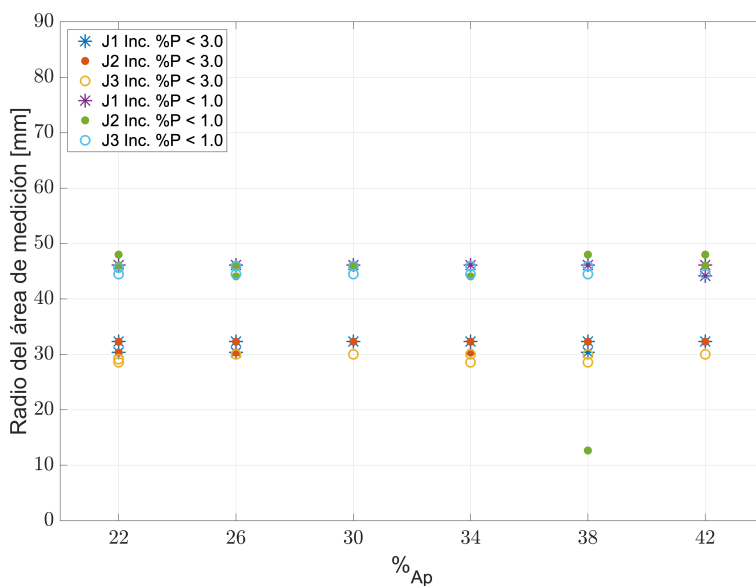


Figura 5.11: Radios del área circular de medición para la obtención de potencias con una tolerancia del incremento porcentual menor a 3 % y 1 %. Resultados de las tres jornadas experimentales para porcentajes de apertura angular de 22 % a 42 %.

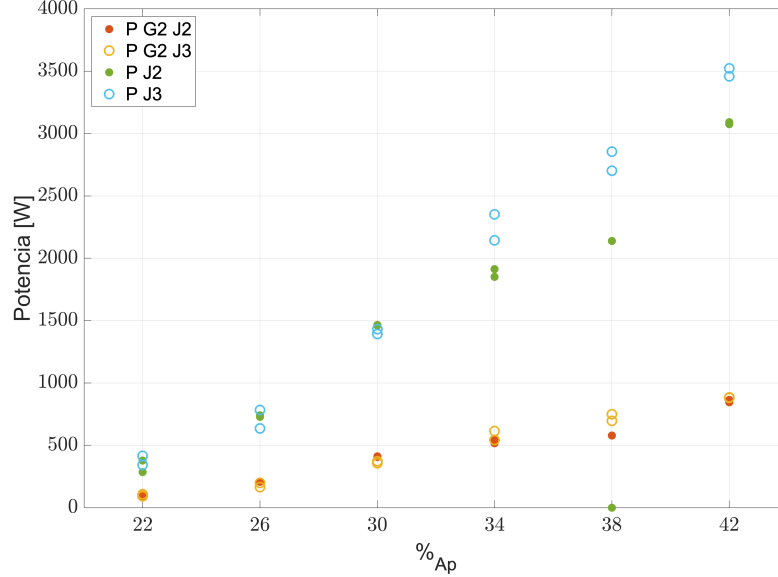


Figura 5.12: Porcentaje de apertura angular graficado contra potencias obtenidas con el área total del receptor y el área de Gardon, P y P_{G2} , respectivamente. Resultados de las jornadas 2 y 3.

Se concluye que para un incremento porcentual con tolerancia del 3%, el área circular de medición de la mancha debe tener por lo menos un radio de $31.05 \text{ mm} \pm 1.33 \text{ mm}$. Por su parte, para una tolerancia de incremento porcentual menor a 1% el área circular de medición debe tener por lo menos un radio de $45.67 \text{ mm} \pm 1.07 \text{ mm}$. Estos resultados concuerdan con lo reportado por R. A. Pérez Enciso [42] que definió una mancha de 36 mm de radio, contenedora del 95% del flujo promedio total.

Al no haber una diferencia significativa entre el radio calculado para las dos tolerancias, se prefieren los radios con incremento porcentual menor a 1%. Redondeando a la siguiente distancia significativa, se propone que el radio del área circular de medición para una versión futura del receptor sea de 50 mm, con la certeza de que capturaré toda la mancha de irradiancia concentrada.

Para el cálculo de las potencias de cada jornada se eligió utilizar la sección de la fotografía con tolerancia del 1%. Para obtener la potencia, se siguió la ecuación (4.9) sustituyendo la fracción del mapa de flujo por Q_{pt} , siendo la relación entre pixeles y longitud en metros $c_{mpx} = \{27.5652 \times 10^{-4}, 27.6329 \times 10^{-4}, 37.037 \times 10^{-4}\} \left[\frac{\text{m}}{\text{pix}} \right]$, respectivamente, para la primera, segunda y tercera jornada.

En la figura 5.12 se muestran los resultados de las potencias concentradas sobre el área total del receptor para las jornadas 2 y 3, así como la potencia recibida únicamente por el Gardon; de acuerdo con las mediciones, el Gardon recibe $27.73\% \pm 0.68\%$, $28.02\% \pm 0.67\%$ y $25.79\% \pm 0.47\%$ de la potencia total para la primera, segunda y tercer jornada, respectivamente.

Para comparar los resultados de potencia obtenidos con el SERFluSol con los reportados por Pérez Enciso en 2015, se hizo una estimación de las potencias para un porcentaje de apertura angular del 100% e irradiancia de $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ en dos pasos.

El primer paso consistió en la extrapolación a una irradiancia de $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ siguiendo la ecuación (5.3); a las potencias obtenidas se les hizo un ajuste lineal, obteniendo para la segunda y tercera jornada las expresiones de la ecuación (5.4a) y (5.4b) en función del porcentaje de apertura angular. Evaluando

los modelos lineales a un $\%_{Ap} = 100$ se obtuvieron 13.60 kW y 16.04 kW para las jornadas 2 y 3, respectivamente.

$$P_{\text{extr}} \left[I = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] = \frac{1000 \cdot P_{\%_{Ap}}}{I_{pl, \text{prom}}} \quad (5.3)$$

$$P_2[W] = 172.56 \%_{Ap} - 3657.1, \quad R^2 = 0.9891 \quad (5.4a)$$

$$P_3[W] = 204.71 \%_{Ap} - 4425.7, \quad R^2 = 0.9884 \quad (5.4b)$$

R. A. Pérez Enciso extrapoló una potencia de $21.75 \text{ kW} \pm 0.30 \text{ kW}$ para un porcentaje de apertura angular de 100 % y una irradiancia de $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ con mediciones calorimétricas (*tabla 4.5* de [42]). La potencia extrapolada a 100 % de apertura angular del atenuador e irradiancia de $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ para la jornada 3, en la que el HoSIER operó en mejores condiciones en cuestión de sombreado y limpieza de las facetas respecto a las jornadas anteriores, representan un 73.77 % de la potencia medida en 2015 por R. Pérez Enciso, resultado que contrasta con la reducción del casi 40 % de la estimación de concentración máxima.

5.6 Actualización de las condiciones de operación del HoSIER

Las estimaciones de concentración y potencia a un 100 % de apertura angular del atenuador e irradiancia de $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, además del diámetro de la mancha concentrada, determinado con el cálculo de incremento porcentual de la potencia para los resultados de la jornada 3 con tolerancia del 1 %, se resumen en la [tabla 5.2](#).

Tabla 5.2: Estimación de las condiciones de operación del HoSIER a un 100 % de apertura angular del atenuador e irradiancia de $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

Parámetro	Valor	Unidad
Diámetro del spot (22 %-42 %)	0.091	m
Pico máximo de concentración	10 860.10	soles
Potencia máxima	16.04	kW

5.7 Enfriamiento por aire

En las tres jornadas experimentales las temperaturas máximas del receptor fueron obtenidas para los porcentajes de apertura más grandes, permaneciendo por debajo de los 500 °C. Para el Gardon, la temperatura medida por el termopar lateral no superó los 120 °C. Cabe señalar que las temperaturas máximas estuvieron presentes por tiempos cortos, no mayores a un *timestep* o 3 s.

De las tres jornadas experimentales se esperaba obtener a las más altas temperaturas en la tercera, por la limpieza de las facetas y la reducción de sombreados respecto a las primeras dos jornadas. En las figuras [5.13.a](#) y [5.13.b](#) se muestran las temperaturas de placa y de Gardon para la jornada experimental 3. Los picos de temperatura corresponden a la apertura del atenuador del horno para realizar una medición. Las temperaturas más altas fueron obtenidas con las aperturas del atenuador mayores.

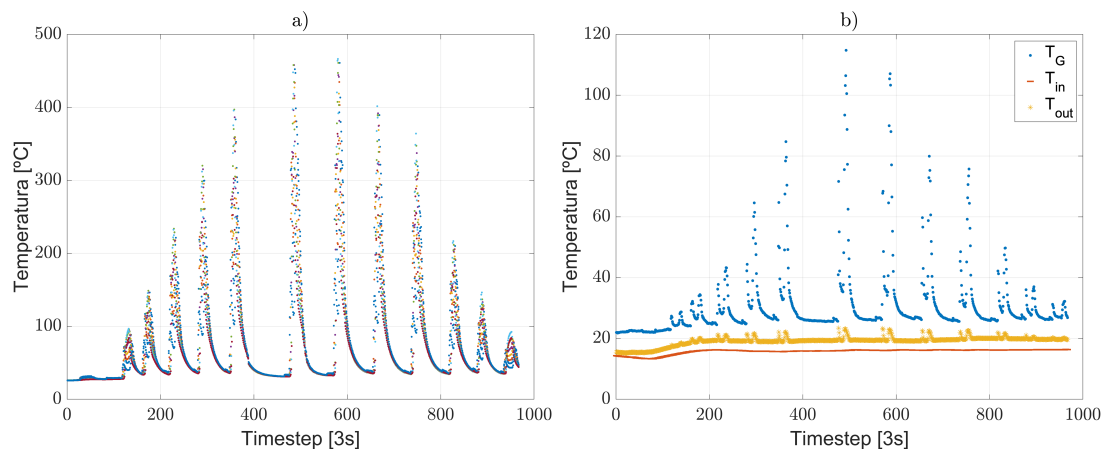


Figura 5.13: Temperaturas obtenidas con los termopares del receptor para la tercera jornada experimental. a) Temperaturas de la placa. b) Temperatura del Gardon (T_G) y del agua de refrigeración a la entrada (T_{in}) y salida (T_{out}) del radiómetro. $Timestep = 3s$.

El enfriamiento por aire mantuvo a las temperaturas de la placa alejadas del punto de fusión del aluminio; sin embargo, se considera prioritario mejorar el enfriamiento por aire para que el receptor sea capaz de realizar mediciones de flujo para porcentajes de apertura angular superiores y tiempos ligeramente mayores.

Como ya se mencionó, las diferencias de temperaturas en el blanco lambertiano causan estreses mecánicos, que en versiones anteriores del receptor provocaron la deformación de la placa. Sin embargo, es importante resaltar que no se observó algún deterioro en la calidad de la superficie lambertiana. En la tercera jornada, la diferencia de temperaturas entre el termopar más cercano al Gardon y el más alejado (ver figura 5.14) se mantuvo por encima de los 50°C para porcentajes de apertura angular mayores a 22% y superó los 100°C para aperturas mayores a 30%. La diferencia de temperatura máxima alcanzada entre T1 y T7 fue de 283.54°C ; las diferencias de temperatura positivas de la figura 5.14 corresponden al posicionamiento de la mancha en la zona del Gardon, mientras que las diferencias de temperatura negativas indican que la mancha concentrada se encontraba en la zona de placa.

5.8 Termografía

Algunas de las imágenes termográficas obtenidas se muestran en la figura 5.15. Para las cuatro situaciones de enfriamiento, denotadas como *SE* (sin enfriamiento), *EP* (enfriamiento posterior), *EPDr* (enfriamiento posterior + anterior directo) y *EPDf* (enfriamiento posterior + anterior difuso), se obtuvieron 12 imágenes termográficas en los tiempos $t = \{-2, 2, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 92\}$ s, donde $t = 0$ s es el momento en que se abrió el atenuador a un 30%.

La distribución de temperaturas en las imágenes es similar para tiempos superiores a 30 s. Se reconoce por la escala de temperaturas, ubicada en el costado derecho de cada imagen, que los enfriamientos EPDr y EPDf son los que mantienen a la placa a una menor temperatura.

Para analizar cuantitativamente las temperaturas del receptor se calculó la emisividad de la placa

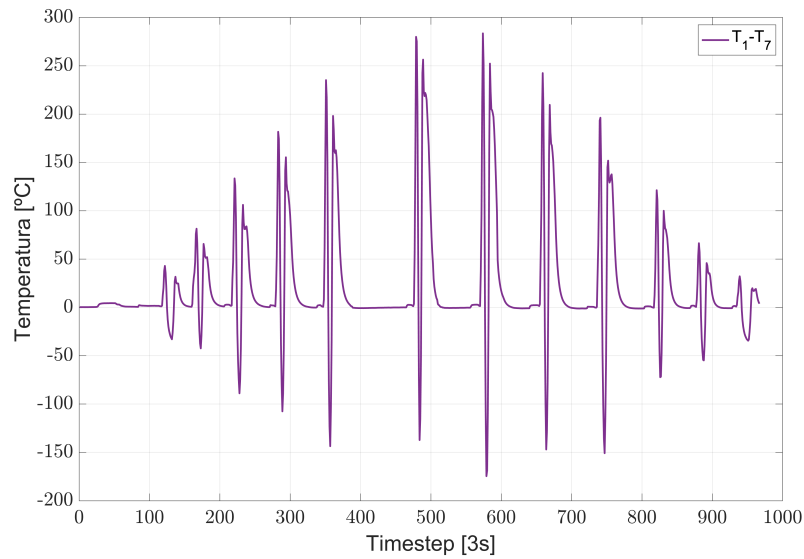


Figura 5.14: Diferencia de temperaturas entre la zona más cercana y más lejana al Gardon a lo largo de la jornada experimental 3; $T_1 - T_7$. Las diferencias de temperatura positivas y negativas corresponden al posicionamiento de la mancha en la zona del Gardon y de placa ,respectivamente. $Timestep = 3s$.

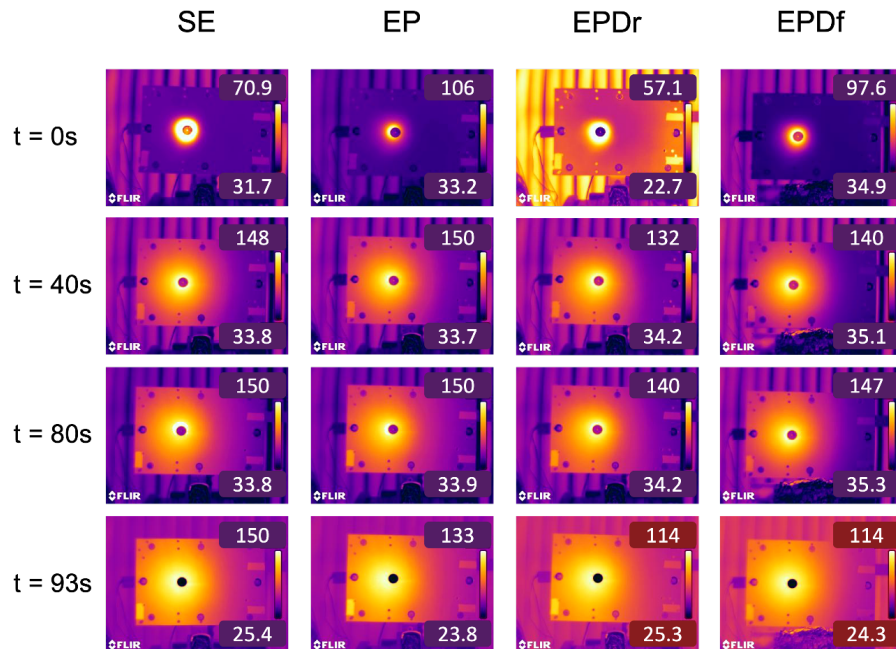


Figura 5.15: Termografía del receptor para diferentes tiempos bajo cuatro configuraciones de enfriamiento; 30% de apertura angular del atenuador.

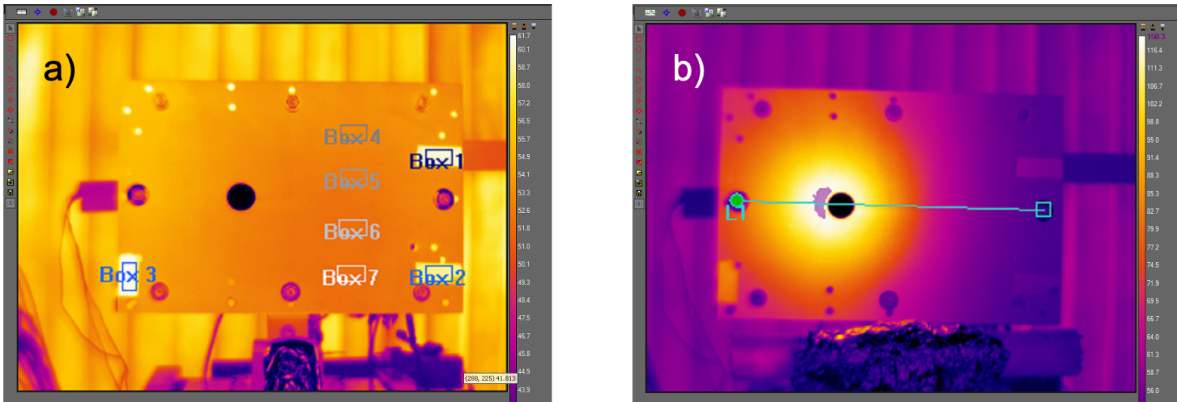


Figura 5.16: a) *Boxes* utilizadas para el cálculo de la emisividad de la placa. b) Línea horizontal para capturar datos de temperatura en el software de la cámara, eje x de la placa.

con el método de «material emisor de referencia» en el software de análisis de FLIR. Los tres trozos de cinta de aislar negra en la placa cumplen la función de un material emisor de referencia ya que la emisividad de la cinta de aislar de alta calidad es conocida y tiene un valor de 0.96 [49].

Se eligió una de las imágenes infrarrojas del receptor a temperatura ambiente y fue importada al software de FLIR. Se definieron siete áreas con la herramienta ROI (región de interés) «Box» del software, una en cada trozo de cinta y cuatro «Boxes» más en la zona lisa de la placa, como se muestra en la figura 5.16.a. La ROI Box entrega la temperatura promedio de los píxeles dentro del área seleccionada y, además, permite calcular el valor de la emisividad si se le da un valor conocido de temperatura.

Para toda la imagen se definió una emisividad de 0.96 (la emisividad de la cinta). A los Boxes de placa se les asignó como temperatura conocida el valor promedio de las temperaturas de los Boxes de la cinta, obteniendo así cuatro valores de emisividad. La emisividad media obtenida de la placa es 0.7465 ± 0.0132 , con un error relativo de 0.0177. El nuevo valor de emisividad permitió ajustar los parámetros de la imagen en el software y obtener valores de temperatura más confiables.

Para comparar las imágenes termográficas, se exportaron valores de temperaturas en una línea horizontal, correspondientes al eje x de la placa, como se muestra en la figura 5.16.b.

Las temperaturas tras el cierre del atenuador ($t = 92$ s), mostradas en la figura 5.17.a, son útiles para reconocer las diferencias entre los cuatro escenarios de enfriamiento.

Las temperaturas alrededor del Gardon no fueron uniformes como se hubiera esperado, considerando que la mancha se centró a la posición del radiómetro; esto puede ser consecuencia del predominio de la transferencia de calor por conducción en la dirección \hat{x} , hacia la zona de placa, mientras que en dirección $-\hat{x}$ la distancia al borde de la placa es menor.

Para el EP, EPDr y EPDf no hubo una diferencia significativa entre las temperaturas finales de la cara receptora del Gardon, solo en el caso sin enfriamiento ésta se eleva aproximadamente un grado sobre las demás. Por lo anterior, se confirma que el sistema de refrigeración del radiómetro por circulación de agua es sumamente útil para regular su temperatura. De acuerdo con la termografía, la temperatura de la cara receptora del Gardon se mantuvo debajo de los 90°C durante el calentamiento.

Las diferencias de temperatura entre el caso sin enfriamiento y los de enfriamiento combinado son

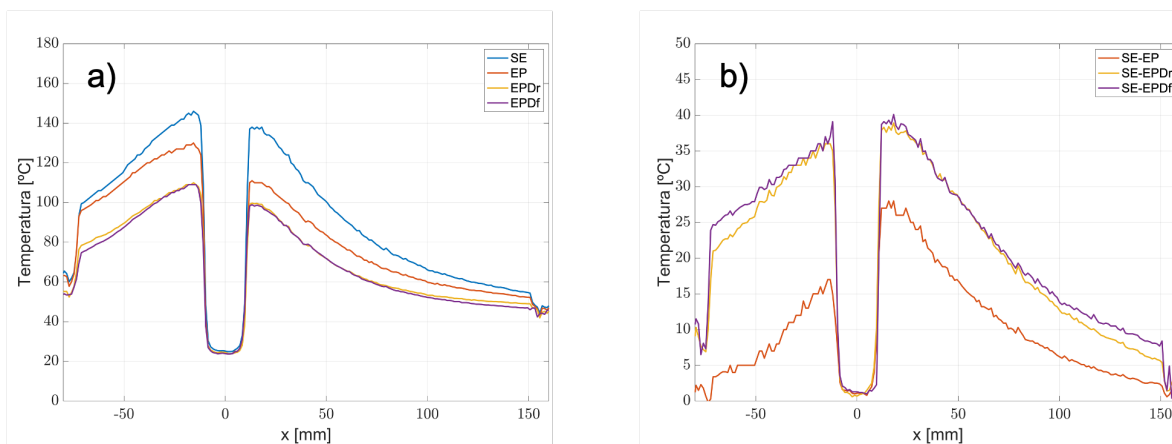


Figura 5.17: a) Temperaturas del eje x de la placa receptora justo después del cierre del atenuador para una medición típica de 90 s a un 30 % de apertura angular bajo diferentes condiciones de enfriamiento; b) diferencia de temperatura entre SE y los casos con enfriamiento con convección forzada.

superiores a 20 °C alrededor del Gardon, llegando a los 40 °C en su contorno, como se muestra en la [figura 5.17.b](#). Entre EPDr y EPDf no hay una diferencia significativa de la temperatura en la zona cercana al Gardon, sin embargo, en las zonas lejanas las temperaturas de la placa son hasta 3 °C mayores con el EPDr. El enfriamiento posterior combinado con el anterior difuso (EPDf) es el que logra homogeneizar mejor las temperaturas en la superficie de la placa.

5.8.1 Sobre el EPDf

Para analizar cuantitativamente la capacidad del EPDf para regular la temperatura de la placa se calculó la tasa del cambio de temperatura de tres termopares siguiendo la relación que se muestra en la [ecuación \(5.5\)](#), donde n es el índice de una temperatura arbitraria y Δt es el tiempo entre mediciones, igual a 3 segundos. En la [figura 5.18.a](#) se muestran las tasas de cambio de temperatura para los termopares T1, T7 y T8 (ver esquema en la [figura 4.9](#)) durante la jornada 3; las tasas negativas corresponden a un calentamiento, mientras que las positivas corresponden a un enfriamiento y una tasa cercana o igual a cero implica el equilibrio térmico de la zona medida.

$$\text{Tasa}_{\text{enf}} = \frac{T(n) - T(n - 1)}{\Delta T} \quad (5.5)$$

En la [figura 5.18.b](#) se grafican las tasas de enfriamiento instantáneo durante la secuencia de medición típica con un porcentaje de apertura angular de 42 %; se reconoce la alternancia del enfriamiento y calentamiento de las diferentes zonas de la placa. Para el calentamiento de las diferentes zonas de la placa, las tasas fueron negativas, mientras que para el EPDf las tasas de T1, T7 y T8 se mantuvieron entre los 0 $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$ y los 16.13 $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$. Las tasas de enfriamiento máximas fueron obtenidas para los porcentajes de apertura angular más grandes, éstas serán el punto de partida para trabajos futuros en cuanto al enfriamiento por aire del receptor.

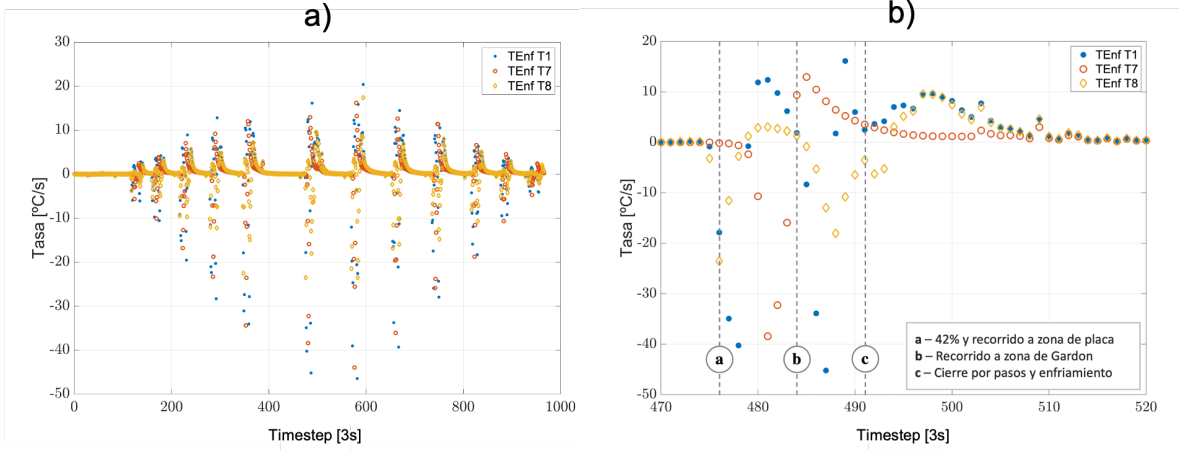


Figura 5.18: Jornada 3. a) Tasa de enfriamiento instantánea de la placa en la posición de los termopares T1, T7 y T8. b) Tasas de enfriamiento instantánea para una secuencia típica de medición a 42 % de apertura angular.

5.9 Análisis y propagación de error

Un análisis de las fuentes de incertidumbre y un cálculo de la propagación de error se llevó a cabo para los resultados principales del SERFluSol que son la concentración solar pico en cada porcentaje de apertura angular, los mapas de flujo y la potencia concentrada.

El error absoluto de una serie de mediciones se define como el máximo entre la desviación estándar de las mediciones (σ) y la precisión del dispositivo de medición (Pc); por su parte, el error relativo (α), se define típicamente como el cociente de el error absoluto y la magnitud real, que puede estimarse con la media (x_{prom}) de las mediciones, como muestra la [ecuación \(5.6\)](#).

$$\alpha = \frac{\max(\sigma, Pc)}{x_{prom}} \quad (5.6)$$

A partir de los resultados experimentales de la jornada 3, se analizó la propagación de error en el proceso de cálculo de los mapas de flujo y la potencia concentrada. Se distinguieron tres fuentes principales: la incertidumbre en la lectura del Gardon, la precisión de la CCD para la obtención de mapas en escala de gris y la transformación del mapa en escala de gris a unidades de flujo.

Como se mencionó previamente, la incertidumbre de la medición del Gardon 2 y del atenuador se analizó en conjunto de manera experimental ([sección A.3](#)). El error relativo máximo de la lectura del Gardon para un mismo porcentaje de apertura angular es 5.3 %.

Para estimar el error relativo máximo de la obtención de un mapa en escala de gris se analizaron cuatro escenarios. Primero que nada, el valor de luminosidad de un pixel es un entero entre 0 GS y 255 GS, por lo que la precisión de luminosidad de un pixel en las imágenes capturadas por la CCD es 1 GS, i.e., su error absoluto es 1 GS. En la jornada 3, los tiempos de exposición de la cámara CCD tuvieron un valor entre 0.002 s y 0.02 s, y los valores en escala de gris de la cara del Gardon estuvieron entre $7462.7 \frac{GS}{s}$ y $70860 \frac{GS}{s}$. Haciendo una combinación de los tiempos de exposición y valores en escala de gris mínimos y máximos, se calcularon cuatro errores relativos siguiendo la [ecuación \(5.7\)](#), donde $t_{\%Ap}$ es el tiempo de exposición y L_G es el valor promedio en escala de gris por unidad de tiempo

de exposición de la cara receptora del Gardon. El error relativo máximo calculado para la luminosidad de un pixel con unidades de escala de gris por unidad de tiempo de exposición es de 6.7%.

$$\alpha_{\text{pix,GS}} = \frac{1 [\text{GS}]}{t_{\%Ap} [\text{s}]} \cdot \frac{1}{L_G [\frac{\text{GS}}{\text{s}}]} \quad (5.7)$$

En la transformación de un mapa en escala de grises a un mapa de flujo, la fuente principal de error es la precisión de la constante de transformación, K . Para la jornada 3, el error relativo de la constante fue calculado siguiendo la [ecuación \(5.6\)](#), obteniendo un valor de 1.5%.

La propagación de error en funciones multivariadas, como lo es el cálculo de flujo a partir de valores en escala de grises y la obtención de la potencia a partir de un mapa de flujo, ha sido estudiada en la literatura. La propagación de error en una función Z , en la que dos variables A y B se multiplican o dividen ([ecuación \(5.8a\)](#)) se calcula como muestra la [ecuación \(5.8b\)](#) [50].

$$Z = A \times B \quad (5.8a)$$

$$Z = \frac{A}{B}$$

$$\alpha_Z = \sqrt{(\alpha_A)^2 + (\alpha_B)^2} \quad (5.8b)$$

Por otro lado, la propagación de error en una función Z , en la que A , B , C y D se suman ([ecuación \(5.9a\)](#)), se obtiene como muestra la [ecuación \(5.9b\)](#) [50]. La diferencia entre este caso y el anterior es que en uno se suman en cuadratura los errores relativos y en el otro las desviaciones estándar.

$$Z = A + B + C - D \quad (5.9a)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{(\sigma_A)^2 + (\sigma_B)^2 + (\sigma_C)^2 + (\sigma_D)^2} \quad (5.9b)$$

La obtención de un pixel de mapa de flujo en $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ es, para fines prácticos, el producto del pixel en escala de gris con la constante K , y su división por el tiempo de exposición. De manera que el error relativo del valor de un pixel en unidades de concentración, $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ o soles, se puede expresar como muestran la [ecuación \(5.10a\)](#) y [\(5.10b\)](#), donde α_K , $\alpha_{\text{pix,GS}}$ y α_{C_G} son los errores relativos de la constante de transformación K , del valor de un pixel en escala de gris y de la medición del Gardon para un mismo porcentaje de apertura angular, respectivamente; α_I es la incertidumbre del pirheliómetro indicada por el fabricante (1%). El error máximo obtenido para un pixel del mapa de flujo con unidades de $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ y soles es, respectivamente, 8.66% y 8.72%.

$$\alpha_{Q_{\text{pix}}} = \sqrt{(\alpha_K)^2 + (\alpha_{\text{pix,GS}})^2 + (\alpha_{C_G})^2} \quad (5.10a)$$

$$\alpha_{C_{\text{pix}}} = \sqrt{(\alpha_K)^2 + (\alpha_{\text{pix,GS}})^2 + (\alpha_{C_G})^2 + (\alpha_I)^2} \quad (5.10b)$$

La propagación de error en el cálculo de la potencia requiere un enfoque diferente, ya que involucra una sumatoria. Desarrollando el cálculo de P para cada «pixel» del mapa de flujo, como muestra la [ecuación \(5.11a\)](#), y proponiendo una expresión siguiendo a [\(5.9b\)](#), se reconoce que se debe determinar la desviación estándar de cada pixel. La [ecuación \(5.11b\)](#) obtiene la desviación estándar de la potencia calculada con un mapa de flujo Q , donde ΔA es el área correspondiente a un pixel en m^2 .

$$P = (Q_{1,1} + Q_{1,2} + Q_{1,3} + \dots + Q_{2,1} + Q_{i,j}) \cdot \Delta A \quad (5.11a)$$

$$\sigma_P = \Delta A \cdot \sqrt{(\sigma_{Q_{1,1}})^2 + (\sigma_{Q_{1,2}})^2 + (\sigma_{Q_{1,3}})^2 + \dots + (\sigma_{Q_{i,j}})^2} \quad (5.11b)$$

Sin embargo, la desviación estándar para los pixeles del mapa de flujo no es la misma. Se propuso obtener un mapa de desviaciones estándar ($\sigma_{Q_{i,j}}$) siguiendo la [ecuación \(5.12\)](#), donde $\alpha_{\text{pix,GS}}$ fue calculada con [ecuación \(5.7\)](#) y $Q_{i,j}$ es un mapa de flujo con unidades de $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

$$\sigma_{Q_{i,j}} = \alpha_{\text{pix,GS}} \cdot Q_{i,j} \quad (5.12)$$

Sustituyendo cada valor del mapa de desviaciones estándar en (5.11b) se obtiene la desviación estándar σ_P que considera la propagación de error a la potencia. Finalmente, se calculó el error relativo de las potencias concentradas en la jornada 3 siguiendo la ecuación (5.13), obteniendo valores menores a 0.1 %.

$$\alpha_{P\%_{AP}} = \frac{\sigma_{P\%_{AP}}}{P\%_{AP}} \quad (5.13)$$

El análisis de los errores presentes en el SERFluSol evidencian que las principales fuentes de incertidumbre son la calibración del Gardon y la constante de transformación K ; se reconoce, además, que la propagación de error a la potencia es despreciable. Los errores relativos máximos obtenidos con los resultados de la jornada experimental 3, se resumen en la tabla 5.3.

Tabla 5.3: Resultados máximos del cálculo de propagación de error para la jornada 3.

Concepto	α_{\max}
Incertidumbre del Pirheliómetro	0.010
Lectura del Gardon para un mismo $\%_{AP}$	0.053
Precisión del valor GS de la CCD	0.067
Error experimental de K	0.015
Pixel del mapa de flujo en W/m^2	0.0866
Pixel del mapa de flujo en soles	0.0872
Potencia calculada con el SERFluSol	0.0005

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis se desarrolló un sistema de evaluación de flujo concentrado basado en el método «cámara-blanco» con enfriamiento por aire y se implementó en el HoSIER.

Al ser el blanco lambertiano un componente esencial del sistema, fue necesario como primer paso plantear una caracterización respecto al tipo de reflexión predominante en una superficie. Se propuso un modelo que describe a la luz reflejada por una superficie como la combinación de dos componentes, una difusa y otra especular con un perfil de dispersión que ajusta a una Gaussiana, cuyo resultado principal es un indicador de lambertianidad. El modelo fue ajustado al perfil de reflexión de muestras experimentales con diferente comportamiento reflectivo y justificó el uso de una placa de aluminio sometida al proceso de arenado, con fracción de lambertianidad del **80 %**, como blanco del receptor.

Se construyó un receptor compuesto por una placa lambertiana instrumentada y un radiómetro Gardon con enfriamiento por agua. Se eligió la configuración de enfriamiento posterior y anterior difuso, manteniendo la placa por debajo de su punto de fusión, aunque se presentaron picos y diferencias en la temperatura de hasta 284 °C. El último diseño es compacto, incluye conexiones rápidas al recirculador de refrigeración que simplifican el proceso de montaje y es robusto, lo que permitió la reducción de la deformación por estreses térmicos. El enfriamiento por aire permanece como una de las principales áreas de mejora del trabajo.

Por la cantidad de datos obtenidos en las jornadas experimentales y la intención de que el proceso de medición fuera replicable, se propuso toda una metodología que facilita la obtención de los mapas de flujo y potencia concentrada. La secuencia de medición típica, en conjunto con el proceso de obtención de resultados y los dispositivos de medición integrados al HoSIER, constituyen el Sistema de Evaluación Rápida de Flujo Solar Concentrado con enfriamiento por aire, que es el principal resultado de este trabajo.

Con el SERFluSol se obtuvieron concentraciones pico, mapas de flujo para diferentes porcentajes de apertura angular y potencias de concentración para dos condiciones de operación del horno. Se estimó, además, un pico máximo de concentración de **10860.1 soles** y una potencia de **16.04 kW**.

La capacidad de concentración del HoSIER disminuyó considerablemente respecto a los resultados

en 2015, casi un 40 %; en contraste, la estimación de la potencia máxima representa el 73.77 % respecto a 2015; estos resultados se atribuyen principalmente a la desalineación de las facetas del concentrador y en segundo lugar a la reducción de la reflectividad de los elementos ópticos del sistema, en particular de las facetas del concentrador; por otro lado, las diferencias entre los resultados de la jornada 2 comparados con los de la jornada 3 muestran que el sombreamiento y suciedad del concentrador tienen un impacto notorio en la capacidad de concentración del horno. El SERFluSol puede ser una herramienta valiosa para el monitoreo y mantenimiento del horno.

Del análisis de propagación de error en los resultados principales del SERFluSol, se obtuvo un error relativo máximo de **8.7 %** para el valor de un pixel en el mapa de flujo y menor al **0.1 %** en el cálculo de la potencia. Para reducir la incertidumbre de las mediciones se recomienda mejorar la calibración del Gardon y perfeccionar el proceso de obtención de fotografías para obtener valores en escala de gris más precisos. Además, se propone comparar experimentalmente al SERFluSol con un sistema previamente calibrado y con mayor confiabilidad.

Las principales limitaciones del sistema son que el receptor no puede ser sometido a altos porcentajes de apertura angular y que la secuencia de medición típica no está automatizada, por lo que el montaje del receptor y la captura de imágenes son realizados de manera manual.

6.1 Propuestas de trabajos futuros

1. Para verificar el «modelo de aportaciones», se propone realizar mediciones para muestras revestidas con pinturas de lambertianidad conocida.
2. Evaluar el efecto que tendría el aumento de la lambertianidad de la placa arenada en los resultados obtenidos con el SERFluSol.
3. Validar al SERFluSol con otro dispositivo de medición de flujo de alta confiabilidad.
4. Mejorar el sistema de enfriamiento por aire y estudiar la alternativa de un diseño aleteado de la placa receptora, para potenciar la transferencia de calor por convección forzada.
5. Proponer la integración de una nueva versión del receptor a la mesa 3D del HoSIER con un diseño que le permita realizar mediciones simultáneas al desarrollo de un experimento.
6. Evaluar experimentalmente el desempeño del Gardon 1 y 2 en comparación a otros dispositivos de medición de flujo y comprobar la validez del factor de corrección propuesto por Ballestrín [23].
7. Estudiar el flujo en la zona focal a través de volúmenes efectivos (superficies imaginarias con densidades radiativas homogéneas) para conocer la forma de la mancha de radiación solar concentrada y descartar cambios en la distancia focal del HoSIER.
8. Actualizar el error óptico global, el factor de horno del HoSIER e indagar las causas principales de la disminución del factor de concentración.

APÉNDICE A

ALGUNOS DESARROLLOS Y RESULTADOS ADICIONALES

A.1 Indicadores, fracciones de Lambertianidad y coeficientes de determinación del modelo de cada muestra

Tabla A.1: Indicadores, fracciones de Lambertianidad y coeficientes de determinación para las muestras N con láser verde.

Muestra	$q_{\lambda,d}$	$q_{\lambda,s}$	F_d	R^2
N1 Z1	0.0158	0.0347	0.3133	0.9959
N1 Z2	0.0226	0.0478	0.3211	0.9880
N1 Z3	0.0184	0.0391	0.3202	0.9957
N1 Z4	0.0150	0.0299	0.3336	0.9956

Tabla A.2: Indicadores, fracciones de Lambertianidad y coeficientes de determinación para las muestras S con láser verde.

Muestra	$q_{\lambda,d}$	$q_{\lambda,s}$	F_d	R^2
S1 C1	0.0074	0.0026	0.7390	0.9902
S1 C2	0.0075	0.0029	0.7221	0.9885
S1 C3	0.0066	0.0026	0.7207	0.9890
S2 C1	0.0073	0.0010	0.8800	0.9883
S2 C2	0.0082	0.0002	0.9770	0.9863

Tabla A.3: Indicadores, fracciones de Lambertianidad y coeficientes de determinación para las muestras N con láser rojo.

Muestra	$q_{\lambda,d}$	$q_{\lambda,s}$	F_d	R^2
N1 Z1	0.0226	0.0542	0.2939	0.9922
N1 Z2	0.0255	0.0602	0.2980	0.9904

Tabla A.4: Indicadores, fracciones de Lambertianidad y coeficientes de determinación para las muestras S con láser rojo.

Muestra	$q_{\lambda,d}$	$q_{\lambda,s}$	F_d	R^2
S1 C1	0.0109	0.0051	0.6820	0.9933
S1 C2	0.0096	0.0013	0.8788	0.9923
S1 C3	0.0089	0.0012	0.8837	0.9917
S2 C1	0.0095	0.0018	0.8431	0.9875
S2 C2	0.0096	0.0039	0.7140	0.9916

A.2 Relación entre el porcentaje de energía concentrada y el porcentaje de apertura angular del atenuador

Basado en resultados experimentales, se propuso un modelo que define al «porcentaje de energía concentrada» por el horno en función del porcentaje de apertura angular del atenuador, $\%_{Ap}$, en donde la energía máxima sería la obtenida para un $\%_{Ap} = 100\%$.

En el experimento, el Gardon montado al receptor v.0.1 registró la radiación incidente para aperturas del atenuador de 20% a 100% con pasos de 5%. La mancha concentrada se hizo incidir sobre el Gardon durante 50 segundos en cada apertura. Para cada porcentaje de apertura, se dividió el promedio de las lecturas del Gardon, $q_{G,prom}$, entre la irradiancia promedio del mismo periodo de tiempo, I_{prom} , obteniendo la magnitud de «soles concentrados» por el HoSIER, como se muestra en la [figura A.1](#).

Para expresar los «soles concentrados» de cada porcentaje de apertura como «porcentaje de energía concentrada», se definió como energía máxima la concentración obtenida para un porcentaje de apertura de 98.9% (virtualmente 100%), $q_{G,max}$; el porcentaje de energía concentrada es definido como se muestra en la [ecuación \(A.1\)](#), donde $I_{prom,max}$ es la irradiancia promedio para la concentración obtenida con el máximo porcentaje de apertura.

$$\%_E = 100 \cdot \frac{q_{G,prom} \cdot I_{prom,max}}{q_{G,max} \cdot I_{prom}} \quad (A.1)$$

A los porcentajes de energía concentrada obtenidos les fue ajustada una función sigmoideal de Boltzmann ([ecuación \(A.2\)](#)), para la que se obtuvo un factor de determinación de $R^2 = 0.9995$.

$$\%_E = 100 \cdot \left(-0.319684 + \left[\frac{1.6068}{1 + e^{0.0352(56.4063 - \%_{Ap})}} \right] \right) \quad (A.2)$$

Con base en la [ecuación \(A.2\)](#) se eligieron seis porcentajes de apertura para la caracterización del SERFluSol con los que se obtuviera entre un 5% y 30% de energía concentrada. Los porcentajes de

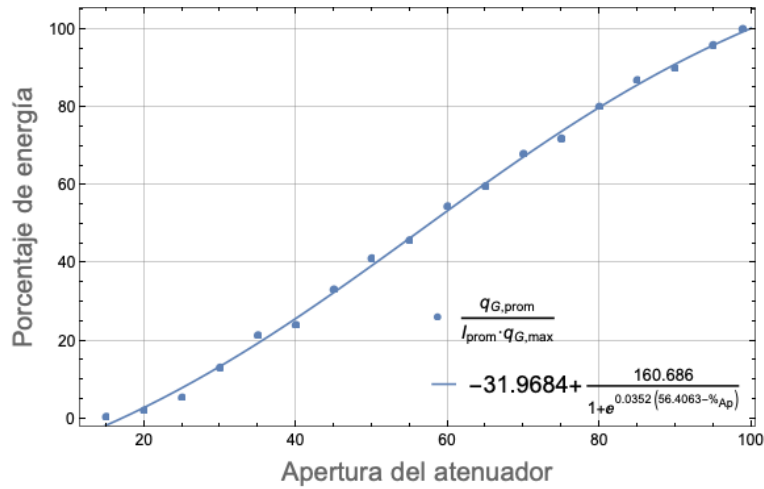


Figura A.1: Apertura del atenuador contra porcentaje de energía concentrada y función sigmoideal de Boltzman ajustada.

apertura del atenuador como son introducidos en programa SCADA del HoSIER y el porcentaje de energía que representan se muestran en la [tabla A.5](#).

Tabla A.5: Porcentajes de apertura utilizados para la evaluación del SERFluSol y porcentaje de energía correspondiente.

$\%_{Ap}$	$\%_E$
22	4.88
26	9.03
30	13.48
34	18.21
38	23.20
42	28.41

Se encontró además que un $\%_{Ap} = 15\%$ representa virtualmente 0% de energía concentrada, algo que empíricamente se había reconocido. Dicho porcentaje de apertura es usado típicamente para hacer ajustes de posición de la mancha de radiación concentrada.

A.3 Incertidumbre de las mediciones del Gardon y apertura del atenuador

Para determinar la incertidumbre de los datos de concentración obtenidos con el SERFluSol se realizó una corrida experimental con la que se pudiera evaluar el error en la concentración medida con el Gardon 2 así como el error del porcentaje de apertura del atenuador.

La corrida se realizó de forma paralela a la segunda jornada y consistió en la apertura del atenuador a 22%, 26%, 30%, 34%, 38% y 42% durante 40 segundos en cinco ocasiones cada una, alineando la mancha concentrada al centro del Gardon. Las cinco mediciones para la apertura de 42% se realizaron

Tabla A.6: Variabilidad del porcentaje de apertura angular actual del atenuador del HoSIER.

$\%_{Ap}$	$\%_{Ap,Act}$	σ	α
22	23.08	0.81	0.0352
26	27.47	0.52	0.0190
30	31.76	0.37	0.0116
34	35.87	0.30	0.0083
38	39.52	0.65	0.0164
42	43.79	0.64	0.0147

Tabla A.7: Variabilidad de las concentraciones obtenidas con el Gardon 2.

$\%_{Ap}$	$C_{G,prom}$ [soles]	σ [soles]	α
22	276.42	46.55	0.1684
26	578.61	44.39	0.0767
30	1014.00	49.99	0.0493
34	1425.80	59.91	0.0420
38	1846.10	88.05	0.0477
42	2186.60	115.30	0.0527

el 16 de mayo.

El timestep del inicio de cada apertura se registró por escrito en una bitácora. El porcentaje de apertura del atenuador fue definido por el operador del horno utilizando el sistema SCADA del HoSIER.

El porcentaje de apertura real o actual del atenuador ($\%_{Ap,Act}$) no es igual al demandado por el operador, sin embargo, se mantiene siempre alrededor de un valor promedio. El sistema SCADA del HoSIER almacena en una bitácora digital la información de los subsistemas del horno durante su operación. El porcentaje de apertura actual del atenuador es almacenado en dicha bitácora durante toda la operación.

Las aperturas actuales promedio correspondientes al $\%_{Ap}$ introducido por el operador, así como las desviaciones estándar y errores relativos obtenidos, se presentan en la [tabla A.6](#). Se observa que el atenuador del HoSIER entrega porcentajes de apertura superiores al demandado por el operador por 1.08 % y hasta 1.87 %. El error relativo con el que opera el atenuador es menor a 2 % con excepción del error obtenido para la apertura de 22 % que fue de 3.52 %.

Para comparar las lecturas del Gardon 2 se calculó la concentración en soles dividiendo por el valor instantáneo de la irradiancia. Las concentraciones promedio, desviaciones estándar y errores relativos obtenidos se presentan en la [tabla A.7](#). Solo para las mediciones con una apertura de 22 % el error relativo fue superior a 15 %, mientras que para las demás aperturas se mantuvo por debajo del 8 %. En la [figura A.2](#) se grafican las concentraciones y porcentajes de apertura actuales promedio junto con las barras de error calculadas.

A.4 Corrección del factor de escala del Gardon 1

Para encontrar la corrección del factor de escala se realizó una comparación lineal entre las concentraciones promedio de la jornada 1 y 2, como se muestra en la [ecuación \(A.3\)](#), donde las concentraciones

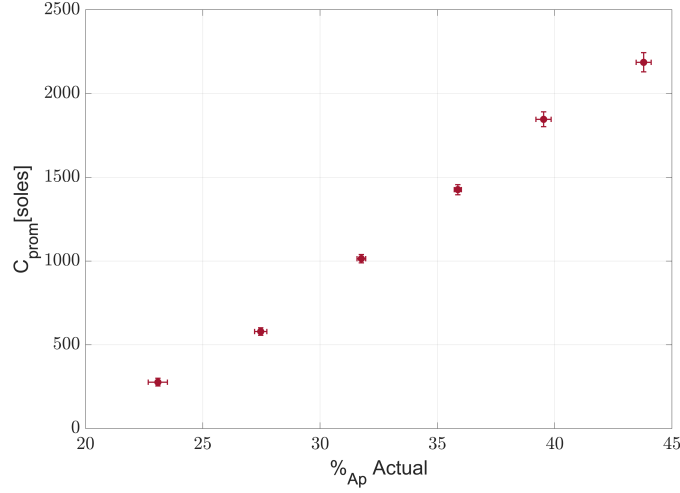


Figura A.2: Resultados de la jornada de variabilidad del 12 de mayo. Porcentajes de apertura actual del atenuador y concentraciones con barras de error.

obtenidas con el Gardon 1 y Gardon 2 se relacionan por una constante m . El nuevo factor de escala de Gardon 1 sería el producto del factor de escala de calibración (F_{G1}) y $1/m$.

$$C_{G1}[\text{soles}] = m \cdot C_{G2}[\text{soles}] \quad (\text{A.3})$$

Del ajuste lineal, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9898$, se obtuvo un valor de $m = 1.1158$. Obteniendo así un nuevo factor de escala para Gardon 1 de:

$$F_{G1,\text{corr}} = 26.4470 [\text{W}/\text{cm}^2/\text{mV}] \quad (\text{A.4})$$

En la [figura A.3](#) se muestran las concentraciones obtenidas con los radiómetros en la primera y segunda jornada, además de las concentraciones obtenidas con la corrección del factor de escala para el Gardon 1 (denotada como G1C J1). Una buena correspondencia se observa entre las concentraciones de la jornada 2 y las concentraciones corregidas.

Provisionalmente, este nuevo factor de escala logra que las lecturas del radiómetro se acerquen a las obtenidas con el Gardon 2, sin embargo un análisis detallado y más jornadas de variabilidad son necesarias para comprobar la fiabilidad del Gardon 1 y del nuevo factor de escala.

A.5 Diagrama de flujo del SERFluSol

En la [tabla A.8](#) se describe la notación utilizada en el diagrama de flujo del SERFluSol ([figura A.4](#) y [5.1](#)). La notación corresponde con la utilizada en el [capítulo 4](#) para el cálculo de obtención de mapas de flujo y potencia.

Tabla A.8: Notación utilizada en el diagrama del flujo del SERFluSol.

Notación	Descripción
$V_{n,G}$	n datos de voltaje entregados por el medidor Gardon
$I_{n,inst}$	n datos de irradiancia directa instantánea entregados por el pirheliómetro
$T_{n,pl}$	n datos de temperatura de los diferentes termopares fijados a la placa del receptor
F_G	Factor de escala del Gardon, proporcionado por el fabricante
F_{corr}	Factor de corrección para la medición de radiación solar [23]
$q_{G,prom}$	n mediciones de flujo, promediadas para el momento de la fotografía de Gardon
$I_{G,prom}$	n mediciones de irradiancia, promediadas para el momento de la fotografía de Gardon
$I_{pl,prom}$	n mediciones de irradiancia, promediadas para el momento de la fotografía de placa
$L_{pl,G}$	Luminosidades de los pixeles correspondientes a la medición del Gardon, en la fotografía de placa
L_{pl}	Fotografía de placa en valores de escala de gris
L_G	Valores en escala de gris de $L_{pl,G}$
$n_{px,G}$	Número de pixeles correspondientes al área receptora del Gardon
c_{mpx}	Relación entre longitud en metros y pixeles en las fotografías del receptor $\frac{m}{pix}$
K	Constante de transformación entre un mapa de valores en escala de gris y un mapa de flujo
Q y C	Mapas de flujo con unidades de $\frac{W}{m^2}$ y <i>soles</i>
P	Potencia concentrada por el HoSIER en unidades de W

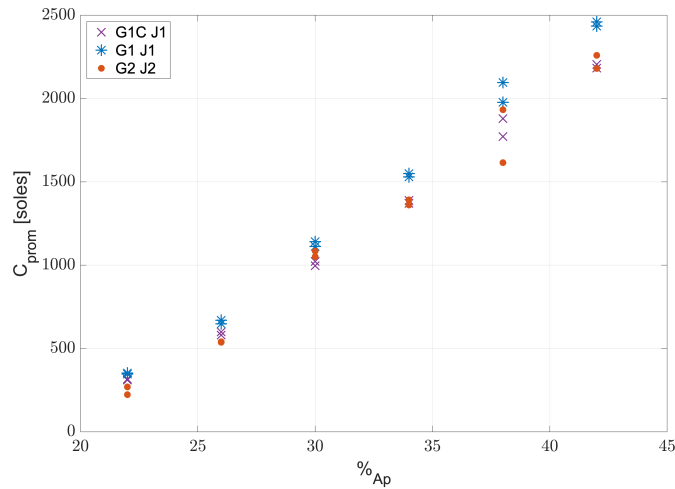


Figura A.3: Comparación entre las concentraciones obtenidas con el Gardon 1 después de la corrección del factor de escala (G1C J1) y las concentraciones de la jornada 1 (G1 J1) y 2 (G2 J2).

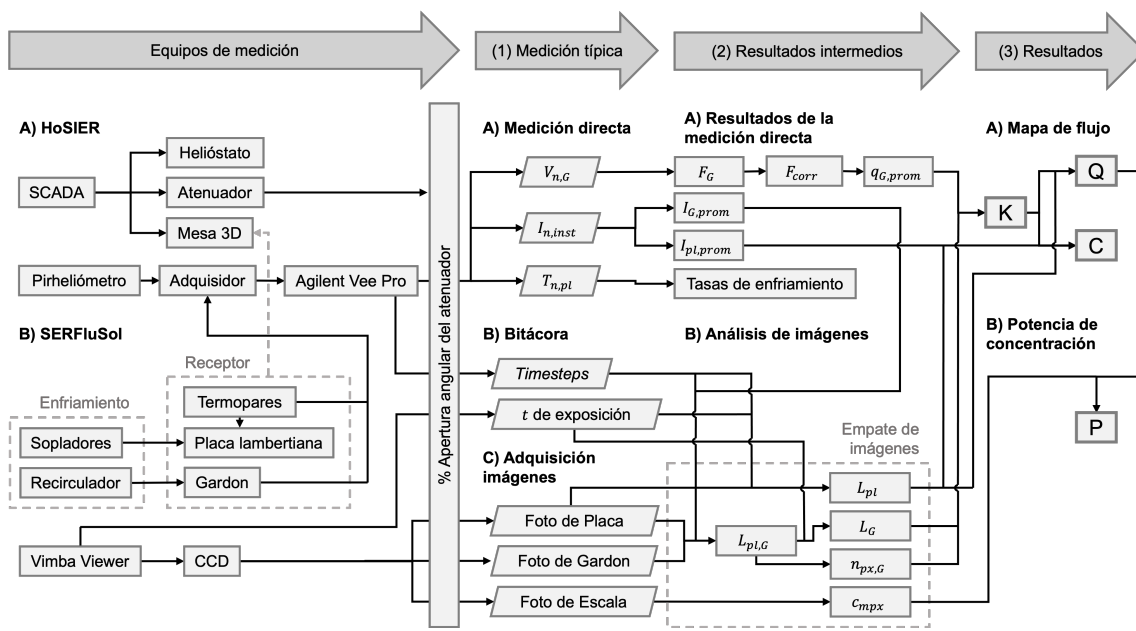


Figura A.4: Diagrama de flujo del SERFluSol integrado al HoSIER.

APÉNDICE B

NOMENCLATURA

La notación y nomenclatura fue definida tomando como referencia las recomendaciones y simbología de Siegel y Howell [4]. Se enlistan casi en su totalidad los símbolos, subíndices y superíndices utilizados en la tesis.

B.1 Símbolos

A	área superficial
c	constante
c	velocidad de la luz
C	mapa de flujo en unidades de soles concentrados
C	concentración
D	diámetro
e	potencia emisiva
F	fracción
h	altura
g	irradiancia
i	intensidad radiativa
j	radiosidad
L	mapa de luminosidades
m	masa de aire
n	índice de refracción
n	normal a una superficie
n	número de elementos

P	potencia
Pc	precisión
q	flujo de energía; energía por unidad de área por unidad de tiempo
Q	mapa de flujo en unidades de $\frac{W}{m^2}$
R ²	coeficiente de determinación
S	distancia entre un elemento emisor y uno receptor
t	tiempo
ts	<i>timestep</i>
T	temperatura
V	voltaje
α	absorbancia
α	error relativo
Δ	cambio
ε	emisividad
θ	ángulo polar medido desde el vector normal a una superficie
θ_z	ángulo cenital solar
κ	número de onda
λ	longitud de onda
ν	frecuencia
ρ	reflectancia
σ	desviación estándar
τ	transmitancia
φ	ángulo azimutal o circumferencial
ω	frecuencia angular
Ω	ángulo sólido

B.2 Subíndices

A	de la superficie A
Ap	apertura angular del atenuador
b	de un cuerpo negro
corr	corrección
d	difuso
e	emitido o emisor
enf	enfriamiento
exp	exposición
extr	extrapolación
E	energía
fracc	fracción
G	del radiómetro Gardon
GS	escala de gris
i	incidente
inst	medición instantánea
l	del láser

m	de la medición
max	máximo
min	mínimo
mpx	metros por pixel
o	en el vacío
p	proyectada
prom	promedio
px	pixeles
pl	de la placa del receptor lambertiano
r	reflejado
ruido	ruido de fondo de una medición
s	especular
λ	dependencia espectral

B.3 Superíndices

'	magnitud direccional
”	magnitud por unidad de área
^	vector direccional unitario

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. F. Modest, *Radiative heat transfer*, 2nd ed. Academic Press, 2003.
- [2] E. W. Weisstein. Radiation. [Online]. Available: <https://scienceworld.wolfram.com/physics/Radiation.html>
- [3] F. Incropera, D. DeWitt, T. Bergman, and A. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition, Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed. John Wiley & Sons, 2007.
- [4] R. Siegel and J. R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer*, 3rd ed. Hemisphere Publishing Corporation, 1992.
- [5] E. Hecht, *Óptica*, 3rd ed. Addison Wesley Iberoamericana, 2000.
- [6] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, 4th ed. John Wiley & Sons, 2013.
- [7] A. Rabl, *Active solar collectors and their applications*. Oxford University Press on Demand, 1985.
- [8] NREL. Reference air mass 1.5 spectra. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>
- [9] R. B. Pettit, “Characterization of the reflected beam profile of solar mirror materials,” *Solar Energy*, vol. 19, no. 6, pp. 733–741, 1977.
- [10] B. L. Butler and R. B. Pettit, “Optical evaluation techniques for reflecting solar concentrators,” in *Optics applied to solar energy conversion*, vol. 114. SPIE, 1977, pp. 43–51.
- [11] M. Röger, P. Herrmann, S. Ulmer, M. Ebert, C. Prah, and F. Göhring, “Techniques to measure solar flux density distribution on large-scale receivers,” *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 136, no. 3, p. 031013, 2014.
- [12] J. Ballestrín, J. Cumpston, and G. Burgess, “Heat flux and high temperature measurement technologies for concentrating solar power,” in *Concentrating Solar Power Technology*. Elsevier, 2021, pp. 633–657.
- [13] C. Pérez-Rábago, M. Marcos, M. Romero, and C. Estrada, “Heat transfer in a conical cavity calorimeter for measuring thermal power of a point focus concentrator,” *Solar Energy*, vol. 80, no. 11, pp. 1434–1442, 2006.

- [14] C. Estrada, C. Pérez-Rábago, J. Ballestrin, and M. Rodríguez, “Experiments with cavical in the solar furnace of the psa,” in *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I–Vol. V) Solar Energy and Human Settlement*. Springer, 2008, pp. 1838–1842.
- [15] C. Estrada, O. Jaramillo, R. Acosta, and C. Arancibia-Bulnes, “Heat transfer analysis in a calorimeter for concentrated solar radiation measurements,” *Solar energy*, vol. 81, no. 10, pp. 1306–1313, 2007.
- [16] O. Jaramillo, C. Pérez-Rábago, C. Arancibia-Bulnes, and C. Estrada, “A flat-plate calorimeter for concentrated solar flux evaluation,” *Renewable Energy*, vol. 33, no. 10, pp. 2322–2328, 2008.
- [17] U. Groer and A. Neumann, “Development and test of a high flux calorimeter at dlr cologne,” *Le Journal de Physique IV*, vol. 9, no. PR3, pp. Pr3–643, 1999.
- [18] J. Kaluza and A. Neumann, “Comparative measurements of different solar flux gauge types,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 123, no. 3, pp. 251–255, 2001.
- [19] J. Ballestrín and R. Monterreal, “Hybrid heat flux measurement system for solar central receiver evaluation,” *Energy*, vol. 29, no. 5-6, pp. 915–924, 2004.
- [20] R. Gardon, “An instrument for the direct measurement of intense thermal radiation,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 24, no. 5, pp. 366–370, 1953.
- [21] E. Guillot, I. Alxneit, J. Ballestrin, J. L. Sans, and C. Willsh, “Comparison of 3 heat flux gauges and a water calorimeter for concentrated solar irradiance measurement,” *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 2090–2099, 2014.
- [22] Siretta. Vatell TG1000 heat flux sensor. [Online]. Available: <https://sensors.siretta.com/heat-flux-sensors/vatell-tg1000-heat-flux-sensor/>
- [23] J. Ballestrín, S. Ulmer, A. Morales, A. Barnes, L. Langley, and M. Rodríguez, “Systematic error in the measurement of very high solar irradiance,” *Solar energy materials and solar cells*, vol. 80, no. 3, pp. 375–381, 2003.
- [24] S. Ulmer, E. Lüpfert, M. Pfänder, and R. Buck, “Calibration corrections of solar tower flux density measurements,” *Energy*, vol. 29, no. 5-6, pp. 925–933, 2004.
- [25] J. Ballestrín, C. Estrada, M. Rodríguez-Alonso, C. Pérez-Rábago, L. Langley, and A. Barnes, “Heat flux sensors: Calorimeters or radiometers?” *Solar energy*, vol. 80, no. 10, pp. 1314–1320, 2006.
- [26] J. Ballestrín, M. Rodríguez-Alonso, J. Rodríguez, I. Cañadas, F. Barbero, L. Langley, and A. Barnes, “Calibration of high-heat-flux sensors in a solar furnace,” *Metrologia*, vol. 43, no. 6, p. 495, 2006.
- [27] G. Levêque, R. Bader, W. Lipinski, and S. Haussener, “Experimental and numerical characterization of a new 45 kw el multisource high-flux solar simulator,” *Optics express*, vol. 24, no. 22, pp. A1360–A1373, 2016.
- [28] K. R. Krueger, W. Lipinski, and J. H. Davidson, “Operational performance of the university of minnesota 45 kwe high-flux solar simulator,” *Journal of solar energy engineering*, vol. 135, no. 4, p. 044501, 2013.
- [29] J. Sarwar, G. Georgakis, R. LaChance, and N. Ozalp, “Description and characterization of an adjustable flux solar simulator for solar thermal, thermochemical and photovoltaic applications,” *Solar Energy*, vol. 100, pp. 179–194, 2014.

- [30] M. Ebert, D. Benitez, M. Röger, R. Korzynietz, and J. A. Brioso, “Efficiency determination of tubular solar receivers in central receiver systems,” *Solar Energy*, vol. 139, pp. 179–189, 2016.
- [31] J. Ballestrín, M. Casanova, R. Monterreal, J. Fernández-Reche, E. Setien, J. Rodríguez, J. Galindo, F. Barbero, and F. Batlles, “Simplifying the measurement of high solar irradiance on receivers. application to solar tower plants,” *Renewable Energy*, vol. 138, pp. 551–561, 2019.
- [32] N. A. Cisneros-Cárdenas, R. Cabanillas-López, R. Pérez-Enciso, G. Martínez-Rodríguez, R. García-Gutiérrez, C. Pérez-Rábago, R. Calleja-Valdez, and D. Riveros-Rosas, “Study of the radiation flux distribution in a parabolic dish concentrator,” *Energies*, vol. 14, no. 21, p. 7053, 2021.
- [33] A. Neumann and U. Groer, “Experimenting with concentrated sunlight using the dlr solar furnace,” *Solar Energy*, vol. 58, no. 4-6, pp. 181–190, 1996.
- [34] J. Ballestrín, “A non-water-cooled heat flux measurement system under concentrated solar radiation conditions,” *Solar energy*, vol. 73, no. 3, pp. 159–168, 2002.
- [35] F. Dähler, M. Wild, R. Schäppi, P. Haueter, T. Cooper, P. Good, C. Larrea, M. Schmitz, P. Furler, and A. Steinfeld, “Optical design and experimental characterization of a solar concentrating dish system for fuel production via thermochemical redox cycles,” *Solar Energy*, vol. 170, pp. 568–575, 2018.
- [36] A. Neumann and A. Schmitz, “The scatmes device for measurement of concentrated solar radiation,” *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 121, no. 2, pp. 116–120, 1999. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.2888148>
- [37] E. Lüpfert, P. Heller, S. Ulmer, R. Monterreal, and J. Fernández, “Concentrated solar radiation measurement with video image processing and online fluxgauge calibration,” in *Solar Thermal 2000 International Conference*, 2000, pp. 241–246.
- [38] K.-J. Riffelmann, A. Neumann, and S. Ulmer, “Performance enhancement of parabolic trough collectors by solar flux measurement in the focal region,” *Solar energy*, vol. 80, no. 10, pp. 1303–1313, 2006.
- [39] S. Ulmer, W. Reinalter, P. Heller, E. Lüpfert, and D. Martínez, “Beam characterization and improvement with a flux mapping system for dish concentrators,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 124, no. 2, pp. 182–188, 2002.
- [40] C. K. Ho and S. S. Khalsa, “A photographic flux mapping method for concentrating solar collectors and receivers,” *Journal of solar energy engineering*, vol. 134, no. 4, p. 041004, 2012.
- [41] Y.-L. He, K. Wang, Y. Qiu, B.-C. Du, Q. Liang, and S. Du, “Review of the solar flux distribution in concentrated solar power: non-uniform features, challenges, and solutions,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 149, pp. 448–474, 2019.
- [42] C. A. Pérez Enciso, Ricardo Arturo y Estrada Gasca, *Caracterización óptica y térmica del horno solar del IER*. Universidad Nacional Autónoma de México, 2015. [Online]. Available: <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02029a&AN=tes.TES01000724555&lang=es&site=eds-live>
- [43] R. W. Bliss, “Notes on performance design of parabolic solar furnaces,” *Solar Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 22–29, 1957.
- [44] C. A. Riveros Rosas, David y Estrada Gasca, *Diseño óptico del horno solar de alto flujo del CIE-UNAM*. Universidad Nacional Autónoma de México, 2008. [Online]. Available: <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02029a&AN=tes.TES01000635634&lang=es&site=eds-live>

- [45] D. Riveros-Rosas, J. Herrera-Vázquez, C. Pérez-Rábago, C. Arancibia-Bulnes, S. Vázquez-Montiel, M. Sánchez-González, F. Granados-Agustín, O. Jaramillo, and C. Estrada, “Optical design of a high radiative flux solar furnace for Mexico,” *Solar energy*, vol. 84, no. 5, pp. 792–800, 2010.
- [46] S. G. Mexicano. Precio internacional de los metales. [Online]. Available: https://www.sgm.gob.mx/SINEMGobMx/precio_metales.jsp
- [47] MARKAL. Pyromark high temperature paint. [Online]. Available: <https://markal.com/products/pyromark-high-temperature-paint?variant=9204789084207>
- [48] W. M. Organization. Radiation centres. [Online]. Available: <https://community.wmo.int/en/activity-areas/imop/radiation-centres>
- [49] T. FLIR. Utilice materiales de bajo coste para aumentar la emisividad del objetivo. [Online]. Available: <https://www.flir.com.mx/discover/rd-science/use-low-cost-materials-to-increase-target-emissivity/>
- [50] I. Hughes and T. Hase, *Measurements and their uncertainties: a practical guide to modern error analysis*. OUP Oxford, 2010.