

Tesis Doctoral

MEDIDA DE ALTA IRRADIANCIA EN CENTRALES SOLARES TERMOELÉCTRICAS DE RECEPTOR CENTRAL



Universidad de Almería

Autora: Marina Casanova Molina
Directores: Jesús María Ballestrín Bolea
Francisco Javier Batlles Garrido

Almería, Septiembre 2021

Tesis Doctoral

MEDIDA DE ALTA IRRADIANCIA EN CENTRALES SOLARES TERMOELÉCTRICAS DE RECEPTOR CENTRAL

HIGH IRRADIANCE MEASUREMENT IN
CENTRAL RECEIVER THERMOELECTRIC
SOLAR POWER PLANTS



Universidad de Almería

Doctorado en Ciencias Aplicadas al Medio Ambiente

Autora: Marina Casanova Molina
Directores: Jesús María Ballestrín Bolea
Francisco Javier Batlles Garrido

Almería, Septiembre 2021

*A mis padres
y a mi hermano*

*“No existe placer más intenso que el que proviene
de saber que un hecho no puede ser comprendido
según las ideas aceptadas actualmente”*

Cecilia Payne Gaposchkin (1900-1979)

*(Demostró que el Sol estaba formado por
Hidrógeno y Helio)*

AGRADECIMIENTOS

Creo firmemente que uno de los propósitos que todas las personas debemos tener es el de encontrar un trabajo que nos guste. Tengo la suerte de ser una de ellas, y de haber disfrutado durante 4 años de un trabajo que me apasiona. Esto ha podido ser gracias a muchas personas que han confiado en mí, a las que estaré siempre agradecida.

A veces el reconocimiento que uno merece queda escondido, pero me gustaría, en este trocito en el que puedo expresarme libremente, darle el reconocimiento que merece en esta tesis a Rafael Monterreal. Esta tesis es igual de tuya que mía. Me has ayudado a arrojar luz en los momentos oscuros, y siempre me has mostrado el camino a seguir, a tu lado. Cuando estábamos perdidos en el bosque sin un camino que seguir, gracias al duro trabajo, entre mi director, tú y yo, hemos construido nuestro propio camino para resolver los problemas de la ciencia. Trabajar a tu lado es uno de los mayores regalos que he podido tener en toda mi vida. Me has enseñado cómo ser mejor profesional, mejor científica y además, mejor persona. Tus sabios consejos los he escuchado con la mayor de las atenciones, además de tus historias. Eres el profesional en el que creo que todos deberíamos fijarnos, eres mi ejemplo a seguir. Has sido mi apoyo y mi familia en Almería. Gracias, Rafa.

Quiero agradecer su esfuerzo y dedicación a mi director, Jesús Ballestrín. Siempre te has preocupado de que tuviera una buena tesis, me has incluido en todo, y sobre todo, la puerta de tu despacho siempre estaba abierta para mí, que es lo que más valoro de ti. Me has enseñado a priorizar, a parar cuando hacía falta y no correr, y a aprovechar el tiempo del que disponemos. Estas enseñanzas me han servido para la tesis y para la vida. Gracias por la oportunidad y por haber confiado en mí. También quería agradecer su tiempo a mi co-director, Francisco Javier Batlles.

A mis padres y a mi hermano, sin su apoyo no estaría donde estoy. Ellos lo son todo para mí. Gracias por escucharme, en la distancia a veces, cuando lo necesitaba, y darme el amor, el cariño y el apoyo que he necesitado toda mi vida. Sois mis referentes. Alex, lucha por lo que quieres, nadie más lo hará por ti, yo estaré para apoyarte y empujarte siempre que lo necesites.

Gracias a mis amigos de Alicante, los de toda la vida. A mis chicas, Araceli, Andrea, Olga y Sandra, porque estar con vosotras es como estar en familia. Gracias a Angels, porque su apoyo ha sido fundamental durante estos años.

Durante el máster tuve la suerte de conocer a personas increíbles, como Vanessa y Bea. Vanessa, me has enseñado lo importante que puede llegar a ser una amistad, aunque sea de poco tiempo, gracias por el apoyo que me has dado siempre. Bea, gracias por acogerme así de bien en Almería, sin ti estos 4 años no habrían sido ni la mitad de divertidos. Sigue con tu sonrisa y tu alegría siempre.

Esta plaza de doctorado no la habría podido tener sin la confianza que depositó en mí Antonio Ávila. Trabajar contigo durante el TFM fue una suerte, eras mi tutor

multitarea, admiro mucho esa parte de ti. Lo mejor que me llevé de ti fue tu buen humor, era contagioso. Gracias por confiar en mí, por apoyarme en momentos de bajón con esta tesis y por haber podido contar contigo siempre que lo necesitaba. Gracias a Gema y a Ángel, mis profesores del máster, que me pusisteis en contacto con Antonio, y por haberme seguido apoyando mucho tiempo después. Sois geniales.

En esta tesis he tenido un apoyo muy valioso, el apoyo de Jesús Fernández. Gracias por apoyarme en mis momentos de estrés y de cabreos, siempre encontraba refugio entre tus palabras, o entre tus chistes malos. Han significado mucho tus consejos, porque pensabas en lo mejor para mí. Piensas en lo mejor para los tuyos, y eso se nota. Eres un espejo en el que mirarme.

La verdad es que he tenido mucha suerte con mi grupo, a los que estaré agradecida. Gracias a Raúl, por esas conversaciones entre despachos y por tu sonrisa durante todo el día. Gracias a Blas y a Jero, porque con ellos siento que realmente perteneces a un gran equipo, sois personas increíbles. Y gracias a mi compi, María Elena. Hemos compartido muchas horas de despacho juntas, y fuera de él. Estabas ahí para escuchar mis enfados o mis alegrías, compartirlo contigo lo hacía todo mejor. He aprendido mucho de ti. Gracias.

He conocido a personas geniales en la PSA. Gracias a Irene, aunque ahora estés un poco lejos, porque eres una gran persona y amiga. Tener compañeros como Thorsten y Aurelio ha sido realmente motivador. Thorsten, te encanta tu trabajo y es realmente inspirador. Aurelio, gracias por tu alegría, por tu apoyo y por escucharme tantas veces. Gracias por haberme enseñado tanto. A Pepe y a Galindo, por estar ahí con los ensayos en el horno, con ese buen humor.

En esta tesis estaba planificada una estancia en el CSIRO en Australia, pero por la pandemia del Covid no pude realizarla. Gracias Mike, por haber estado ahí durante tantas videollamadas planificando la estancia. Verte trabajar mientras estabas en la PSA me motivó muchísimo. We will meet in Australia one day for sure. Thank you.

No puedo terminar sin darle las gracias a mi familia. Gracias a mis tías, a mis tíos, y a mis primos. A mi tía Reyes, por haberme dejado vivir contigo 1 año en Madrid para poder hacer el máster. A mi tía Paqui por esos achuchones. A mi tío Pepe por enseñarme lo que es el buen humor de verdad. Y a mi tía Balbi, porque siempre me has apoyado y empujado, has confiado en lo que soy capaz de hacer y estás ahí para animarme siempre. Gracias por todo. Os quiero.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	ix
RESUMEN	xxv
INTRODUCCIÓN	xxix
CAPÍTULO 1.	1
TECNOLOGÍAS SOLARES DE CONCENTRACIÓN	1
1.1. CONTEXTO ENERGÉTICO ACTUAL	2
1.2. ENERGÍA SOLAR DE CONCENTRACIÓN.....	7
1.2.1. COLECTORES CILINDROPARABÓLICOS (CCP)	12
1.2.2. COLECTORES LINEALES FRESNEL	13
1.2.3. DISCOS PARABÓLICOS.....	14
1.2.4. SISTEMAS DE RECEPTOR CENTRAL	15
1.3. PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA.....	17
CAPÍTULO 2.	20
FUNDAMENTOS DE RADIACIÓN SOLAR	20
2.1. RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	21
2.2. FUNDAMENTOS DE RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA.....	26
2.3. RADIACIÓN TÉRMICA Y CUERPO NEGRO.....	28
2.3.1. PROPIEDADES RADIATIVAS DE LOS MATERIALES	28
2.3.2. CUERPO NEGRO	30
2.4. RADIACIÓN SOLAR.....	32
2.5. CÓDIGO SMARTS.....	34
2.6. INSTRUMENTOS DE MEDIDA DE MAGNITUDES ASOCIADAS A LA RADIACIÓN SOLAR	35
CAPÍTULO 3.	38
SENSORES DE MEDIDA DE ALTA IRRADIANCIA	38
3.1. MEDIDA DE IRRADIANCIA	39
3.2. RADIÓMETROS Y CALORÍMETROS	39
3.3. RADIÓMETRO GARDON.....	41
3.3.1. CALIBRACIÓN DE RADIÓMETROS.....	44
3.3.2. ERROR SISTEMÁTICO Y CORRECCIÓN EN LA CALIBRACIÓN DE RADIÓMETROS.....	45

3.3.3. CALIBRACIÓN DE RADIÓMETROS EN EL HORNO SOLAR DE LA PSA	49
3.4. RADIÓMETRO SCHMIDT-BOELTER.....	52
3.5. RADIÓMETRO KENDALL.....	54
3.6. RADIÓMETRO HFM	56
3.7. CALORÍMETRO SUNCATCH	58
3.8. INTERCOMPARACIONES DE RADIÓMETROS.....	59
CAPÍTULO 4.	65
SISTEMAS DE MEDIDA DE ALTA IRRADIANCIA.....	65
4.1. SISTEMAS DE MEDIDA DE IRRADIANCIA DIRECTOS	66
4.1.1. MDF (MEDIDA DIRECTA DE FLUJO)	68
4.1.2. SISTEMA ESTACIONARIO EN PS10	70
4.2. SISTEMAS DE MEDIDA DE IRRADIANCIA INDIRECTOS.....	70
4.2.1. MÉTODO PROHERMES	74
4.3. MODELOS Y CÓDIGOS DE SIMULACIÓN.....	77
4.3.1. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ÓPTICA DE CAMPOS DE HELIOSTATOS.....	78
4.3.2. OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS	79
CAPÍTULO 5.	81
MEDIDA DE IRRADIANCIA EN UN RECEPTOR DE REDUCIDA SUPERFICIE ($< 1 \text{ m}^2$).....	81
5.1. INTRODUCCIÓN.....	82
5.2. HIPÓTESIS PARA LA MEDIDA DE ALTA IRRADIANCIA EN LA SUPERFICIE DE RECEPTORES.....	83
5.3. DESCRIPCIÓN DEL RECEPTOR	87
5.3.1. PYROMARK ® 2500.....	89
5.4. CARACTERIZACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL RECEPTOR.....	91
5.5. ENSAYO EN EL HORNO SOLAR	96
5.5.1. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN. HORNO SOLAR SF60	96
5.5.1.1. CÁMARA DIGITAL.....	99
5.5.1.1.1. RESPUESTA ESPECTRAL DE LA CÁMARA	100
5.5.1.1.2. RUIDO DE FONDO	101
5.5.1.1.3. SOMBREADO	102
5.5.1.1.4. IMPERFECCIÓN EN LOS SENSORES	102

5.6. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA DE IRRADIANCIA	103
5.6.1. NIVEL DE IRRADIANCIA ALTO (900 kW m⁻²)	114
5.6.2. NIVEL DE IRRADIANCIA BAJO (500 kW m⁻²)	117
5.7. MEDIDA DE LA POTENCIA	120
CAPÍTULO 6.	123
MEDIDA DE IRRADIANCIA EN UN RECEPTOR DE REDUCIDA SUPERFICIE (1 m²)	123
6.1. INTRODUCCIÓN.....	124
6.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO CAPTURE Y RECEPTOR.....	125
6.3. CARACTERIZACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL RECEPTOR.....	127
6.4. ENSAYO EN LA INSTALACION DE TORRE CRS	131
6.4.1. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DE TORRE SSPS-CRS	131
6.5. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA DE IRRADIANCIA	134
6.5.1. MEDIDAS EN EL LABORATORIO: CARACTERIZACIÓN DE LA SUPERFICIE DE LAS COPAS DEL RECEPTOR CAPTURE.....	137
6.5.2. MEDIDA DE IRRADIANCIA SOBRE RECEPTOR VOLUMÉTRICO	141
6.5.2.1. NIVEL DE IRRADIANCIA 450 kW m⁻²	153
6.5.2.2. NIVEL DE IRRADIANCIA 500 kW m⁻²	156
6.6. MEDIDA DE LA POTENCIA	159
CONCLUSIONES	161
FUTUROS TRABAJOS.....	165
ANEXOS	176
ANEXO A	177

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.1. Mix de generación eléctrico global, 2010-2020 [5]	3
Figura 1.1.2. Mix de generación eléctrico en la Unión Europea. Enero 2020-Septiembre 2020 [6]	4
Figura 1.1.3. Emisiones globales de CO ₂ , 1990-2020 [7]	4
Figura 1.1.4. Balance eléctrico nacional (GWh) 2019 [8]	5
Figura 1.1.5. Balance eléctrico nacional (GWh). 01/2020 – 05/2020 [9]	6
Figura 1.2.1. Eficiencia total de solar a trabajo según la concentración [13].....	8
Figura 1.2.2. Mapa de la radiación solar directa en el planeta [15].....	9
Figura 1.2.3. Niveles de radiación solar directa en España [15]	10
Figura 1.2.4. Tecnologías termosolares de concentración [17].....	11
Figura 1.2.1.1. Colector Cilindroparabólico [21]	13
Figura 1.2.2.1. Lazo Fresnel [21]	14
Figura 1.2.3.1. Discos parabólicos: a) en serie, b) autónomo [21].....	15
Figura 1.2.4.1. Vista de centrales de torre: a) PS10 y PS20, con campo norte. b) Gemasolar, con campo circular [22], [23].....	16
Figura 1.3.1. Vista aérea de la Plataforma Solar de Almería [21].....	18
Figura 1.3.2. Instalaciones de receptor central Cesa-1 (izquierda) y SSPS-CRS (derecha) [21]	19
Figura 1.3.3. Hornos solares SF40 (izquierda) y SF60 (derecha) en la PSA	19
Figura 2.1.1. Espectro electromagnético y sus rangos	21
Figura 2.1.2. Regiones del Sol [34]	23
Figura 2.1.3. Espectro de la radiación solar	24
Figura 2.1.4. Definición del ángulo de elevación α	25
Figura 2.2.1. Sensibilidad del ojo humano a la luz visible.....	27
Figura 2.3.1.1. Comportamiento de la radiación incidente sobre un cuerpo real	29
Figura 2.3.2.1. Radiación emitida por un cuerpo negro a distintas temperaturas	31
Figura 2.4.1. Procesos que sufre la radiación solar al atravesar la atmósfera [33].....	33
Figura 2.6.1. a) Piranómetro con disco para medir radiación difusa. b) Piranómetro sin disco para medir radiación global.....	36
Figura 2.6.2. Pirheliómetro.....	36
Figura 3.2.1. Esquema termopila.....	40
Figura 3.3.1. Radiómetro Gardon.....	42
Figura 3.3.2. Esquema del radiómetro Gardon.....	43
Figura 3.3.1.1. Banco Thermogage con radiómetro primario y secundario durante la calibración. Laboratorio de Radiometría de la PSA	45
Figura 3.3.2.1. Absortancias del Zynolyte® y del grafito coloidal, irradiancia de cuerpo negro a 850 °C e irradiancia solar AM 1.5 en función de la longitud de onda.....	46
Figura 3.4.1. Vista interna del radiómetro Schmidt-Boelter	53
Figura 3.4.2. Radiómetro Schmidt-Boelter	53
Figura 3.5.1. Esquema del radiómetro Kendall	55
Figura 3.6.1. Esquema del sensor HFM	56
Figura 3.6.2. Sensor HFM	57

Figura 3.7.1. Esquema calorímetro SunCatch	59
Figura 3.8.1. Esquema del método simultáneo.....	64
Figura 4.1.1.1. Esquema MDF [76].....	69
Figura 4.1.1.2. Barra móvil con 8 HFM y su posición [76]	69
Figura 4.2.1. Esquema del sistema BDSTC junto con la cámara digital (CCD) y los radiómetros	71
Figura 4.2.1.1. Esquema de los sistemas MDF y ProHERMES [18].....	75
Figura 5.3.1. Imágenes del receptor y sus dimensiones	88
Figura 5.3.2. a) Horno mufla. b) Horno mufla abierto con el receptor dentro	88
Figura 5.3.1.1. Reflectancia espectral del Pyromark® 2500, Zynolyte®, y heliostato frente a la longitud de onda	89
Figura 5.4.1. Reflexión difusa vs reflexión especular	91
Figura 5.4.2. Área de 4x 4 cm del receptor pintado con Pyromark 2500.....	92
Figura 5.4.3. Dispersión en la pintura del receptor	92
Figura 5.4.4. Luminancímetro MAVO-SPOT 2.....	93
Figura 5.4.5. Test para estudio de comportamiento lambertiano en función del ángulo de medida	94
Figura 5.4.6. Variación angular de la luminancia en la superficie del receptor	95
Figura 5.5.1.1. Esquema del horno solar	97
Figura 5.5.1.2. Imágenes del horno solar. a) Concentrador y banco de ensayos. b) Perspectiva desde el exterior: heliostato, atenuador y concentrador	98
Figura 5.5.1.3. Blanco lambertiano con radiómetro.....	99
Figura 5.5.1.1.1. Eficiencia del sensor CMOS frente a la radiación directa (DNI) con Masa de Aire (AM) 1.5 y AM 5	101
Figura 5.6.1. Montaje dispositivo experimental con el receptor, blanco lambertiano y radiómetro.....	103
Figura 5.6.2. Radiación de cuerpo negro de Planck a la temperatura del Sol (5527 °C), temperatura máxima que alcanza el blanco lambertiano (814 °C) y temperatura máxima del receptor (572 °C).....	105
Figura 5.6.3. Nivel de irradiancia 690 kWm ⁻² . a) Receptor, 20 junio, 2018, Hora 11:46:12. b) Blanco lambertiano, 20 junio, 2018, Hora 11:46:31. c) Radiómetro 20 junio, 2018, Hora 11:45:37.....	106
Figura 5.6.4. Imagen del radiómetro con el AOI circular seleccionado en su interior. 107	
Figura 5.6.5. Funciones de calibración de: a) Blanco lambertiano, b) Receptor.....	108
Figura 5.6.6. Distribución de irradiancia para el nivel de 690 kWm ⁻² . a) Blanco lambertiano. b) Receptor	110
Figura 5.6.7. Perfil horizontal de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 690 kW m ⁻²	111
Figura 5.6.8. Perfil vertical de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 690 kW m ⁻²	112
Figura 5.6.9. Perfil horizontal. Nivel 690 kW m ⁻²	113
Figura 5.6.10. Perfil vertical. Nivel 690 kW m ⁻²	113
Figura 5.6.1.1. Distribución de irradiancia para el nivel de 900 kWm ⁻² . a) Blanco lambertiano, b) Receptor	114

Figura 5.6.1.2. Perfil horizontal de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 900 kW m ⁻²	115
Figura 5.6.1.3. Perfil vertical de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 900 kW m ⁻²	115
Figura 5.6.1.4. Perfil horizontal. Nivel 900 kW m ⁻²	116
Figura 5.6.1.5. Perfil vertical. Nivel 900 kW m ⁻²	117
Figura 5.6.2.1. Distribución de irradiancia para el nivel de 500 kW m ⁻² . a) Blanco lambertiano. b) Receptor	118
Figura 5.6.2.2. Perfil horizontal de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 500 kW m ⁻²	118
Figura 5.6.2.3. Perfil vertical de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 500 kW m ⁻²	119
Figura 5.6.2.4. Perfil horizontal. Nivel 500 kW m ⁻²	119
Figura 5.6.2.5. Perfil vertical. Nivel 500 kW m ⁻²	120
Figura 5.7.1. AOI del receptor.....	121
Figura 6.2.1. a) Módulo 140 x 140 mm de carburo de silicio. b) Zoom en el módulo poroso del receptor	126
Figura 6.2.2. Receptor Capture formado por 35 módulos	126
Figura 6.2.3. Reflectancia hemisférica (%) del SiC	127
Figura 6.3.1. Dispersión en la superficie del receptor del proyecto Capture	128
Figura 6.3.2. Test para estudio de la luminancia de la superficie del receptor en función del ángulo de medida.....	129
Figura 6.3.3. Variación angular de la luminancia en la superficie del receptor del Capture	130
Figura 6.4.1.1. Instalación SSPS-CRS	132
Figura 6.4.1.2. a) Heliostatos autónomos campo CRS. b) Parte del campo de heliostatos y torre.....	132
Figura 6.4.1.3. a) Receptor Capture y radiómetro. b) Barra móvil pasando por delante del receptor	133
Figura 6.5.1. Vista del receptor y el contenedor de la barra móvil	135
Figura 6.5.2. Función de calibración del sistema cámara-blanco.....	136
Figura 6.5.1.1. Copas centrales seleccionadas del receptor	138
Figura 6.5.1.2. Estudio de laboratorio del comportamiento de las copas del receptor Capture	139
Figura 6.5.2.1. Campo de heliostatos Martin-Marietta.....	142
Figura 6.5.2.2. Lugares de apunte sobre el receptor Capture	143
Figura 6.5.2.3. Nivel de irradiancia 600 kW m ⁻² . a) Blanco lambertiano, 03 junio, 2020, Hora 15:18:02. b) Receptor Capture 03 junio, 2020, Hora 15:17:33	143
Figura 6.5.2.4. AOI de las 15 copas centrales del receptor Capture y AOI del radiómetro	145
Figura 6.5.2.5. Isolínea que pasa por el radiómetro. 03 junio, 2020, Nivel 600 kW m ⁻²	146
Figura 6.5.2.6. Función de calibración para la Copa 34 del receptor	147

Figura 6.5.2.7. Distribución de irradiancia para el nivel 600 kW m^{-2} . a) Blanco Lambertiano. b) Receptor	149
Figura 6.5.2.8. Vista de perfil de una copa del receptor Capture	150
Figura 6.5.2.9. Incertidumbre en la irradiancia al medir sobre cada copa. Nivel 600 kW m^{-2}	150
Figura 6.5.2.10. Perfil horizontal de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 600 kW m^{-2}	152
Figura 6.5.2.11. Perfil horizontal. Nivel 600 kW m^{-2}	153
Figura 6.5.2.1.1. Distribución de irradiancia para el nivel 450 kW m^{-2} . a) Blanco Lambertiano. b) Receptor	154
Figura 6.5.2.1.2. Incertidumbre en la irradiancia al medir sobre cada copa. Nivel 450 kW m^{-2}	154
Figura 6.5.2.1.3. Perfil horizontal de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 450 kW m^{-2}	155
Figura 6.5.2.1.4. Perfil horizontal. Nivel 450 kW m^{-2}	156
Figura 6.5.2.2.1. Distribución de irradiancia para el nivel 500 kW m^{-2} . a) Blanco Lambertiano. b) Receptor	157
Figura 6.5.2.2.2. Incertidumbre en la irradiancia al medir sobre cada copa. Nivel 500 kW m^{-2}	157
Figura 6.5.2.2.3. Perfil horizontal de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 500 kW m^{-2}	158
Figura 6.5.2.2.4. Perfil horizontal. Nivel 500 kW m^{-2}	159

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.3.2.1. Error relativo y desviación estándar obtenido para distintos recubrimientos al medir radiación solar	47
Tabla 3.3.2.2. Coeficientes de corrección para las constantes de calibración según el tipo de recubrimiento	48
Tabla 3.3.3.1. Desviación obtenida en la constante de calibración entre el método calorimétrico y el suministrado por el fabricante.	51
Tabla 3.8.1. Sensores con los que se realizó la intercomparación de 1998.....	60
Tabla 3.8.2. Sensores comparados en Colonia	61
Tabla 3.8.3. Valores medios entre la desviación de los sensores con respecto al radiómetro Kendall	61
Tabla 3.8.4. Radiómetros del grupo de baja irradiancia Intercom 2006	62
Tabla 3.8.5. Radiómetros del grupo de alta irradiancia Intercom 2006	62
Tabla 3.8.6. Sensores comparados y sus calibraciones en Odeillo	63
Tabla 5.4.1. Medidas tomadas de la luminancia en función de la variación angular	95
Tabla 5.7.1. Potencia en el receptor y en el blanco lambertiano para los niveles de 900, 690 y 500 kW m ⁻² . DNI y porcentaje del atenuador en el momento de la toma de cada imagen	122
Tabla 6.3.1. Medidas de luminancia en función de la variación angular en copas volumétricas de SiC.....	130
Tabla 6.5.1.1. Pendiente ξ_i de la respuesta de cada copa y su error asociado	140
Tabla 6.5.2.1. Grupos de heliostatos con sus apuntes respectivos	142
Tabla 6.5.2.2. Niveles de irradiancia medidos en el ensayo del día 03 junio 2020.....	144
Tabla 6.5.2.3. Copas cuyo nivel medio de irradiancia pertenece a la isolínea de calibración	146
Tabla 6.5.2.4. Valores del Factor de Corrección (FC) y su error asociado	148
Tabla 6.6.1. Potencia en el receptor y en el blanco lambertiano para los niveles de 600, 450 y 500 kW m ⁻² . DNI en el momento de la toma de la imagen	160

ACRÓNIMOS

AICIA: Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía

ANU: Australian National University

AOI: Area de interés, area of interest

BDSTC: Beam Down Solar Thermal Concentrator

CCD: Charged couple device

CCP: Colector Cilindroparabólico

CD: Cámara Digital

CETHIL: Centre for Energy and Thermal Sciences of Lyon (France)

CFD: Computational Fluid Dynamics (Dinámica de fluidos computacional)

CIEMAT: Centro de Investigaciones Energéticas, MedioAmbientales y Tecnológicas

CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor

CNRS: Centre National de la Recherche Scientifique (France)

CSP: Concentrated Solar Power, energía solar por concentración

DLR: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (German Aerospace Center)

ETHZ: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (Escuela Politécnica Federal de Zúrich)

GEI: Gases Efecto Invernadero

GL: Niveles de gris, Grey Level

HFLCAL: Heliostat Field Layout Calculations

HFM: Heat Flux Microsensor

HFS: Heat Flux Sensor

HTF: Heat Transfer Fluid

ICTS: Instalación Científica y Tecnológica Singular

IEA: International Energy Agency

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

IPP: Software ImagePro Plus

ISO: International Organization for Standardization

LCOE: Levelized Cost Of Electricity

MDF: Medida Directa de Flujo

MFV: Medida de Flujo receptors Volumétricos

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NREL: National Renewable Energy Laboratory (EEUU)

PHLUX: Photographic Flux

ProHERMES: Programmable Heliostat and Receiver Measuring System

PSA: Plataforma Solar de Almería

PSI: Paul Scherrer Institute (Switzerland)

REE: Red Eléctrica de España

RTS: Sensor de temperatura de Resistencia (Resistance temperature sensor)

SAM: System Advisor Model

SMARTS: Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine

SSPS-CRS: Small Solar Power Systems - Central Receiver System

STRAL: Solar Tower Ray-tracing Laboratory

TSI: Total Solar Irradiance

UE: Unión Europea

UV: Ultravioleta

WRC: World Radiation Center (Davos, Suiza)

NOMENCLATURA

A	Área
a	Pendiente de una recta
AM	Air Mass o Espesor óptico
atm	Atmósfera, unidad de presión
b	Ordenada en el origen
c	Velocidad de la luz
c_0	Velocidad de la luz en el vacío
C_1	Constante de la ecuación de Planck, $C_1 = 3.74 \cdot 10^8 \text{ W } \mu\text{m}^4 \text{ m}^{-2}$
C_2	Constante de la ecuación de Planck, $C_2 = 1.44 \cdot 10^4 \mu\text{m K}$
C_b	Constante de calibración radiómetros (con el cuerpo negro)

cd	Candela, unidad SI para medir intensidad luminosa
c_p	Calor específico de un fluido ($J K^{-1}$)
C_s	Constante de calibración solar en radiómetros
C_{ref}	Constante de calibración de la copa de referencia
cte_{CD}	Constante de la cámara digital
D	Desviación (%)
E	Radiancia ($W m^{-2}$)
e^+	Positrón
E_b	Radiancia emitida por un cuerpo negro ($W m^{-2}$)
E_{FS}	Irradiancia a fondo de escala
E_λ	Radiancia espectral ($W m^{-2} nm^{-1}$)
FC	Factor de corrección
FG	Factor geométrico ($m^{-2} pixel^{-1}$)
g, h	Coefficientes que relacionan la sensibilidad y la temperatura dados en la hoja de calibración del sensor HFS ($\mu V W^{-1} cm^{-2}$)
G_b , DNI	Irradiancia solar directa
$G_{b\lambda}$	Irradiancia solar espectral directa
G_d	Radiación solar difusa
G_{HFS}	Ganancia del amplificador del HFS
GL_T	Grey Level del radiómetro
GL_B	Grey Level del blanco lambertiano
GL_R	Grey Level del receptor
H	Longitud horizontal
H	Radiación solar global (total: directa + difusa)
I	Irradiancia solar ($W m^{-2}$)
I_{SC}	Constante solar ($W m^{-2}$), $1353 W m^{-2} (\pm 1.6 \%)$
I_λ	Irradiancia solar espectral ($W m^{-2} nm^{-1}$)
J	Radiosidad ($W m^{-2}$)
K	Constante de proporcionalidad entre el voltaje y la densidad de potencia absorbida
K_B	Constante de calibración para el blanco lambertiano
K_R	Constante de calibración para el receptor
lm	Lumen, unidad del SI para medir flujo luminoso (cd sr)
lux	$1 lux = 1 lm m^{-2}$. Unidad del SI para medir iluminancia
L_v	Luminancia ($cd m^{-2}$)
m	Masa
n	Número de píxeles
n	Índice de refracción del medio
N	Número de uniones de una termopila
P	Potencia (W)
P_{ais}	Potencia del aislamiento del calorímetro (W)

P_{frontal}	Potencia que incide sobre la cara delantera del radiómetro (W)
P_r	Potencia radiante (W)
Q	Energía o Calor (J)
Q_r	Energía radiante (J)
R	Radio (m)
R	Coefficiente de determinación de una regresión lineal
S	Sección (de una lámina) (m)
SiC	Carburo de Silicio
sr	estereorradián, unidad para medir ángulo sólido
S_T	Coefficiente Seebeck ($V K^{-1}$)
T	Temperatura (K)
\dot{V}	Flujo de volumen del fluido
V	Longitud vertical
V_{HFS}	Voltaje del Heat Flux sensor
V_{out}	Voltaje salida (V)

ALFABETO GRIEGO

α	Absortancia
ξ_i	Respuesta ante un estímulo de la copa i del receptor Capture
ε	Emitancia
ϕ_v	Flujo luminoso
γ	Fotón
λ	Longitud de onda
ν	Neutrino
ρ	Reflectancia
ρ	Densidad
ρ_h	Reflectancia del heliostato
σ	Incertidumbre de una medida
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($W m^{-2} K^{-4}$)
τ	Tiempo de exposición de la cámara digital
τ_λ	Transmitancia
θ	Posición angular ($^\circ$)

ÍNDICES

ais	Aislamiento
b	Cuerpo negro
B	Blanco lambertiano
d	Difusa
e	Emitida
frontal	Cara delantera del radiómetro
FS	Fondo de escala
h	Heliostato
i	Incidente
in	Entrada
max	Máxima
out	Salida
r	Radiómetro
<i>r</i>	Reflejada
ref	Referencia
R	Receptor
s	Solar
SC	Constante solar
t	Transmitida
th	Térmica
λ	Espectral
x	Eje x
y	Eje y

RESUMEN

El aumento de la demanda energética mundial y el crecimiento de la población están provocando un modelo energético poco sostenible. Para tratar de mejorar este modelo energético y que los países logren ser menos dependientes energéticamente, es necesario implementar con mayor capacidad las energías renovables en el mix energético.

En este contexto, las tecnologías de energía solar por concentración tienen un gran potencial como alternativa a los combustibles fósiles, tan contaminantes. Con ellas, es posible tanto generar electricidad como generar energía térmica a gran escala que puede ser usada para procesos industriales. Una de las ventajas más valiosas de estas tecnologías es su capacidad de almacenamiento. Son capaces de almacenar energía térmica, según la demanda, de forma sencilla y más económica que otras fuentes de energía renovable. Esto quiere decir que esta tecnología es capaz de adaptarse mejor a las curvas de demanda energéticas, pudiendo incluso generar electricidad sin radiación solar.

Dentro de las tecnologías de concentración, se encuentran los sistemas de receptor central. Estos sistemas consisten en un receptor situado en la parte alta de una torre, alrededor de la cual hay un campo de espejos, llamados heliostatos, que reflejan y concentran la radiación solar directa sobre el receptor. Cada vez se construyen torres más altas, con campos de heliostatos más grandes y receptores de mayor superficie. Sobre el receptor incide la radiación solar reflejada por el campo de heliostatos, que aumentará conforme aumente el número de heliostatos del sistema. Gracias a ello, en esta tecnología se pueden alcanzar potencias incidentes sobre el receptor muy elevadas, pudiendo alcanzar temperaturas de hasta 1200 °C. Sin embargo, existe un retardo entre la irradiancia incidente (causa) y la temperatura (efecto) del receptor, que hace que la vigilancia del receptor mediante la medida de temperatura sea insuficiente.

Por ello es necesario el desarrollo de un método de medida de irradiancia que garantice el buen funcionamiento del receptor, ayudando al mantenimiento y aumentando la seguridad en las centrales.

Esta tesis doctoral trata de contribuir al desarrollo de un nuevo método de medida de irradiancia en la tecnología de receptor de central. Este nuevo método se diferencia del resto en la eliminación de superficies auxiliares y móviles para la medida, consiguiéndose medir directamente sobre la superficie del receptor.

Para realizar este estudio, se ha desarrollado y expuesto el nuevo método de medida de irradiancia, que ha sido validado posteriormente mediante ensayos experimentales. Este nuevo método supone un cambio de paradigma, ya que se eliminan las superficies auxiliares que las centrales comerciales no permiten añadir en el diseño de la torre y en la operación de la planta. El sistema utilizado consta de un radiómetro y una cámara digital exclusivamente. Este diseño es sencillo, fácil de aplicar y de instalar

en cualquier central comercial sin añadir cambios en su estructura, diseño ni operación, y además es económico.

Se ha validado el método en dos ensayos en las instalaciones de la Plataforma Solar de Almería, en concreto en un horno solar y en una de las torres. En ambos ensayos se han comparado los resultados obtenidos mediante el nuevo método con un sistema de referencia ampliamente validado. En el primer ensayo, se ha diseñado y construido un receptor de pequeño tamaño y se ha pintado con la pintura que suelen usar las centrales comerciales para sus receptores. En el segundo ensayo, se han realizado medidas de distribuciones de irradiancia sobre un receptor poroso de mayor tamaño, de carburo de silicio, en el marco de un proyecto internacional. Los resultados en ambos ensayos se han comparado con un método de referencia, obteniendo desviaciones muy bajas entre las medidas. De esta manera, se ha podido validar y demostrar la viabilidad del método.

ABSTRACT

The rise of the global energy demand and the population growth are leading to an unsustainable energy model. In order to try to improve this energetic model and to make countries less energy dependent, the renewable energies need to be implemented with higher load in the energy mix.

In this context, concentrating solar power technologies have great potential as an alternative to fossil fuels. With these technologies, it is possible both to generate electricity and to generate thermal energy on a large scale, which can be used for industrial processes. One of the most valuable advantages of these systems is their storage capacity. They are able to store thermal energy in an easily and more economically way than other renewable energies. This means that this technology is able to adapt better to the energy demand and can even generate electricity without solar radiation.

One of the technologies are central receiver systems. These systems consist of a receiver placed at the top of a tower, around which there is a field of mirrors, called heliostats that reflect and concentrate direct solar radiation onto the receiver. The towers are being built higher and higher, with larger heliostat fields and larger receiver surfaces. The solar radiation reflected by the heliostat field hits the receiver, which increases when the number of heliostats increases. As a result, this technology can achieve very high incident power on the receiver, reaching temperatures up to 1200 °C. However, there is a delay between the incident irradiance (cause) and the temperature (effect) of the receiver, which makes the monitoring of the receiver by means of temperature measurement insufficient.

It is therefore necessary to develop a method of irradiance measurement that guarantees the proper working of the receiver, helping maintenance and increasing safety in power plants.

This thesis aims to contribute to the development of a new method of irradiance measurement in central receiver systems. This new method is different from the rest in the elimination of auxiliary and mobile surfaces for the measurement, being able to measure directly on the surface of the receiver.

In order to carry out this study, the new irradiance measurement method has been developed and presented, and has been validated with experimental tests. This new method represents a change, as it eliminates the auxiliary surfaces that commercial plants do not allow to be added in the design of the tower and in the operation of the plant. The system consists of a radiometer and a digital camera. This design is simple, easy to implement and install in any commercial power plant without adding changes to the structure, design and operation, and is cost-effective.

The method has been validated in two tests at the Plataforma Solar de Almería facilities, specifically in one of the solar furnaces and in one of the towers. In both tests,

the results obtained using the new method were compared with a widely validated reference system. In the first test, a small receiver was designed, built and painted with the coating, which is used to employ by commercial power plants for their receivers. In the second test, measurements of irradiance distributions were made on a larger foam silicon carbide receiver as part of an international project. The results in both tests were compared with a reference method, obtaining very low deviations between the measurements. In this way, it has been possible to validate and demonstrate the feasibility of the method.

INTRODUCCIÓN

La demanda energética de la Tierra aumenta cada año y se estima que ésta se duplicará para el 2050. El crecimiento de la población y el modelo de desarrollo energético y medioambiental no son sostenibles. Se están realizando grandes esfuerzos por la mayoría de los países para tratar de paliar las consecuencias de este modelo energético, abordando estos problemas y proponiendo tratados y acuerdos internacionales con el fin de mejorar esta situación. La mayoría de estos tratados se centran en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, aumentar el porcentaje de las fuentes de energía renovables en el mix energético mundial y ahorrar en el consumo de energía mediante el aumento de la eficiencia energética.

Durante los últimos años ha habido un cambio importante en la tendencia de las fuentes de energía utilizadas, gracias a estos acuerdos firmados por gran cantidad de países de todo el mundo. Las fuentes de energía renovables se posicionan actualmente como segunda fuente de energía en el mix de generación eléctrico global. Sin embargo, todavía queda mucho camino por recorrer. Son necesarios más esfuerzos e inversiones en estas energías de origen renovable, ya que contribuyen a generar energía de manera limpia, sin emitir gases contaminantes a la atmósfera, evitando el aumento de la temperatura media mundial. Al desarrollar estas energías renovables, se está ayudando a mejorar el sistema energético, ayudando a la población futura a que puedan vivir en un mundo sin tanta contaminación, evitando más catástrofes naturales y conservando los recursos naturales del planeta, tan necesarios para mantener la biodiversidad y poder convivir con la naturaleza en equilibrio. Estas son las motivaciones que mueven a la mayoría de la comunidad científica para desarrollar herramientas que permitan a los seres humanos convivir de modo sostenible con la naturaleza.

Dentro de las energías renovables, una de las más prometedoras y en la que se está poniendo gran parte del foco es la energía solar. Uno de los tipos de energía solar es la energía solar de concentración. Este tipo de energía refleja la radiación directa proveniente del Sol mediante espejos, en una zona en la que se sitúa un receptor, en el cual se transforma la energía solar concentrada en energía térmica, que puede ser usada para distintas actividades. Esta energía térmica puede almacenarse en forma de calor, o llevarse a un ciclo de potencia y producir electricidad. La energía solar de concentración tiene un gran potencial, ya que al operar a altas temperaturas, se consiguen altas eficiencias.

Una de las tecnologías de concentración solar son los sistemas de receptor central, consistentes en una torre en la que se sitúa un receptor en la parte alta, y distribuido alrededor de su base hay un campo de espejos (heliostatos) que reflejan y concentran la radiación solar directa sobre el receptor. Las líneas de investigación aplicada en estos sistemas buscan optimizar el rendimiento, desarrollando e investigando diferentes fluidos de trabajo, diferentes materiales para los receptores, así como la optimización del campo de heliostatos, entre otros. En el estudio e investigación en receptores, es necesario conocer la magnitud y distribución de la alta

irradiancia solar incidente sobre él, ya que es una variable que influye en su rendimiento y en el mantenimiento y seguridad del mismo.

En las plantas de receptor central comerciales no existe un método de medida de la irradiancia incidente sobre el receptor. La irradiancia incidente se calcula mediante estimaciones con programas de simulación, o infiriéndola a partir de medidas de temperatura del receptor mediante cámara de infrarrojos. Esto es insuficiente ya que en el receptor se produce un retardo entre la irradiancia y la temperatura. Es por ello que son necesarios el desarrollo e investigación de un método de medida de irradiancia, que garantice el buen funcionamiento del sistema, ayudando al mantenimiento y aumentando la seguridad en las centrales.

Al conocer la distribución de irradiancias sobre la superficie del receptor, se puede observar y encontrar desviaciones en la estrategia de apunte del campo de heliostatos o errores en los heliostatos, que pueden provocar daños o mal funciones en el receptor. Además, se puede obtener la potencia que incide sobre el receptor, pudiendo calcular los valores reales de eficiencia de las plantas, necesarias para las estimaciones económicas.

Los equipos tradicionales de medida de irradiancia en plantas solares de receptor central, basan su metodología en la intervención de un instrumento calibrado de medida de la irradiancia procedente del campo de heliostatos, denominado radiómetro. La misión del radiómetro es medir el verdadero valor de esta magnitud física (irradiancia) en una determinada ubicación puntual y fija de la torre. La realización práctica de la medida de esta magnitud presenta dos problemas. El primero es de su emplazamiento en la torre, ya que, en general, los protocolos de seguridad en la operación de estas plantas no permiten una ubicación del radiómetro próxima a la superficie del receptor, que es realmente el objeto sobre el que dicha magnitud debería medirse. El segundo problema es de cobertura espacial de la medida, ya que la medida realizada por el radiómetro es puntual y en una ubicación determinada, por lo que de alguna manera la información local que proporciona debe ser necesariamente extrapolada a una región extensa que coincida con la superficie que ocupa el objeto a medir, es decir, el receptor.

En las condiciones de las grandes plantas comerciales de receptor central, los métodos de medida tradicionales han sido incapaces de resolver en la práctica los mencionados problemas de emplazamiento y cobertura espacial de la medida. Esto se debe a dos razones. Por un lado, las limitaciones impuestas por los protocolos de seguridad en la operación de dichas plantas, imposibilitan el emplazamiento de los instrumentos, elementos auxiliares y modo de operación del que hacen uso los métodos de medida tradicionales. Por otro lado, la enorme extensión de la superficie del receptor hace inviable en la práctica la cobertura espacial de dicha medida.

Por todo ello, esta tesis trata de contribuir al estudio de la medida de irradiancia en las plantas de receptor central, mediante la propuesta de una metodología innovadora que no necesita el uso de superficies auxiliares, no afectando ni al diseño ni a la operación de la planta. Esta nueva metodología consiste en la medida de irradiancia

directamente sobre el receptor, mediante un sistema compuesto por una cámara digital y un radiómetro únicamente. Esto supone un cambio de paradigma en la medida de irradiancia en las centrales de torre, ya que la mayoría de los métodos existentes usan superficies auxiliares móviles. Sin embargo en esta tesis, se han eliminado estos elementos externos y se mira directamente a la superficie del receptor para obtener el mapa de distribución de irradiancias.

Tal como se acaba de comentar, el objetivo de esta tesis es contribuir al desarrollo en los métodos de medida de alta irradiancia solar para las plantas de receptor central. Los objetivos que se han propuesto para la presente tesis doctoral son:

- El desarrollo de un método de medida de alta irradiancia que elimine las superficies auxiliares o superficies móviles, para no afectar al diseño de la torre.
- El estudio de los fundamentos físicos en la medida de irradiancia en las tecnologías de receptor central.
- La revisión de los métodos existentes en la actualidad para la medida de alta irradiancia.
- Revisión de los sistemas de medida utilizados en estos métodos, haciendo hincapié en los sensores de medida de irradiancia (radiómetros) y en su calibración.
- La aplicación y validación de la metodología propuesta mediante experimentos realizados en la Plataforma Solar de Almería (PSA).
- El ensayo y la experimentación del nuevo método propuesto en diferentes tipologías de receptores.
- Validación de los resultados mediante la comparación de los resultados obtenidos con un método de referencia de medida de radiación solar concentrada incidente sobre receptores, ampliamente validado.

Con todo ello, se ha desarrollado la tesis doctoral, y se ha redactado la memoria del trabajo y estudio efectuado durante 4 años, distribuidos en 6 capítulos.

En el primer capítulo se introduce el contexto energético actual global y se compara con el europeo y el español. Se introducen las tecnologías solares de concentración como parte de la solución al cambio climático. Además, se hace una breve descripción del centro de investigación en el que se ha realizado esta tesis, la Plataforma Solar de Almería.

En el segundo capítulo se revisan las bases de la radiación electromagnética y las leyes fundamentales de radiación de los cuerpos negros. Por otro lado, se profundiza en los conceptos de la radiación solar, sus componentes, los dispositivos de detección y en la medida de magnitudes asociadas a ella.

En el tercer capítulo se presentan los diferentes tipos de sensores utilizados para la medida de alta irradiancia, los radiómetros. Se presenta el método de calibración empleado en la PSA, así como el estudio de las fuentes de error que contribuyen en su

medida. Además, se revisan las intercomparaciones internacionales realizadas entre los distintos tipos de sensores.

En el cuarto capítulo se revisa el estado del arte en las metodologías de medida de alta irradiancia en las tecnologías de concentración. Estas metodologías se han separado en métodos directos, métodos indirectos y códigos de simulación. Se revisa con especial detalle el método indirecto que ha servido como referencia para los ensayos realizados en esta tesis.

En el quinto capítulo se expone la hipótesis propuesta para medir alta irradiancia en receptores mediante el uso de una cámara digital y un radiómetro. Además se describe el experimento diseñado para confirmar dicha hipótesis. Se explica el proceso de construcción de un receptor de pequeño tamaño que es instalado en el horno solar SF60 de la PSA. Se presentan los resultados de este experimento y a continuación se comparan con los resultados de la medida de irradiancia proporcionados por el sistema de referencia de blanco lambertiano que posee el horno solar. Además, se proporcionan y comparan también los resultados obtenidos para la potencia.

En el sexto capítulo se documentan los ensayos efectuados en el marco de un proyecto europeo, dentro del cual se ha medido irradiancia con la nueva metodología propuesta en esta tesis. Se presentan las medidas realizadas y se comparan con las medidas obtenidas con el sistema de referencia operativo en la PSA, el sistema ProHermes. Por último, se comparan también las medidas de potencia obtenidas durante los ensayos.

Para finalizar la tesis, se exponen las conclusiones que se han logrado gracias al estudio y experimentos realizados, y se presentan los futuros trabajos que se pueden proponer a partir de las conclusiones y resultados obtenidos en esta tesis.

CAPÍTULO 1.

TECNOLOGÍAS SOLARES DE CONCENTRACIÓN

En el Capítulo 1 se introduce el contexto energético actual global, y se compara con el europeo y el español. Se introducen las tecnologías solares de concentración como parte de la solución al cambio climático. Por último, se hace una breve descripción del centro de investigación en el que se ha realizado esta tesis, la Plataforma Solar de Almería.

“Era como un mundo nuevo para mí, el mundo de la ciencia, que por fin se me permitió conocer en toda libertad”

Marie Curie (1867-1934)

(Ganadora Premio Nobel Física y Química)

1.1. CONTEXTO ENERGÉTICO ACTUAL

El cambio climático es un hecho demostrado científicamente, y ha generado un amplio consenso entre los científicos de todo el mundo. El aumento de la temperatura media mundial, o la tasa de subida del nivel del mar son algunas de las consecuencias del mismo, recogidas en el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) [1]. El cambio climático es provocado por los gases de efecto invernadero que contribuyen al aumento de la temperatura media de la Tierra.

El efecto invernadero es un fenómeno natural gracias al cual ha sido posible la vida en la Tierra. Existen gases presentes en la atmósfera que impiden que la radiación solar reflejada por la superficie terrestre, y la radiación térmica emitida por la superficie y atmósfera de la tierra escape al espacio. Estos gases se denominan gases de efecto invernadero (GEI) y son el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) y el ozono (O_3), entre otros. Gracias a estos gases, parte de la radiación que se escaparía al espacio permanece en la atmósfera terrestre, manteniendo una temperatura superior a otros planetas, permitiendo proliferar la vida. Este efecto no es exclusivo del planeta Tierra, sino que está presente en otros planetas con atmósfera, como es el caso de Venus. La atmósfera de Venus contiene grandes cantidades de CO_2 (96 % [2]) que producen el efecto invernadero, provocando temperaturas de hasta 465 °C [3], mayores que en Mercurio, que está más cerca del Sol.

Sin embargo, durante los dos últimos siglos las cantidades de estos gases presentes en la atmósfera se han multiplicado y alcanzado niveles nunca antes vistos, debido a la acción del hombre. Las actividades humanas son las responsables del aumento de las temperaturas globales de aproximadamente 1 °C sobre el nivel preindustrial [4]. En el caso de España, el aumento de la temperatura es superior a la media en casi 0.5 °C [4]. Todo ello tiene impactos que ya son perceptibles como el aumento de la temperatura de los océanos, el deshielo que provoca el aumento del nivel del mar, la desertificación o eventos climáticos más extremos. Se estima que para el 2050 el aumento de temperaturas llegará a 1.5 °C, provocado por el incremento de la población y del consumo de energía, si no se hace nada para remediarlo.

El modelo energético mundial está basado en los combustibles fósiles, principales causantes de las emisiones de GEI a la atmósfera. En el mundo, en el mix de generación de electricidad sigue predominando el carbón, suponiendo aproximadamente el 40 % del total de la producción de electricidad. A principios de 2010, el gas suponía la segunda fuente principal para la generación de electricidad, y se ha mantenido constante a lo largo de los años, como se puede apreciar en la Figura 1.1.1. Sin embargo, en los últimos años las energías renovables han aumentado y ya en 2020 suponen la segunda fuente principal de generación eléctrica. Por último, el cuarto tipo de fuente es la nuclear, que se mantiene constante a lo largo de los últimos años entorno al 10 % de la producción total de electricidad en el mundo. En la Figura 1.1.1 se muestran los datos recopilados por la International Energy Agency (IEA) entre los años 2010 y 2020 para el mix de generación eléctrico global.

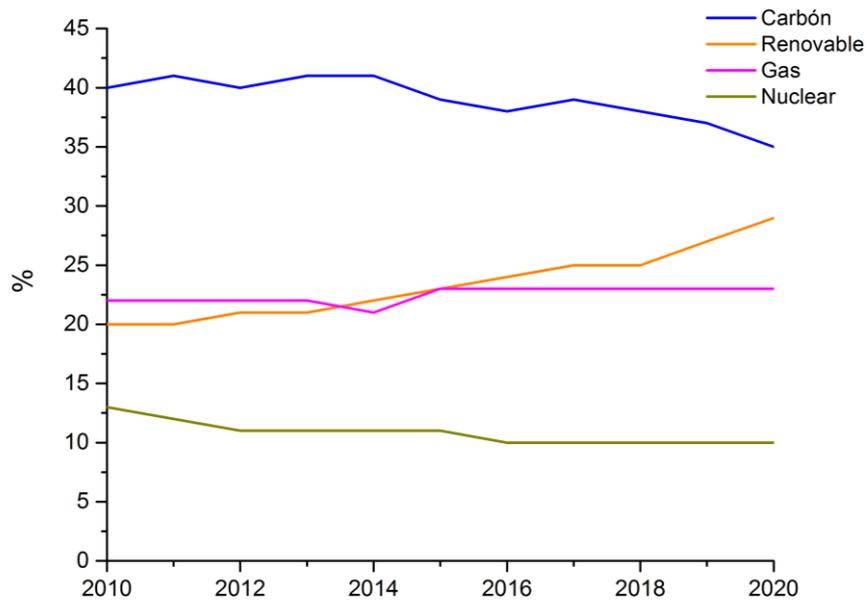


Figura 1.1.1. Mix de generación eléctrico global, 2010-2020 [5]

Como se puede apreciar, en todo el planeta sigue siendo predominante la generación de electricidad mediante combustibles fósiles, como el carbón o el gas. Si se estudia y se compara el mix mundial con el mix eléctrico de la Unión Europea (UE), estos porcentajes son algo distintos. En la Figura 1.1.2 se representa el mix de electricidad en la UE durante el período de Enero de 2020 hasta Septiembre de 2020 (este es el período con datos oficiales). En el caso de la UE, la primera fuente de producción de electricidad son las energías renovables, que alcanzan hasta casi el 50 % de la producción en ciertos periodos, como se puede apreciar en la Figura 1.1.2. La segunda fuente de electricidad es la nuclear, que es la energía de base del sistema eléctrico, ya que genera una cantidad de electricidad constante durante las 24 horas del día, suponiendo alrededor del 25 % de la cantidad total de electricidad. Alrededor del 20 % de la electricidad generada proviene del gas, mientras que la producción con carbón varía entre el 10-15 %. Como se puede observar en la Figura 1.1.2, en la UE hay una clara tendencia a reducir los combustibles fósiles y apostar por las energías renovables, como se ha constatado en diversos acuerdos firmados de la UE para mitigar el cambio climático.

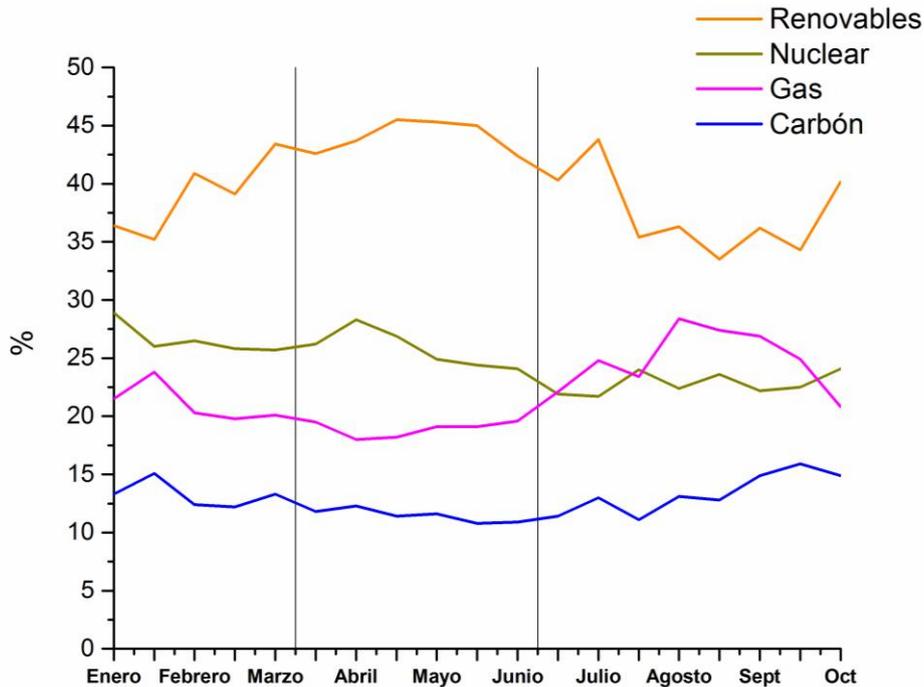


Figura 1.1.2. Mix de generación eléctrico en la Unión Europea. Enero 2020-Septiembre 2020 [6]

El año 2020 estuvo marcado por la pandemia debida al COVID19. La pandemia ha provocado una crisis global, y con ella una reducción en la demanda de energía debida a los confinamientos a partir de marzo del 2020. Gracias a esta reducción en la demanda de energía, ha habido una reducción en las emisiones de CO₂ a nivel mundial, como se puede observar en la Figura 1.1.3.

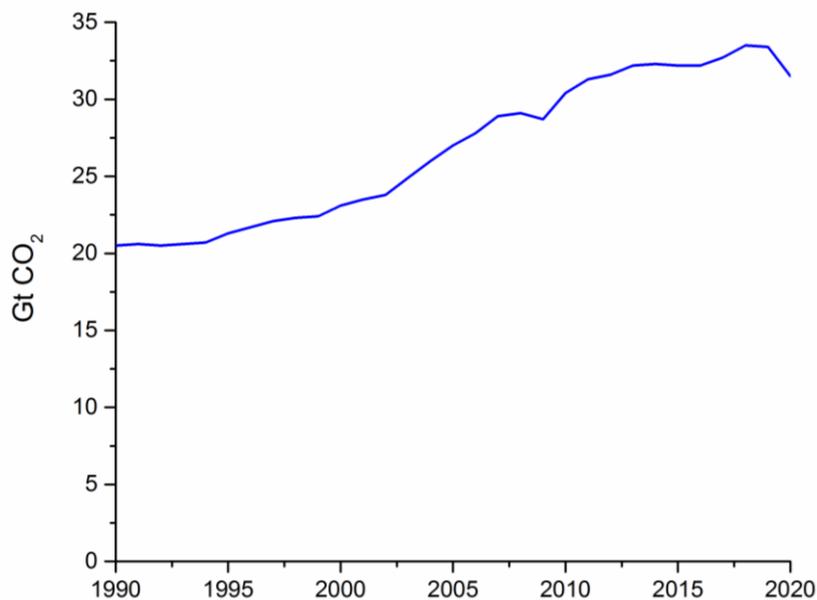


Figura 1.1.3. Emisiones globales de CO₂, 1990-2020 [7]

Si se compara el mix de generación eléctrico de la UE con el mix español, se pueden apreciar algunas diferencias. En la Figura 1.1.4 está representado el balance eléctrico según la fuente de generación del 2019 en España, según los datos oficiales de la Red Eléctrica de España (REE). Al compararlo con la UE, la generación de electricidad a partir de fuentes renovables es inferior en España, con un 37.5 % del total. El 62.5 % corresponde a la generación con fuentes no renovables, entre las que se incluyen la nuclear, el ciclo combinado, el carbón o la cogeneración, entre otras.



Figura 1.1.4. Balance eléctrico nacional (GWh) 2019 [8]

La REE también aporta los datos oficiales de 2020, pero sólo hasta el 31 de mayo de 2020. A partir de esa fecha son datos provisionales. Sin embargo, si se analizan los datos proporcionados hasta esa fecha, se puede apreciar un incremento en el porcentaje de electricidad de origen renovable, alcanzando el 46.5 % del total de la electricidad suministrada a la red. La aportación a la red tanto de la energía eólica como la energía solar aumentan del año 2019 al periodo de 2020.



Figura 1.1.5. Balance eléctrico nacional (GWh). 01/2020 – 05/2020 [9]

Sin embargo, aunque ha habido una reducción en las emisiones de CO₂, y se aprecia un aumento en la cantidad de energía de origen renovable, son necesarios mayores esfuerzos con tal de conseguir los objetivos de reducir las emisiones, para mitigar el cambio climático. Con el objetivo de reducir estas emisiones, se han firmado varios acuerdos entre países de la UE y terceros, como el Acuerdo de París (2015), el último Acuerdo firmado por 189 países [10]. Se trata de un tratado internacional cuyo objetivo es limitar el calentamiento global por debajo de 2 °C en comparación con los niveles preindustriales, mitigando las emisiones de GEI [10].

En España, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico presentó el proyecto de Ley de Cambio Climático que fue aprobado en Mayo de 2021 [11]. Esta ley pretende promover la transición energética, reduciendo las emisiones al menos un 20 % para el año 2030 respecto al año 1990. El objetivo a largo plazo es alcanzar la neutralidad climática para el 2050 [4]. Para ello, se pretende alcanzar un sistema eléctrico con al menos un 70 % de generación a partir de energías renovables, y mejorar la eficiencia energética disminuyendo el consumo de energía primaria en al menos un 35 % [4].

1.2. ENERGÍA SOLAR DE CONCENTRACIÓN

Con el objetivo de alcanzar mayores porcentajes de generación de energía a partir de fuentes renovables, una de las fuentes con mayor potencial es la solar.

La energía solar es una fuente de energía renovable, mediante la cual se puede generar calor y electricidad. Existen varias maneras de captar y aprovechar la radiación solar para producir energía, que da lugar a dos tipos de tecnologías solares:

- Energía solar fotovoltaica: obtiene electricidad a partir de una célula solar basada en la unión de dos semiconductores.
- Energía termosolar de concentración: obtiene energía térmica, a partir de la concentración, en un punto o a lo largo de un eje, de la radiación solar directa. Esta energía térmica puede ser transformada en energía eléctrica o ser utilizada como calor de proceso.

Si tenemos un sistema con dos focos a diferente temperatura (T_1 y T_2), el foco con mayor temperatura (T_1) cederá calor al foco de menor temperatura (T_2), produciendo un trabajo sobre el exterior. Esta es la segunda ley de la termodinámica, que limita la conversión de energía térmica en trabajo. De esto, se deduce que el rendimiento máximo, η , en forma de trabajo que puede sustraerse en una máquina térmica del foco caliente cuando está conectado al foco frío [12], viene dado por la Ley de Carnot (Ecuación 1.2.1):

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \text{Ecuación 1.2.1}$$

De acuerdo con esta ley, el rendimiento de la conversión de energía térmica a trabajo aumenta cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas entre el foco frío y el foco caliente. La eficiencia total de un sistema que usa radiación solar, es el producto de la eficiencia térmica de transformar la radiación solar en energía térmica útil y la eficiencia de transformar esta energía térmica en trabajo [12]. De acuerdo con esta ley, el rendimiento de la conversión de energía térmica a trabajo aumenta cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas entre el foco frío y el foco caliente. Según las características de los sistemas, se alcanzan mayores temperaturas, y por tanto mayores eficiencias, cuanto mayor sea la concentración, C , como puede apreciarse en la Figura 1.2.1.

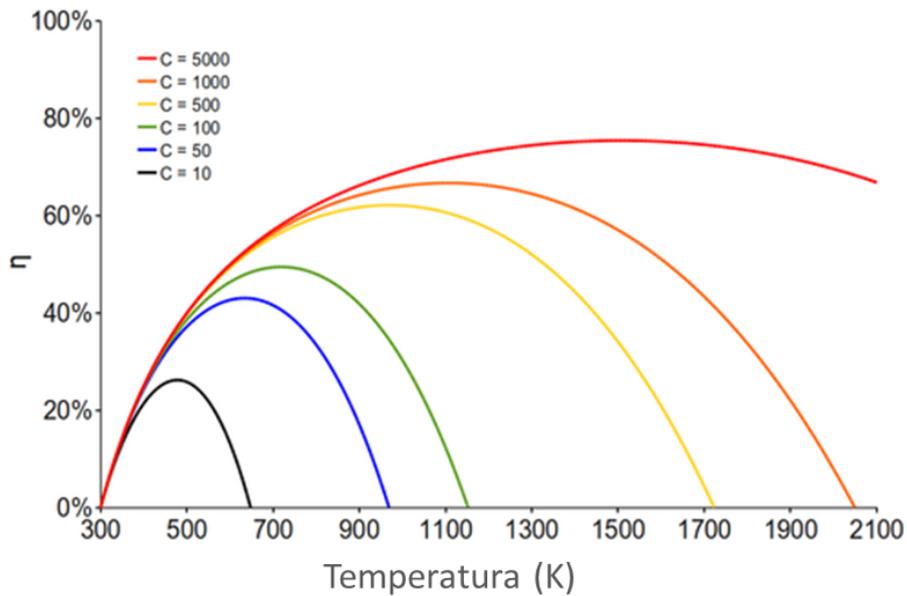


Figura 1.2.1. Eficiencia total de solar a trabajo según la concentración [13]

Los sistemas de concentración termosolar redirigen la radiación solar directa con un concentrador, de mayor área, hacia un elemento receptor, de menor superficie, aumentando la cantidad de radiación solar sobre el elemento receptor [14]. Un sistema de concentración es el conjunto de componentes eléctricos, mecánicos y electrónicos que permiten captar la energía solar disponible y transformarla en calor, de forma que se pueda usar para diferentes necesidades, así como para producir energía eléctrica a partir de ese calor. Estos sistemas solares definidos son los llamados captadores o colectores solares. El captador solar es el elemento encargado de transformar la radiación solar (energía electromagnética) en energía térmica. En España, debido a su situación geográfica, se dispone de una gran cantidad de recurso solar.

Ya que estos sistemas sólo hacen uso de la radiación solar directa, el valor de ésta condicionará el emplazamiento de las plantas. Así, aunque la componente global de la radiación solar en los trópicos es alta, el nivel de la radiación solar directa no permite su aprovechamiento a través de centrales termosolares. En general, se asume que las mejores áreas de aprovechamiento de la radiación solar directa se encuentran localizadas en zonas áridas o semiáridas del planeta. Como se puede observar en la Figura 1.2.2, las áreas geográficas óptimas se encuentran principalmente en los desiertos del norte y sur de África, Península Arábiga y Oriente Próximo, India, Australia, costa oeste de América del Sur, Brasil, México y sudoeste de Estados Unidos.

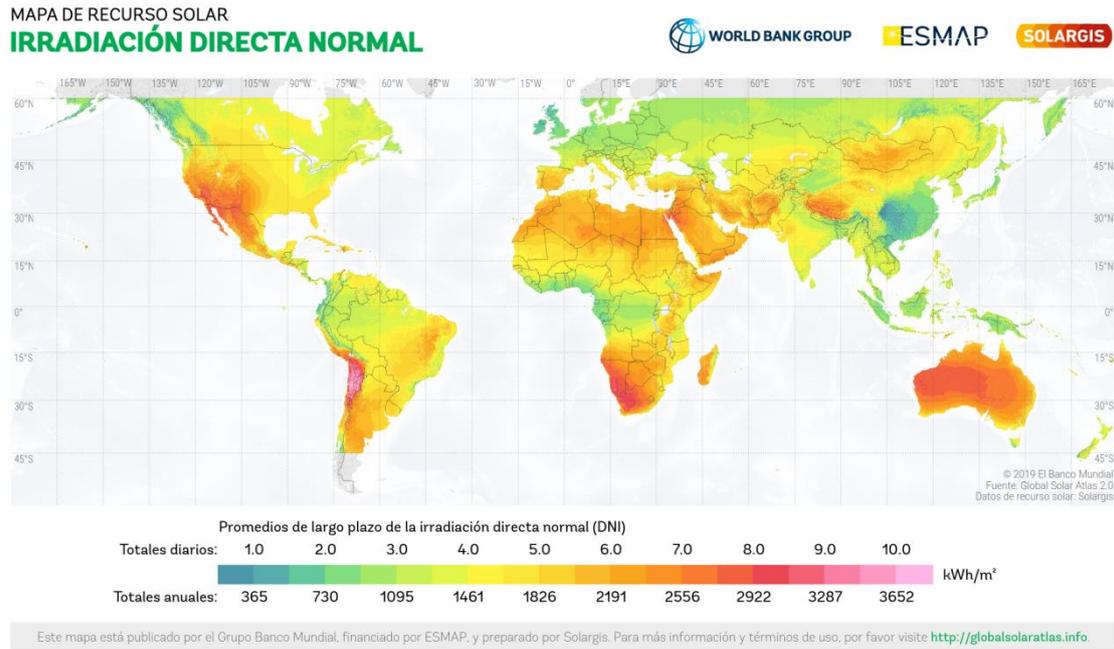


Figura 1.2.2. Mapa de la radiación solar directa en el planeta [15]

En el continente europeo, los mejores emplazamientos se encuentran en el Sur de España y las islas del Mediterráneo. En algunas zonas geográficas españolas la radiación solar directa puede superar los $1800 \text{ kWh m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ [14]. Existen zonas idóneas para esta tecnología como la cuenca del Guadalquivir, Andalucía Oriental y Extremadura, en los que se han registrado valores superiores a $2000 \text{ kWh m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ [14].



Figura 1.2.3. Niveles de radiación solar directa en España [15]

Los sistemas de energía termosolar, o energía solar térmica, son sistemas de generación de energía limpia, segura y renovable. Además, tienen capacidad para dotarse de soluciones tecnológicas con almacenamiento térmico, lo que permite adaptarse mejor a las curvas de demanda de electricidad y permite incrementar las horas de entrega a la red, aun cuando no haya luz solar, pudiéndose llevar a cabo diseños con factores de capacidad de 4000 a 6000 horas. Por otro lado, al ser una energía renovable, evita la importación de petróleo y otros combustibles fósiles, de manera que permite reducir la alta dependencia energética de España, así como de otros países, mediante el uso de energías renovables. En muchos países con menor desarrollo energético y económico, se dispone de un gran recurso solar, hecho que supone una gran oportunidad para la energía termosolar, pudiendo proporcionar electricidad a zonas aisladas.

Los sistemas de concentración utilizan únicamente la componente directa de la radiación solar, por lo que es necesario emplear dispositivos de seguimiento del movimiento aparente del Sol para mantener dicha radiación concentrada en el receptor [16]. Este seguimiento se puede realizar en uno o dos ejes, según los cuales se pueden clasificar los sistemas de concentración termosolar:

- Sistemas de foco lineal: realizan el seguimiento solar en un solo eje, concentrando la radiación solar sobre una línea. Las tecnologías de foco lineal son los colectores cilindroparabólicos (CCP) y los colectores lineales Fresnel.

- Sistemas de foco puntual: constan de seguimiento solar en dos ejes, concentrando la radiación solar sobre un punto o pequeña zona central. Las tecnologías de foco puntual son los sistemas de receptor central y los discos parabólicos.

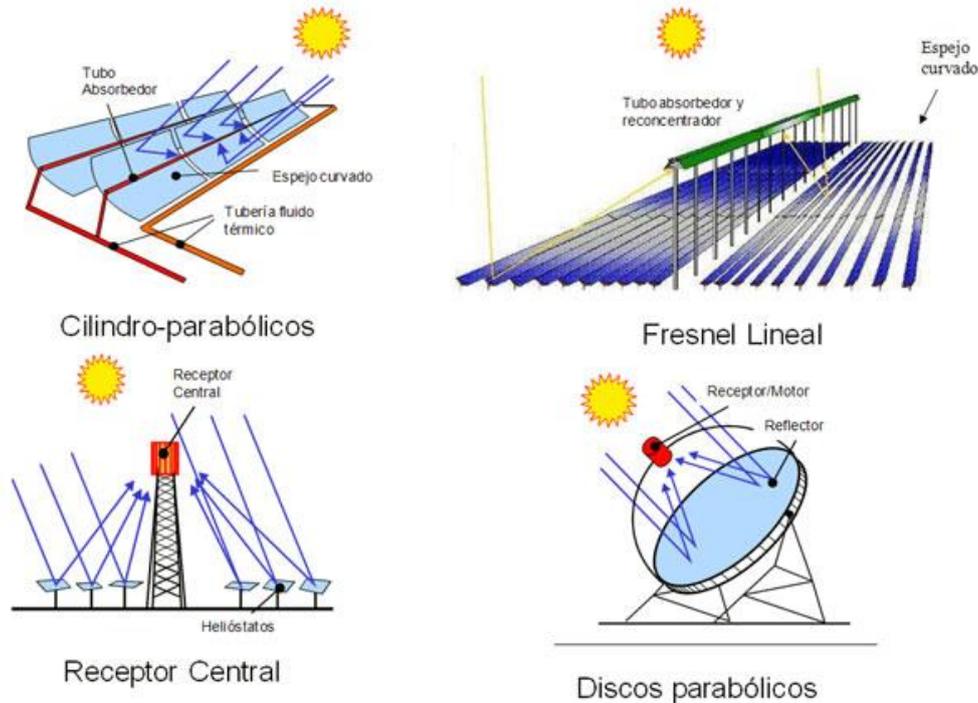


Figura 1.2.4. Tecnologías termosolares de concentración [17]

Estos cuatro tipos de colectores tienen distintas fases de desarrollo e implementación y presentan un esquema básico común. La parte solar de la planta tiene el objetivo principal de aumentar la temperatura de un fluido de trabajo mediante el uso de la energía solar concentrada, mientras que la parte convencional se encarga de transformar la energía térmica contenida en el fluido de trabajo en electricidad [14]. Suelen presentar cuatro elementos principales: el concentrador solar, el receptor, el fluido de trabajo y el ciclo de potencia que convierte la energía térmica en energía eléctrica.

Las eficiencias de estas tecnologías dependen de las eficiencias de cada uno de sus componentes. La eficiencia global de una planta de receptor central, en la que se centra esta tesis, viene definida por la Ecuación 1.2.2 [16].

$$\eta_{global} = \eta_{campoSolar} \eta_{Receptor} \eta_{Almacenamiento} \eta_{BOP} \eta_{parásitos} \quad \text{Ecuación 1.2.2}$$

Dónde η_{BOP} es la eficiencia del balance de planta (*Balance of Plant* en inglés), que es el componente de la tecnología que utiliza componentes convencionales, encargado de transformar la energía térmica en mecánica y eléctrica, conformado por una turbina de vapor o de gas junto con el equipo auxiliar de bombeo/compresor,

tanques, etc [16]. $\eta_{parásitos}$ se refiere a los consumos parásitos de la planta, como el consumo eléctrico de los heliostatos, de las bombas, etc.

Esta tesis se centra en la medida de la irradiancia solar incidente sobre el receptor, a partir de la cual se puede obtener la potencia total incidente sobre el receptor. Es necesario conocer esta variable ya que el rendimiento del receptor ($\eta_{Receptor}$) depende directamente de ella, como puede observarse en la Ecuación 1.2.3:

$$\eta_{Receptor} = \frac{P_{in} - P_{pérdidas}}{P_{in}} \quad \text{Ecuación 1.2.3 [18], [19]}$$

Dónde P_{in} es la potencia solar incidente sobre el receptor, y $P_{pérdidas}$ son las pérdidas de potencia por desbordamiento (spillage), por absorción de la radiación solar, por radiación térmica de la superficie del receptor, por convección natural y por conducción hacia la estructura y otros componentes del receptor [18].

1.2.1. COLECTORES CILINDROPARABÓLICOS (CCP)

Un CCP es un reflector parabólico con seguimiento solar en un eje que concentra la radiación solar directa en una línea focal en la que se sitúa un receptor lineal. En sus inicios, estos colectores se utilizaron para aportar calor de proceso para aplicaciones industriales como tratamiento de residuos o producción de acetona, pero posteriormente se emplearon para la producción de electricidad. De los diferentes tipos de tecnologías de concentración solar, la tecnología CCP es la más extendida a nivel mundial.

Gracias a su forma parabólica, se alcanzan concentraciones de entre 70 a 100 veces la intensidad normal [18], [20]. La razón de concentración se define como la relación entre el área de apertura del concentrador ($A_{apertura}$) y el área del receptor ($A_{receptor}$), tal como se formula en la Ecuación 1.2.1.1:

$$C = \frac{A_{apertura}}{A_{receptor}} \quad \text{Ecuación 1.2.1.1}$$

Al concentrar la energía en el receptor, se consigue calentar el fluido de trabajo que circula por su interior, consiguiendo energía térmica en forma de calor del fluido. Estos sistemas pueden operar con buenos rendimientos a temperaturas de hasta 450 °C aproximadamente [18].

Los concentradores utilizan estructuras soporte para conformar la superficie reflectante. El receptor está compuesto por un tubo absorbedor circular con un recubrimiento selectivo de alta absorción solar y baja emitancia térmica para reducir

las pérdidas radiativas [14]. Durante el seguimiento al Sol en un eje del concentrador, el receptor se mueve simultáneamente con el concentrador. Para ello, son necesarias juntas rotativas que unen las partes móviles con las partes fijas, en las que es necesario evitar las fugas. Al ser la superficie del tubo absorbedor o receptor mucho menor que el área de apertura del concentrador, se consigue reducir significativamente las pérdidas térmicas, que dependen tanto de la temperatura como de la superficie del absorbedor.

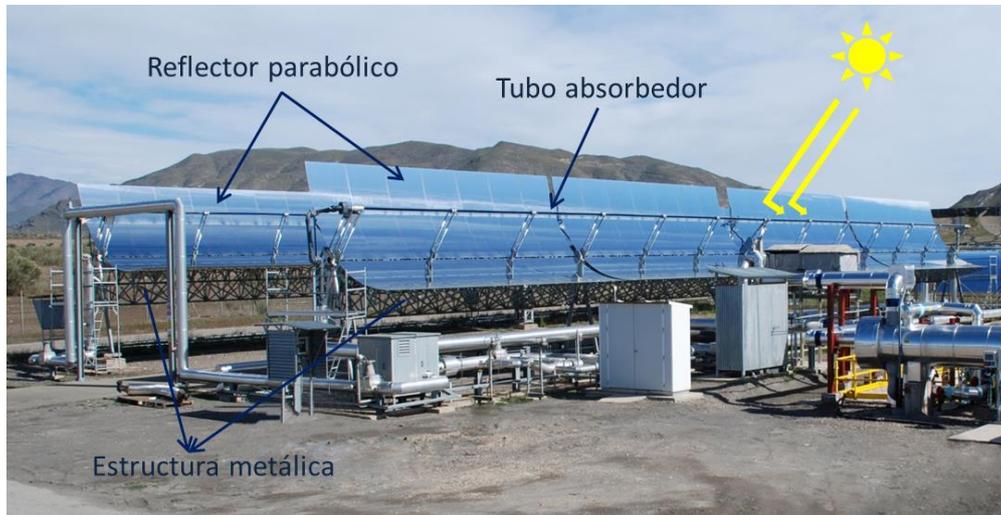


Figura 1.2.1.1. Colector Cilindroparabólico [21]

Los componentes principales que se pueden observar en la Figura 1.2.1.1 de un CCP son la cimentación y estructura metálica, el reflector cilindroparabólico y el tubo absorbedor. Además, estos sistemas cuentan con un sistema de seguimiento al Sol en un eje, transmisión, conexiones entre los colectores y un fluido de trabajo que circula por el interior del tubo absorbedor.

1.2.2. COLECTORES LINEALES FRESNEL

Otro tipo de colectores son los Fresnel, similares a los cilindroparabólicos, a diferencia de que en este caso, el receptor o tubo absorbedor se mantiene inmóvil, y son los espejos los que cambian su orientación para concentrar la radiación solar sobre éste. Además, con los espejos se consigue el efecto de una lente tipo Fresnel. Estos espejos son planos o cuasi-planos, por lo que resultan más sencillos de construir. El ratio de concentración que alcanza está entre 25 – 100 [18]. Este tipo de tecnología se encuentra en fase comercial, con una eficiencia de conversión de energía solar a electricidad de entre un 10-15 %. Sin embargo, esta tecnología está poco desarrollada, debido a las bajas eficiencias que alcanza.

Esta tecnología utiliza como reflector primario líneas largas de espejos cuasi-planos. Las líneas tratan de conseguir un efecto parábola mediante la sectorización de la superficie reflectante, disminuyendo tanto la eficiencia óptica del sistema como el

coste de producción y mantenimiento [14]. Aunque el coste de esta tecnología es más baja que las demás tecnologías solares, su eficiencia es la más baja, por lo que no está muy desarrollada. En la Figura 1.2.2.1 se pueden apreciar las líneas de espejos sectorizadas.



Figura 1.2.2.1. Lazo Fresnel [21]

Los espejos que forman las líneas tienen seguimiento en un eje, para reflejar la radiación solar y concentrarla en el tubo absorbedor. En la actualidad hay dos tendencias en la configuración del receptor: monotubo y multitubo. Sin embargo, la tendencia actual es la configuración monotubo, ya que permite captar más energía y es más sencillo.

1.2.3. DISCOS PARABÓLICOS

Los discos parabólicos, o discos Stirling, son sistemas de foco puntual, que cuentan con sistema de seguimiento en dos ejes. Su ratio de concentración está entre 1000 – 5000 [18]. Esta tecnología puede funcionar mediante sistemas individuales aislados (autónomos) o conectados en serie, como puede observarse en la Figura 1.2.3.1. El sistema consiste en un disco parabólico formado por espejos, que concentran la radiación solar en un punto, dónde se sitúa el motor Stirling, que transforma la energía térmica en energía mecánica, que después se puede convertir en energía eléctrica. Este tipo de colectores son los ideales para emplazamientos aislados, y con difícil acceso a la red eléctrica, ya que al poder funcionar de manera autónoma un sólo disco parabólico, proporciona suficiente energía para abastecer un hogar. Esta es la tecnología con mayor

concentración, que permite alcanzar las mejores eficiencias globales, llegando a temperaturas mayores de 1500 °C.



Figura 1.2.3.1. Discos parabólicos: a) en serie, b) autónomo [21]

La tecnología de discos parabólicos requiere algunas mejoras en su receptor, en el cual se sitúa el motor Stirling, que tiene un alto coste de mantenimiento, para poder contar con motores fiables y duraderos con tal de poder hacer su implementación a nivel comercial, siendo todavía la tecnología más costosa. Sin embargo, estos sistemas son los de eficiencia más alta entre todos los colectores solares por concentración, llegando a una eficiencia entre el 25 y el 30 %.

1.2.4. SISTEMAS DE RECEPTOR CENTRAL

Los sistemas de receptor central, son sistemas con seguimiento en dos ejes de foco puntual. La radiación solar se capta por medio de un conjunto de espejos, llamados heliostatos, que reflejan la luz del Sol concentrándola en una zona o punto focal. En esta zona se sitúa el receptor, que recibe la radiación solar concentrada y transfiere la energía al fluido de trabajo, que puede ser aire, agua o sales fundidas. Se consiguen concentraciones muy altas, entre 200 - 1000, lo que permite alcanzar temperaturas elevadas, y con ello, eficiencias más elevadas que la tecnología Fresnel o clindroparabólica.

Estos sistemas constan de un campo de heliostatos, un receptor, un fluido de trabajo, un sistema de almacenamiento y un bloque de potencia. El campo de heliostatos es el conjunto de espejos dispuestos alrededor de la torre, que reflejan la radiación solar hacia el receptor. Este elemento es el elemento más caro dentro de las plantas de torre. Existen dos tipos de configuraciones para el campo: circular o norte. El campo circular está asociado a receptores externos, en el que los heliostatos se sitúan a ambos lados de la torre, aunque predominan en la zona norte. El campo norte está asociado tanto a receptores externos como de cavidad, en el que se sitúan los heliostatos al norte de la torre. Dos ejemplos de estas configuraciones son las plantas de torre PS10 y PS20, en

Sevilla [22], que cuentan con un campo norte, y Gemasolar [23], [24], con campo circular, como se puede apreciar en la Figura 1.2.4.1 a) y b) respectivamente.



Figura 1.2.4.1. Vista de centrales de torre: a) PS10 y PS20, con campo norte. b) Gemasolar, con campo circular [22], [23]

El receptor es el elemento principal de la planta, en el que se absorbe la radiación solar concentrada. En su superficie la radiación solar se convierte en calor, que después se puede transformar en electricidad. El fluido de trabajo absorbe la radiación solar, transformándola en calor, y lo transporta al sistema de almacenamiento o al bloque de potencia, según las necesidades de la red eléctrica.

Existen distintos tipos de receptores, que se pueden dividir según su morfología, en externos o de cavidad. Los receptores externos pueden ser receptores de tubos o volumétricos. Los receptores de tubos están formados por paneles con tubos por el interior de los cuales circula un fluido térmico, como agua o sales fundidas. Las paredes de los tubos transfieren la energía al fluido térmico o fluido de trabajo. Los receptores volumétricos utilizan como fluido de trabajo el aire. La energía térmica que adquiere el receptor al ser irradiado con radiación solar concentrada es transferida al aire cuando éste circula a través del volumen del receptor. El receptor volumétrico suele ser un absorbedor metálico o cerámico con diferentes formas y porosidades. Si el material es metálico, la temperatura máxima de trabajo se encuentra en torno a 800 – 1000 °C, mientras que si es material cerámico está entre 1200 – 1500 °C [25]. En cuanto a los receptores de cavidad, consisten en un recinto aislado con una apertura para dejar pasar la radiación solar, dentro del cual hay una superficie absorbente que recibe dicha radiación [19]. Gracias a esta configuración, se consigue reducir las pérdidas de calor con el exterior. Estos receptores pueden ser de tubos, entre otros.

Es posible clasificar a los receptores según su morfología, como se ha visto, o según su configuración, en tubos, volumétricos o de partículas. Los primeros, pueden ser externos o de cavidad. En los receptores de partículas se absorbe directamente la radiación, al contrario que en los receptores de tubos, que cuentan con absorción indirecta, ya que la radiación solar calienta la superficie absorbente del tubo y luego el calor se transfiere por convección y conducción al fluido de trabajo [26]. Las partículas pueden trabajar en condiciones de temperatura hasta 1000 °C, consiguiendo altas

eficiencias en los receptores. Según sea necesario, es posible transferir el calor de las partículas a un ciclo de potencia para producir electricidad, o se pueden usar directamente como material de almacenamiento [26]. Se han estudiado diferentes materiales con diferentes tamaños de partícula, como la alúmina, el sílice (óxido de silicio), el carburo de silicio, entre otros [27]. Sin embargo, esta tecnología todavía necesita desarrollo, sobretodo en el transporte de partículas y en el intercambiador de calor.

1.3. PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA

La Plataforma Solar de Almería (PSA) es el mayor centro europeo de investigación, desarrollo y ensayos de tecnologías solares de concentración. Este centro pertenece al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT, que a su vez pertenece al Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España. Está reconocida como Instalación Científica y Tecnológica Singular (ICTS), pues tiene infraestructuras singulares y abiertas total o parcialmente al uso de toda la comunidad científico-tecnológica e industrial, nacional e internacional [28]. Además, está reconocida como “*Large-Scale Research Facility*” por la Comisión Europea.

La PSA se ubica en el sudeste de España, en el Desierto de Tabernas. En esta zona, la radiación solar directa anual oscila entre 1900 y 2000 kWh m⁻² año⁻¹, y su temperatura media anual está en torno a 17 °C [29]. Estas condiciones favorecen el desarrollo, evaluación y transferencia de la tecnología solar de concentración.

Está formada por 28 instalaciones experimentales y laboratorios, entre los cuales se encuentran 10 instalaciones relacionadas con los sistemas cilindroparabólicos, 2 sistemas de receptor central, 3 hornos solares, 2 instalaciones de discos parabólicos y 1 instalación de almacenamiento térmico.

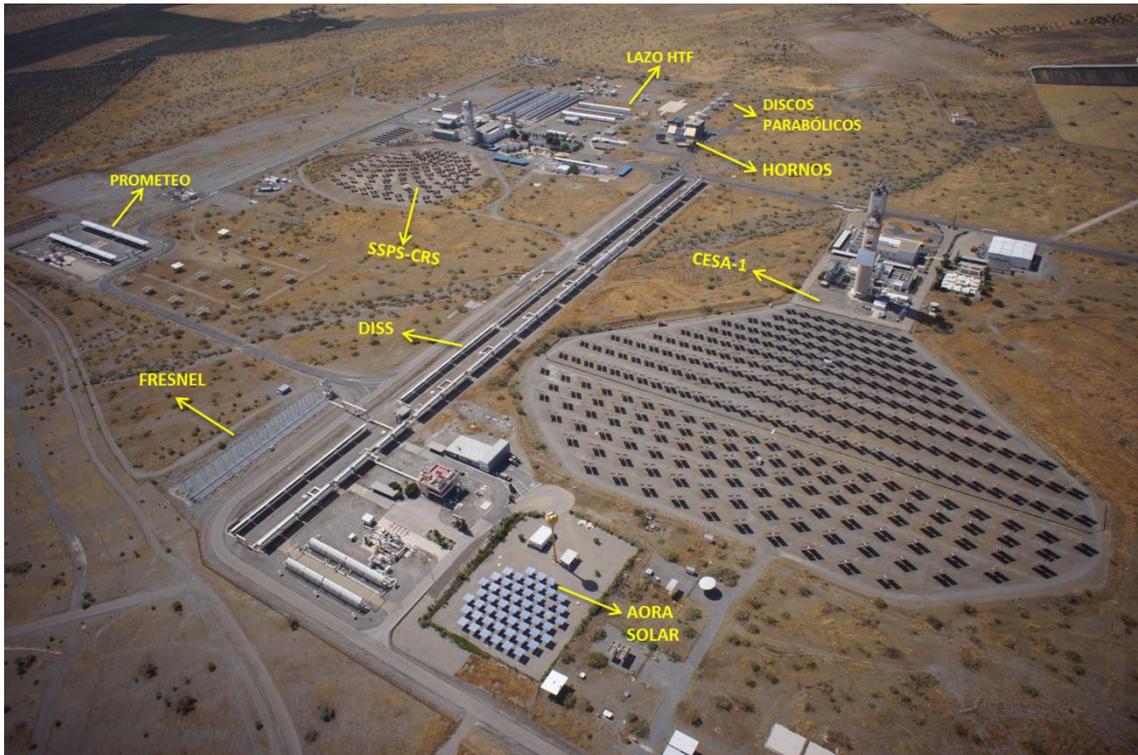


Figura 1.3.1. Vista aérea de la Plataforma Solar de Almería [21]

En esta tesis, se han realizado experimentos en las instalaciones de receptor central y en uno de los hornos solares. La PSA cuenta con 2 plantas de receptor central, la torre CESA-1 y la torre SSPS-CRS, que se pueden apreciar en la Figura 1.3.2. La instalación CESA-1 se inauguró en 1983, cuenta con una torre de 82 metros, y un campo de 300 heliostatos de 39.6 m^2 distribuidos en 16 filas. Esta instalación cuenta con la experiencia más extensa en heliostatos de vidrio y metal en el mundo [30] y opera en rangos de hasta 6 MW_{th} . La instalación SSPS-CRS, descrita más adelante en el Capítulo 8, está dedicada al ensayo de pequeños prototipos de receptores en el rango de 200 a $500 \text{ kW}_{\text{th}}$. El campo de heliostatos Martin-Marietta está formado por 111 heliostatos de primera y segunda generación. En la planta SSPS-CRS se han realizado los ensayos durante el año 2020 pertenecientes a un proyecto europeo, Capture, con un receptor volumétrico, en el que se ha medido la irradiancia y ha servido como experimentación y validación para esta tesis.



Figura 1.3.2. Instalaciones de receptor central Cesa-1 (izquierda) y SSPS-CRS (derecha) [21]

Otro de los experimentos de esta tesis, en el que se ensayó y validó en primer lugar la hipótesis propuesta, se realizó en el horno solar SF60 de la PSA. La PSA cuenta con 3 hornos solares, 2 de eje horizontal y uno de eje vertical. Los dos hornos de eje horizontal son el horno SF60 y SF40, de 60 y 40 kW de potencia respectivamente. Ambos hornos se pueden observar en la Figura 1.3.3. El heliostato asociado al horno SF60 tiene una superficie de 120 m^2 , y el SF40 un heliostato de superficie 100 m^2 . El horno vertical, SF5, cuenta con una potencia de 5 kW.



Figura 1.3.3. Hornos solares SF40 (izquierda) y SF60 (derecha) en la PSA

CAPÍTULO 2.

FUNDAMENTOS DE RADIACIÓN SOLAR

En este capítulo se revisan las bases de la radiación electromagnética y las leyes fundamentales de radiación del cuerpo negro. Además, se profundiza en la radiación solar, sus componentes, dispositivos de detección y medida de magnitudes asociadas a la misma.

“La imaginación es, por excelencia, la habilidad de descubrir, es aquello que penetra en los mundos invisibles que nos rodean, los mundos de la ciencia”

Ada Lovelace (1815-1852)

(Diseñó el primer programa de ordenador de la historia)

2.1. RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La radiación es la forma de propagarse la energía a través del espacio. Esta propagación se produce a través de la combinación de campos eléctricos y magnéticos. La radiación se divide en bandas de longitudes de onda, al conjunto de las cuales se llama espectro electromagnético. La distinción de la radiación se produce por los rangos de longitud de onda, ya que toda la radiación viaja a la misma velocidad, la velocidad de la luz, y su frecuencia depende del medio por el cual se propaga la radiación:

$$c = \frac{c_0}{n} = \lambda \nu \quad \text{Ecuación 2.1.1}$$

Dónde c es la velocidad de la luz, c_0 es la velocidad de la luz en el vacío, n es el índice de refracción del medio, λ es la longitud de onda, y ν la frecuencia [31].

La banda del espectro electromagnético que comprende desde 0.4 hasta 0.7 μm (Figura 2.1.1) es el espectro visible. El rango de radiación infrarroja abarca desde 0.7 μm hasta 0.1 mm aproximadamente. A partir de 0.1 m se denominan ondas de radio, que se pueden dividir en onda corta y onda larga. La radiación ultravioleta está comprendida desde 100 nm hasta 400 nm. [19], [32], [33]

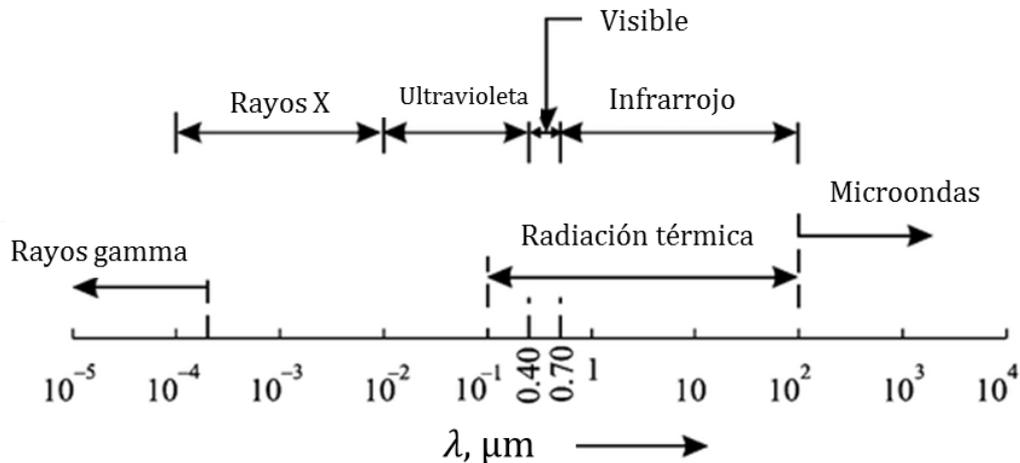


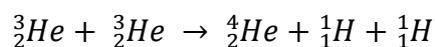
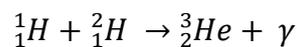
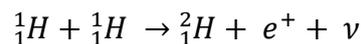
Figura 2.1.1. Espectro electromagnético y sus rangos

La radiación térmica es la radiación emitida por los cuerpos al estar a una temperatura superior al cero absoluto. El rango de longitudes de onda que abarca la radiación térmica comienza en aproximadamente 0.1 μm y se extiende hasta 100 μm [33], abarcando la radiación infrarroja, el espectro de la radiación ultravioleta y el rango del visible. El Sol emite continuamente radiación, y el 99% de esta radiación que llega a la Tierra está comprendida entre 0.276 hasta 4.96 μm [18], por lo que el rango de esta radiación estaría dentro del rango de la radiación térmica.

Un electrón dentro de un átomo puede tener diferentes estados energéticos, normalmente tiende a estar en el nivel de energía más bajo posible. Este electrón puede ser excitado al absorber energía y puede subir a un nivel de energía superior, siendo la

consecuencia un aumento de temperatura. De forma espontánea, vuelve a bajar al estado de baja energía, emitiendo energía en forma de radiación electromagnética. Este movimiento de partículas cargadas es la causa de que todos los cuerpos emitan radiación electromagnética.

Por definición, una estrella es un objeto celeste en el cual hay fusión termonuclear continua de hidrógeno en su núcleo [32]. La fusión se produce en el interior de las estrellas, dónde la temperatura y presión son muy altas, necesarias para que la interacción nuclear fuerte sea capaz de vencer la fuerza electrostática (repulsión entre núcleos cargados positivamente). En la fusión, dos núcleos atómicos se unen para formar un núcleo más pesado, liberando una gran cantidad de energía, que es la fuente de energía de las estrellas. En las estrellas, se piensa que la fusión dominante que se produce es del Hidrógeno, en la que dos protones se unen para formar un isótopo de Hidrógeno, deuterio, cuyo núcleo está compuesto por un protón y un neutrón, y liberándose un positrón (e^+) y un neutrino (ν). A continuación, el deuterio se fusiona con un protón, para formar un átomo de Helio-3 acompañado de la emisión de un fotón gamma (γ). Una vez se ha formado el Helio-3, éste se fusiona con otro igual, formando un átomo de Helio-4 y dos protones, liberando gran cantidad de energía:



Estas reacciones de fusión se producen en el núcleo de la estrella, que es la región más interna. El Sol se puede dividir en seis regiones [32] (Figura 2.1.2):

- Núcleo: la región central donde ocurren las reacciones termonucleares, o reacciones de fusión. Se extiende hasta aproximadamente el 25% del radio solar y la temperatura es de millones de grados.
- Zona radiativa: región donde el transporte de energía dominante es la radiación. Se extiende hasta el 70% del radio solar.
- Zona de convección: sobre la zona radiativa se encuentra esta zona, en la que predomina el transporte de energía por convección.
- Fotosfera: es la superficie del Sol en la cual la radiación escapa al espacio. Se trata de una región convectiva, con un espesor de pocos cientos de kilómetros.
- Cromosfera: esta región se extiende 2000 km sobre la fotosfera y la temperatura alcanza 10^5 K.
- Corona: región sobre la cromosfera que se extiende varios millones de kilómetros y la temperatura alcanza 1 o 2 millones de grados.

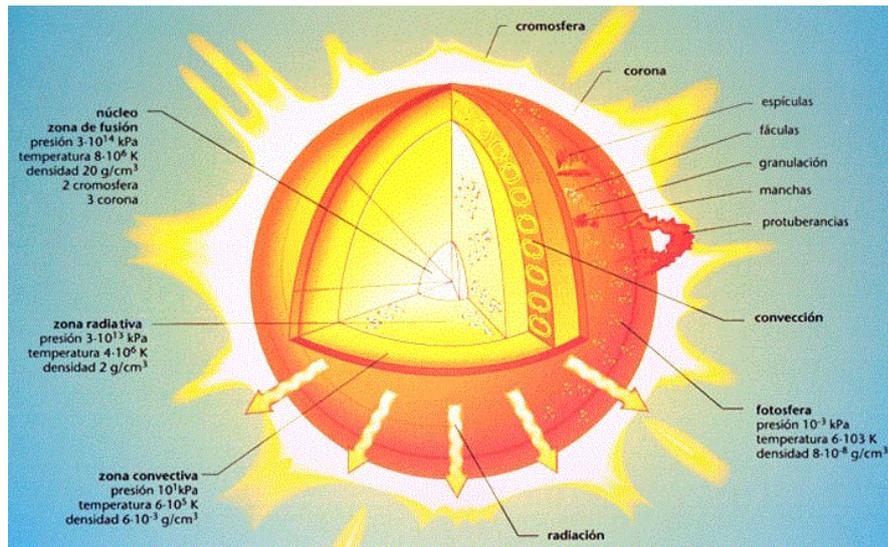


Figura 2.1.2. Regiones del Sol [34]

El radio del Sol es de aproximadamente $7 \cdot 10^5$ km [33], y la temperatura en su superficie es de 5800 K, en la capa más externa. La energía emitida por el Sol es de $3.8 \cdot 10^{23}$ kW, de la cual, aproximadamente $1.7 \cdot 10^{14}$ kW llegan a la tierra [33]. Esto equivale a una emisión del Sol de aproximadamente 63 MW m^{-2} , mientras que la Tierra intercepta alrededor de 1 kW m^{-2} .

La radiación solar es la energía proveniente del Sol, como se acaba de comentar, y en su espectro se distinguen las bandas del visible, infrarrojo y ultravioleta. El máximo de intensidad del espectro solar se encuentra en la región del visible (Figura 2.1.3). La radiación solar promedio que llega a una superficie normal a los rayos del Sol, fuera de la atmósfera de la tierra (radiación solar extraterrestre) a una distancia media de la Tierra al Sol, se llama constante solar, I_{SC} . Hay dos valores de referencia proporcionados por la NASA y por el World Radiation Center (WRC) en Davos (Suiza). El valor medido por la NASA corresponde con un valor de 1353 W m^{-2} , y el de WRC con 1367 W m^{-2} . Este último valor es el más aceptado a nivel mundial.

Los valores que se han obtenido a lo largo del tiempo de la constante solar oscilan entre 1230 y 1550 W m^{-2} [35]. La primera estimación se hizo en 1837, cuando a partir de medidas con un pirheliómetro, Pouillet obtuvo un valor de la constante solar de 1230 W m^{-2} [35]. En 1911, Abbot, estimó el valor de la constante solar, promediando los valores obtenidos entre 1902 y 1910, que resultó 1340 W m^{-2} [36]. Este valor obtenido en el año 1911, es bastante cercano a las estimaciones actuales de la constante solar, teniendo en cuenta que las incertidumbres en los experimentos de entonces eran mucho mayores que actualmente. El valor propuesto por Thekaekara en 1974 era el de 1353 W m^{-2} [37]. Posteriormente, en el año 2000, se actualizó este valor, a 1366.1 W m^{-2} [38]. Por otra parte, la Organización Internacional para la Estandarización (ISO, *International Organization for Standardization*) proporcionó el valor de 1366 W m^{-2} [39], el cual suele tomarse de referencia para el valor de la constante solar, y fue ratificado en 2015.

Actualmente se suele referir a la constante solar como Irradiancia Total Solar (TSI, por sus siglas en inglés, *Total Solar Irradiance*), y se refiere a la irradiancia solar que llega a la parte alta de la atmósfera. El término constante solar se usa para designar el valor medio durante un período de tiempo largo de la irradiancia total solar. Las variaciones en el valor de la TSI están en constante estudio. Por un lado, Gueymard en 2018, reevalúa este valor durante 42 años, obteniendo un valor promedio de TSI de 1361.1 W m^{-2} , con una incertidumbre de 0.5 W m^{-2} [35]. Además, comenta que la mayor parte de la variabilidad en el valor de la TSI es debida a la actividad solar, durante su ciclo de 11 años. En particular, hay dos procesos importantes que afectan a la TSI durante los períodos de alta actividad: las manchas solares y las fáculas [35]. Las manchas solares son zonas en las que el campo magnético es mucho mayor que en el resto de la superficie del Sol, debido a que son puntos dónde el campo magnético sale a la superficie. Estas zonas están caracterizadas por tener una temperatura de aproximadamente 3800 K [40], en comparación con la temperatura del Sol que son 5800 K, por lo que se ven como zonas más oscuras. Las manchas solares suelen aparecer en grupos, y están acompañadas por fáculas, que son zonas en las que la temperatura es mayor, apareciendo con un color más brillante que el resto de la superficie del Sol.

Por otro lado, en 2019, Aparicio realizó un estudio en el que afirma que la actividad solar no afecta a la irradiancia solar directa (DNI). Analizó los valores recogidos por un pirheliómetro en el Observatorio Astronómico de Madrid, durante el período 1910-1929, concluyendo que no había variaciones significativas en la DNI en la superficie terrestre. También observó una variación significativa con el tiempo, pero independiente de la actividad solar, que podría ser debido a cambios en la transparencia de la atmósfera, según el autor [41].

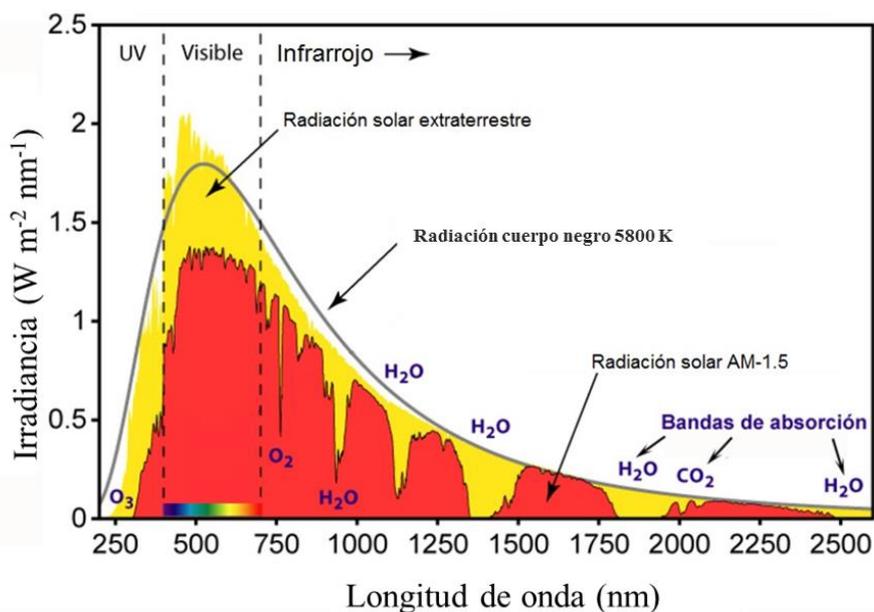


Figura 2.1.3. Espectro de la radiación solar

En la Figura 2.1.3 está representada la radiación solar que llega a la atmósfera, así como la radiación que emite un cuerpo negro a la temperatura a la que se encuentra el Sol. En ella, se puede apreciar como la radiación solar que llega a la superficie de la atmósfera (TSI), es mayor que la que llega a la superficie de la Tierra, que debe atravesar la atmósfera, correspondiente a una Masa de Aire de 1.5.

El término Masa de Aire (del inglés *Air Mass*, AM) es la proporción entre la longitud del camino en la atmósfera a través del cual el rayo de radiación pasa y la longitud del camino por el que pasaría a través el rayo si el Sol estuviera en el cénit.

$$AM = \frac{BP}{AP} = \frac{1}{\text{sen}(\alpha)} \quad \text{Ecuación 2.1.2}$$

Dónde α es el ángulo de elevación del Sol sobre la horizontal, BP y AP son los segmentos que unen los puntos B y A con el punto P, que pueden observarse en la Figura 2.1.4.

Al nivel del mar, AM=1 cuando el Sol está en el cénit. Para ángulos entre 0° y 70° a nivel del mar, AM se puede calcular teniendo en cuenta la curvatura de la tierra [33]:

$$AM = \frac{1}{\text{sen} \alpha + 0.50572(6.07995 + \alpha)^{-1.6364}} \quad \text{Ecuación 2.1.3}$$

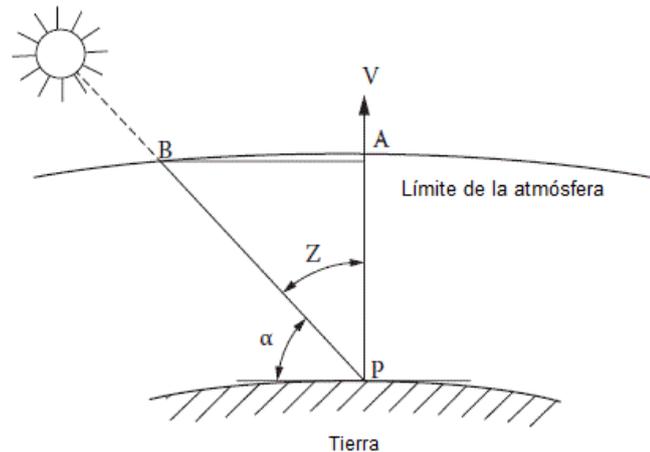


Figura 2.1.4. Definición del ángulo de elevación α

2.2. FUNDAMENTOS DE RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA

La Radiometría estudia los conceptos, terminología, relaciones matemáticas, instrumentos y unidades de medida que describen la radiación y su interacción con la materia. Por otro lado, la Fotometría incluye el mismo sistema que la Radiometría para la radiación, pero relacionada con la detección de la misma por el ojo humano.

Hay algunos conceptos fundamentales en Radiometría, que se explican a continuación.

- La energía radiante (Q_r) es la cantidad de energía que se propaga desde una superficie con un área dada en un periodo de tiempo. En esta radiación se incluyen todas las longitudes de onda. La unidad de energía radiante es el Julio (J).
- La potencia radiante (P_r) es el flujo de energía radiante por tiempo. Su unidad es el vatio (W). Cabe recordar que $1W = 1 J s^{-1}$. La ecuación es la siguiente:

$$P_r = \frac{dQ}{dt} \quad \text{Ecuación 2.2.1}$$

- Irradiancia (I) es la cantidad de energía radiante solar que llega a una superficie por unidad de área y tiempo. Su unidad es $W m^{-2}$. Es posible definir también la irradiancia espectral (I_λ) como la irradiancia a una determinada longitud de onda, en un punto específico de la superficie. ds_0 es un elemento de área en la superficie. Las unidades de I_λ son $W m^{-2} nm^{-1}$, y se define como:

$$I_\lambda = \frac{d^2Q_\lambda}{ds_0 dt} = \frac{d^2\phi}{ds_0 d\lambda} \quad \text{Ecuación 2.2.2}$$

- La radiancia (E) es la potencia radiante emitida por unidad de área. Su unidad es $W m^{-2}$. Es posible definir también la radiancia espectral (E_λ) como la irradiancia a una determinada longitud de onda, en un punto específico de la superficie. ds_0 es un elemento de área en la superficie. Las unidades de E_λ son $W m^{-2} nm^{-1}$, y se define como:

$$E_\lambda = \frac{d^2\phi}{ds_0 d\lambda} \quad \text{Ecuación 2.2.3}$$

- La radiosidad (J) es la potencia radiante que sale de un elemento i por unidad de superficie. Se define como la suma de la radiancia emitida por dicha unidad de superficie (E_i), más la irradiancia reflejada por su superficie. La irradiancia reflejada se obtiene de multiplicar la reflectancia de la superficie (ρ) por la irradiancia solar que incide sobre ella (I_i). Las unidades de la radiosidad son $W m^{-2}$.

$$J_i = E_i + \rho I_i \quad \text{Ecuación 2.2.4}$$

La Fotometría se puede considerar como una rama de la Radiometría, la cual estudia la capacidad que tiene la radiación electromagnética de estimular el ojo humano. La radiación que el ojo humano es capaz de captar se encuentra entre 380 y 780 nm, teniendo diferentes sensibilidades según la longitud de onda (Figura 2.2.1). Además, esta sensibilidad cambia según si es de noche o de día. Durante el día, la máxima sensibilidad del ojo está a unos 550 nm, mientras que la máxima sensibilidad por la noche es a 500 nm aproximadamente, como se puede observar en la Figura 2.2.1.

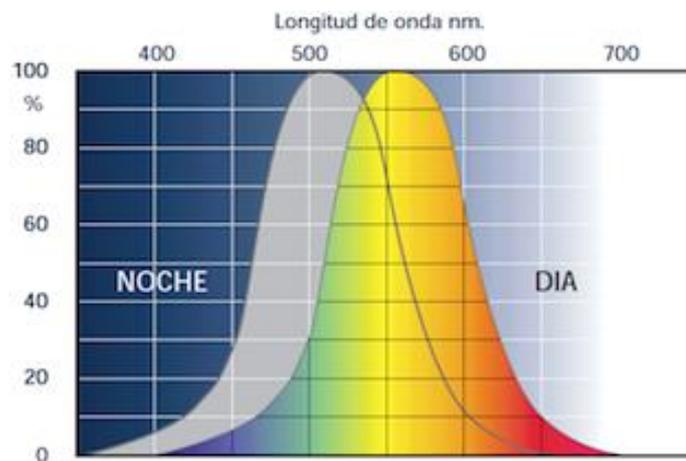


Figura 2.2.1. Sensibilidad del ojo humano a la luz visible

La diferencia entre la Radiometría y la Fotometría se centra en que la Radiometría estudia la radiación electromagnética en todas las longitudes de onda, mientras que la Fotometría se encarga únicamente de la luz visible.

El lumen (lm) es la unidad usada para medir el flujo luminoso (ϕ_v), que es la potencia luminosa emitida por una fuente. El flujo luminoso es el concepto fotométrico equivalente a la potencia radiante de Radiometría. Un lumen son $1/683 W$ a 555 nm. El concepto equivalente a la irradiancia en Fotometría es la iluminancia. La iluminancia es la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie por unidad de área. La unidad de medida del sistema internacional es el lux: $1 \text{ lux} = 1 \text{ lm m}^{-2}$.

La unidad de intensidad luminosa en el sistema internacional es la candela (cd) y se define como la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia $540 \cdot 10^{12}$ hercios y cuya intensidad energética en

esta dirección es $1/683 \text{ W}$ por estereorradián. El lumen se puede relacionar con la candela y el estereorradián: $1 \text{ lm} = 1 \text{ cd sr}$.

Por último, la luminancia (L_v) es el término equivalente a la radiancia en Radiometría. Es la cantidad de flujo luminoso que incide, emerge o atraviesa una determinada superficie en una dirección específica. Sus unidades son $\text{lm m}^{-2} \text{ sr}^{-1} = \text{cd m}^{-2}$. La unidad más usada para la luminancia suele ser cd m^{-2} .

2.3. RADIACIÓN TÉRMICA Y CUERPO NEGRO

La radiación térmica es una parte de la radiación electromagnética, comprendida entre 0.1 hasta $100 \mu\text{m}$, mientras que la radiación emitida por el Sol, se sitúa mayormente entre 0.1 y $3 \mu\text{m}$. En las aplicaciones para la energía solar, se intenta aprovechar esta energía en forma de radiación para alcanzar niveles altos de temperatura, con el fin de conseguir alta eficiencia térmica.

Esta radiación la emite cualquier cuerpo debido a su temperatura, siempre que se encuentre a una temperatura por encima de 0 K . Cuando un cuerpo se calienta, los electrones de los átomos y moléculas por los que está formado, son excitados y llevados a niveles de energía más altos, también llamados estados excitados. Sin embargo, estos electrones tienden a volver a los niveles de energía más bajos, emitiendo energía en el proceso en forma de ondas electromagnéticas. La radiación emitida por un cuerpo se distribuye en un amplio rango de longitudes de onda y frecuencias, como se ha visto en la Figura 2.1.1.

2.3.1. PROPIEDADES RADIATIVAS DE LOS MATERIALES

El comportamiento radiativo ideal del cuerpo negro se utiliza como referencia para comparar con los cuerpos reales. El comportamiento radiativo de un cuerpo real depende de muchos factores, tales como la composición, el acabado de la superficie, la temperatura, el ángulo en el que la radiación es emitida o interceptada, la distribución espectral de la radiación incidente, y la opacidad del cuerpo. Varias propiedades, como la emitancia, absortancia, la reflectancia o la transmitancia se usan para describir el comportamiento de la radiación en materiales reales, en relación con el comportamiento del cuerpo negro. [42]

Cuando incide radiación sobre un cuerpo, parte de esta radiación se refleja (ρ), otra parte se absorbe (α), y otra se transmite (τ) a través del mismo, como se representa en la Figura 2.3.1.1.

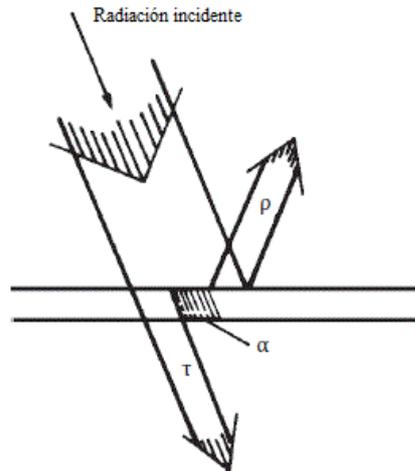


Figura 2.3.1.1. Comportamiento de la radiación incidente sobre un cuerpo real

La absorptancia direccional espectral se define como la fracción de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida, para una longitud de onda, λ , con una dirección, θ, ϕ :

$$\alpha_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,a}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad \text{Ecuación 2.3.1.1}$$

Dónde el subíndice “a” indica la radiación absorbida, e “i” indica radiación incidente. La absorptancia monocromática direccional es una propiedad de la superficie del cuerpo [33]. Se desprecia la dependencia de la absorptancia con la temperatura en la Ecuación 2.3.1.1, ya que es una dependencia pequeña. Según el tipo de superficie, se puede encontrar una absorción selectiva dependiendo de la longitud de onda y de la dirección de la radiación incidente.

La reflectancia direccional espectral se define como la fracción de radiación incidente sobre una superficie que es reflejada, para una longitud de onda, λ , con una dirección, θ, ϕ :

$$\rho_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,r}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad \text{Ecuación 2.3.1.2}$$

Esta propiedad depende de la dirección de la radiación incidente y de la dirección de la radiación que es reflejada. El subíndice “r” indica la radiación reflejada.

Las superficies pueden ser difusoras o especulares en función de la manera en la que la radiación es reflejada. Una superficie es difusora, cuando refleja la radiación de forma difusa, es decir, cuando la radiación incidente es reflejada uniformemente en todas las direcciones; si esto ocurre en todo el rango angular se le denomina superficie

lambertiana. Por el contrario, una superficie es especular si el ángulo con el que incide la radiación es igual al ángulo de reflexión.

Por último, se define la transmitancia direccional espectral como la fracción de radiación incidente sobre una superficie que se transmite a su través, para una longitud de onda, λ , con una dirección, θ , ϕ :

$$\tau_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,t}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad \text{Ecuación 2.3.1.3}$$

Dónde el subíndice “t” indica la radiación transmitida.

La relación entre estas tres propiedades corresponde con la Ecuación 2.3.1.4, a partir de la cual, si son conocidas dos de las propiedades, se puede obtener la tercera.

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad \text{Ecuación 2.3.1.4}$$

Otra magnitud necesaria para el estudio de las propiedades radiativas de los cuerpos es la emitancia (ϵ). Se define la emitancia direccional espectral como la relación entre la radiancia emitida por un cuerpo, a una temperatura T_A , y la radiancia que emitiría un cuerpo negro a esa misma temperatura:

$$\epsilon_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T_A) = \frac{E_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T_A)}{E_{\lambda,b}(\lambda, T_A)} = \frac{E_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T_A)}{\sigma T_A^4} \quad \text{Ecuación 2.3.1.5}$$

En la Ecuación 2.3.1.5, el subíndice “e” indica la intensidad de la radiación emitida por el cuerpo, y el subíndice “b” hace referencia al cuerpo negro. La constante σ es la constante de Stefan-Boltzmann, la cual tiene un valor de $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ [33].

2.3.2. CUERPO NEGRO

Un cuerpo negro es una superficie ideal con las siguientes propiedades:

- Es un absorbedor perfecto, es decir, absorbe toda la radiación incidente ($\alpha=1$), sin importar la longitud de onda ni la dirección.
- Emite el máximo de energía a una temperatura y longitud de onda establecidas ($\epsilon=1$).
- La radiación emitida por un cuerpo negro es función de la longitud de onda y de la temperatura, sin embargo, es independiente de la dirección. Esto significa que el cuerpo negro es un emisor difuso.

Debido a que el cuerpo negro es un absorbedor y emisor perfecto ($\alpha=1$, $\epsilon=1$) sirve de referencia para comparar las propiedades radiativas de superficies reales [43]. Una aproximación muy utilizada consiste en una cavidad en la cual la superficie interna se encuentra a temperatura uniforme. Esta cavidad tiene una pequeña apertura por la cual entra radiación, que es absorbida casi por completo por la cavidad, al sufrir múltiples reflexiones en el interior.

La radiación emitida por un cuerpo negro en el vacío depende únicamente de la temperatura a la que se encuentra el cuerpo. Planck fue el primero que formuló la distribución espectral de la emisión del cuerpo negro:

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad \text{Ecuación 2.3.2.1 [33]}$$

Dónde $C_1 = 3.74 \cdot 10^8 \text{ W } \mu\text{m}^4 \text{ m}^{-2}$ y $C_2 = 1.44 \cdot 10^4 \mu\text{m K}$.

El valor $E_{b\lambda}$ tiene las unidades $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$, y representa la potencia emisiva de un cuerpo negro por unidad de área para una longitud de onda. Se puede definir como la energía emitida por un cuerpo negro por unidad de longitud de onda y unidad de área y tiempo, a la temperatura T [33].

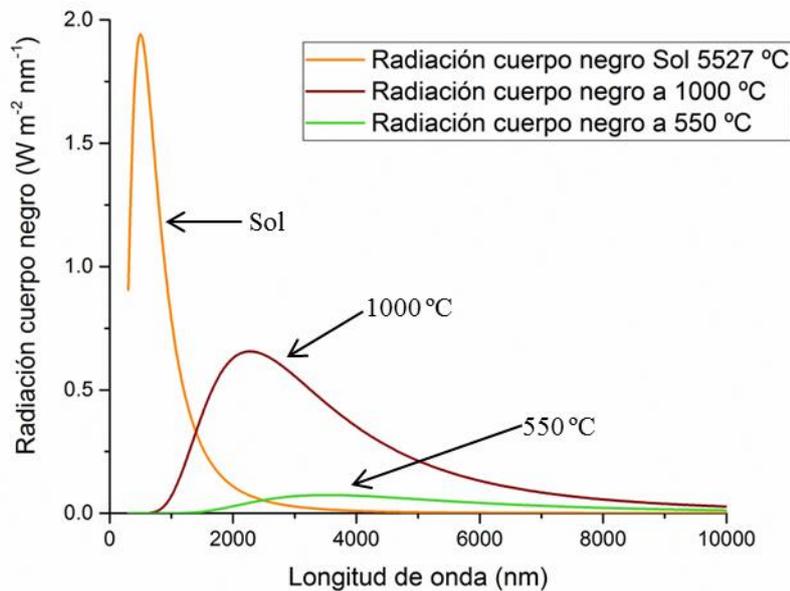


Figura 2.3.2.1. Radiación emitida por un cuerpo negro a distintas temperaturas

En la Figura 2.3.2.1 está representada la radiación emitida por un cuerpo negro a diferentes temperaturas, siguiendo la ecuación de Planck (Ecuación 2.3.2.1). Las temperaturas escogidas son las correspondientes a la temperatura a la que se encuentra el Sol (5527 °C o 5800 K), y dos temperaturas diferentes como referencia en plantas de torre. Estas dos temperaturas son las temperaturas de trabajo usuales para una central de

torre con un receptor de sales fundidas (550 °C) y para un receptor volumétrico (1000 °C). Como se puede apreciar, a menores temperaturas, el espectro de la radiación emitida por un cuerpo negro se desplaza hacia la derecha, es decir, mayores longitudes de onda.

Si se deriva la ley de Planck, respecto a la longitud de onda, y se iguala a cero, se obtiene la ley de desplazamiento de Wien. Esta ley representa la longitud de onda máxima (λ_{max}) a la que emite un cuerpo negro, dependiendo en cada caso de la temperatura (T).

$$\lambda_{max}T = 2897.8 [\mu\text{m K}] \quad \text{Ecuación 2.3.2.2}$$

La potencia total por unidad de área que emite un cuerpo negro a una temperatura T, se puede calcular integrando en todo el espectro de longitudes de onda, obteniendo la ley de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad \text{Ecuación 2.3.2.3}$$

Dónde σ es la constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, y T es la temperatura en Kelvin.

Mediante la ley de Stefan-Boltzmann se puede calcular la potencia total por unidad de área emitida por un cuerpo negro, para todas las longitudes de onda, conociendo únicamente la temperatura a la que se encuentra dicho cuerpo.

2.4. RADIACIÓN SOLAR

La radiación que proviene del Sol sufre distintas modificaciones hasta que llega a la superficie de la Tierra. Antes de que llegue a la atmósfera, se le llama radiación extraterrestre, y contiene la cantidad total de energía que proviene del Sol.

Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera terrestre, se producen distintos procesos que la atenúan, como son la reflexión, la dispersión y la absorción. A la parte de la radiación que penetra la atmósfera sin desviarse, con una trayectoria definida, se le llama radiación solar directa (G_b). Esta trayectoria es la línea que une el Sol con el punto dónde está situado el observador en la superficie terrestre. Cuando el día es muy soleado, puede significar el 90 % de la radiación global, mientras que si el cielo está completamente cubierto por nubes será nula. [18]

La parte de la radiación que es desviada de su trayectoria inicial por las partículas de polvo y por las moléculas presentes en la atmósfera, es denominada

radiación difusa (G_d). Al total de la suma de la radiación difusa y la radiación directa se le denomina radiación global (H), que corresponde a la radiación total que incide sobre la superficie de la tierra [44].

En la Figura 2.4.1 se pueden observar los diferentes procesos que sufre la radiación solar a lo largo de su interacción con la atmósfera, hasta llegar a la superficie de la tierra. La radiación que llega a la parte alta de la atmósfera, sin que llegue a penetrar dentro de ella, es la radiación extraterrestre. Después, entra en la atmósfera, que atenúa la radiación mediante diferentes procesos: absorción y dispersión. Cuando los fotones chocan contra algunas partículas presentes en la atmósfera, son absorbidos. Los principales gases absorbentes son el vapor de agua, el ozono, el dióxido de carbono y el oxígeno, y en menor influencia los aerosoles atmosféricos [45]. Por otro lado, existen diferentes fenómenos de dispersión que afectan a la radiación solar al atravesar la atmósfera, como la dispersión de Rayleigh y la de Mie.

Estos procesos son consecuencia de fluctuaciones en la densidad del aire, además de la presencia de aerosoles. La dispersión de Rayleigh se presenta en partículas con radios inferiores a 0.03λ , mientras que la de Mie explica la dispersión de la radiación solar por partículas de gran tamaño [45].

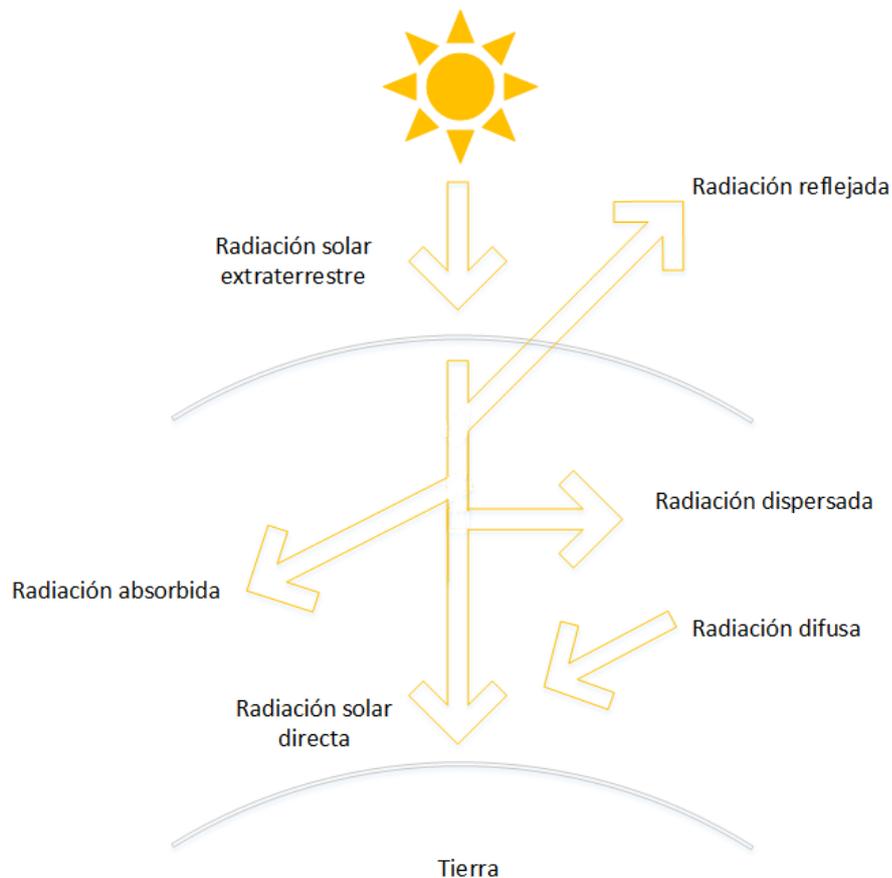


Figura 2.4.1. Procesos que sufre la radiación solar al atravesar la atmósfera [33]

2.5. CÓDIGO SMARTS

La radiación solar se puede modelizar. Uno de los programas utilizados con este fin es SMARTS (*Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine*). SMARTS contiene un modelo de transferencia radiativa atmosférica que calcula irradiancias espectrales, incluyendo la irradiancia directa, circumsolar, hemisférica difusa y global, para unas condiciones atmosféricas específicas [46]. Las irradiancias espectrales se encuentran todas dentro del rango de las longitudes de onda del espectro solar, entre 280 y 4000 nm.

El programa permite modificar el contenido de ciertos componentes presentes en la atmósfera, tales como el vapor de agua, el ozono, o la cantidad y tipo de aerosoles. Es posible configurar la geometría de observación y el rango espectral deseado en las simulaciones.

La primera versión de SMARTS consistía en una versión mejorada de un código escrito en lenguaje Fortran [47], y fue desarrollado por NREL (*National Renewable Energy Laboratory*, EEUU). Posteriormente, se fueron introduciendo mejoras y revisiones, como mejoras en los cálculos relacionados con la irradiancia directa o la contribución de la irradiancia difusa, con el fin de mejorar su exactitud y resolución. Gracias a su versatilidad, SMARTS puede ser usado en una gran variedad de aplicaciones, tales como predecir la irradiancia directa sin presencia de nubes, la irradiancia difusa, global o la irradiancia circumsolar en cualquier superficie horizontal o inclinada, en 2002 longitudes de onda, desde 280 hasta 4000 nm. La mayor resolución que se ha conseguido está dividida en los siguientes intervalos del espectro: intervalos de 0.5 nm entre 280 y 400 nm, 1 nm entre 400 y 1700 nm e intervalos de 5 nm entre 1700 y 4000 nm [48].

Se pueden seleccionar distintas condiciones atmosféricas de un rango de valores por defecto, que corresponden a casos ideales, o se pueden configurar para que correspondan con datos medidos. Además, se puede seleccionar el espectro solar extraterrestre entre varios espectros, incluyendo un espectro solar de referencia, en el que se usa para la constante solar el valor aceptado de 1361.1 W m^{-2} . Este espectro solar extraterrestre está basado en datos de satélite. [47]

Otras aplicaciones para las que se usa SMARTS son la determinación de los componentes atmosféricos, tests para espectroradiómetros, o como espectro de referencia para longitudes de onda cortas o UV. Además, es posible determinar la turbiedad para una banda de datos de irradiancia, predicciones de radiación, y para predecir la irradiancia espectral circumsolar en el campo de visión de los espectroradiómetros o pirheliómetros. [47]

2.6. INSTRUMENTOS DE MEDIDA DE MAGNITUDES ASOCIADAS A LA RADIACIÓN SOLAR

La medida de magnitudes asociadas a la radiación solar es de vital importancia para muchas aplicaciones de energía solar, especialmente para aplicaciones de energía solar de concentración. Para la predicción del rendimiento de una central y la energía eléctrica que se producirá, son necesarias las medidas de la extinción atmosférica [49] y de la DNI, entre otras. Todas estas medidas son importantes para una correcta planificación y operación de las centrales termosolares.

Son necesarias distintas medidas, tales como la medida de la irradiancia solar directa y difusa, y se requiere su medida tanto de manera instantánea como diaria, mensual o por horas. Además, algunos estudios detallados necesitan el comportamiento de estos valores según rangos de longitudes de ondas, es decir, necesitan saber su comportamiento espectral.

Los dos tipos fundamentales de sensores utilizados para la medida de irradiancia solar son los pirheliómetros y piranómetros [50]. Los detectores térmicos pueden ser dispositivos de unión metálica, como los termopares o termopilas, en los cuales se produce el efecto Seebeck. En el efecto Seebeck, dos metales o semiconductores conectados, que están a diferentes temperaturas, generan un voltaje proporcional a la diferencia de temperatura entre ellos. Por otro lado, existen sensores de tipo fotovoltaico, los cuales utilizan una célula fotovoltaica como detector. Estos sensores se basan en el efecto fotoeléctrico. Este efecto se da cuando un átomo absorbe un fotón con energía suficiente para expulsar un electrón de la capa de valencia. Al absorber la energía, este electrón se libera del átomo, y adquiere energía cinética. Los detectores fotovoltaicos son de construcción simple, sin embargo, no detectan radiación de longitudes de onda mayores a la banda prohibida del semiconductor. Esto hace que una parte de la radiación infrarroja no puedan detectarla, y por tanto, no sean sensibles a los cambios en esta banda de la radiación solar [33].

El efecto contrario al efecto Seebeck es el efecto Peltier. En este caso, se aplica un voltaje al circuito que contiene la unión de los dos metales, creando un aumento de la temperatura en uno de los metales, y una disminución de la temperatura en el otro metal. Este efecto es usado para enfriar detectores que operan mejor a temperaturas bajas, sin necesidad de añadir aparatos de refrigeración. [51]

Los termopares son efectivos usados como sensores de temperatura, sin embargo, tienen sensibilidad muy baja cuando se trata de detectar radiación electromagnética, como la radiación solar. Para resolver esta baja sensibilidad, se conectan varios termopares en serie. Esta configuración se llama termopila, la cual tiene mayor sensibilidad y puede ser usada para medir radiación solar.

El piranómetro es un tipo de termopila que mide la radiación solar global de toda la bóveda celeste. Estos dispositivos son muy versátiles ya que son capaces de medir la radiación global, además de la radiación difusa incorporando un disco que

bloquea la radiación directa proveniente del Sol. En la Figura 2.6.1 se puede observar un piranómetro dispuesto para la medida de la radiación solar global (a) y otro dispuesto para medir únicamente la radiación difusa con el disco (b).



Figura 2.6.1. a) Piranómetro con disco para medir radiación difusa. b) Piranómetro sin disco para medir radiación global

Por otra parte, el pirheliómetro (Figura 2.6.2) es una termopila también, pero se diferencia del piranómetro en que cuenta con un ángulo de visión restringido. El pirheliómetro se usa para medir la radiación solar directa, apuntando directamente hacia el Sol. El detector se sitúa en la base de un tubo largo, lo que permite restringir la vista del cielo a un ángulo más pequeño, de aproximadamente 5° , que corresponde con aproximadamente 10 veces el tamaño del disco solar. Este dispositivo cuenta con un sistema de seguimiento del Sol, con dos motores, uno para la altitud y otro para el azimut. Con todo esto, se consigue una medida más precisa.



Figura 2.6.2. Pirheliómetro

Como se ha comentado anteriormente, algunas aplicaciones en energía solar requieren una medida de la radiación solar en diferentes rangos espectrales. Para

ello, se utilizan espectrorradiómetros. Estos dispositivos están formados por un sistema óptico capaz de medir la irradiancia en cada longitud de onda ($\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$). Consisten en un monocromador, un detector, una esfera integradora y un sistema de adquisición de datos. Son capaces de medir radiación solar en el espectro de 280 a 2500 nm.

CAPÍTULO 3.

SENSORES DE MEDIDA DE ALTA IRRADIANCIA

En este capítulo se presentan los diferentes tipos de sensores utilizados para medida de alta irradiancia. Se presenta el método de calibración empleado en la PSA, así como el estudio de las fuentes de error del mismo. Por último, se comparan los sensores en base a las intercomparaciones que se han realizado entre ellos.

“Si las disposiciones actuales de la sociedad no permiten el libre desarrollo de las mujeres, entonces la sociedad debe ser remodelada”

Elizabeth Blackwell (1821-1910)

(Primera mujer en ejercer la medicina en la historia)

3.1. MEDIDA DE IRRADIANCIA

En muchas aplicaciones relativas a la energía solar, tanto de fotovoltaica como de CSP (*Concentrated Solar Power*), es igual de necesario e importante tener medidas de la temperatura, así como de la distribución de irradiancia que incide sobre la superficie del receptor solar. Sin embargo, muchos de los métodos utilizados para medir irradiancia se basan en la medida de la temperatura en la superficie o cerca de la superficie [52]. Estos métodos son indirectos, y cuentan con un problema añadido, debido a que hay un retraso entre la irradiancia que incide sobre la superficie y la temperatura que alcanza el receptor; este retraso puede ser de varios minutos, dependiendo del material y geometría del receptor, el fluido de transferencia de calor, las condiciones de operación, entre otros [53], [54]. La temperatura en el receptor es una consecuencia de la irradiancia incidente sobre éste, por lo que al medir la temperatura, ésta tiene un retraso respecto la irradiancia que se infiere a partir de la temperatura. Esto pone de manifiesto la necesidad del desarrollo de un método de medida de irradiancia óptimo.

En el caso de las centrales de receptor central, la evaluación de sus receptores depende del conocimiento de la potencia incidente en la apertura del receptor. La eficiencia de un receptor se obtiene mediante la relación entre la potencia térmica generada en el receptor y la potencia solar concentrada que incide sobre su superficie. Es por ello que la medida de la distribución de irradiancia es tan necesaria en las centrales de torre.

Existen distintos métodos para medir la distribución de irradiancia en los receptores, como se verá en el Capítulo 4, en los que el componente principal es un sensor que mide la radiación solar. Estos sensores se pueden clasificar en 4 tipos: termomecánicos, calorimétricos, termoelectricos y fotoelectricos [33]. Los más comunes son los termoelectricos y los fotoelectricos. Los sensores termoelectricos proporcionan una señal proporcional al aumento de temperatura resultante de la absorción de la radiación que llega a la superficie del detector [51]. Para aumentar su absorción, se fabrican con materiales que tengan altas absorptancias, o se les aplica un revestimiento con una pintura de alta absorptancia. En general, los detectores térmicos se caracterizan por tener poca sensibilidad, sin embargo, son recomendables cuando se trabaja con niveles de irradiancia altos.

3.2. RADIÓMETROS Y CALORÍMETROS

Los sensores termoelectricos están compuestos por termopares unidos en serie, llamado termopila. Un termopar es un dispositivo compuesto por dos hilos metálicos de diferentes materiales, unidos en uno de los extremos. A esa unión se le llama junta caliente, y es la parte expuesta del termopar sobre la cual incide la irradiancia que se

desea medir. En el otro extremo, se sitúa la junta fría, la cual suele estar refrigerada para conseguir una temperatura constante. La diferencia de temperatura entre las dos juntas, genera un voltaje. A esto se le llama efecto Seebeck, y los termopares y termopilas se basan en él. En este efecto dos metales diferentes, dos semiconductores o un metal y un semiconductor, a diferentes temperaturas generan un voltaje proporcional a la diferencia de temperaturas entre ellos. Los termopares individuales son efectivos a la hora de medir temperatura, como por ejemplo en un termómetro, pero debido a su baja sensibilidad no sirven para medir radiación electromagnética. Es por ello que se utilizan termopares unidos en serie, para aumentar su sensibilidad. Hay dos configuraciones para las termopilas, una de ellas consiste en una cadena de termopares conectados por cables, mientras que la otra configuración consiste en la deposición de una fina lámina sobre un sustrato en el vacío. En la Figura 3.2.1 se puede observar el esquema de una termopila donde los termopares están conectados en serie. Las juntas calientes son las expuestas al calor, causando así una diferencia de temperatura entre ellas y las juntas frías, generando un voltaje.

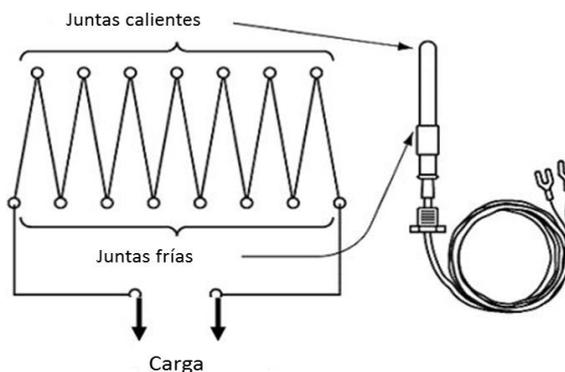


Figura 3.2.1. Esquema termopila

El voltaje obtenido por una termopila se puede calcular sabiendo el número de uniones, N , el coeficiente Seebeck o sensibilidad termoeléctrica del material, S_T (sus unidades son $V K^{-1}$), y la diferencia de temperaturas entre los materiales [52]:

$$V_{out} = N S_T (T_1 - T_2) \quad \text{Ecuación 3.2.1}$$

Se pueden usar distintos pares de conductores, como el cobre-constantán (termopar tipo T), para el conjunto de termopares que forman la termopila. Sin embargo, para la salida del voltaje, es necesario que los cables sean del mismo material, para que no se creen uniones adicionales de termopares. Es por esto que en la Ecuación 3.2.1, sólo se contempla un coeficiente de Seebeck de un material.

El término radiómetro se usa para hacer referencia a los instrumentos que miden potencia radiante (W) por medio de la señal eléctrica generada. Los radiómetros pueden ser de tipo termoeléctrico o fotoeléctrico, según sea el tipo de transductor. Cuando son destinados a medir en el mismo rango de longitudes de onda que es capaz de ver el ojo

humano, se llaman fotómetros. Por otra parte, hay otros radiómetros que miden a través de varios rangos espectrales, llamados espectralradiómetros. Es importante conocer la respuesta espectral de cada dispositivo, ya que, si incide irradiancia con longitudes de onda fuera del rango espectral que es capaz de medir el dispositivo, ésta no será medida, y los resultados sólo proporcionarán una parte de la irradiancia incidente. Los radiómetros de tipo termoeléctrico están compuestos por termopares y termopilas, como se verá a continuación, en los Apartados 3.3 - 3.6.

Otro tipo de dispositivos que miden la potencia radiante son los calorímetros. Los calorímetros absorben la irradiancia en una cavidad de cuerpo negro, alrededor de la cual circula un fluido de transferencia de calor. El fluido utilizado normalmente es agua. Para calcular la potencia transmitida al fluido, se mide el caudal de fluido y se efectúa un balance térmico. Los dos puntos críticos del calorímetro son la exactitud de la medida de temperatura y del caudal de fluido, así como el diseño de la cavidad, las cuales determinarán la precisión del dispositivo. La absorptancia del sensor depende de la forma de la cavidad y de su recubrimiento, que debe adaptarse a la distribución angular y espectral de la irradiancia incidente sobre ella para optimizar la medida. Además, el balance térmico depende de la cantidad de potencia transmitida al fluido, teniendo en cuenta la pérdida de energía producida por convección con la cubierta. Tanto el área de apertura del dispositivo como la capacidad calorífica del fluido deben ser conocidas para poder alcanzar un diseño óptimo del sensor. [55], [56]

Hay distintos tipos de radiómetros y calorímetros en la industria. Los radiómetros Gardon y Kendall son comerciales y son apropiados para aplicaciones donde interviene energía solar concentrada. Además, también se usan en los simuladores solares [57], [58]. Según el tipo de aplicación, si se requiere una respuesta rápida, también son apropiados los HFM (Heat Flux Microsensor), compuestos por una termopila. Por otro lado, los calorímetros, como el Suncatch, son recomendables para niveles altos de irradiancia, ya que su exactitud depende inversamente de la irradiancia incidente, por lo que no son recomendables para bajos niveles de irradiancia [19].

3.3. RADIÓMETRO GARDON

En 1952, Gardon publicó un artículo en el que describía el radiómetro que había diseñado. Según el artículo, el nuevo instrumento debía de poder adaptarse a la medida de la intensidad de la radiación térmica en el rango de 42-4200 kW m⁻² (1-100 cal cm⁻² s⁻¹). Debía poder medir intensidad de manera directa, así como tener una respuesta de tiempo corta y que fuera posible registrar la señal sin necesidad de amplificarla [59]. Por último, debía de ser robusto mecánicamente. La diferencia que Gardon estableció entre los radiómetros que había hasta la fecha y el nuevo radiómetro consistía en la alta conductividad entre la superficie donde se absorbe la radiación y el disipador de calor. Mientras que en las termopilas la mayor parte de la energía radiante absorbida es disipada por sus alrededores de forma radiativa y convectiva, en el nuevo

radiómetro la energía absorbida es transferida a un disipador de calor (fluido de refrigeración) a través de un buen conductor térmico sólido (cobre) [59]. Este nuevo radiómetro se ha convertido en un radiómetro ampliamente utilizado en la actualidad (Figura 3.3.1).

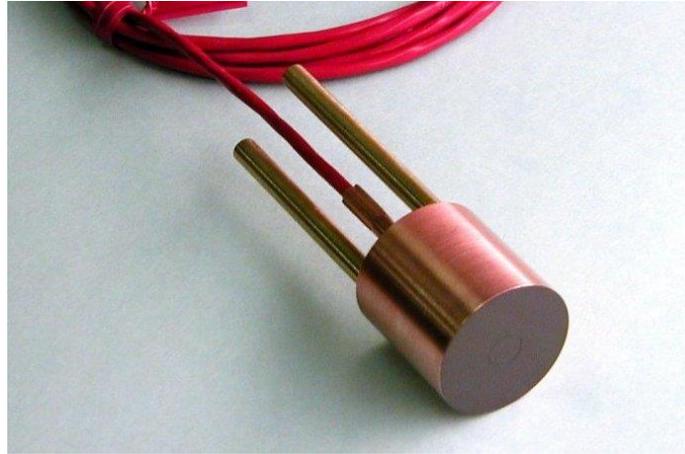


Figura 3.3.1. Radiómetro Gardon

En este radiómetro, la radiación incide sobre una superficie negra que contiene una lámina delgada y circular de constantán. La circunferencia de la lámina de constantán está rodeada y fijada a un bloque de cobre, tal como se puede observar en la Figura 3.3.2 [60]. La energía que absorbe esta lámina es transmitida radialmente hacia el bloque de cobre, que actúa como un sumidero que se encuentra a temperatura constante gracias a su refrigeración por agua [59]. Debido a esta transmisión de energía, se crea una diferencia de temperatura entre el centro de la lámina y su periferia, que genera un voltaje por efecto Seebeck, comentado en el Apartado 3.2. El bloque de cobre actúa como terminal negativo para la salida del termopar, y el terminal positivo se obtiene al unir un cable de cobre al centro de la lámina de constantán. Es necesario que para la salida del termopar los cables sean del mismo material, tal como se ha explicado en el Apartado 3.2, en este caso de cobre. El voltaje generado puede ser relacionado con la intensidad de la potencia radiante incidente sobre la lámina de constantán.

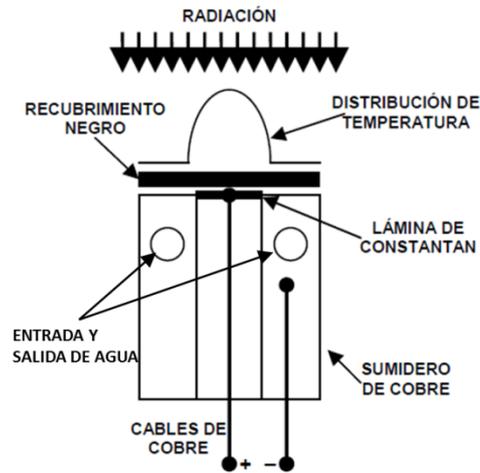


Figura 3.3.2. Esquema del radiómetro Gardon

En los radiómetros Gardon construidos actualmente, se ha conseguido una exactitud en la medida de irradiancia del $\pm 3\%$. Además, se fabrican distintos modelos según el rango de irradiancias que se desean medir, pudiendo medir desde el rango de $0-50 \text{ kW m}^{-2}$, hasta el rango de $0-50 \text{ MW m}^{-2}$ [60]. La lámina de constantán se debe modificar según el rango de irradiancia que se quiera medir, siguiendo la Ecuación 3.3.1 [60]:

$$\frac{\Delta V}{E_{FS}} = 4.37 \cdot 10^{-7} \frac{R^2}{S} \left(\frac{mV}{W m^{-2}} \right) \quad \text{Ecuación 3.3.1}$$

Dónde ΔV es la FEM de salida a fondo de escala en mV, E_{FS} es la irradiancia a fondo de escala en $W m^{-2}$, R es el radio de la lámina de constantán en metros, y S es la sección de la lámina de constantán en metros. [60]

El rango de voltaje en el cual mide el sensor es de $0-10 \text{ mV}$, para todos los rangos de irradiancia. Por encima de 10 mV , la salida del sensor no es lineal, por lo que las calibraciones que se le aplican a estos radiómetros no son válidas, como se explicará a continuación (Apartado 3.3.1). Además, se ha conseguido que el radiómetro soporte grandes periodos de tiempo expuesto a altas irradiancias, que tenga una alta sensibilidad y que su tiempo de respuesta sea de menos de 1 segundo. Para aumentar la sensibilidad del sensor, su superficie se pinta con un recubrimiento negro con una alta absorción. Este recubrimiento suele ser grafito coloidal o Zynolyte®. Se usa el grafito coloidal en las aplicaciones en las que los niveles de irradiancia son más altos, mientras que el Zynolyte® se usa para aplicaciones donde el rango de irradiancias sea menor que 3500 kW m^{-2} .

3.3.1. CALIBRACIÓN DE RADIÓMETROS

En el pasado, un reducido número de empresas (Thermogage, HycCal,...) han fabricado los radiómetros tipo Gardon. En la actualidad, varias empresas (Vatell, Medtherm, Hukseflux, Captec...) fabrican estos radiómetros. Son estas mismas empresas las que efectúan la calibración de los sensores en sus propias instalaciones. Actualmente, se está haciendo un esfuerzo por unificar los métodos de calibración, ya que no hay ningún método estandarizado para calibrar este tipo de sensores.

El procedimiento de calibración más extendido consiste en el uso de un cuerpo negro de doble cavidad, formado por un tubo de grafito cilíndrico con una partición cerrada en el centro. En el interior del tubo se puede medir la temperatura a través de unos de los orificios con un pirómetro. En una de las cavidades se mide la temperatura con el pirómetro, calibrado con un cuerpo negro de referencia. Cuando la temperatura alcanza los 850 °C y se estabiliza, se introduce en la otra cavidad el radiómetro que se pretende calibrar (patrón primario). Al introducir el radiómetro en la cavidad, hay un pico debido a la convección por el rápido paso por la cavidad, después del cual, la señal de irradiancia se estabiliza, momento en el cual se efectúa la medida. Una vez hecha esta medida, la cavidad empieza a enfriarse y se retira el radiómetro [61]. Según la ley de Stefan-Boltzmann (Ecuación 2.3.2.3), la irradiancia en la superficie delantera del sensor es de 90.2 kW m^{-2} . Además, se supone que en ambas cavidades la temperatura es la misma, de manera que se obtiene la irradiancia calculada con la ley de Stefan-Boltzmann, y se relaciona con el voltaje generado por el radiómetro que ha sido medida. La constante de calibración que se obtiene posee una incertidumbre inferior al $\pm 2 \%$ [60].

Este procedimiento proporciona la calibración para un radiómetro que se usa de referencia, denominado radiómetro primario, el cual sirve para calibrar otros radiómetros (secundarios). Para ello, se usa un banco Thermogage de 24 kW, por el cual circula una corriente eléctrica, que calienta una pastilla de grafito, que irradia hacia ambos lados simétricamente por efecto Joule (Figura 3.3.1.1). El radiómetro primario y el radiómetro secundario, es decir, el que se desea calibrar, se sitúan uno a cada lado de la pastilla de grafito, a la misma distancia, mientras se aumenta la corriente que circula por la pastilla. El radiómetro primario determina el valor de la irradiancia, y en el radiómetro secundario se mide el voltaje generado. Con estos valores de irradiancia incidente frente al voltaje generado, se obtiene la curva de calibración del radiómetro secundario. Sin embargo, debido a este procedimiento, la constante de calibración de los radiómetros que se calibran a partir del radiómetro primario, obtienen una incertidumbre mayor que la del primario, que será del orden de $\pm 3 \%$ [60]. Este procedimiento de calibración se realiza actualmente en el Laboratorio de Radiometría de la PSA.

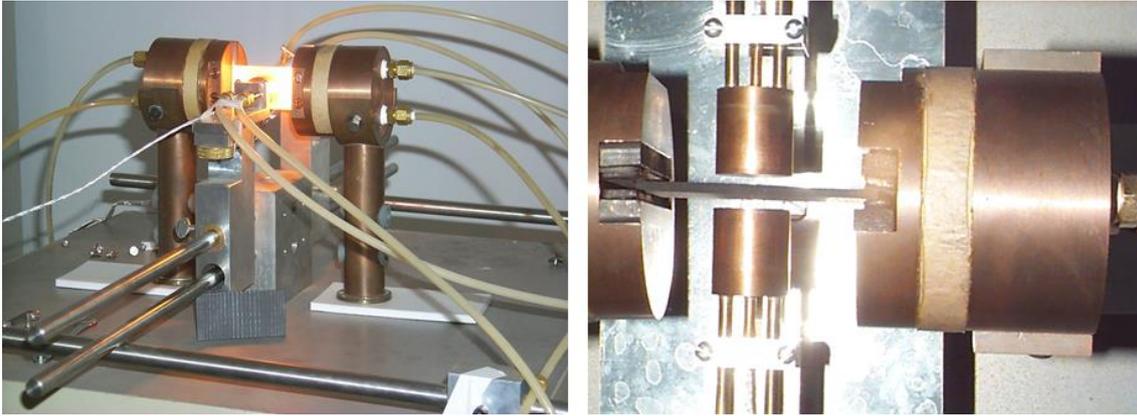


Figura 3.3.1.1. Banco Thermogage con radiómetro primario y secundario durante la calibración. Laboratorio de Radiometría de la PSA

En su origen, los radiómetros tipo Gardon estaban relacionados con diagnóstico de plasma para la fusión y en la investigación sobre la combustión. Estas aplicaciones se realizan en unos rangos del espectro electromagnético diferentes a los rangos en los que se encuentra la radiación solar. Es por ello que la forma de calibrar los radiómetros es objeto de críticas, debido a que se calibran en un rango de longitudes de onda diferente al de la radiación solar. Para resolver este punto crítico en la calibración de radiómetros, cuando se van a utilizar en aplicaciones solares, se cuantifica la diferencia ocasionada por los diferentes rangos espectrales y se efectúa una corrección a la calibración dada [60], [62].

3.3.2. ERROR SISTEMÁTICO Y CORRECCIÓN EN LA CALIBRACIÓN DE RADIÓMETROS

La parte de los radiómetros expuesta a irradiancia es pintada con un tipo de pintura negra que tiene alta absorptancia y es resistente a altos niveles de irradiancia. Como se ha comentado en el Apartado 3.3, las dos pinturas usualmente utilizadas son Zynolyte ® y grafito coloidal. La absorptancia de estas dos pinturas no es constante a lo largo de todo el espectro de longitudes de onda, sino que varía en función de la longitud de onda. Por tanto, el recubrimiento que se aplica sobre la superficie expuesta de los sensores introduce un error sistemático en la calibración del sensor, debido a la diferencia en la potencia absorbida por los recubrimientos por su selectividad espectral. Para tratar de evitar errores sistemáticos debido a los recubrimientos, es importante que se calibren los radiómetros recubiertos con la misma pintura (Figura 3.3.1.1).

Otra posible fuente de error en las medidas es debida al hecho de que la calibración de los radiómetros se realiza en condiciones hemisféricas y las medidas posteriores podrían realizarse con una distribución angular de la radiación más reducida. La respuesta angular de los radiómetros Gardon es constante para ángulos menores de 35°. Para ángulos mayores, la respuesta de los sensores es algo menor. Además, algunos

modelos de este tipo de radiómetros cuentan con una ventana de cuarzo, la cual limita el ángulo de visión del radiómetro hasta $\pm 70^\circ$, debido a la restricción geométrica producida por el soporte de la ventana [63]. Esto lleva a sobrestimar la radiación solar, cometiendo un error sistemático de + 5.3 % en casos sin ventana, y de hasta un + 27 % en presencia de ventana de cuarzo [63]. El objetivo de estas ventanas adicionales es reducir la influencia de posibles corrientes convectivas durante las medidas, pero ha quedado claro [63] que esta solución no es recomendable ya que incrementa la incertidumbre de forma ostensible.

El error sistemático más estudiado en la literatura es el error producido por la dependencia de la absorptancia de las pinturas utilizadas con la longitud de onda. En la Figura 3.3.2.1 se representan las absorptancias de los dos recubrimientos utilizados, Zynolyte® y grafito coloidal (Electrodag® 154) [62], además de la radiancia emitida por un cuerpo negro a 850 °C y la radiancia emitida por el Sol, considerado un cuerpo negro a 5800 K.

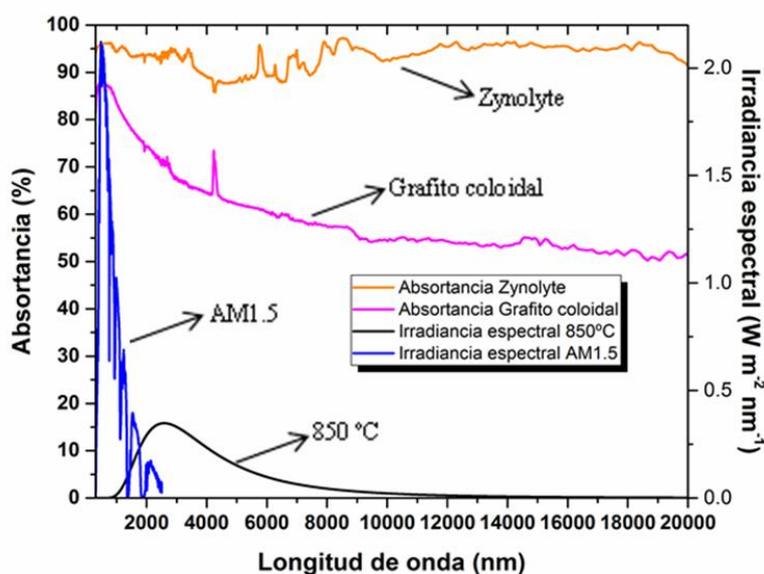


Figura 3.3.2.1. Absortancias del Zynolyte® y del grafito coloidal, irradiancia de cuerpo negro a 850 °C e irradiancia solar AM 1.5 en función de la longitud de onda

Si consideramos un cuerpo negro a una cierta temperatura, T , la radiancia espectral que emite es $E_{b\lambda}$, la potencia absorbida por la superficie del sensor, P_b , para una potencia incidente P_{in} , viene dada por:

$$P_b = A \int_0^{\infty} E_{b\lambda} \alpha_{\lambda} d\lambda \approx A \int_{300}^{20000} E_{b\lambda} \alpha_{\lambda} d\lambda \quad \text{Ecuación 3.3.2.1}$$

Donde A es el área sensible del sensor, $E_{b\lambda}$ se obtiene a partir de la ley de Planck y α_{λ} es la absorptancia hemisférica espectral del recubrimiento.

En CSP, se usan heliostatos para concentrar la radiación solar, los cuales modifican la Ecuación 3.3.2.1 de la siguiente manera:

$$P_s = A \int_0^{\infty} G_{b\lambda} \alpha_{\lambda} \rho_{\lambda} d\lambda \approx A \int_{300}^{20000} G_{b\lambda} \alpha_{\lambda} \rho_{\lambda} d\lambda \quad \text{Ecuación 3.3.2.2}$$

Donde P_s es la potencia de la radiación solar absorbida por la superficie del sensor, $G_{b\lambda}$ es la irradiancia solar espectral directa, y ρ_{λ} es la reflectancia espectral del heliostato.

Por lo tanto, el error relativo entre P_s y P_b se determina:

$$\Delta P = \frac{P_s - P_b}{P_b} \quad \text{Ecuación 3.3.2.3}$$

Según el tipo de pintura utilizado, ΔP varía significativamente (Tabla 3.3.2.1). Para el caso del uso de Zynolyte ® como recubrimiento, se obtiene un error relativo ΔP de 3.6 %, con una desviación estándar de 0.1 %. Sin embargo, para el grafito coloidal los valores aumentan hasta un error ΔP de 27.9 %, con una desviación estándar del 0.7 % [60]–[62]. Estos errores promedio se obtuvieron con tres muestras de grafito coloidal, tres muestras de Zynolyte, una muestra de espejo y distintas masas de aire AM [62].

	ΔP (%)	Desviación estándar (%)
Zynolyte ®	3.6	0.1
Grafito coloidal	27.9	0.7

Tabla 3.3.2.1. Error relativo y desviación estándar obtenido para distintos recubrimientos al medir radiación solar

Al ser esta incertidumbre de carácter sistemático, es posible corregirla. Para corregir las constantes de calibración que se obtienen en el laboratorio al calibrar los radiómetros, se hace un estudio que relaciona la radiancia del cuerpo negro con el voltaje obtenido por el sensor. Esta corrección consiste en multiplicar la constante de calibración que proporciona la empresa que calibra el sensor por un valor que depende del tipo de pintura que tenga el radiómetro [60]. La manera de relacionar la irradiancia, E_b , con la constante de calibración, C_b , y el voltaje, V_b , es la siguiente:

$$E_b = C_b V_b = C_b K P_b \quad \text{Ecuación 3.3.2.4}$$

Donde K es la constante de proporcionalidad entre el voltaje y la densidad de potencia absorbida P_b .

El sensor bajo radiación solar absorbe la misma cantidad de radiancia que un cuerpo negro, añadiéndole el error sistemático que se ha comentado anteriormente ($P_b (1 + \Delta P)$). El error sistemático depende de si el recubrimiento es Zynolyte ®, en

cuyo caso es un error del 3.6 %, o de si es grafito coloidal, cuyo error es de 27.9 % (Tabla 3.3.2.1). Esto se puede expresar como:

$$E_s = C_s V_s = C_s K P_b (1 + \Delta P) \quad \text{Ecuación 3.3.2.5}$$

Si se supone un mismo valor de radiancia de origen solar, E_s , y de cuerpo negro, E_b , se obtiene que a partir de las Ecuaciones 3.3.2.4 y 3.3.2.5:

$$E_b = E_s$$

$$C_s = \frac{C_b}{1 + \Delta P} \quad \text{Ecuación 3.3.2.6}$$

Sustituyendo los valores de ΔP por los valores dados en la Tabla 3.3.2.1, se obtienen los siguientes coeficientes de corrección para el Zynolyte ® y para el grafito coloidal [59], [62]:

	Factor Corrección (Zynolyte)	Factor Corrección (Grafito coloidal)
Coefficiente corrección	0.965	0.782
Desviación estándar	0.001	0.004

Tabla 3.3.2.2. Coeficientes de corrección para las constantes de calibración según el tipo de recubrimiento

Por lo tanto, las constantes de calibración dadas por los fabricantes de los radiómetros, deben ser corregidas cuando se trabaje bajo radiación solar, dependiendo de la pintura que se use para recubrir la superficie del sensor. Para el caso del Zynolyte ®, la corrección se efectúa multiplicando la constante de calibración por su coeficiente, $0.965 C_b$, y para el caso del grafito coloidal será $0.782 C_b$.

$$C_s = 0.965 C_b \text{ (Zynolyte ®)} \quad \text{Ecuación 3.3.2.7}$$

$$C_s = 0.782 C_b \text{ (Grafito coloidal)} \quad \text{Ecuación 3.3.2.8}$$

Como se ha visto en este apartado, las calibraciones que efectúan las empresas que fabrican los radiómetros, tienen un error sistemático que debe ser corregido cuando se usen en aplicaciones en condiciones de radiación solar. Al usarlos bajo radiación solar, este error sistemático se traduce en una sobrestimación de la radiación solar. En el caso del recubrimiento con Zynolyte ®, la sobrestimación es de un 3.6 %, y la constante de calibración proporcionada por el fabricante debe ser corregida multiplicándose por 0.965. En el caso de que la pintura sea grafito coloidal, la sobrestimación de la irradiancia corresponde con un 27.9 %, y su constante de calibración debe multiplicarse por 0.782 (Tabla 3.3.2.1 y Tabla 3.3.2.2). Con estas correcciones para los radiómetros, se efectuará una medida de irradiancia bajo condiciones de radiación solar correcta y adecuada.

3.3.3. CALIBRACIÓN DE RADIÓMETROS EN EL HORNO SOLAR DE LA PSA

Una vez abordado de forma teórica el error sistemático producido por los recubrimientos de los radiómetros, es necesario verificar experimentalmente bajo condiciones de radiación solar la evidencia de dicho error. Cuando los radiómetros son calibrados, se calibran respecto a un cuerpo negro a 850 °C, como se ha visto en el Apartado 3.3.1. La radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro a 850 °C es diferente a la radiación emitida por el Sol, considerándolo un cuerpo negro a 5800 K. Esta diferencia se puede apreciar en la Figura 3.3.2.1, donde aparece la radiancia emitida por un cuerpo negro a 850 °C y la radiancia emitida por el Sol que llega a la superficie terrestre. La radiancia que emite el cuerpo negro a menor temperatura se extiende en rangos de longitudes de onda mayores. La radiación solar se concentra sobre todo entre 300 y 2500 nm, mientras que la del cuerpo negro a 850 °C se extiende hasta más de 10000 nm. Estas diferencias hacen que al calibrar un radiómetro con el banco Thermogage, a partir del cuerpo negro a 850 °C, se esté calibrando para ese rango de longitudes de ondas, diferente al rango del espectro solar. La selectividad espectral de los recubrimientos o pinturas utilizados en los radiómetros causan la incertidumbre mencionada. Para verificar experimentalmente este error sistemático cometido en las calibraciones de los radiómetros, en la PSA se hicieron unos ensayos en el horno solar con el fin de calibrar los radiómetros en condiciones de radiación solar.

Los ensayos realizados en el horno de la PSA para calibrar radiómetros, se basaron en la técnica de calorimetría [61], [64]. La calorimetría se basa en la medida del calor transferido a un fluido. Como el 95 % de la parte frontal del sensor Gardon es cobre, un metal con alta conductividad térmica, eso hace que pueda usarse como un calorímetro, ya que su tiempo de respuesta térmico es alrededor de 1 s [60], [64]. Este bajo tiempo de respuesta permite que la potencia absorbida por el sensor se transfiera rápidamente al agua que actúa como refrigerante. Esta rápida transferencia permite estudiar las variaciones de potencia sobre el sensor. La potencia que absorbe el fluido es la parte de potencia que incide menos las pérdidas. El cuerpo del sensor transfiere el calor al agua, produciendo un aumento en la temperatura, observando así una diferencia de temperaturas entre la temperatura de entrada del fluido y la de salida, que estará a mayor temperatura. La potencia que absorbe el agua sigue la Ecuación 3.3.3.1.

$$P = \dot{V} \int_{T_{in}}^{T_{out}} \rho(T) c_p(T) dT \quad \text{Ecuación 3.3.3.1}$$

Donde \dot{V} es el flujo de volumen del fluido, ρ es la densidad y c_p es el calor específico del fluido. T_{in} y T_{out} son las temperaturas de entrada y salida del fluido [61], [64]. En este caso, el fluido que refrigera el radiómetro es agua. Cuando la diferencia entre las temperaturas de entrada y de salida es pequeña, de pocos grados, la Ecuación

3.3.3.1 se puede simplificar, tomando T_{media} como la media entre la temperatura de entrada y de salida:

$$P = \dot{V} \rho(T_{media}) c_p(T_{media}) \Delta T \quad \text{Ecuación 3.3.3.2}$$

A partir de estas ecuaciones, se observa que, para obtener la potencia absorbida por el fluido refrigerante, es necesario conocer el caudal volumétrico, la densidad del fluido que se está utilizando, junto con su calor específico, además de saber las temperaturas de entrada y de salida de dicho fluido.

La cara delantera del radiómetro, sobre la cual incide la irradiancia, absorbe una cantidad de potencia que viene dada por la Ecuación 3.3.3.3:

$$P_{frontal} = \frac{P - P_{ais}}{A} \quad \text{Ecuación 3.3.3.3}$$

Donde P_{ais} es la potencia del aislamiento del calorímetro, es decir, las pérdidas por conducción, y A es el área de la parte delantera del sensor. Con el fin de reducir las pérdidas durante el ensayo, el radiómetro se aísla térmicamente. Para aislarlo, se introduce en un confinamiento de acero inoxidable, con alta reflectancia y baja conductividad térmica, exponiendo únicamente la parte frontal de la superficie del sensor. El interior de la caja contiene lana de alúmina, que también tiene una baja conductividad térmica.

Si asumimos que la radiación incidente es radiación solar, se puede calcular la irradiancia que llega a la parte frontal del sensor, teniendo en cuenta la absortancia solar hemisférica del recubrimiento usado sobre el sensor, α :

$$I = \frac{P}{\alpha} \quad \text{Ecuación 3.3.3.4}$$

Para obtener la absortancia solar hemisférica se utiliza la Ecuación 3.3.3.5 dónde $G_{b\lambda}$ es la radiación solar directa, ρ_λ es la reflectancia espectral del heliostato, y α_λ es la absortancia espectral hemisférica del recubrimiento.

$$\alpha = \frac{\int_{300}^{2500} G_{b\lambda} \rho_\lambda \alpha_\lambda d\lambda}{\int_{300}^{2500} G_{b\lambda} \rho_\lambda d\lambda} \quad \text{Ecuación 3.3.3.5}$$

Las absortancias solares hemisféricas del Zynolyte ® y del grafito coloidal, usando la Ecuación 3.3.3.5 son 95.4 % y 84.7 % respectivamente [61], [64].

Para medir la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del fluido refrigerante, agua en este caso, se usaron dos termopares en modo diferencial. Con esto, se consigue disminuir la incertidumbre que puede producir el uso de dos termopares por

separado. Además, también se usaron termopares para medir la temperatura del aislamiento. Los termopares escogidos son los de tipo T, ya que poseen una buena resistencia a la corrosión, una tolerancia en fabricación inferior a otros tipos de termopares, y tienen una buena repetibilidad.

El método seguido durante los ensayos en el horno solar de la PSA consiste en situar el sensor en el foco, e ir midiendo diferentes niveles de irradiancia. Para ello, se abre la persiana del horno, o *shutter*, en distintas posiciones, para tener diferentes niveles de irradiancia. Además, una placa de alúmina se sitúa delante del sensor mientras no se está midiendo. Al abrir el *shutter* del horno, se espera durante un tiempo hasta que el sistema se estabiliza. Una vez el sistema está estabilizado, la placa de alúmina se quita de delante del sensor durante unos 5 s, mientras que el nivel de irradiancia se estabiliza en el sensor. Durante ese breve tiempo queda asegurado que toda la potencia absorbida por el radiómetro es transferida al agua sin pérdidas. Mientras, se efectúa la calorimetría, y a continuación se vuelve a situar la placa delante del sensor para evitar la incidencia de radiación sobre el sensor. Este proceso es repetido hasta que se obtienen suficientes datos para realizar la calibración. El valor máximo de irradiancia se limitó hasta 1300 kW m^{-2} .

La irradiancia se calcula a tiempo real durante el experimento, a partir del balance térmico de las Ecuación 3.3.3.2, Ecuación 3.3.3.3 y Ecuación 3.3.3.4, junto con los datos adquiridos. A su vez, se guardan los valores de voltaje proporcionados por el sensor, a partir de los cuales se obtiene el nivel de irradiancia, con la calibración efectuada a partir de cuerpo negro.

Para obtener la calibración del radiómetro, se calcula la pendiente de la recta que relaciona la irradiancia obtenida por calorimetría frente al voltaje proporcionado por el radiómetro. Esta pendiente es la constante de calibración para radiación solar. El error con el que se obtuvo la constante de calibración era menor del 2 % [60]. La desviación entre las constantes de calibración obtenidas por balance térmico y las constantes de calibración suministradas por el fabricante son de $(5 \pm 3) \%$ si se usa Zynolyte ® y $(30 \pm 4) \%$ si se usa grafito coloidal [60].

	Desviación entre calibraciones (%)	Incertidumbre (%)
Zynolyte ®	5	3
Grafito coloidal	30	4

Tabla 3.3.3.1. Desviación obtenida en la constante de calibración entre el método calorimétrico y el suministrado por el fabricante.

Los resultados de este experimento confirmaron los errores sistemáticos predichos mediante la calibración con un cuerpo negro, dados en el Apartado 3.3.1 y 3.3.2. En el caso del Zynolyte ®, la medida del radiómetro sobreestima un 3.6 % la irradiancia solar, mientras que si se usa grafito coloidal, la medida se sobreestima un 27.9 %, que concuerdan con los valores obtenidos bajo radiación solar en el horno, dados en la Tabla 3.3.3.1. Además, se obtuvo la constante de calibración de los

radiómetros con una incertidumbre inferior a la que proporcionaban los fabricantes. Sin embargo, este procedimiento de calibración en el horno solar no se consideró como método usual de calibración, debido a su complejidad y elevado grado de elaboración.

3.4. RADIÓMETRO SCHMIDT-BOELTER

En 1925, Schmidt patentó un instrumento para medir irradiancia [65], basado en la medida de diferencia de temperaturas con termopares. Estos termopares eran de cobre-constantán, al igual que en los radiómetros Gardon, y se unían a otros termopares iguales para formar una termopila, pudiendo así medir la fuerza electromotriz (o voltaje inducido). Más tarde, en 2001, la empresa Vatel Corporation patentó un radiómetro refrigerado por agua [66], a partir de la patente de Schmidt. Este nuevo radiómetro tenía la misma apariencia exterior que el radiómetro Gardon, pero usa una tecnología diferente en el sensor. En principio, el principal propósito de este tipo de radiómetros era el estudio de la reacción y la resistencia al fuego, y se puede aplicar en pruebas de inflamabilidad y de cámaras de humo [67], [68]. Aunque este tipo de radiómetros se suele usar en los laboratorios de pruebas de incendio, es posible usarlo también en el contexto de la energía solar y de la energía nuclear.

La principal diferencia y característica de este sensor, consiste en que el cable de constantán se envuelve alrededor de la capa de resistencia térmica, también llamada oblea. La oblea está envuelta en espiral por 35 a 40 vueltas de cable de constantán, con un diámetro de 0.051 mm [66]. A continuación, la oblea es sumergida por la mitad en una solución de cobre, para que el cobre se deposite sobre los cables de constantán. Se obtienen así termopares tipo T, de cobre-constantán, a cada lado de la oblea. Esta oblea se adhiere a una carcasa de aluminio anodizado. Esta anodización del aluminio consiste en un proceso mediante el cual, el aluminio, se recubre con una capa natural de óxido, con el fin de protegerlo, aumentando su resistencia y su durabilidad. De esta manera, la capa de resistencia térmica u oblea, se cubre por óxido de aluminio, conocido como alúmina. Además, los sensores Schmidt-Boelter son recubiertos con pintura negra resistente a altas temperaturas [69]. El esquema del interior de estos sensores puede apreciarse en la Figura 3.4.1, donde se ve que la parte externa es el cable de constantán enrollado, y la parte interna está compuesta por el termopar.

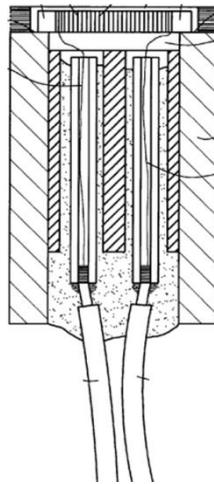


Figura 3.4.1. Vista interna del radiómetro Schmidt-Boelter

Al incidir radiación, el calor circula a través de la parte superior de la oblea hasta la parte inferior, creando una diferencia de temperatura. Esta diferencia de temperatura origina un voltaje que puede ser medido, y es proporcional a la irradiancia incidente.

Los sensores Schmidt-Boelter actuales son capaces de medir radiación en el rango espectral de 200-50000 nm. El recubrimiento negro absorbe la irradiancia incidente, que se convierte en calor, el cual circula a través de la termopila interna, hasta la envoltura de metal del sensor. Esta envoltura es un cuerpo de metal, que actúa como disipador de calor, ya que está refrigerada con agua.

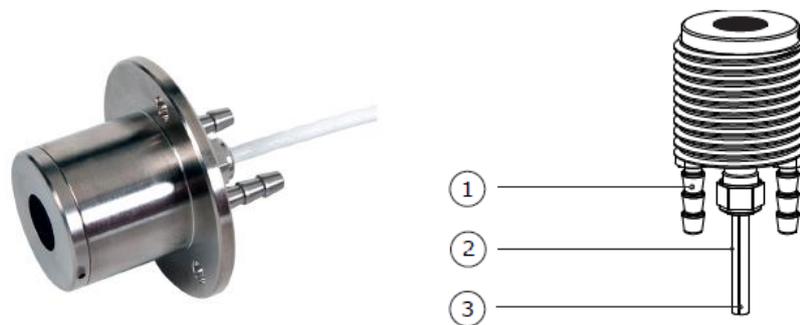


Figura 3.4.2. Radiómetro Schmidt-Boelter

En las Figuras Figura 3.4.1 y Figura 3.4.2 se puede apreciar cómo es un radiómetro Schmidt-Boelter. En la Figura 3.4.2, el número 1 corresponde con el tubo de refrigeración por el que circula el agua; el número 2 es el cable de teflón; el número 3 es el cable del termopar tipo T, que pasa por el interior del cable de teflón. También se puede apreciar en la parte frontal del sensor, donde se encuentra la termopila, su recubrimiento con pintura negra. Aunque la apariencia es igual que la de un radiómetro Gardon, los Gardon pueden soportar niveles de irradiancia mucho más altos. Por otra

parte, los Schmidt-Boelter adquieren mayores sensibilidades con menores tiempos de respuesta. Las dimensiones del sensor Schmidt-Boelter son del mismo orden que en los Gardon [70]. La incertidumbre del Schmidt-Boelter es de un $\pm 3\%$ aproximadamente [71], pero aumenta rápidamente cuando se miden altos niveles de irradiancia [72]. El procedimiento de calibrado de estos radiómetros y su problemática, explicados anteriormente, son similares a los de los Gardon.

3.5. RADIÓMETRO KENDALL

En los laboratorios de la NASA en 1969, se desarrolló un radiómetro diseñado principalmente para la medida de la irradiancia solar contenida en los rangos ultravioleta, visible e infrarrojo. La diferencia con los radiómetros que había hasta la fecha era que contenía una cavidad receptora. Este nuevo radiómetro cuenta con las siguientes características [73], [74]:

- Incertidumbre del 1 %
- Trabaja de igual manera en el vacío que en presencia de aire (hasta 1 atm de presión)
- Buena respuesta frente a la radiación hemisférica
- No se ve afectado por la acción del viento
- La cavidad tiene una absorptancia de 0.999
- Es posible controlar el ángulo de aceptación
- El tiempo de respuesta es 7 s
- El conjunto del radiómetro permanece a temperatura ambiente, a excepción de la parte de la cavidad, que sube 1 °C por encima del resto de las partes cuando es sometido a irradiancia
- La respuesta espectral es igual en todo el espectro solar

El radiómetro consiste en una apertura para limitar la vista, un tubo, y una protección térmica cuya función es la de disipar el calor. En el interior de la protección térmica se encuentra el receptor de cavidad que contiene una resistencia térmica, la cual dirige el calor de la cavidad hacia el disipador de calor. Para compensar la cavidad y la resistencia, se coloca simétricamente otra cavidad y otra resistencia térmica. Todos los elementos se montan en un frasco o botella Dewar, un recipiente que proporciona aislamiento térmico y disminuye las pérdidas de calor por conducción, convección o radiación.

El propósito del tubo limitador de la vista es proporcionar un ángulo de aceptación de entre 5-15°, además de proporcionar al receptor de la cavidad protección frente al viento [73]. La apertura de la cavidad es de cobre y mide 1.13 cm [73], mientras que el cono de la cavidad es de plata. Las dimensiones totales del radiómetro son de 5 cm de diámetro, 10 cm de largo y pesa aproximadamente 1 kg [74]. Este

tamaño es mayor que en el resto de los radiómetros, lo que dificulta su uso respecto al resto. El esquema del radiómetro Kendall se puede ver en la Figura 3.5.1 [19].

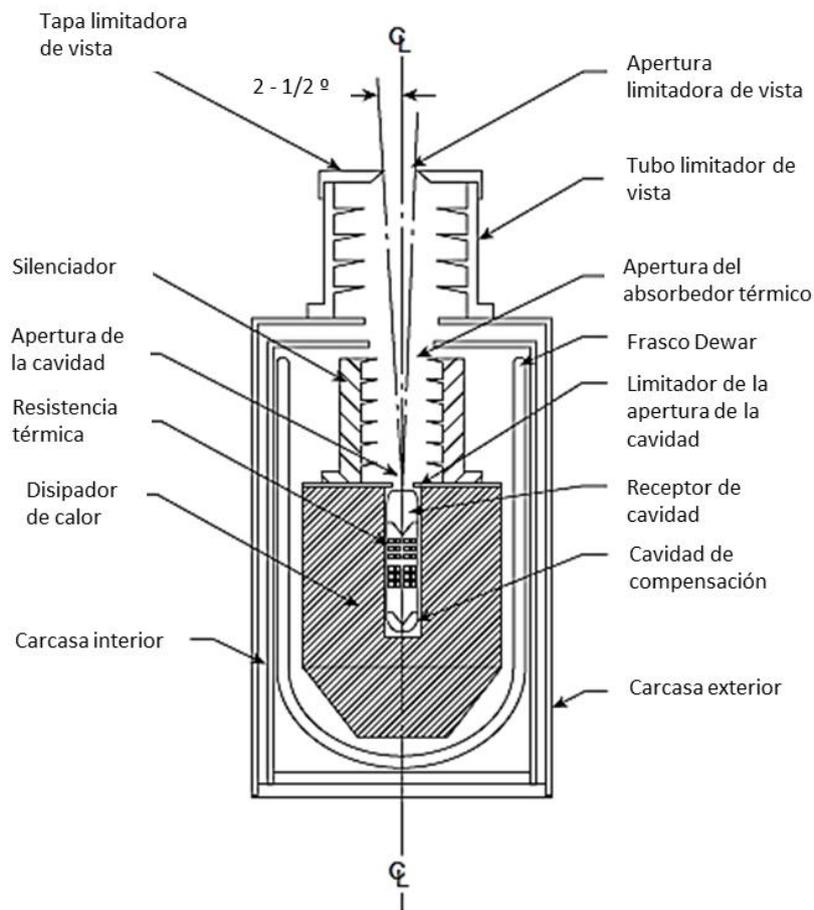


Figura 3.5.1. Esquema del radiómetro Kendall

La radiación pasa por una apertura pequeña, y después es absorbida por el recubrimiento negro de la superficie de la primera cavidad. La primera cavidad es la que se somete a radiación, mientras que la segunda está en equilibrio térmico con el disipador de calor [75]. Una termopila mide el voltaje proporcional a la diferencia de temperatura entre ambas cavidades. Teniendo en cuenta el área de apertura, la potencia interceptada por la cavidad corresponde con la irradiancia incidente sobre el radiómetro.

En comparación con los radiómetros Gardon, los radiómetros Kendall tienen mayor tamaño, como se ha explicado anteriormente. Los radiómetros Gardon tienen un mayor ángulo de aceptación y son más robustos mecánicamente. El radiómetro Gardon mide con una incertidumbre del $\pm 3\%$, mientras que el Kendall tiene $\pm 1\%$. Sin embargo, el radiómetro Kendall tiene un tiempo de respuesta de 7 s, frente a 1 s aproximadamente del Gardon. Todo esto hace al radiómetro Gardon más apto para medidas en receptores de torre, donde se requiere una buena exactitud además de una rápida respuesta de los sensores.

3.6. RADIÓMETRO HFM

En 1991, Hager y la empresa estadounidense Vatel Corporation, desarrollaron el radiómetro HFM (Heat Flux Microsensor), un sensor con una fina termopila. Una de las novedades de este radiómetro respecto a los que había hasta la fecha era su rápida respuesta, del orden de microsegundos. En 1997, la Marina de EEUU midió con éxito el perfil de irradiancia en el tubo de escape del motor de un cohete con estos sensores [76]. Los resultados fueron muy importantes en el estudio de la medida de irradiancia, debido a las condiciones tan extremas de estas pruebas.

Los HFM se fabrican con una fina capa de resistencia térmica, con un grosor de menos de $1\ \mu\text{m}$, situada entre diferentes termopares que crean una termopila diferencial. Su grosor total es menor de $2\ \mu\text{m}$, por lo que la diferencia de temperatura a través de la resistencia térmica es muy pequeña. El voltaje de salida de cada termopar es demasiado pequeño para poder ser medido, por lo que se unen pares de termopares en serie (Figura 3.6.1 [77]). El voltaje de salida es directamente proporcional a la irradiancia normal a la superficie [78]. Debido al grosor tan pequeño del sensor, el tiempo de respuesta es de aproximadamente $20\ \mu\text{s}$ [78], [79]. La termopila contiene termopares tipo S, compuestos por metales preciosos, cuya combinación de los dos materiales es Platino para el primer material, y Platino-Rodio(10 %) [77] para el segundo material. Los termopares tipo S pueden soportar temperaturas de hasta $1500\ ^\circ\text{C}$. Además, se deposita un recubrimiento protector compuesto por óxido de aluminio (Al_2O_3) sobre la superficie del sensor.

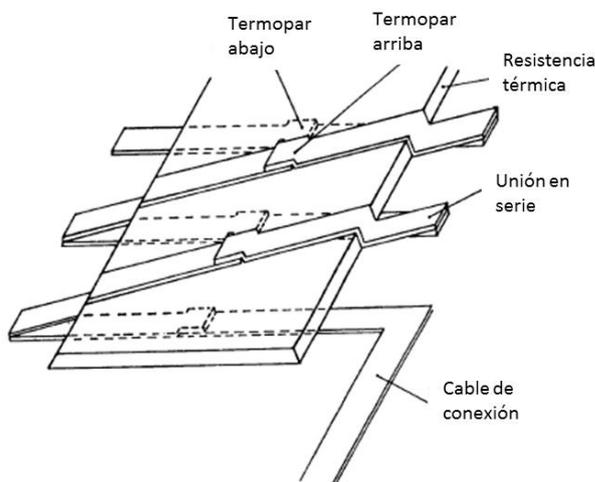


Figura 3.6.1. Esquema del sensor HFM

Los microsensores se hacen mediante técnicas de pulverización de película delgada con máscaras de acero inoxidable. Para cada capa se hace una máscara por separado y se alinea una a una con un microscopio hasta que las seis capas [77] del sensor se completan. A continuación, se aumenta la temperatura hasta $300\text{-}400\ ^\circ\text{C}$ [78], para reducir el estrés térmico en la lámina y proporcionar mayor adhesión a las capas. Por último, se deposita una capa de óxido de aluminio sobre el sensor para protegerlo de

abrasiones además de servir de aislamiento eléctrico. Es posible preparar el sensor directamente en la superficie o en un conector del mismo material. Los sensores se depositan sobre unos discos de nitruro de aluminio de 6.3 mm de espesor y 25.4 mm de diámetro [77], [78]. En la Figura 3.6.2 se puede apreciar cómo es un sensor HFM.



Figura 3.6.2. Sensor HFM

Es posible tomar dos tipos de medidas con los sensores HFM, temperatura e irradiancia. Según el modelo del HFM, la temperatura se obtiene de dos maneras diferentes. La primera es a partir de una lámina delgada de platino depositada en círculos alrededor del borde exterior de la cara del sensor, obteniendo un sensor de temperatura de resistencia (RTS) [76], [80]. La segunda manera es a partir de un termopar de lámina delgada, el cual se comporta como un termopar usual de hilos metálicos [76], [80]. Por otra parte, la medida de irradiancia (HFS por sus siglas en inglés, Heat Flux Sensor) se obtiene a partir de la termopila que ocupa la mayor parte de la superficie de la cara del sensor, tal como se ha explicado en este apartado [80]. La ecuación que se utiliza para calcular la irradiancia que incide sobre el sensor, es la siguiente [80]:

$$I = \frac{V_{HFS}/G_{HFS}}{g T + h} \quad \text{Ecuación 3.6.1}$$

Dónde I es la irradiancia en W cm^{-2} , V_{HFS} es la señal instantánea de voltaje del HFS en μV , G_{HFS} es la ganancia del amplificador del canal del HFS (en caso de que se use, de lo contrario su valor es 1), g y h son los coeficientes que relacionan la sensibilidad y la temperatura dados en la hoja de calibración del sensor en $\mu\text{V W}^{-1} \text{cm}^{-2}$, y T es la temperatura en $^{\circ}\text{C}$.

De la misma manera que en los radiómetros Gardon, en los HFM la selectividad espectral del recubrimiento que se utiliza influye en la medida de irradiancia. Se han hecho estudios para analizar diferentes recubrimientos [81], observándose un buen comportamiento de la emisividad con la temperatura del Pyromark, entre otros. Como se ha visto, los HFM son los sensores para medir irradiancias con la respuesta más

rápida de la industria, pudiendo operar en condiciones extremas sin necesidad de refrigeración. Es posible medir temperatura e irradiancia en la cara del sensor. Además, la incertidumbre es baja en este tipo de radiómetros, al igual que en los Gardon, de un $\pm 3\%$. Sin embargo, a la hora de operar con ellos, son menos robustos que los Gardon, lo que supone mayor fragilidad durante su uso.

3.7. CALORÍMETRO SUNCATCH

Otra manera de medir irradiancia es a partir del principio calorimétrico, midiendo el calor transferido a un fluido de refrigeración que circula a través del sensor, como se ha visto anteriormente en el apartado del radiómetro Gardon. El calor transferido al fluido de refrigeración en el calorímetro se puede calcular a partir de la ecuación de la termodinámica:

$$Q = m c_p \Delta T \quad \text{Ecuación 3.7.1}$$

Donde Q es el calor proporcionado, m es la masa de fluido, c_p es el calor específico del fluido, y ΔT es la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del calorímetro.

Uno de los calorímetros más usados es el calorímetro SunCatch, desarrollado por Groer y Neumann en 1999 [82]. Se trata de un calorímetro de cobre, con diseño de doble cono que forma la cavidad. El primer cono es de cobre, dentro del cual es redirigida la radiación solar. El segundo cono envuelve el primero, y tiene aislamiento en su parte posterior para minimizar las pérdidas de calor de la cavidad. La parte delantera de la cavidad tiene una apertura para permitir que la radiación entre a la cavidad, minimizando las pérdidas de calor debidas a la convección [19]. El esquema del calorímetro se puede observar en la Figura 3.7.1 [19]. Las dimensiones externas del calorímetro son de 220 mm de diámetro, y una longitud de 240 mm. El ángulo de la cavidad son 45° , y la apertura del calorímetro es de 20 mm de diámetro. Sin embargo, el tiempo de respuesta del dispositivo es de 75 s, muy superior al de los radiómetros. El error en la medida es de alrededor del $\pm 1\%$, pero su alto tiempo de respuesta hace que el sensor no sea utilizado si se necesitan medidas en un período de tiempo muy corto. [82]

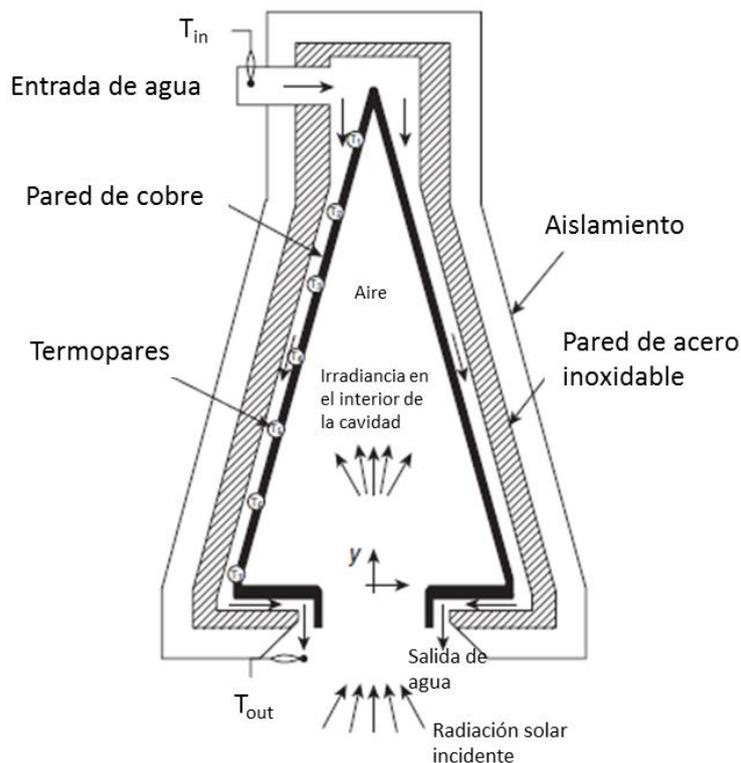


Figura 3.7.1. Esquema calorímetro SunCatch

La incertidumbre en la medida del calorímetro SunCatch es inversamente proporcional a la irradiancia incidente, midiendo peor los niveles bajos de irradiancia. Para niveles de 5000 soles, la incertidumbre es de aproximadamente $\pm 0.5\%$, mientras que en niveles de 1000 soles, corresponde con una incertidumbre de $\pm 1\%$, aumentando rápidamente para irradiancias inferiores[19].

3.8. INTERCOMPARACIONES DE RADIÓMETROS

Como se ha visto en este capítulo, existen diferentes tipos de radiómetros y calorímetros usados en CSP. Estos sensores se utilizan bien para medir directamente irradiancia en la superficie de los receptores, o bien para calibrar las imágenes de cámaras y obtener la distribución de irradiancia de forma indirecta en la superficie del receptor (Capítulo 4). Con el fin de conocer las similitudes y discrepancias en la medida de irradiancia solar de los diferentes sensores, se han realizado varias intercomparaciones internacionales.

En 1998 se realizó una intercomparación de radiómetros bajo condiciones reales de radiación solar concentrada, en el horno solar de Odeillo, en Francia. En ella participaron diferentes equipos de Australia, Estados Unidos, Francia, Suiza y Alemania, con 10 radiómetros diferentes (Tabla 3.8.1). [83]

Participantes	Tipo de sensor	Flujo pico alcanzado (MW m ⁻²)	Diámetro (mm)
ANU	Gardon (HyCal)	3.4	15.9
DLR	Kendall	10	1.95
	Calorímetro SunCatch	5	10
CNRS	Calorímetro Asterix	10	3
CETHIL	Calorímetro Transient	10	30
NREL	Gardon (Thermogage)	10	25.4
SANDIA	Kendall	3	1.95
	Kendall	3	1.95
PSI	Kendall	2.5	1.95
	Calorímetro Spats	10	4.1

Tabla 3.8.1. Sensores con los que se realizó la intercomparación de 1998

En la Tabla 3.8.1 se pueden observar los sensores que se compararon en el horno solar de Odeillo en 1998. La ANU, Australian National University proporcionó un radiómetro Gardon (suministrado por HyCal); el DLR, de Alemania, llevó un radiómetro Kendall y el calorímetro SunCatch; por parte del CNRS, de Francia, el calorímetro Asterix, que es un calorímetro refrigerado por agua desarrollado por el CNRS; Francia también participó a través del CETHIL, un centro de investigación en Lyon, con un calorímetro Transient; por parte de Estados Unidos, el NREL proporcionó un radiómetro fabricado por la empresa Thermogage, y los laboratorios SANDIA dos radiómetros Kendall; por último, de Suiza, el PSI, participó con un radiómetro Kendall y un calorímetro Spats, fabricado por el propio centro.

El ensayo se realizó en grupos de cinco sensores, los cuales se situaban en la parte central de un panel. Los calorímetros Spats y SunCatch requirieron una protección con un diafragma de 100 mm de diámetro de apertura. El método de medida consistía en mover los 5 dispositivos sucesivamente a la posición de medida, situada en el foco del horno, en la que se tomaban los datos. El calorímetro Asterix se utilizó en cada grupo, sirviendo de referencia, midiendo al principio y al final. El rango en el que se midió fue 500-8000 kW m⁻². Después del ensayo, se observó que los radiómetros Kendall presentaban mayores desviaciones para niveles bajos de irradiancia. Sin embargo, los sensores que medían por debajo de 3 MW m⁻², presentaban desviaciones del 5 %. Esta desviación se hacía menor al medir niveles elevados de irradiancia, para los sensores que medían más de 4.5 MW m⁻². [83]

Después de la intercomparación de Odeillo de 1998, se realizó otra comparación en el año 2000, en el horno solar del DLR en Colonia, entre cuatro radiómetros tipo Gardon suministrados por la empresa HyCal, un radiómetro Kendall y un calorímetro SunCatch (Tabla 3.8.2) [75], todos los sensores pertenecientes al DLR.

Nombre del sensor	Principio	Max. Densidad flujo (MW m ⁻²)	Diámetro área efectiva (mm)	Tiempo de respuesta (s)
Kendall	Radiómetro de cavidad	10	1.95	5
SunCatch	Calorímetro refrigerado con agua	5	10	75
DLR-H1	Radiómetro Gardon (5/8")	11	2	< 3
DLR-H2	Radiómetro Gardon (5/8")	11	2	< 3
DLR-H3	Radiómetro Gardon (5/8")	3	2	< 3
DLR-H4	Radiómetro Gardon (5/8")	3	2	< 3

Tabla 3.8.2. Sensores comparados en Colonia

Se realizaron unas 100 medidas en el rango 0.5-5 MW m⁻². Los sensores se montaron en una placa refrigerada. Para controlar y medir la distribución de irradiancias sobre la placa, se montó también una superficie blanca, de la cual se tomaban imágenes con una cámara de video para saber la distribución de brillo en la superficie de la placa. Cuando las condiciones eran estables, los sensores se iban posicionando en un punto llamado punto de lectura, en el cual se tomaban las medidas proporcionadas por los radiómetros. Se detectaron desviaciones mayores del 2 % entre la primera medida y la última, debidas a condiciones meteorológicas inestables entre otras razones. [75]

En esta intercomparación, se tomó como referencia un radiómetro Kendall. Los resultados se muestran en la Tabla 3.8.3, donde la Media es el valor promedio entre las desviaciones del sensor y el radiómetro Kendall. Se puede observar que hay una buena correspondencia entre el radiómetro Kendall y el calorímetro SunCatch [75]. La pequeña diferencia entre estos dos sensores puede ser debida al mayor tiempo de respuesta del calorímetro, que provoca desviaciones si las condiciones son inestables, pero aporta gran precisión y exactitud en las medidas en condiciones muy estables. Además, la medida del radiómetro Kendall en niveles altos de irradiancia tiende a ser mayor a la medida del SunCatch.

Sensor	Media (%)	Desviación estándar (%)
SunCatch	0.4	2.0
DLR-H1	2.1	2.0
DLR-H2	3.4	3.4
DLR-H3	13.2	2.3
DLR-H4	9.3	1.5

Tabla 3.8.3. Valores medios entre la desviación de los sensores con respecto al radiómetro Kendall

Respecto a los sensores Gardon comparados, en los H3 y H4 se pudo apreciar que la superficie de los sensores estaba deteriorada debido a su anterior uso, por lo que la desviación es mayor respecto al radiómetro Kendall. Para tratar de repararlo, el sensor H3 se recubrió con una pintura negra diferente, lo cual fue la principal fuente de error en este sensor, ya que no estaba caracterizada [75], y es por eso que la desviación respecto al Kendall es mayor en este radiómetro. Con todo esto, se concluyó que los

radiómetros tipo Gardon debían ser recalibrados para proporcionar medidas más exactas.

Por otra parte, en 2002 se realizó una comparación entre un radiómetro Gardon y un Schmidt-Boelter, pero en un contexto de radiación infrarroja [84]. Los resultados mostraron una gran coherencia entre las medidas proporcionadas por estos dos radiómetros. Se apreció también que el sensor Gardon genera un 25 % de voltaje de salida menos que el Schmidt-Boelter [84] debido a la mayor sensibilidad del segundo, siendo una de las causas en la diferencia entre las curvas de calibración.

En el marco de la alianza de laboratorios europeos SolLab, se realizó una intercomparación en 2006 con sensores procedentes de PROMES-CNRS (Francia), DLR (Alemania), CIEMAT-PSA (España) y ETHZ (Suiza). Doce sensores fueron comparados en el horno solar del DLR, divididos en dos grupos: grupo de baja irradiancia (Tabla 3.8.4) y grupo de alta irradiancia (Tabla 3.8.5). [85]

Centro	Fabricante	Tipo	Rango irradiancias (kW m ⁻²)
DLR (Alemania)	TMI Kendall	1 cm Kendall	40
DLR (Alemania)	Vatell	19.5 mm Gardon (3/4")	100
DLR (Alemania)	Vatell	19.5 mm Gardon (3/4")	250
CNRS (Francia)	Captec	25.4 mm Gardon	300

Tabla 3.8.4. Radiómetros del grupo de baja irradiancia Intercom 2006

Centro	Fabricante	Tipo	Rango irradiancias (kW m ⁻²)
DLR (Alemania)	TMI Kendall	2 mm Kendall	10000
DLR (Alemania)	HyCal	19.5 mm Gardon (3/4")	11000
DLR (Alemania)	Suncatch-DLR	1 cm Calorímetro	5000
DLR - PSA	TMI Kendall	0.2 cm ² Kendall	1000
DLR - PSA	Vatell	25.4 mm Gardon (1")	1000
CNRS (Francia)	CNRS	Calorímetro	6000
CIEMAT	Vatell	15.9 mm Gardon (5/8")	1200
CIEMAT	Vatell	15.9 mm Gardon (5/8")	5000

Tabla 3.8.5. Radiómetros del grupo de alta irradiancia Intercom 2006

Los ensayos se hicieron en primer lugar para los sensores de bajo rango, y a continuación los de alto rango. La manera de proceder era ir posicionando uno a uno los sensores en un punto del foco del horno en el que se efectuaba la medida.

En la campaña de medidas realizada, había diferentes fuentes de error. Una de ellas era la variación en las condiciones meteorológicas, en concreto la variación de la DNI. Además, aunque se intentó conseguir un frente de irradiancias plano en el horno

solar, éste no era homogéneo, y suponía un 10% de error en la medida. Por otra parte, se introduce otro error como consecuencia de los recubrimientos negros de los radiómetros Gardon, debido a su calibración con un cuerpo negro, a una temperatura aproximada de 850 °C, y la diferencia en el rango espectral de éste con el rango espectral de la radiación solar, explicado en el Apartado 3.3.2. Debido a la diferente área de los sensores y a que el frente de irradiancia no era plano, como se acaba de comentar, la irradiancia que recibían los sensores era diferente, lo que añadía otra fuente de error.

El radiómetro Kendall del DLR de 2 mm de diámetro fue el escogido como referencia para el grupo de alta irradiancia, mientras que los radiómetros Gardon (Vatell) de 250 y 100 kW m⁻² fueron las referencias escogidas para el grupo de baja irradiancia, usados en diferentes días de ensayo.

Los resultados de esta intercomparación de los 12 sensores fueron diversos. En el grupo de alta irradiancia, el radiómetro Kendall de 2 mm de diámetro del DLR, usado como referencia, y el calorímetro SunCatch, también del DLR, mostraron resultados bastante similares. El calorímetro del CNRS y el Kendall de 0.2 cm² de área activa, aparecían con desviaciones menores del 3 % respecto a la referencia. Los radiómetros Gardon presentaron discrepancias en los valores, con una desviación máxima del 18 %. Sin embargo, el radiómetro Gardon del DLR presentó una menor desviación respecto al Kendall y el Suncatch, ambos del DLR. Esta concordancia fue debida a que estos radiómetros fueron calibrados entre sí, usando el mismo sensor como radiómetro primario. Por último, en el grupo de baja irradiancia, se observó gran concordancia entre ellos, en concreto entre el Kendall de 1 cm de diámetro y el sensor Captec del CNRS.

Recientemente, en 2012, se realizó otra intercomparación internacional en el horno solar de Odeillo (Francia) [55]. En ella, se compararon 3 sensores Gardon y un calorímetro refrigerado con agua, con irradiancias hasta 1500 kW m⁻². Los sensores junto con sus calibraciones aparecen en la Tabla 3.8.6.

Centro	Fabricante	Tipo	Calibración
CNRS Idefix (Francia)	CNRS-PROMES	Calorímetro Idefix de agua	ΔT con termopares K, diafragma de 15.85 mm
DLR (Alemania)	Hycal	15.9 mm Gardon (5/8")	DLR 2940.78 kW m ⁻² mV ⁻¹
CIEMAT (España)	Vatell	25.4 mm Gardon (1")	CIEMAT 120.48 kW m ⁻² mV ⁻¹
PSI (Suiza)	Vatell	25.4 mm Gardon (1")	Vatell 200.9 kW m ⁻² mV ⁻¹

Tabla 3.8.6. Sensores comparados y sus calibraciones en Odeillo

Para la comparación entre los sensores, se utilizó el método secuencial, igual que en las intercomparaciones anteriores. Este método consiste en la instalación de los sensores en una placa, uno al lado de otro, y se van posicionando en un mismo punto del foco del horno, dónde se efectúa la medida con cada uno de los sensores. La medida de un grupo tarda entre 5 y 10 minutos, por lo que es importante que las condiciones meteorológicas sean lo más estables posible.

El sensor escogido como referencia en esta comparación fue el radiómetro Gardon del PSI, fabricado por Vatell, el cual fue escogido de manera arbitraria. A partir de los resultados, se observó una diferencia del 10 % entre el radiómetro de PSI y el resto de sensores [55]. En concreto, las medidas del sensor Gardon del CIEMAT eran un 1 % mayores que las del sensor de referencia del PSI, y la respuesta de ambos sensores era prácticamente igual. El sensor Gardon del DLR proporcionaba medidas entre 5-10 % menores que el del PSI, para niveles mayores de 150 kW m^{-2} . Por último, aunque los datos del calorímetro Idefix del CNRS tenían bastante ruido, se apreció una diferencia menor del 10 %. Todo esto demostró una discrepancia entre las medidas de los sensores menores al 10 %, para niveles de irradiancia hasta 1500 kW m^{-2} .

Está planificada para el verano de 2022 una intercomparación internacional de radiómetros en el horno solar de Odeillo, Francia, en el marco del proyecto SFERA-III [86]. Será una intercomparación dónde participarán los mismos centros que en los años anteriores, pero se probará como alternativa una nueva metodología. Como se ha visto, en las anteriores comparaciones se ha usado el método secuencial, en el cual se van posicionando un sensor tras otro en un punto en el que se toma la medida. Sin embargo, en este caso se usará el método simultáneo, propuesto por el CIEMAT, representado en la Figura 3.8.1.

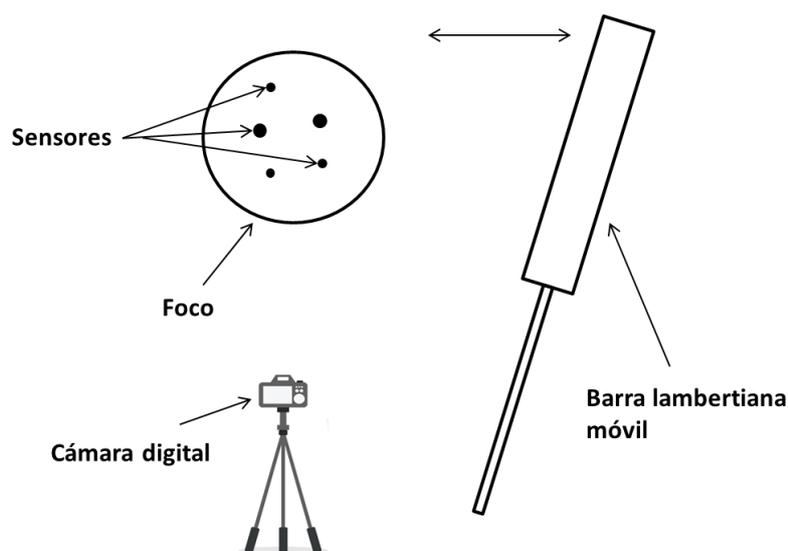


Figura 3.8.1. Esquema del método simultáneo

Este método consiste en la instalación de todos los sensores en el plano focal simultáneamente, los cuales toman medidas de forma continua [55]. A la vez, se hace pasar por delante de los sensores una barra móvil lambertiana, mientras que una cámara digital toma imágenes para medir los niveles de gris (Figura 3.8.1), que pueden ser asociados posteriormente a la irradiancia en cada sensor. Para comparar las medidas de los sensores, se comparan las curvas de calibración de los niveles de gris frente a las irradiancias. De esta manera, se comparan todos los dispositivos de manera objetiva, sin necesidad de un sensor de referencia.

CAPÍTULO 4.

SISTEMAS DE MEDIDA DE ALTA IRRADIANCIA

En este capítulo se revisa el estado del arte en métodos de medida de alta irradiancia en sistemas termosolares. Se han dividido en tres grandes apartados: métodos directos, métodos indirectos y códigos de simulación. Se revisa con especial detalle el método indirecto que ha servido de referencia en esta tesis.

“La vida no tiene por qué ser fácil, siempre que no esté vacía”

Lise Meitner (1878-1968)

(Descubrió junto con su marido la fisión nuclear)

4.1. SISTEMAS DE MEDIDA DE IRRADIANCIA DIRECTOS

En la investigación y desarrollo de sistemas solares de concentración, se busca optimizar las tecnologías de manera que se alcancen altas eficiencias energéticas. Para ello, se requieren medidas exactas y precisas de magnitudes asociadas a la radiación solar. Entre otras magnitudes, se requiere la medida de la potencia de la radiación solar concentrada, a partir de la cual se obtiene la eficiencia del receptor y de la planta. También es necesario conocer la distribución de irradiancia sobre el receptor, a partir de la cual se obtiene la potencia. Esta distribución de irradiancia, también es mencionada por otros autores de CSP como flujo, o mapa de flujo, pero cabe señalar que en ambos casos se refieren a la misma magnitud. En esta tesis, se ha adoptado la palabra irradiancia, ya que flujo puede conducir a interpretaciones erróneas fuera del contexto CSP.

En las plantas de receptor central, que constan de un campo de heliostatos y un receptor situado en la parte alta de la torre, son necesarias las medidas de magnitudes asociadas a la radiación solar, para poder evaluar eficientemente los receptores. El componente fundamental de las plantas de torre es el receptor. Obtener la eficiencia al evaluar un receptor prototipo es fundamental, ya que a partir de este dato, se diseñará y dimensionará la planta [18]. Para calcular la eficiencia, es necesaria la medida de la potencia solar concentrada que incide sobre la apertura del receptor.

Existen diferentes métodos utilizados para medir la alta potencia solar en la superficie de los receptores prototipo, en los que se usan radiómetros o calorímetros como los descritos en el Capítulo 3. El tamaño de los sensores es muy reducido en comparación con el área de apertura de los receptores. Estos sensores miden la irradiancia en kW m^{-2} en diferentes puntos, a partir de estas medidas puntuales, mediante distintas técnicas, se obtiene la potencia total incidente y la distribución de irradiancia sobre la superficie del receptor.

Entre los métodos de medida de alta irradiancia solar en instalaciones experimentales, se incluyen:

- 1) *métodos directos* que hacen uso de radiómetros o calorímetros en los lugares donde se quiere medir.
- 2) *métodos indirectos* con una cámara digital que capta la imagen de la irradiancia reflejada por una superficie y un radiómetro de referencia.
- 3) *métodos híbridos* que combinan los dos métodos anteriores.

En este apartado se explicarán los primeros métodos, los métodos directos. Más adelante, en el Apartado 4.2 se explicarán los métodos indirectos entre los cuales se encuentran los métodos híbridos.

Los métodos de medida de irradiancia directos son aquellos que usan exclusivamente radiómetros o calorímetros. Los demás métodos, son indirectos, en los

cuales se suelen usar cámaras digitales. A continuación, se procede a revisar los diferentes métodos de medida directos propuestos en la literatura.

En 1994, Elsayed et al. [87], diseñaron y construyeron una instalación para medir la distribución de irradiancia de un heliostato plano en un receptor plano, con el fin de caracterizar heliostatos. Se diseñó tanto un mecanismo de seguimiento para el heliostato, como un mecanismo bidimensional sobre el que se situaba un sensor solar en miniatura. El mecanismo de seguimiento del Sol para los heliostatos contaba con dos motores. Cada uno de los motores controlaba la elevación y el ángulo azimutal respectivamente. Los espejos planos de varias dimensiones se situaban encima del mecanismo de seguimiento. El punto al que enfocaba el heliostato era el centro geométrico del plano del receptor. El receptor plano tenía unas dimensiones de 90 x 70 cm [87]. Este receptor se montaba en una caja de acero, las paredes internas del cual estaban pintadas de negro para minimizar la reflexión de estas paredes hacia la superficie del receptor. Por último, las medidas de irradiancia se tomaban usando un sensor solar en miniatura fabricado por Devices and Service Co. [87], montado sobre un mecanismo con movilidad en los ejes x e y. Las dimensiones del sensor eran de un diámetro de 1.58 cm y servía para medir la irradiancia en un punto de una superficie. La sensibilidad del sensor era de $414.94 \text{ W m}^{-2} \text{ mV}^{-1}$ [87]. Este sensor estaba conectado a un software de adquisición de datos, llamado “*Tower*”, encargado de controlar los motores del mecanismo de seguimientos de los heliostatos, de mover la plataforma en la cual se situaba el sensor, y de realizar las medidas de irradiancia usando la calibración de dicho sensor, obteniendo así la distribución de irradiancia.

Desde finales de los años 70 se han estado investigando los sistemas de lentes Fresnel. Las lentes Fresnel ofrecen diversas ventajas, como que al situarse el foco detrás de la lente, se facilita el acceso al experimento. En este contexto, Ferriere et al [88], en 2004, realizaron un trabajo que se centraba en la caracterización de la distribución de irradiancia proporcionada por una lente Fresnel, la cual iba a ser instalada en la Universidad de Castilla-La Mancha, en España. El sensor utilizado para medir irradiancias en el área focal detrás de la lente es un sensor diseñado por Ferriere y Rivoire [89]. Este sensor usaba un detector de silicio situado dentro de una esfera, con una apertura de 1 mm de diámetro, y un tiempo de respuesta menor de 1 ms. El rango de longitudes de onda captado por este detector era entre 400-800 nm. El error relativo estimado de este instrumento era de $\pm 1.6\%$ cuando el nivel de irradiancia era de 3000 kW m^{-2} , y del $\pm 16\%$ cuando la irradiancia caía hasta 300 kW m^{-2} [88]. Para caracterizar la distribución de irradiancia y realizar las medidas, se montaba el sensor en un mecanismo con movimiento en los 3 ejes. Con este sistema, se evaluó la potencia total, el factor de concentración de la lente, y la posición del pico de irradiancia, caracterizando así la lente Fresnel.

En trabajos que preceden a esta tesis realizados en la PSA, se desarrollaron sistemas de medida directos e indirectos para medir irradiancia. Uno de los primeros sistemas directos que se desarrollaron en la PSA fue el sistema MFV (Medida de Flujo receptores Volumétricos), instalado en 1988 en la torre SSPS-CRS. El sistema estaba

compuesto por una matriz de radiómetros, con forma de cruz. Estos radiómetros estaban fabricados por la empresa HYCAL Engineering y tenían un $\pm 3\%$ de incertidumbre en la medida [76]. Esta cruz de radiómetros estaba accionada por un mecanismo que pivotaba en un punto fijo, permitiendo que mientras no se medía, los radiómetros se mantuvieran fuera del foco. El mecanismo de posicionamiento desplazaba la cruz delante de la apertura del receptor durante 5 segundos [76], durante los cuales se tomaban las medidas. Este sistema fue el predecesor del sistema diseñado en 2001, explicado a continuación.

4.1.1. MDF (MEDIDA DIRECTA DE FLUJO)

En el trabajo de Ballestrín en 2001 [76], [90], se diseñó y construyó un sistema de medida directa de distribución de irradiancia para la torre SSPS-CRS de la PSA.

En este trabajo, se construyó una barra móvil en la cual estaban instalados varios radiómetros. Esta barra pasaba por un plano paralelo al plano de la superficie del receptor, pivotando en un punto fijo por debajo de la apertura del receptor, en la línea central vertical [76]. Sobre la barra, se montaban 8 radiómetros de respuesta rápida, HFM (Heat Flux Microsensor), fabricados por la empresa Vatell. Estos sensores tienen un tiempo de respuesta de entre 2 a 6 microsegundos, son capaces de operar a temperaturas de hasta 850 °C sin necesidad de refrigeración, y tienen una sensibilidad de $15 \mu\text{V kW}^{-1} \text{m}^2$ [90]. El diámetro de estos sensores es de 6.32 mm, y su exactitud es de $\pm 3\%$. En el Apartado 3.6 han sido descritos este tipo de radiómetros. Estos sensores tienen la posibilidad de realizar dos tipos de medidas: temperatura e irradiancia. El sistema estaba conectado a un sistema de adquisición de datos de alta frecuencia de muestreo, que registraba y guardaba las medidas. De esta manera, era posible realizar medidas directas de la distribución de irradiancia casi instantáneamente y sin refrigeración por agua. El esquema del sistema MDF era el que se ha representado en la Figura 4.1.1.1:

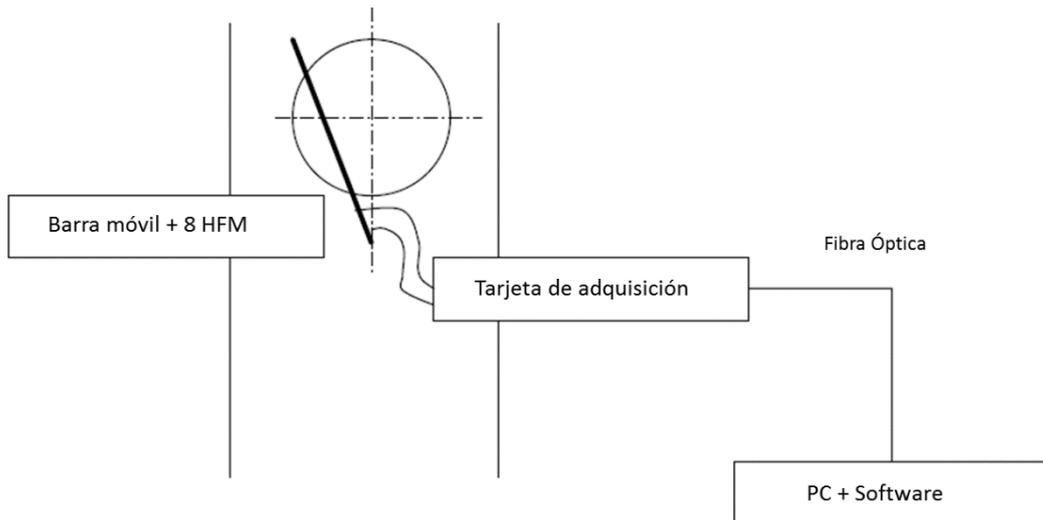


Figura 4.1.1.1. Esquema MDF [76]

Los 8 HFM se posicionaban en la barra a distintas distancias, con el objetivo de obtener una resolución óptima del área de interés [90], [91], como se puede apreciar en la Figura 4.1.1.2.

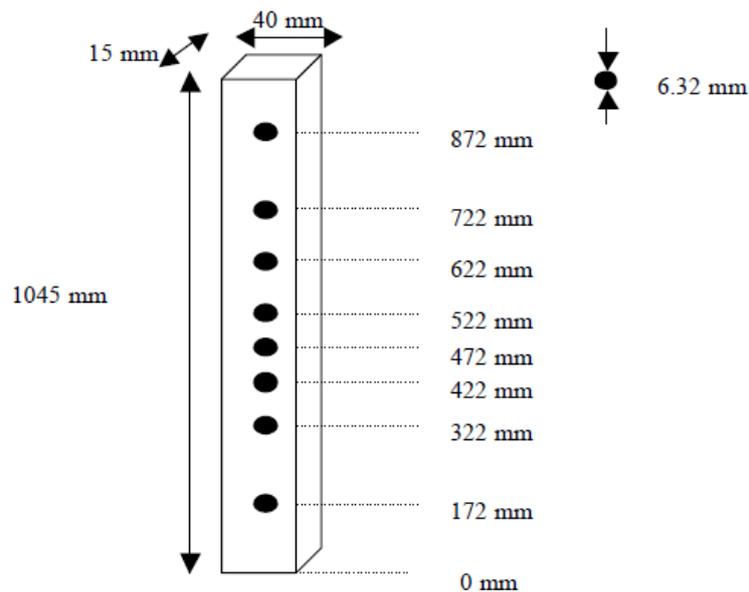


Figura 4.1.1.2. Barra móvil con 8 HFM y su posición [76]

La distribución de irradiancia se obtenía interpolando entre los puntos en los que se medía con los HFM. Así, se podía calcular la potencia incidente en la apertura, integrando la distribución de irradiancia en el área de apertura. La incertidumbre asociada a la medida de potencia con este método era de un $\pm 5.4\%$ [19], [76], [90].

Una de las ventajas de este sistema es que no requiere de refrigeración, debido a que la barra tarda en escanear la apertura del receptor menos de 2 segundos. Además, es un sistema directo, y las incertidumbres asociadas a la medida son bajas.

4.1.2. SISTEMA ESTACIONARIO EN PS10

Otro tipo de sistema, que se clasificaría como método directo y además estacionario, es el que se utiliza en la central de torre PS10, ubicada en Sanlúcar la Mayor, Sevilla (España). Esta planta fue la primera planta comercial del mundo con esta tecnología, puesta en marcha a mediados de 2007. La PS10 es una planta solar térmica de torre de 11 MW, con un campo de heliostatos compuesto por 624 heliostatos de 75 m² de superficie y una torre de 120 m de altura [22]. El receptor consta de 4 paneles de cilindros, con una superficie de 260 m², dispuestos dentro de una cavidad. Se basa en el concepto de cavidad para reducir las pérdidas por radiación y convección. El sistema de medida de irradiancia lo conforma una matriz de radiómetros dispuestos en la superficie del receptor. Por lo tanto, es un sistema estacionario, que además, omite todas las partes móviles, como las que tenían los otros sistemas directos. Para obtener el mapa o distribución de irradiancias, se interpola entre los distintos puntos de medida. Al ser un método directo, la exactitud en la medida en los puntos donde se encuentran los radiómetros es alta, pero la exactitud en la resolución espacial depende del número de radiómetros instalados en la superficie del receptor.

4.2. SISTEMAS DE MEDIDA DE IRRADIANCIA INDIRECTOS

Como se ha comentado al principio de este capítulo, existen diversos métodos para medir distribuciones de irradiancia sobre los receptores, que se pueden clasificar en métodos directos e indirectos. Los primeros se han estudiado en el Apartado 4.1. Existen pocos métodos directos como se ha visto, debido a la complicación añadida de la necesidad de instalar numerosos sensores dentro o en los alrededores del receptor, modificando en parte el diseño del receptor. La opción de barra de radiómetros del Apartado 4.1.1 (MDF), se puede usar en instalaciones de investigación, para la evaluación de receptores de pequeño tamaño. Sin embargo, si se trata de dimensionar para una central comercial, el sistema de barra se hace muy grande y complejo, dejando de ser no intrusivo, afectando al funcionamiento y operación del receptor. Se considera que un sistema de medida es no intrusivo cuando la operación del receptor y/o la planta no se ve afectada durante el proceso de medida. Todas estas razones hacen a los investigadores buscar otras formas menos intrusivas de medir distribuciones de irradiancia.

El objetivo que se pretende alcanzar es conseguir un método de medida que sea lo menos intrusivo posible para el óptimo funcionamiento de la planta. Algunos de los métodos de medida menos intrusivos han sido métodos indirectos. En ellos, se suelen utilizar cámaras digitales, superficies reflectantes y un número pequeño de sensores.

El sistema de medida indirecto más extendido, especialmente en las instalaciones dedicadas a investigación, es el sistema compuesto por una superficie

reflectante difusora y una cámara digital. Se hace pasar la superficie por delante de la apertura del receptor, interceptando la radiación solar concentrada y reflejándola, para ser captada por la cámara digital. En la literatura se proponen distintas maneras de calibrar el sistema, instalando un sensor en las cercanías del receptor [91], [92], o tomando una imagen del Sol [93].

Existen otros sistemas de medida de irradiancia para niveles muy altos, como en el caso de los discos Stirling [92], o para niveles bajos [94]. En el trabajo de Ulmer [92], se caracterizaba la distribución de irradiancia en el foco de un disco Stirling, en la PSA, usando un sistema compuesto por una cámara digital y un blanco lambertiano. La cámara digital se fijaba al concentrador, y se instalaba un blanco lambertiano refrigerado con agua en la trayectoria de los rayos de la radiación solar concentrada. En este caso, no se usó un radiómetro para la calibración del sistema, sino que se calculó la potencia total incidente sobre el blanco. Para calcular esta potencia incidente, se calculaba la potencia total proporcionada por el concentrador, suponiendo que toda la radiación concentrada llegaba a la superficie del blanco, cuando estaba situado en el plano focal o cerca de él [92]. La potencia sobre el blanco estaba relacionada con la DNI, la reflectancia del concentrador, el área del concentrador, y el nivel de gris medio de la superficie del blanco. De esta manera se obtenía un factor de calibración que permanecía constante mientras que los parámetros del experimento no se vieran afectados. En el trabajo de Mokhtar [94], se mide la distribución de irradiancia proporcionada por un BDSTC (*Beam Down Solar Thermal Concentrator*, por sus siglas en inglés), en niveles comprendidos entre 0 y 100 kW m⁻². El sistema de medida es similar al de Ulmer [92], que consiste en una cámara digital y un blanco lambertiano (Figura 4.2.1). En este caso, el blanco lambertiano está compuesto por láminas cerámicas. En el interior del blanco hay 8 radiómetros Schmidt-Boelter, mencionados en detalle en el Apartado 3.4, usados para calibrar las imágenes tomadas por la cámara.

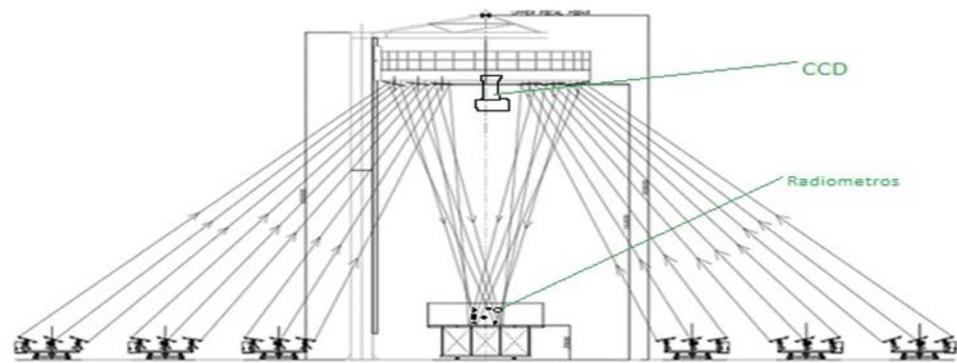


Figura 4.2.1. Esquema del sistema BDSTC junto con la cámara digital (CCD) y los radiómetros

Además de los sistemas en los que se usan cámaras digitales y radiómetros, en la literatura se ha descrito otro método en el que no serían necesarios los radiómetros. En su lugar, se usaron imágenes guardadas del Sol para realizar la calibración [93]. Este método necesitaba una cámara digital, la reflectancia del receptor o del blanco y la DNI. Las imágenes del Sol servían para dos propósitos: en primer lugar, para poder transformar los valores de los píxeles a unidades de irradiancia, usando la DNI; en

segundo lugar, se usaban como referencia espacial para calcular el ángulo subtendido de la imagen física [93]. Los pasos seguidos en el procedimiento de medida eran, en primer lugar, estimar la reflectancia del heliostato. En segundo lugar, usando la cámara digital, se tomaba una imagen del receptor, en el que estaba enfocado el heliostato. En este paso, no debía haber *spillage* o desbordamiento en el receptor. A continuación, se tomaba otra imagen del receptor, pero esta vez sin el rayo procedente del heliostato, es decir, sin radiación concentrada sobre el receptor. Por último, se calculaba la reflectancia media del receptor [93]. Todos estos datos se analizaban con un software, en el cual ya estaban cargadas las imágenes del Sol, y se obtenía la distribución de irradiancia sobre el receptor. Este método se conoce como PHLUX (*Photographic Flux*). Las incertidumbres asociadas a la medida con este método, según reportan Ho y Khalsa varían entre un 20 % y un 40 % [93]. Las fuentes principales de incertidumbre del método provienen de la reflectancia del receptor y de la atenuación de los filtros, pero también se tiene en cuenta el ruido de fondo de la cámara o la incertidumbre en la medida de la DNI con el pirheliómetro. Este método no fue tenido en cuenta como método de referencia para esta tesis debido a las altas incertidumbres asociadas a su medida, que alcanzan el 40 %.

Entre los métodos de medida indirectos, existe un método denominado método inverso, mediante el cual se obtiene la distribución de irradiancia sobre una superficie, a partir de medidas de temperatura. Pozzobon y Salvador [95] exponen un ensayo en el que validaron este método. Para ello, usaron una lámpara de Xenon para imitar la radiación solar, un espejo elíptico que concentraba la radiación y una placa de metal pintada de negro. Conseguían diferentes niveles de irradiancia mediante un *shutter* o persiana, instalada antes del foco. Mediante una cámara de infrarrojos, con un rango de trabajo de entre 8 y 12 μm [95], tomaban medidas de las variaciones de temperatura sobre la placa de metal. A partir de estas medidas, efectuaban una modelización termodinámica para obtener el mapa de distribución de irradiancias sobre la placa. Una vez habían simulado o modelado la distribución de irradiancias, usaban un radiómetro Gardon, definido en el Apartado 3.3, el cual situaban en diferentes posiciones para validar los resultados obtenidos matemáticamente. La discrepancia entre la irradiancia medida por el radiómetro Gardon y el método inverso es menor del 5 % para niveles altos de irradiancia, alrededor de 1000 kW m^{-2} , mientras que a niveles bajos aumenta esta discrepancia hasta el 30 %, donde la relación ruido/señal es alta [95].

En el DLR (centro alemán aeroespacial), Offergeld propuso un método de escaneo de la superficie del receptor con un heliostato, con el que se obtenía la reflectancia de la superficie del receptor, y con ella obtenían la distribución de irradiancias [96]. El método de escaneo consistía en mover la luz reflejada de un solo heliostato por el receptor, siguiendo una forma de S encadenada, como un serpenteo. Iban tomando imágenes sucesivas mientras se escaneaba la totalidad de la superficie del receptor. A partir de las matrices de las imágenes, seleccionaban para cada píxel, el valor máximo entre todas las imágenes tomadas. De esta forma, obtenían una imagen formada por los valores máximos de cada píxel. Con esta imagen, podían calcular la

reflectancia de la superficie del receptor. Una vez obtenida la reflectancia del receptor, para calibrar el sistema proponían dos maneras: o usar un radiómetro o calcular la potencia incidente con un software de trazado de rayos [96]. La manera que emplearon en el DLR fue simular mediante un software de trazado de rayos la potencia incidente sobre el receptor. Relacionando la potencia en kW simulada sobre el receptor con el nivel de gris de las imágenes tomadas, obtuvieron el factor de calibración que permitía transformar las imágenes en niveles de gris a unidades físicas de irradiancia en kW m^{-2} . Este método se probó en la instalación de torre del DLR de Jülich, alcanzando irradiancias pico de aproximadamente 120 kW m^{-2} . Sin embargo, sólo es posible realizar estas medidas, y por tanto usar este método, en la puesta en marcha de la central, ya que alteraría la operación de la planta.

En la Plataforma Solar Sanlúcar la Mayor, cerca de Sevilla, entre otras instalaciones de energía termosolar comerciales que proporcionan electricidad a la red, se encuentra el sistema SOLUGAS, una planta de torre de demostración con un sistema híbrido de turbina de gas. Este sistema tiene 69 heliostatos de 120 m^2 de superficie cada uno, y una torre de 77 m de alto. El receptor es de cavidad, formado por tubos metálicos, con una potencia térmica de 3.1 MW. En esta plataforma se han realizado unos ensayos para comprobar un método de medida de irradiancia sobre receptores de cavidad, usando el software de simulación STRAL (comentado en el Apartado 4.3.1) y medidas efectuadas sobre el escudo o protección alrededor del receptor [97]. El método usado en el artículo de Ebert et al. [97], en el que obtuvieron tanto el mapa de distribución de irradiancia sobre el receptor como la eficiencia del mismo, consistía en comparar las simulaciones con medidas tomadas con una cámara digital. Se llevaron a cabo simulaciones con STRAL, en las que obtuvieron diferentes mapas de irradiancias sobre el receptor y el escudo, teniendo en cuenta el offset de los heliostatos y posibles errores en el seguimiento y en el apunte de los heliostatos. En paralelo, se tomaron imágenes del receptor y el escudo. Para obtener el mapa de distribución de irradiancias, se eliminaba el área del receptor en la imagen, ya que es de cavidad y su reflectancia no es conocida, quedándose únicamente con la superficie reflectante del escudo. Estas imágenes del escudo se calibraban de la misma manera que la mayoría de los sistemas de medida, usando un radiómetro Gardon y relacionando su medida de irradiancia con los niveles de gris de la imagen. Repitiendo el proceso para diferentes niveles de irradiancia, se obtenía un factor de calibración, que permitía transformar los niveles de gris sobre el escudo a niveles de irradiancia en kW m^{-2} . Una vez obtenidos tanto el mapa de irradiancias simulado como el obtenido con la cámara digital y el radiómetro, se comparaban ambas distribuciones. Comparando las distribuciones de irradiancia sobre el escudo, escogían la simulación de irradiancias más parecida. Esta simulación proporcionaba la distribución de irradiancia sobre el receptor de cavidad. En el artículo se reportaba una incertidumbre en la medida de la potencia solar incidente de entre ± 1.3 a $\pm 6.3 \%$ [97].

El método indirecto más utilizado para medir la radiación solar concentrada incidente sobre receptores, en los centros de investigación, es el consistente en una

cámara digital, un blanco lambertiano y un radiómetro [60], [64], [91], [92], [94]. Este método se puede usar en la evaluación de nuevos prototipos de receptores de pequeño y mediano tamaño, pero no es posible efectuar el escalado para su uso en las grandes centrales comerciales de torre. A continuación, en el Apartado 4.2.1 se explica con detalle, pues es el método escogido como referencia para los ensayos realizados en esta tesis, ya que es un método que ha sido ampliamente validado, como se estudiará en el siguiente apartado.

4.2.1. MÉTODO PROHERMES

Como se acaba de comentar, el método desarrollado por Monterreal y Neumann en 1994 [98] es el método utilizado como referencia en esta tesis. Se ha propuesto un nuevo método de medida de la radiación solar concentrada incidente sobre un receptor, y para comprobar y validar este método, se ha usado la técnica basada en una cámara, un radiómetro y un blanco lambertiano, que es la más utilizada en los centros de investigación termosolar. Esta técnica está ampliamente validada, como se explicará a continuación.

Este método se desarrolló en la PSA [98], y se llamó ProHERMES (*Programmable HELiostat and Receiver MEasuring System*). El antecedente al ProHERMES fue el HERMES II, desarrollado por A. Neumann, que operaba fundamentalmente en receptores pequeños y en discos parabólicos en Arabia Saudí y Australia [99]. Se usaba un blanco lambertiano, que se situaba tapando la totalidad de la apertura del receptor y permanecía en el foco mientras se tomaba la imagen, por lo que era necesario refrigerarlo. Con el tiempo, los receptores iban aumentando el tamaño, convirtiéndose en un riesgo poner un blanco lambertiano refrigerado delante del receptor en el foco, ya que al situarlo delante del receptor, éste sufría un estrés térmico importante al caer la radiación incidente a cero. La solución que se propuso entonces fue una barra móvil que era un blanco pequeño, rápido, sin necesidad de refrigeración y que no perturbaba el estado estacionario del receptor. Con ello, se desarrolló un software para análisis y tratamiento de las imágenes de la barra móvil, dando lugar al conocido ProHERMES. Los sistemas HERMES se dejaron de usar al empezar a usar los sistemas ProHERMES cuyo entorno de programación era abierto y desarrollado sobre plataformas comerciales de software.

El ProHERMES consistía en una superficie pintada de blanco, cuya superficie era lambertiana, una cámara, un radiómetro y un software diseñado específicamente para este sistema. Se usó tanto en la torre SSPS-CRS de la PSA como en discos parabólicos. A lo largo de los años, se fueron incluyendo mejoras en el ProHERMES, como el uso de radiómetros con mayor exactitud, y cámaras digitales con mayores resoluciones. En la actualidad se sigue usando, con versiones más actualizadas.

El procedimiento de medida consiste en hacer pasar el blanco lambertiano por un plano paralelo a la apertura del receptor, interceptando el haz de radiación solar concentrada por el campo de heliostatos. Cuando el blanco intercepta esta radiación, la refleja de forma difusa. De esta manera, la cámara digital, situada en la parte central del campo de heliostatos, es capaz de captar la radiación reflejada por el blanco, tomando imágenes mientras el blanco pasa por delante del receptor. Las imágenes tomadas con la cámara están en unidades de niveles de gris, y es necesario transformarlas a unidades de irradiancia, en kW m^{-2} . Para transformar la imagen de niveles de gris a unidades físicas de irradiancia, se calibra el sistema cámara-blanco. Para calibrarlo, se sitúa un radiómetro en las proximidades del receptor, que proporciona la medida de irradiancia en un punto. El blanco lambertiano, en su paso por delante de la apertura del receptor, cubre el radiómetro, permitiendo relacionar el nivel de brillo o nivel de gris de la zona del blanco, al cubrir el radiómetro, con la medida de irradiancia proporcionada por el sensor [18], [91]. Este procedimiento se repite para diferentes niveles de irradiancia, permitiendo así obtener una función de calibración que relaciona los niveles de gris con la irradiancia. De esta manera, es posible transformar las matrices o imágenes en niveles de gris a matrices con la distribución de irradiancia incidente sobre el receptor.

Una de las versiones más recientes del ProHERMES, el ProHERMES 2A, se instaló en la torre SSPS-CRS de la PSA, y se integró junto con el sistema MDF, descrito en el Apartado 4.1.1. Los dos sistemas funcionaban simultáneamente y ello permitió que pudieran ser validados. Esto hizo posible comparar y validar ambos métodos, el directo MDF, y el método indirecto, el ProHERMES 2A. El esquema de la integración de ambos sistemas de medida de distribución de irradiancia se ha representado en la Figura 4.2.1.1.

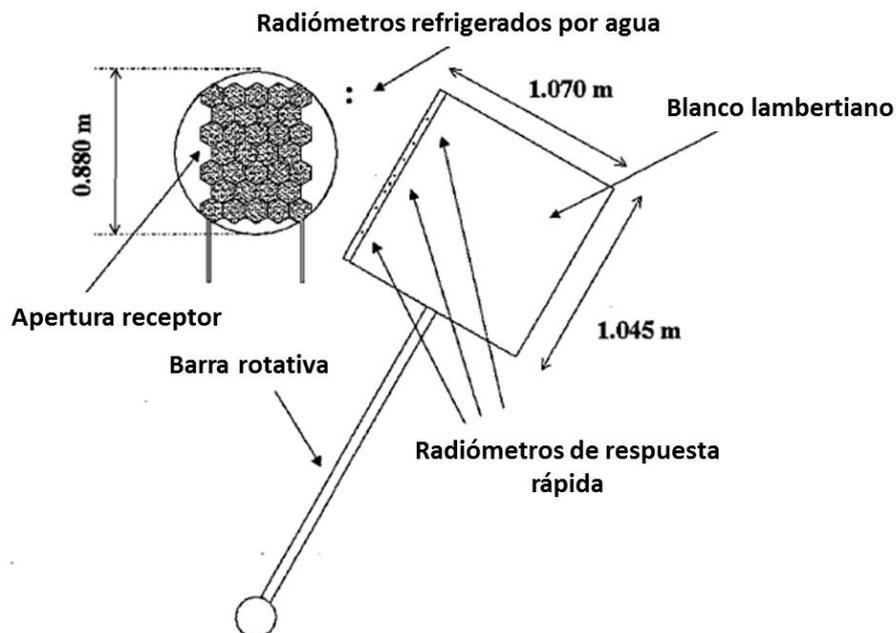


Figura 4.2.1.1. Esquema de los sistemas MDF y ProHERMES [18]

Como se puede apreciar en la Figura 4.2.1.1, el blanco lambertiano disponía de una barra rotativa que le permitía pasar por delante de la apertura del receptor durante un breve periodo de tiempo, por lo que no necesitaba refrigeración. Para calibrar el blanco, se instalaron en las proximidades del receptor dos radiómetros refrigerados por agua. Los dos radiómetros instalados fueron suministrados por la empresa Vatel, de 25 mm de diámetro en su cara frontal, y con una respuesta de alrededor de medio segundo. Además, la cara frontal de los sensores estaba pintada con un recubrimiento negro (Zynolyte®), que tiene una absorción solar del 94 %. El rango de medida de los sensores era entre 0 y 1200 kW m⁻², con una incertidumbre en su medida de ± 3 %. Estos dos sensores fueron comparados en un horno de calibración de la PSA, usando una lámina de grafito que radia cuando circula corriente eléctrica a través de la lámina. El resultado de la comparación de estos dos sensores fue de una diferencia entre ellos del 1 %. La cámara digital usada fue una CCD (*Charged Coupled Device*) de Hamamatsu Photonics, de 14 bits. [91]

Sobre una parte del blanco lambertiano se instalaron los ocho sensores HFM del sistema MDF, descrito en el Apartado 4.1.1. Así, se llegó a tener un sistema híbrido, compuesto por un método directo y otro indirecto, y se pudieron comparar las medidas obtenidas de la distribución de irradiancias sobre el receptor. La comparación se realizó durante la campaña de ensayos del proyecto HitRec II, en la que se tomaron 42 medidas de potencia incidente sobre la apertura del receptor con los dos métodos simultáneos [91]. La dispersión de los resultados entre ambos métodos fue menor del 1 %, permitiendo validar ambos sistemas.

Esta dispersión menor del 1 % entre el sistema MDF y el ProHERMES proporciona gran confianza en las medidas realizadas con ambos sistemas. Por todo ello, en las dos campañas de ensayos realizadas en esta tesis se ha utilizado el ProHERMES como método de referencia. Este método de referencia ha permitido comparar los resultados de la medida de distribución de irradiancia realizadas con el nuevo método propuesto en esta tesis, con los resultados de la medida obtenidos con el ProHERMES, gracias a la gran confianza y validación de este último método.

La necesidad de desarrollar un nuevo método de medida de irradiancia solar en los receptores, objeto de esta tesis, es debido a que en las grandes centrales de torre comerciales no es posible dimensionar el sistema ProHERMES. El sistema de la barra móvil sería demasiado grande, ocupando gran cantidad de espacio en la torre, complicando y alterando su diseño y operación. Es por esto que es necesario desarrollar un nuevo método de medida que no perturbe la operación ni el diseño de las grandes centrales solares comerciales de torre.

4.3. MODELOS Y CÓDIGOS DE SIMULACIÓN

Las plantas solares de torre central son sistemas industriales muy complejos que necesitan optimizar muchas variables antes de ser construidos, para intentar minimizar la inversión inicial requerida y amortizarla en el menor tiempo posible. En este contexto, se han desarrollado diferentes modelos y códigos de simulación para ayudar en el proceso de diseño de las instalaciones [100]–[102]. Existen dos ramas en las que se pueden dividir estos modelos y programas: optimización de sistemas y análisis detallado de la eficiencia óptica del campo de heliostatos. Dentro de los códigos disponibles, se pueden evaluar diferentes componentes de los sistemas de torre, como son la calidad óptica del campo de heliostatos, la eficiencia del receptor y del sistema en conjunto, la transferencia, intercambio y almacenamiento de calor del fluido de trabajo (HTF, *Heat Transfer Fluid*), así como el ciclo de potencia.

En el caso del modelado de los componentes ópticos del campo de heliostatos, se diseñan los componentes del sistema de torre para formar una imagen del disco solar en el plano focal [100]. Con el objetivo de calcular la radiación solar concentrada, se suele usar el método de *ray-tracing* o trazado de rayos, y el método de convolución. En el primero, el principio del método de trazado de rayos es elegir de manera aleatoria un haz de rayos proveniente de una superficie “1”, y determinar cuáles de ellos llegan a una superficie “2” [100]. A partir del número de rayos que impactan sobre un elemento de superficie, se calcula la irradiancia de manera proporcional. En cuanto a los métodos de convolución, los rayos reflejados de superficies elementales de espejos se consideran conos de error, obtenidos por convolución de distribuciones Gaussianas normales correspondientes a cada error, que son los errores en la forma del Sol y los errores de los heliostatos [100]. Para poder realizar simulaciones bien detalladas, es necesario introducir una descripción muy completa de las superficies reflectantes y de la forma del Sol. Si estas propiedades no están bien caracterizadas o son incompletas, es cuando se cometen mayores errores en las simulaciones.

Los primeros códigos fueron desarrollados en EEUU a finales de los años 70. Estos primeros códigos se escribieron en lenguaje FORTRAN, y son: HELIOS y DELSOL. A estos códigos se les han añadido diversas actualizaciones y siguen estando disponibles hoy en día.

Como se ha comentado, se pueden clasificar los diferentes programas según si su objetivo es el del estudio y análisis de la calidad óptica de los campos de heliostatos o la optimización de los sistemas. Existen diversos códigos para cada una de las ramas, como los que se describen en los Apartados 4.3.1 y 4.3.2.

4.3.1. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ÓPTICA DE CAMPOS DE HELIOSTATOS

A lo largo de los años, se han desarrollado diferentes códigos de simulación con el fin de evaluar la calidad óptica de los heliostatos. Algunos códigos son más completos y capaces de simular gran cantidad de heliostatos, pudiendo estudiar el campo de heliostatos en conjunto, mientras que otros se centran en el estudio más detallado de un heliostato individual.

Uno de los primeros códigos desarrollado en los Laboratorios Sandia, en EEUU, fue HELIOS. El objetivo de este software fue el análisis de los experimentos con los campos de heliostatos de Sandia. Como se ha comentado, está escrito en lenguaje FORTRAN. El código es capaz de calcular la distribución de irradiancia sobre el receptor, incluyendo las propiedades ópticas del campo de heliostatos como el sombreado, bloqueo o la forma y reflectancia de los heliostatos, entre otras. Una de las limitaciones de HELIOS es que no es posible simular campos de heliostatos grandes, por lo que no es posible su uso para las grandes plantas comerciales de hoy en día, en las que el número de heliostatos es muy elevado. Para hacerse una idea del tamaño de las plantas comerciales actuales, la última planta comercial puesta en marcha es Cerro Dominador, en Chile, que cuenta con un campo de 10600 heliostatos [103].

DELSOL es otro de los primeros códigos, desarrollado también por los Laboratorios Sandia y escrito en lenguaje FORTRAN. Es posible realizar el análisis de la eficiencia óptica de campos de heliostatos, así como el estudio y optimización de la calidad óptica de heliostatos individuales. Además, se pueden realizar cálculos simplificados de la eficiencia de la planta y análisis económicos. DELSOL trabaja con las pérdidas energéticas más importantes, como el efecto coseno, el bloqueo y sombreado, la extinción atmosférica, la reflectancia de los heliostatos, las pérdidas en el aislamiento y otros factores termodinámicos [101]. Además, es capaz de optimizar el diseño del campo, las dimensiones del receptor o la altura de la torre, teniendo en cuenta el coste. Este software fue actualizado en 2001 por AICIA, CIEMAT y SOLUCAR, dando lugar a WinDELSOL [104].

Por otro lado, a finales de los años 90 se desarrolló en la PSA un software, FIATLUX [105], [106], cuyo objetivo era el estudio de la calidad óptica de los heliostatos. El software se desarrolló en Matlab, simulaba la imagen de un heliostato y ayudaba en los ensayos de los prototipos de heliostatos que llegaban a la PSA para ser evaluados. Desde finales de los 90, todos los prototipos de heliostatos que se han evaluado en la PSA, se han evaluado con la ayuda de FIATLUX. La parametrización de este software es muy completa, lo que permite tomar en consideración todas las posibles fuentes de error.

A finales de los años 80 se desarrolló un software llamado HFLCAL (Heliostat Field Layout Calculations) en el contexto del proyecto GAST, un programa de cooperación español-alemán. En 1994, el DLR compró este software, escrito en FORTRAN. Es capaz de obtener la distribución de irradiancia de la radiación solar

sobre el receptor concentrada por un campo de heliostatos, aplicando la integración de las imágenes producidas por cada uno de los heliostatos del campo [101]. Una de las limitaciones de este software es que el cálculo de esta distribución de irradiancia sobre el receptor no es tan preciso como el obtenido mediante trazado de rayos.

STRAL (Solar Tower Ray-tracing Laboratory) es un software de trazado de rayos, desarrollado por el DLR, centrado en el análisis de la eficiencia óptica del campo de heliostatos. Su objetivo es obtener la distribución de irradiancia del campo de heliostatos de manera exacta y rápida [101]. Este software está escrito con programación orientada a objetos C++.

Por último, uno de los códigos más extendido hoy en día, y que está disponible gratuitamente para todos los usuarios es Tonatiuh [107]. Se trata de un software de trazado de rayos, desarrollado en C++, para la simulación detallada de la calidad óptica de sistemas de concentración solar. Tonatiuh ha sido validado con SolTrace [108], así como con resultados reales experimentales [109]. Ya que es un software de trazado de rayos, el número de rayos y la complejidad del sistema que se esté estudiando determinarán la exactitud y el tiempo de procesamiento.

4.3.2. OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS

La otra rama de simulación es la dedicada a la optimización de sistemas de concentración solar. Uno de los códigos más utilizados es SAM (System Advisor Model), desarrollado por los laboratorios nacionales de energía renovable (NREL) de EEUU. Tiene un amplio rango de usos, ya que puede modelizar desde sistemas de concentración solar, hasta sistemas fotovoltaicos o eólicos. Este software es usado para predecir la eficiencia y los costes de los sistemas. Además, es capaz de optimizar el tamaño del receptor, la altura de la torre y el número y distribución de heliostatos, para minimizar el LCOE (Levelized Cost of Energy). Para el cálculo de las pérdidas energéticas del sistema, el software incluye las pérdidas por efecto coseno, extinción atmosférica, reflectancia y bloqueos entre los heliostatos que apuntan al centro del receptor [101]. Sin embargo, no tiene en cuenta el sombreado para agilizar el procedimiento.

Otro código de trazado de rayos es SolTrace, cuya finalidad es modelizar sistemas ópticos complejos de energía solar de concentración y analizar su eficiencia [100]. Fue desarrollado por NREL, y actualizado a C++. SolTrace es capaz de modelizar cualquier sistema óptico usando el Sol como fuente de luz. El software acepta diferentes definiciones para el Sol, es decir, acepta diferentes formas solares (Sun shapes). Otra de las ventajas es que es capaz de manejar muchas configuraciones diferentes, así como su robustez y exactitud para analizar la eficiencia óptica de campos

de heliostatos [101]. Además, está disponible de manera gratuita para todos los usuarios.

Existen también códigos que se usan para modelizar la transferencia, intercambio y almacenamiento del fluido de trabajo en las centrales termosolares, como TRNSYS y FLUENT. El primero, TRNSYS, es utilizado para modelizar el intercambio de calor del fluido, así como para modelizar la eficiencia total de los sistemas. Este software es utilizado para modelizar sistemas transitorios usando componentes modulares [102]. Los componentes que pueden ser añadidos y desarrollados son los concentradores, intercambiadores de calor, tanques de almacenamiento térmico o tuberías, entre otros. TRNSYS se desarrolló en la Universidad de Wisconsin, y entre sus aplicaciones se incluyen además de los sistemas solares de concentración, los sistemas fotovoltaicos, sistemas de energías renovables o cogeneración.

Por último, FLUENT es un código de dinámica de fluidos computacional (CFD, Computational Fluid Dynamics) que simula el flujo laminar y turbulento de fluidos, conducción, convección o radiación, entre otros. Este software trabaja resolviendo las ecuaciones de continuidad, momento y energía para cada celda de volumen finito dentro de un dominio discretizado [102]. Incluye diferentes modelos de transferencia radiativa, y se puede aplicar a diferentes componentes de sistemas de receptor central, introduciendo la geometría detallada del sistema. FLUENT está disponible comercialmente, y es propiedad de ANSYS [110].

CAPÍTULO 5.

MEDIDA DE IRRADIANCIA EN UN RECEPTOR DE REDUCIDA SUPERFICIE (< 1 m²)

En este capítulo se expone la hipótesis propuesta para medir altas irradiancias en receptores mediante el uso de una cámara digital y un radiómetro exclusivamente, así como el experimento diseñado para confirmar dicha hipótesis. Se explica el proceso de construcción de un receptor con una superficie reducida para que pueda ser instalado en el horno solar SF60 de la Plataforma Solar de Almería. Se presentan los resultados de este experimento y a continuación se comparan con la medida de alta irradiancia que proporciona el sistema oficial de blanco lambertiano que posee el horno solar. Además, se proporcionan los datos de potencia obtenidos en este ensayo.

“La especie humana tiene ahora más que nunca el reto de demostrar su dominio, no de la naturaleza, sino de sí mismo.”

Rachel Carson (1907-1964)

(Demostró los efectos nocivos de los pesticidas en el medio ambiente)

5.1. INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores se han descrito los distintos sistemas de medida directos e indirectos para medir alta irradiancia, así como todas las limitaciones que tienen en las centrales de torre comerciales. Debido a las pocas modificaciones que son posibles realizar en la torre, es necesario desarrollar un nuevo método que no altere la distribución o estructura de la torre, y que no perturbe su operación. Estos últimos motivos han sido los que han llevado a desarrollar el método de medida de irradiancia en la superficie del receptor en el que se basa esta tesis.

La hipótesis de partida de esta tesis se basa en la capacidad de poder captar mediante cámaras digitales la radiación que refleja cualquier superficie, en este caso en concreto, una superficie lambertiana. Además, será necesario un radiómetro para calibrar estas imágenes, dándoles un significado físico, en este caso, transformando los valores de las imágenes (niveles de gris) a unidades de irradiancia (kWm⁻²).

Es necesario seleccionar una cámara digital que se adapte a las necesidades de esta hipótesis. En primer lugar, se escoge la cámara en base al rango espectral en el que se desea trabajar. Dependiendo de las distancias de trabajo se elige una lente adaptable a la cámara. Finalmente, se eligen filtros adaptables a la lente que permitan adaptar el nivel de radiación de la cámara. Estas cámaras digitales suelen usar dos tipos de sensores: los dispositivos de carga acoplada (*charged couple device*, CCD) o de semiconductor de óxido de metal complementario (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*, CMOS). Tradicionalmente, las cámaras CCD proporcionaban imágenes con una calidad superior. Hoy en día, los sensores CMOS son equiparables en calidad de imagen a los CCD y a un precio más reducido. En esta sección se ha elegido una cámara digital tipo CMOS [111], [112].

Una vez se dispone de una cámara digital apropiada para el proceso de adquisición de imágenes, es necesario elegir un radiómetro para calibrar estas imágenes. Se ha escogido un radiómetro tipo Gardon, como se ha explicado en el Capítulo 3, debido a su gran versatilidad.

Además del sistema escogido, es necesario contar con otro sistema alternativo y fiable de la medida de alta irradiancia que sirva de referencia. Ambos sistemas serán utilizados en la instalación donde se procederá a realizar el ensayo, en este caso el Horno solar SF60 de la PSA. El sistema de referencia usado será el sistema de medida indirecta del blanco lambertiano móvil [91], descrito en el Capítulo 4. El procedimiento de medida con el blanco lambertiano ha sido validado con el sistema de medida directo [76], como se ha explicado en el Capítulo 4 [91]. Para comparar estas medidas con las de la hipótesis, se construye un receptor de reducido tamaño, que se describirá en un apartado específico.

A continuación, se procede a explicar la hipótesis, así como el ensayo realizado en el horno solar, los resultados y algunas de las conclusiones que se pueden obtener de él.

5.2. HIPÓTESIS PARA LA MEDIDA DE ALTA IRRADIANCIA EN LA SUPERFICIE DE RECEPTORES

Se propone medir alta irradiancia solar, I , en la superficie de un receptor en un sistema de torre central, mediante la utilización de un radiómetro, r , y una cámara digital exclusivamente. Existen distintas tipologías de receptores, como pueden ser los receptores de tubos, volumétricos, o de cavidad. En esta hipótesis, será necesario disponer de receptores exteriores (como los de tubos o volumétricos), en los que en la superficie del mismo es dónde se empieza a producir el intercambio de calor entre el fluido de trabajo y el receptor, para que se pueda captar mediante la cámara la radiación que incide sobre la superficie. Según el tipo de receptor usado en la torre, la superficie objeto de estudio varía, por lo que es necesario estudiar el comportamiento de la reflectancia de la superficie del receptor junto con la pintura que lo recubre para mejorar su absorptancia radiativa.

El primer paso para saber si se puede usar una cámara digital para medir irradiancia sobre una superficie, es analizar su comportamiento difusor. Es necesario que la superficie tenga un comportamiento lambertiano, es decir, que todos los rayos de luz que recibe los refleje por igual en todas las direcciones. En otras palabras, se puede describir una superficie lambertiana como aquella que nos proporciona una distribución uniforme de la radiación incidente tal que su radiancia y luminancia es la misma en todas las direcciones. Esta primera hipótesis nos permite asegurar que, sea cual sea la posición de la cámara, va a captar la radiancia reflejada por el receptor con igual valor, ya que no hay una dirección predeterminada. El estudio de la difusividad sólo necesita de una foto de la superficie del receptor, para comprobar su homogeneidad, y de un luminancímetro [113]. Se ha realizado este estudio para el receptor construido, y los resultados se presentan en el Apartado 5.4.

El segundo paso es la calibración de la cámara utilizando un radiómetro. Este paso permite la transformación de una imagen, expresada en niveles de gris (GL) a niveles de irradiancia, en kW m⁻². Se efectuarán dos calibraciones, una correspondiente al blanco lambertiano, $I\text{-GL}_B$, y otra para el receptor, $I\text{-GL}_R$.

Se sitúa la cámara frente a la superficie a calibrar y se van tomando imágenes a medida que aumentamos la cantidad de irradiancia. En estas imágenes se podrá apreciar tanto la superficie objeto de estudio como el radiómetro. De esta manera y gracias a la respuesta lineal de la cámara a la radiación, se puede relacionar la irradiancia medida por el radiómetro, con el nivel de gris de la superficie, de la siguiente manera:

Capítulo 5. Medida de Irradiancia en un Receptor de Reducida Superficie (<1 m²)

$$I = K_B GL_B \quad \text{Ecuación 5.2.1}$$

Dónde I es la irradiancia, K_B es la constante de calibración y GL_B es el nivel de gris del blanco lambertiano. K_B depende de una constante de la cámara digital y de la reflectancia de la superficie, K_B(cte_{CD}, ρ_B). Similar relación se obtiene para la superficie del receptor R, con constante de calibración K_R(cte_{CD}, ρ_R):

$$I = K_R GL_R \quad \text{Ecuación 5.2.2}$$

Cada constante de calibración depende de la reflectancia de la superficie (incluido el recubrimiento) y de una constante de la cámara digital. La constante de la cámara, cte_{CD}, representa la proporción lineal entre radiación y niveles de gris.

Los niveles de gris de las imágenes de la cámara dependen de la reflectancia de la superficie (incluido el recubrimiento) y de una constante de la cámara digital. Se puede expresar en los siguientes términos:

$$GL_B = \text{cte}_{CD} \tau_B I \rho_B \quad \text{Ecuación 5.2.3}$$

$$GL_R = \text{cte}_{CD} \tau_R I \rho_R \quad \text{Ecuación 5.2.4}$$

ρ_B y ρ_R son las reflectancias solares de las pinturas del blanco lambertiano (Amercoat® 741) y receptor (Pyromark® 2500) respectivamente, ponderadas al espectro solar de directa G_{bλ} en el rango espectral de la cámara escogida (en este caso 400-1000 nm). τ_B y τ_R son los tiempos de exposición de la cámara para cada superficie. Ambas se pueden obtener [33]:

$$\rho_{B,R} = \frac{\int_{400}^{1000} \rho_{B,R\lambda} G_{b\lambda} \rho_{h\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{1000} G_{b\lambda} \rho_{h\lambda} d\lambda} \quad \text{Ecuación 5.2.5}$$

Dónde ρ_{B,Rλ} se refiere al blanco lambertiano o al radiómetro, según la reflectancia espectral que se quiera calcular, ρ_{hλ} es la reflectancia espectral del heliostato, ya conocida.

Una vez calculadas las reflectancias del blanco lambertiano y del receptor objeto de estudio, se relacionan las cuatro ecuaciones (Ecuación 5.2.1 a Ecuación 5.2.4) de manera que se pueda obtener una ecuación que permita predecir la irradiancia en base a los niveles de gris de la imagen captada por la cámara y a la reflectancia.

Se calcula el cociente entre ambas ecuaciones de los niveles de gris, con el fin de obtener una relación entre los dos niveles de gris, las reflectancias y el tiempo de exposición:

$$\frac{GL_B}{GL_R} = \frac{\tau_B \rho_B}{\tau_R \rho_R}$$

$$GL_B = GL_R \frac{\tau_B \rho_B}{\tau_R \rho_R} \quad \text{Ecuación 5.2.6}$$

Con esta última ecuación (Ecuación 5.2.6), se puede relacionar el nivel de gris del blanco lambertiano con el del receptor, si es sabido el cociente entre las reflectancias de ambos recubrimientos y los tiempos de exposición de la cámara. Es decir, si son conocidas las reflectancias de las dos superficies, y los niveles de gris de una de las variables (el blanco lambertiano o receptor), se puede predecir el nivel de gris de la otra superficie para un mismo nivel de irradiancia. Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación para la irradiancia del blanco lambertiano (Ecuación 5.2.1) el GL del blanco (Ecuación 5.2.6), se obtiene la curva de calibración referida al receptor, que será:

$$I = K_B \left(\frac{\tau_B \rho_B}{\tau_R \rho_R} \right) GL_R \quad \text{Ecuación 5.2.7}$$

Se conseguiría de esta manera, trasladar la calibración obtenida con el blanco lambertiano a una función de calibración referida a la superficie del receptor.

A continuación, se utiliza la ecuación que relaciona las irradiancias con las constantes de calibración y los niveles de gris, para obtener una fórmula que relacione las reflectancias con las constantes de calibración, junto con los tiempos de exposición del blanco y del receptor:

$$\frac{K_R}{K_B} = \frac{\tau_B \rho_B}{\tau_R \rho_R} \quad \text{Ecuación 5.2.8}$$

Esta ecuación explica que, en condiciones ideales con la cámara, conocida la constante de calibración obtenida con el blanco lambertiano y sabiendo el cociente entre las reflectancias (conocido), se puede obtener directamente la constante de calibración del receptor. Para que estas condiciones ideales se den, es necesario que la cámara tenga un valor de 0 nivel de gris cuando hay nivel 0 de irradiancia. Esto no puede ocurrir, ya que las cámaras tienen un nivel de ruido de fondo impuesto para evitar valores de niveles de gris negativos y además ruido térmico causado al calentarse el sensor de la cámara por su funcionamiento. Cuanto más caliente esté el sensor, el ruido de fondo es mayor, por lo que afecta a la imagen tomada. Este efecto térmico es muy reducido en cámaras de alta gama con refrigeración Peltier.

Es por esto, debido al *background* o ruido de fondo de la cámara, que a las ecuaciones se les debe añadir una ordenada en el origen. El significado físico de esta ordenada en el origen corresponde con el valor de GL que hay cuando la irradiancia es

nula; es de esperar, por tanto, un valor negativo para la ordenada en el origen de las funciones de calibración obtenidas con cámara. Explícitamente:

- Blanco lambertiano: $I = K_B GL_B + b_B$ Ecuación 5.2.9

$$GL_B = \text{cte}_{CD} \tau_B I \rho_B \quad \text{Ecuación 5.2.10}$$

- Receptor: $I = K_R GL_R + b_R$ Ecuación 5.2.11

$$GL_R = \text{cte}_{CD} \tau_R I \rho_R \quad \text{Ecuación 5.2.12}$$

Se repite el mismo proceso que antes, para obtener la nueva relación entre reflectancias y constantes de calibración. En primer lugar se calcula el cociente entre los niveles de gris, igual que se ha efectuado anteriormente, y con el mismo resultado, ya que estas ecuaciones (Ecuación 5.2.10 y Ecuación 5.2.12) no son las que sufren las variaciones debidas a las ordenadas en el origen. Las ecuaciones que van a tener modificaciones con respecto a las obtenidas anteriormente son las correspondientes a la irradiancia (Ecuación 5.2.7 y Ecuación 5.2.8).

Se reformula esta última ecuación mencionada, y se obtiene:

$$1 = \frac{K_B GL_B + b_B}{K_R GL_R + b_R}$$

$$K_R GL_R + b_R = K_B GL_B + b_B$$

Se sustituye GL_B por GL_R (Ecuación 5.2.6):

$$K_R GL_R + b_R = K_B GL_R \frac{\tau_B \rho_B}{\tau_R \rho_R} + b_B$$

$$GL_R \left(K_R - K_B \frac{\tau_B \rho_B}{\tau_R \rho_R} \right) = b_B - b_R$$

$$GL_R = \frac{b_B - b_R}{K_R - K_B \frac{\tau_B \rho_B}{\tau_R \rho_R}} \quad \text{Ecuación 5.2.13}$$

De esta manera, se obtiene cuál es el nivel de gris correspondiente al ruido de fondo de la cámara, que obliga a modificar la ecuación que se ha explicado anteriormente correspondiente al caso ideal en el que para una irradiancia nula, se debería tener un nivel de gris de 0. Para comprobar que esta ecuación está conforme con las hipótesis sobre las ordenadas en el origen, debidas al ruido de fondo, se minimiza:

$$\frac{\partial}{\partial GL_R} \left(GL_R \left(K_R - K_B \frac{\rho_B}{\rho_R} \right) - b_B + b_R \right) = 0$$

$$K_R - K_B \frac{\tau_B \rho_B}{\tau_R \rho_R} = 0$$

$$K_R = K_B \frac{\tau_B \rho_B}{\tau_R \rho_R}$$

$$\frac{K_R}{K_B} = \frac{\tau_B \rho_B}{\tau_R \rho_R}$$

Ecuación 5.2.14

Como se puede ver en la última ecuación, al minimizarla, se retrocede otra vez a la fórmula obtenida (Ecuación 5.2.8) para condiciones ideales de la cámara, donde se pueden relacionar las constantes de calibración de cada superficie con las reflectancias de las mismas y los tiempos de exposición.

Explicada ya la nueva hipótesis para medir altas irradiancias en las centrales de torre comerciales, se procede a describir el ensayo propuesto para la comprobación de las nuevas ecuaciones y su posterior análisis.

5.3. DESCRIPCIÓN DEL RECEPTOR

Se ha construido un receptor de reducido tamaño, circular y de acero inoxidable, específicamente para los test de medida de alta irradiancia. Este receptor tiene refrigeración por agua gracias a las tuberías de entrada y salida, además de tres termopares (T1, T2, T3) de tipo K en su parte anterior para saber la temperatura del fluido que circula por el interior del receptor. La temperatura en la superficie del receptor pintado se mide mediante una cámara de infrarrojos, suponiendo una emitancia de la superficie del 95% en todo el rango de temperaturas medido.



Figura 5.3.1. Imágenes del receptor y sus dimensiones

El receptor ha sido pintado con Pyromark® 2500, el recubrimiento usado comúnmente en los receptores de las plantas comerciales. Una vez aplicada la pintura sobre el receptor, el fabricante, Tempil, recomienda un proceso de curado que consiste en calentar el receptor en un horno de mufla.

Un horno de mufla es una cámara cerrada construida con materiales refractarios. Puede alcanzar temperaturas de hasta 1200 °C. Se suele usar para la cocción de materiales cerámicos y para la fundición de metales a través de la energía térmica.



Figura 5.3.2. a) Horno mufla. b) Horno mufla abierto con el receptor dentro

El proceso de curado tiene dos fases, la primera calentar el receptor durante dos horas a 250 °C, y la segunda fase a una temperatura de 540 °C durante una hora. Una vez pintado con Pyromark® 2500 y curado, la superficie del receptor tiene una absorptancia solar del 95 % [114], [115].

5.3.1. PYROMARK® 2500

Pyromark® 2500 es una pintura a base de silicona para aplicaciones de alta temperatura, usada como recubrimiento de los receptores de las centrales de torre. Esta pintura aumenta la absorptancia de la superficie del receptor, consiguiendo aumentar la eficiencia de los receptores, y con ello, la eficiencia de la planta.

Está especialmente formulada para superficies metálicas destinadas a una alta exposición a la radiación. El revestimiento a base de silicona proporciona una protección duradera contra la oxidación y la corrosión. Su reflectancia espectral está representada en la Figura 5.3.1.1. Además de la reflectancia del Pyromark®, se ha representado también la reflectancia del Zynolyte®, pintura usada para cubrir la cara frontal del radiómetro y lograr una máxima absorción de la radiación. La reflectancia de un heliostato, obtenida con un reflectómetro [116], también se ha añadido a la Figura 5.3.1.1, junto con la reflectancia del Amercoat®, pintura blanca con la cual se recubre el sistema de medida de referencia de este capítulo (Apartado 5.5.1).

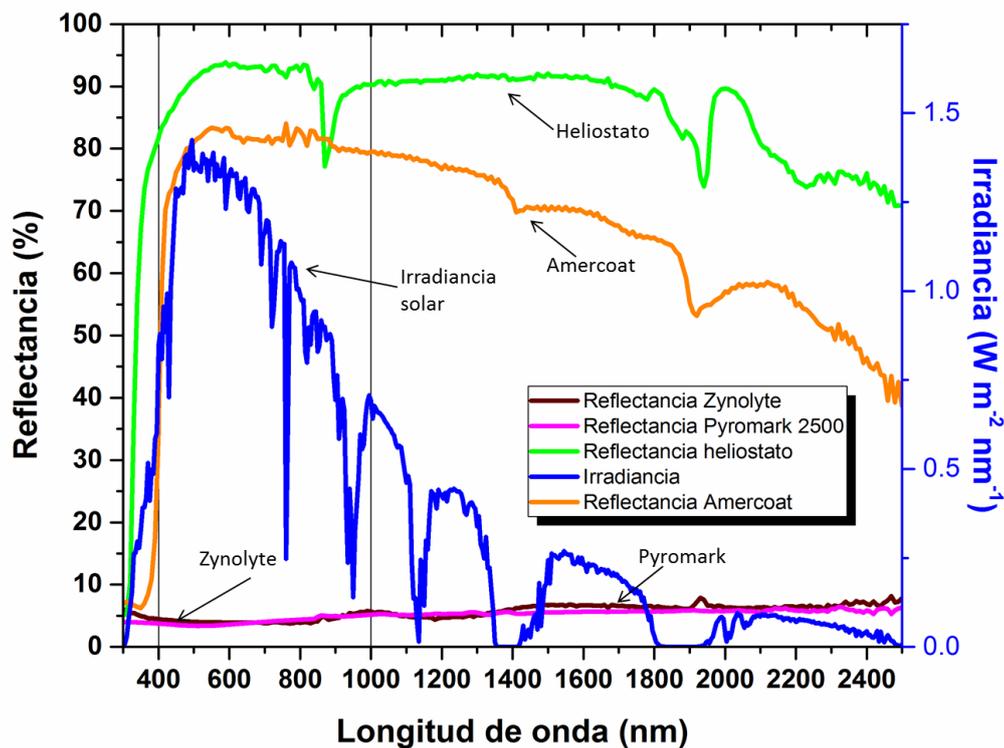


Figura 5.3.1.1. Reflectancia espectral del Pyromark® 2500, Zynolyte®, y heliostato frente a la longitud de onda

Como se puede ver en la Figura 5.3.1.1, la reflectancia en el rango del espectro solar del Pyromark® 2500 oscila entre el 3 % y el 6 % aproximadamente. El rango espectral de trabajo de la cámara Hammamatsu utilizada para la medida de alta

irradiancia es 400-1000 nm, indicado por las líneas negras verticales. En este intervalo, la reflectancia del Pyromark® 2500 varía entre 3.4 - 5.2 %.

Usando la Ecuación 5.2.5, se puede obtener la reflectancia del pyromark entre dos longitudes de onda escogidas. Se calcula la reflectancia entre los siguientes dos intervalos:

1. [300,2500] : Rango del espectro solar
2. [400,1000] : Rango espectral de la cámara Hammamatsu empleada

Las reflectancias obtenidas usando la Ecuación 5.2.5 son:

1. $\rho_{Pyromark} = 4.36 \%$, $300 \leq \lambda \leq 2500 \text{ nm}$
2. $\rho_{Pyromark} = 3.97 \%$, $400 \leq \lambda \leq 1000 \text{ nm}$

Estos valores obtenidos sirven para calcular los cocientes entre las reflectancias de la Ecuación 5.2.13, que permite relacionar los niveles de gris de las imágenes tomadas con la cámara con las constantes de calibración del blanco y del receptor. Para ello, se ha obtenido también, mediante la Ecuación 5.2.5, las reflectancias para el Zynolyte®, pintura con la cual se ha recubierto la superficie del radiómetro, con el fin de que absorba la mayor cantidad de radiación que llega al frontal del radiómetro. Estas reflectancias obtenidas son:

1. $\rho_{Zynolyte} = 4.56 \%$, $300 \leq \lambda \leq 2500 \text{ nm}$
2. $\rho_{Zynolyte} = 4.13 \%$, $400 \leq \lambda \leq 1000 \text{ nm}$

La curva de reflectancia en el rango del espectro solar para el Zynolyte viene dada en la Figura 5.3.1.1, con el fin de que se comparen mejor las reflectancias del Zynolyte® y del Pyromark® 2500, para poder observar el comportamiento de cada una según la longitud de onda en la que se trabaje. En ella se ve que ambas reflectancias son muy parecidas, pero el Pyromark® tiene un poco menos de reflectancia, lo que hará que absorba algo más de radiación que una superficie pintada con Zynolyte®.

En la Figura 5.3.1.1 también se ha representado la reflectancia del Amercoat®, pintura con la cual se recubre la superficie del blanco lambertiano. Siguiendo el mismo proceso anterior para calcular la reflectancia a partir de la Ecuación 5.2.5, se obtiene la reflectancia del Amercoat®:

1. $\rho_{Amercoat} = 76.42 \%$, $300 \leq \lambda \leq 2500 \text{ nm}$
2. $\rho_{Amercoat} = 80.38 \%$, $400 \leq \lambda \leq 1000 \text{ nm}$

Con las reflectancias calculadas, usando la Ecuación 5.2.7, se puede predecir la irradiancia a partir de los niveles de gris de las imágenes que se toman con la cámara digital. Para comprobar esta hipótesis, es necesario realizar el experimento planteado. En primer lugar, se construye el receptor, se pinta con el recubrimiento analizado en este apartado, y se procede a caracterizar la superficie del receptor, con el objetivo de

estudiar si se ha conseguido una superficie homogénea, y para comprobar que se trate de una superficie lambertiana. A continuación se expone el proceso de caracterización de la superficie del receptor para después realizar el ensayo en el horno solar.

5.4. CARACTERIZACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL RECEPTOR

Existen dos tipos de reflexión de radiación cuando ésta incide sobre una superficie: difusa o especular. La reflexión difusa se produce cuando la radiación es reflejada por la superficie en diferentes direcciones. Sin embargo, la reflexión especular es aquella que refleja la radiación de modo que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (Figura 5.4.1).

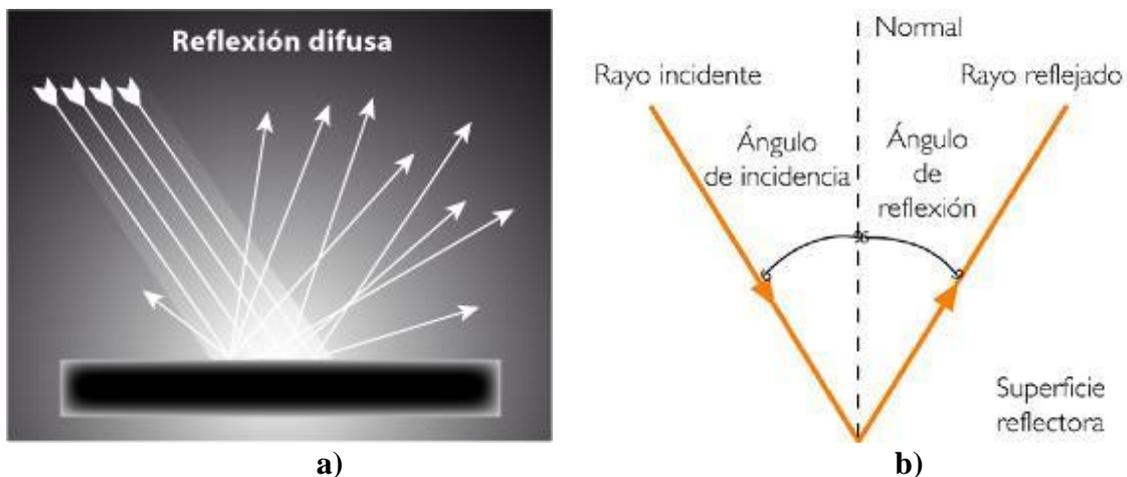


Figura 5.4.1. Reflexión difusa vs reflexión especular

Una superficie lambertiana es aquella superficie sobre la cual se produce una reflexión difusa ideal, es decir, la superficie refleja o emite la misma luminancia en todas las direcciones. Se trata pues de un difusor perfecto, el cual es importante en las técnicas de medida que involucran cámaras digitales usadas en concentración solar. Estas técnicas toman fotografías de la superficie difusa desde cualquier ángulo, tal como hace la técnica de medida de alta irradiancia estudiada en esta tesis. Además de esta medida, se usa también para caracterización de heliostatos o para la medida de la extinción solar en las centrales de torre [49], [117].

El motivo principal por el que se requieren superficies lambertianas es el requerimiento de que la radiación solar reflejada sea isotrópica durante el transcurso de la toma de imágenes por la cámara digital. Esto permite despreocuparse de la componente direccional de la radiación reflejada con respecto a la posición de la cámara.

Con este objetivo, se desarrolló en la PSA un método de caracterización para superficies lambertianas [113], que consiste en estudiar la homogeneidad de la superficie además de la luminancia en función del ángulo. En primer lugar, se toma una

fotografía de la superficie a analizar. Con esta imagen se puede estudiar si se trata de una superficie homogénea, como se puede apreciar en las Figura 5.4.2 y Figura 5.4.3, de dónde se obtiene que la dispersión es menor del 0.3 % (Figura 5.4.3).



Figura 5.4.2. Área de 4x 4 cm del receptor pintado con Pyromark 2500

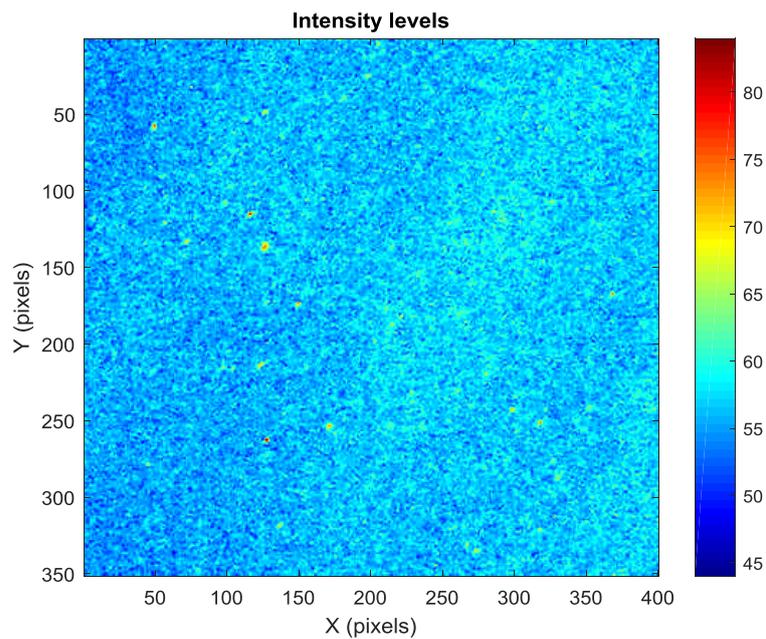


Figura 5.4.3. Dispersión en la pintura del receptor

La ventaja de este método es que permite caracterizar la pintura utilizada y la superficie en conjunto, viendo el grado de difusividad. Al tratarse de una pintura negra, que refleja una baja cantidad de luz, es necesario usar una cámara con una sensibilidad aceptable, como la Canon EOS 350D. Esta cámara tiene un sensor de 8 megapíxeles de resolución espacial y 8 bits de resolución para la intensidad luminosa, suficiente para comprobar la homogeneidad en esta situación.

Capítulo 5. Medida de Irradiancia en un Receptor de Reducida Superficie (<math><1\text{ m}^2</math>)

Para analizar la superficie del receptor mediante este método, se ha escogido un área central de 4 x 4 cm, y se ha visto que la dispersión es del 0.3 %. Esta baja dispersión es debida a la homogeneidad de la superficie pintada con Pyromark 2500. Una vez comprobada la primera parte de la caracterización, y al obtener un buen resultado en el grado de homogeneidad de la muestra, se procede a realizar el segundo test al receptor.

El segundo test consiste en analizar las variaciones de luminancia en la superficie del receptor sometido a radiación difusa al ser observado a una misma distancia desde distintos ángulos. El luminancímetro utilizado es el MAVO-SPOT 2 (Figura 5.4.4), que contiene un sensor de alta precisión con un campo de visión de 15° y un ángulo de medida de 1°. Las medidas tomadas con este dispositivo tienen una exactitud del 3 %. Si se sitúa el luminancímetro a 1 metro de distancia del centro del receptor y en posición perpendicular a él, el área de medida en la superficie corresponde con un círculo de 1.7 cm de diámetro. La luminancia medida en este área se compara con medidas efectuadas a la misma distancia pero a diferentes ángulos de la perpendicular: $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 40^\circ$, $\pm 50^\circ$, $\pm 60^\circ$ y $\pm 70^\circ$ (Figura 5.4.5).



Figura 5.4.4. Luminancímetro MAVO-SPOT 2



Figura 5.4.5. Test para estudio de comportamiento lambertiano en función del ángulo de medida

La toma de medidas consiste en situarse en cada una de las diferentes posiciones angulares marcadas y medir con el luminancímetro la luminancia procedente de la misma zona del receptor en cada uno de ellas. Este proceso dura aproximadamente 2 minutos, y se efectúa en una habitación con iluminación tenue para eliminar las posibles variaciones en la luminosidad del ambiente externo, que introducirían distorsiones en las medidas.

Como el ensayo que se ha preparado se va a llevar a cabo en el horno solar SF60 de la PSA, descrito en el Apartado 5.5.1, es necesario que la superficie sea lambertiana en el “Rim Angle” del horno, que corresponde con 50.5°. Al tomar estas medidas, se obtiene que la superficie se comporta como un blanco lambertiano en la zona angular de interés, como se puede ver en la Tabla 5.4.1 y en la Figura 5.4.6. Las desviaciones que aparecen en la Tabla 5.4.1 son las desviaciones respecto a la posición perpendicular al receptor (0° en este caso), y vienen dadas por la Ecuación 5.4.1:

$$D_{\theta}(\%) = 100 \frac{L_{\theta} - L_0}{L_0} \quad \text{Ecuación 5.4.1}$$

Dónde L_{θ} es la medida de luminancia en las diferentes posiciones angulares, y L_0 es la luminancia en la posición perpendicular al receptor. Las incertidumbres asociadas con estas desviaciones se calculan con la Ecuación 5.4.2:

$$\Delta D_{\theta}(\%) = \sqrt{\left(\frac{100}{L_0}\right)^2 (\Delta L_{\theta})^2 + \left(\frac{100L_{\theta}}{L_0^2}\right)^2 (\Delta L_0)^2} \quad \text{Ecuación 5.4.2}$$

Ángulo (°)	Luminancia (cd m ⁻²)	Desviación (%)	Incertidumbre (%)
-70	0.42	5.0	4.5
-60	0.41	2.5	4.3
-50	0.4	0.0	4.2
-40	0.41	2.5	4.3
-30	0.39	-2.5	4.1
-20	0.4	0.0	4.2
-10	0.4	0.0	4.2
0	0.4	0.0	4.2
10	0.41	2.5	4.3
20	0.41	2.5	4.3
30	0.42	5.0	4.5
40	0.42	5.0	4.5
50	0.43	7.5	4.6
60	0.46	15.0	4.9
70	0.53	32.5	5.6

Tabla 5.4.1. Medidas tomadas de la luminancia en función de la variación angular

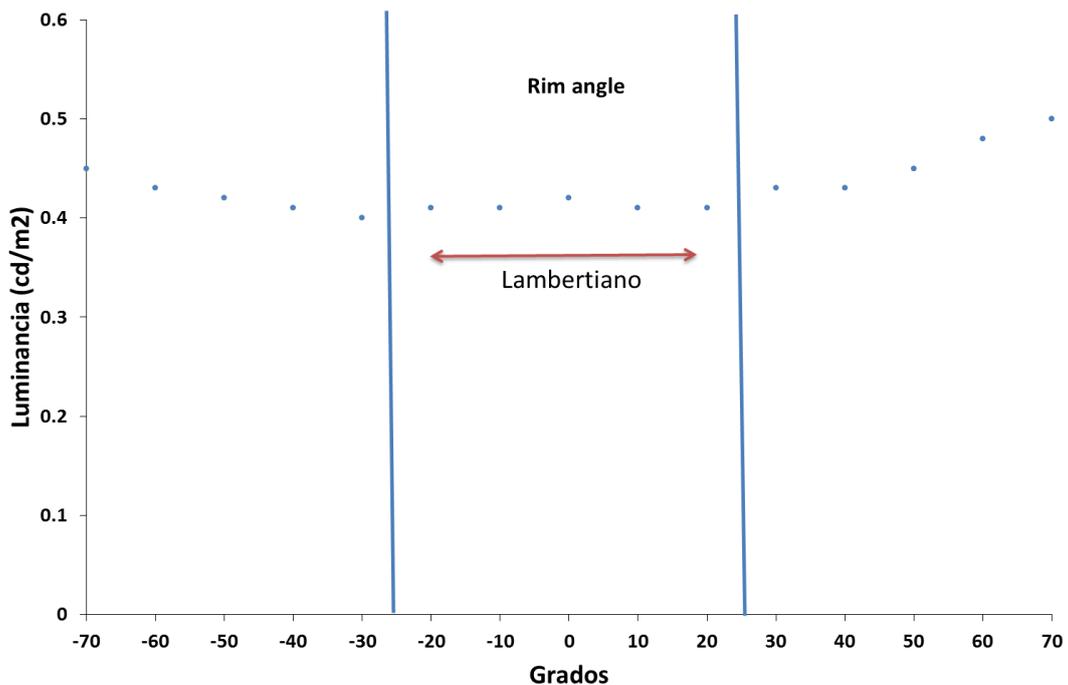


Figura 5.4.6. Variación angular de la luminancia en la superficie del receptor

De la Figura 5.4.6 se puede deducir que la cámara utilizada para medir alta irradiancia puede situarse en cualquier punto dentro del ángulo del horno (Rim Angle), ya que el valor medido será constante.

5.5. ENSAYO EN EL HORNO SOLAR

Para llevar a cabo la comprobación de la hipótesis inicial sobre la posibilidad de medir alta irradiancia directamente sobre la superficie de un receptor, sin la necesidad del uso de un blanco lambertiano, se ha elegido la instalación del horno solar SF60 de la PSA. Esta instalación permite variar la irradiancia concentrada sobre el objeto de estudio, ya que dispone de un atenuador que permite cubrir un amplio rango de irradiancias, entre ellas, el rango en el que operan las centrales de torre. Además, para este ensayo es necesario tomar medidas de referencia para su posterior comparación con las medidas obtenidas sobre la superficie del receptor, razón por la cual se ha escogido esta instalación, ya que dispone de un blanco lambertiano de fácil instalación y manejo para que sirva de referencia. A partir de esto, se ha construido el receptor descrito anteriormente ajustándolo a los requerimientos del horno solar.

5.5.1. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN. HORNO SOLAR SF60

En los hornos solares se puede concentrar la radiación solar varios miles de veces. El horno solar SF60 de la PSA consiste en un heliostato plano de grandes dimensiones, un atenuador para poder variar la irradiancia que llega a un concentrador parabólico, y un banco de ensayos. La radiación solar es reflejada por el heliostato, pasa a través del atenuador, y llega al concentrador, el cual concentra la radiación en el punto focal de la parábola, donde está situado el banco de ensayos. Es posible concentrar la radiación solar directa (entre 800-1000 W m⁻²) hasta un factor aproximado de 3000 en un foco de 20 cm de diámetro con una densidad de energía de hasta 3000 kW m⁻² [118]. Este esquema se puede apreciar en la Figura 5.5.1.1:

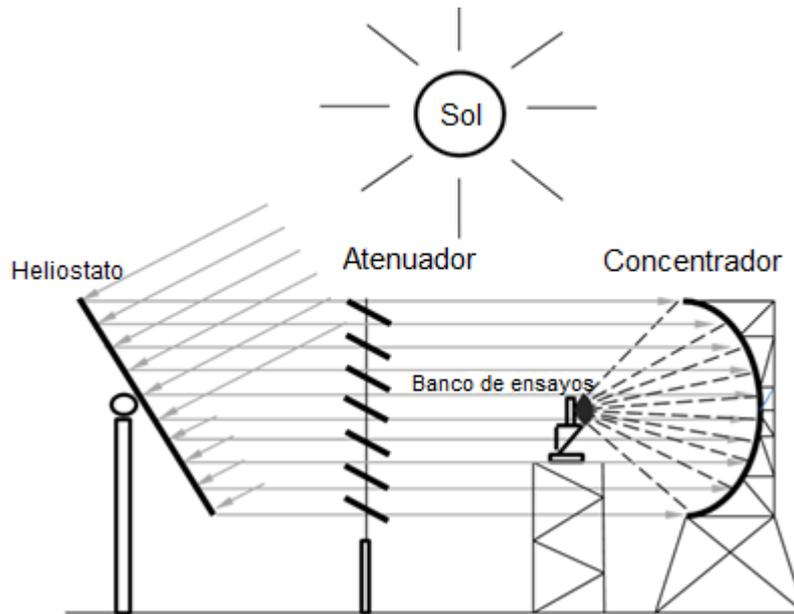
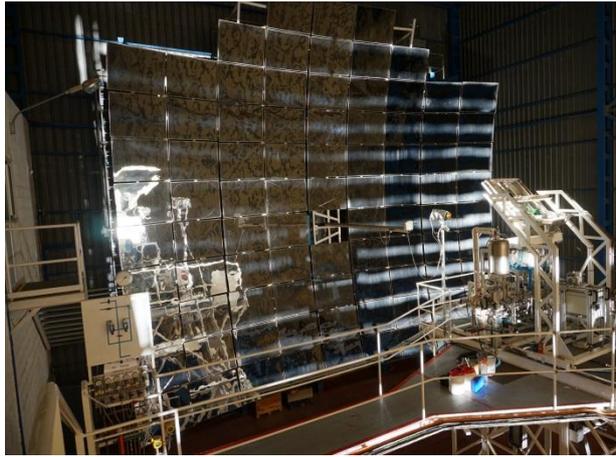


Figura 5.5.1.1. Esquema del horno solar

En la Figura 5.5.1.1 se aprecian todos los componentes citados anteriormente. En primer lugar, el heliostato tiene un área de 140 m², una reflectancia del 93 % y un sistema de seguimiento del Sol. Los rayos de Sol inciden sobre este heliostato, y son reflejados hacia el interior de la instalación, atravesando el atenuador de 11.5 m de ancho por 11.2 m de alto, que consta de 30 lamas colocadas en dos columnas. La inclinación de las lamas se regula con un motor, permitiendo inclinaciones entre 0° (abierto) hasta 55° (cerrado), con el objetivo de controlar la luz proveniente del heliostato para ajustar la concentración de la radiación solar sobre el banco de ensayos.

El concentrador parabólico, con un área de 98.5 m² y el 94 % de reflectancia, está compuesto por 89 facetas de 1.21 m de ancho por 0.91 m de alto, agrupadas en 5 grupos concéntricos alrededor del centro de la parábola. Los rayos de Sol concentrados por el concentrador parabólico, se dirigen al foco de la parábola, dónde está situado el banco de ensayos. El banco de ensayos es una mesa móvil, con motores que controlan el movimiento de la misma en los tres ejes, X,Y,Z desde la sala de control [118]. Esta instalación se puede ver en la Figura 5.5.1.2.



a)



b)

Figura 5.5.1.2. Imágenes del horno solar. a) Concentrador y banco de ensayos. b) Perspectiva desde el exterior: heliostato, atenuador y concentrador

El horno solar SF60 dispone de un blanco lambertiano para medir la distribución de alta irradiancia en el foco, situado en el banco de ensayos, que permite medir a la vez que se están efectuando ensayos. Es necesaria una cámara digital, un blanco lambertiano y un radiómetro (Figura 5.5.1.3). El blanco lambertiano es una lámina de aluminio, con su cara frontal pintada con Amercoat@741, y tiene refrigeración mediante agua. El recubrimiento de Amercoat@741 proporciona al blanco unas propiedades difusoras óptimas [113], [119]. El radiómetro es tipo Gardon con refrigeración por agua, con recubrimiento de grafito coloidal, calibrado en el laboratorio de radiometría de la PSA. Como se ha visto en el Capítulo 3, en el Apartado 3.3.2, el error relativo que se comete al medir potencia con un radiómetro con recubrimiento de grafito coloidal es de un 27.9 % [62]. Se compone de un cilindro de 25.4 mm de largo y 15.9 mm su cara frontal de diámetro. El rango del radiómetro es de 0 a 6470 kW m⁻². Está fabricado por la empresa Vatel, que proporciona una constante de calibración de laboratorio de 292.89 kW m⁻², pero se usa una constante de calibración corregida de 282.64 kW m⁻² para medir radiación solar [62], [64]. La medida de irradiancia con este radiómetro tiene una incertidumbre del 3 %. El modelo del radiómetro es TG1000-1 y su número de serie 9881.

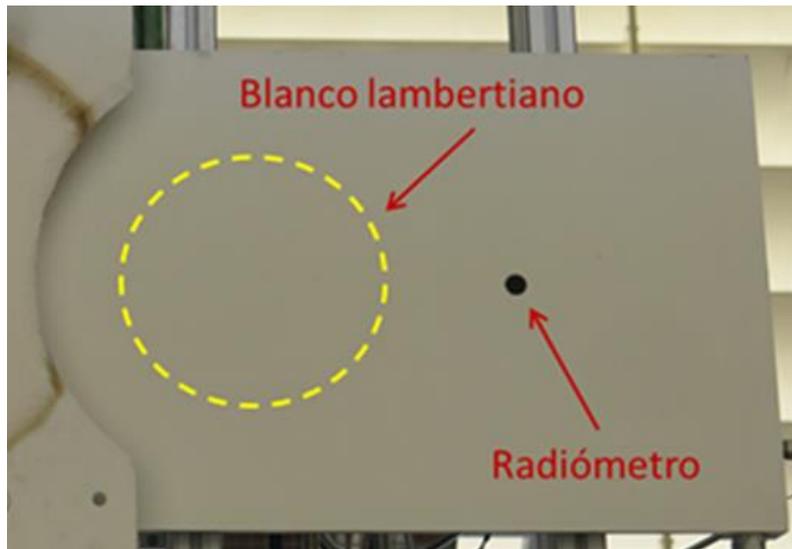


Figura 5.5.1.3. Blanco lambertiano con radiómetro

Se usa la cámara digital para tomar imágenes del blanco de la Figura 5.5.1.3, el cual está situado en el foco del concentrador, interceptando el haz incidente y reflejándolo de forma difusa gracias a sus propiedades. Estas imágenes digitales proporcionan una matriz con los niveles de gris, que puede ser transformada a unidades de irradiancia (kW m^{-2}) mediante una calibración. Para realizar esta calibración se usa el radiómetro como referencia, relacionando el nivel de brillo del blanco lambertiano, que se ha situado cubriendo el espacio que ocupaba el instante anterior el radiómetro, con la medida de irradiancia que proporciona el sensor en el instante anterior a que el blanco cubriera su posición. Este proceso se repite para diferentes niveles de irradiancia, permitiendo obtener una calibración para transformar la matriz de la imagen en escala de grises a unidades de irradiancia.

5.5.1.1. CÁMARA DIGITAL

Existen dos tipos de tecnologías utilizadas para la fabricación de los sensores de cámaras digitales: CCD (*Charge Coupled Device*) y CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). En un sensor CCD los condensadores se encargan de acumular una carga eléctrica proporcional a los fotones incidentes, que se va transmitiendo entre los condensadores sucesivos hasta llegar al último, que transmite la carga a un amplificador y la transforma a un voltaje proporcional. El sensor CMOS tiene como elemento básico el fotodiodo, que es un semiconductor construido con una unión PN, y es sensible a la luz visible e infrarroja. La principal diferencia entre ambos es que cada

pixel o celda se trata de forma individual en los CMOS, y en los CCD se transfiere la carga entre todas las celdas.

La cámara digital que se usa en este sistema es la Hamamatsu®, modelo ORCA-flash4.0 v2 CMOS, conversión A/D de 16 bit, con rango espectral 400-1000 nm, los píxeles disponibles son 2048 (horizontal) x 2048 (vertical), el tamaño de pixel es de 6.5 µm x 6.5 µm, una eficiencia cuántica mayor al 82 % a 600 nm y del 60 % a 750 nm, con un tiempo de exposición que puede variar entre 1 ms hasta 10 s. La lente seleccionada es SOLIGOR Ø55 (Rango del zoom 80-200 mm) F1:4.5. Para prevenir la saturación de la luz, se fijan tres filtros de densidad neutra a la lente. Los filtros seleccionados son ThorLabs Ø2" (NE2R10A OD=1.0, NE2R30A OD=3.0, NE2R40A OD=4.0), proporcionando una transmitancia total de 10⁻⁶ % en su rango espectral de trabajo 300-1000 nm. Este sistema óptico compuesto por la cámara, filtros atenuadores y lente se sitúa en el concentrador, mirando directamente al banco de ensayos. El software usado para la adquisición de imágenes y su procesado es ImagePro Plus 7.0 (Media Cybernetics). [120]

Los aparatos de medida tienen distintas propiedades que afectan a la medida que se realiza. En este caso, algunas de estas propiedades de la cámara digital pueden causar imperfecciones al medir, que se traducen en imperfecciones en las imágenes tomadas o ruido. Este ruido es generado por el sensor de la cámara, sin posibilidad de evitarse y es independiente de la luz incidente. Se puede clasificar en dos tipos, ruido aleatorio y ruido sistemático. El ruido aleatorio varía de una imagen a otra y es impredecible. Sin embargo, el ruido sistemático sí puede predecirse y en caso de ser necesario, se puede compensar. La mayor parte del ruido sistemático que puede ser compensado viene dado por el ruido de fondo, el sombreado y la imperfección de los sensores [111], [112].

5.5.1.1.1. RESPUESTA ESPECTRAL DE LA CÁMARA

La eficiencia cuántica del modelo de cámara Hamamatsu® escogida para la realización de los ensayos está representada en la Figura 5.5.1.1.1.1. Se trata de una medida de la fracción de fotones incidentes que son convertidos en electrones en el semiconductor. La eficiencia cuántica depende de la longitud de onda, y puede llegar hasta valores cercanos al 90% en función de la longitud de onda.

En la Figura 5.5.1.1.1.1 está representada tanto la eficiencia del sensor CMOS como el espectro solar de radiación directa para diferentes masas de aire: AM 1.5 y AM 5. El espectro solar varía a lo largo del día, por lo que, si se tiene en cuenta la eficiencia cuántica, no será lo mismo calibrar con la cámara al mediodía solar que a otra hora del día. Al variar la respuesta espectral o eficiencia cuántica, y depender directamente de la

longitud de onda, se debe calibrar a la hora aproximada a la que se va a realizar el ensayo, para evitar las variaciones en el espectro.

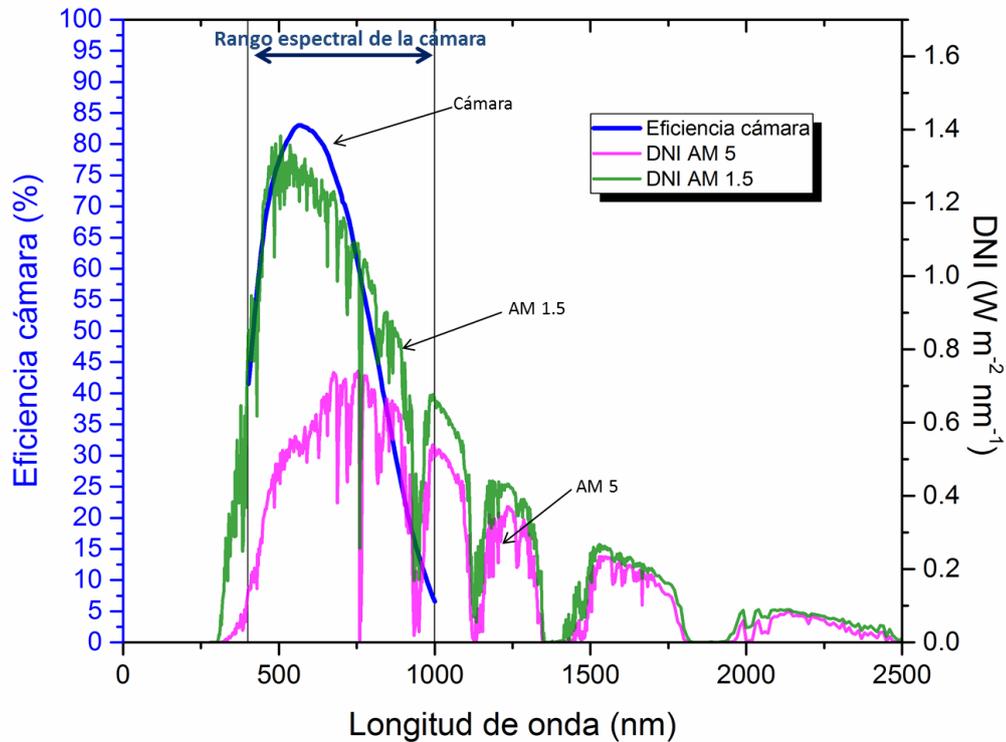


Figura 5.5.1.1.1.1. Eficiencia del sensor CMOS frente a la radiación directa (DNI) con Masa de Aire (AM) 1.5 y AM 5

5.5.1.1.2. RUIDO DE FONDO

El ruido de fondo se puede apreciar tomando una imagen en ausencia de luz. Esta imagen debería dar un valor de 0 niveles de gris en todos los píxeles de la imagen, sin embargo, no es así. Al tomar una imagen con la cámara tapada para que no entre luz, se observa que, al contrario de lo esperado, el valor medio del nivel de gris de la imagen es mayor que 0. Esto es debido a que los fabricantes fuerzan un valor positivo, un “offset”, con el objetivo de evitar posibles lecturas con valores menores que 0 grey level, ya que cualquier valor por debajo de 0 en la cámara, sería interpretado como 0.

Para conocer este ruido de fondo, o “dark current”, se toma la imagen con la cámara tapada, con dos tiempos de exposición correspondientes al blanco lambertiano y al receptor. En el caso de un tiempo de exposición de 50 ms, para el blanco lambertiano, se obtiene una media de 99.2 grey level y una desviación estándar de 2.6. Para el

receptor, se escoge un tiempo de exposición de 500 ms, que da una media de 99.2 grey level y una desviación estándar de 2.8. Una vez obtenida esta imagen y sus valores, a la hora de realizar el experimento se sustraerá la imagen del ruido de fondo a las imágenes tomadas con luz, ya que se pretende medir valores absolutos de irradiancia.

5.5.1.1.3. SOMBREADO

El sombreado es un fenómeno que ocurre en todos los sistemas ópticos, que se percibe en las imágenes, consistente en una disminución de la intensidad luminosa con dependencia radial. Este fenómeno provoca que en los bordes de las imágenes haya menos iluminación que en el centro de la imagen y es debido a las lentes de la cámara y las propiedades ópticas del sistema.

Las lentes tienen un sistema de propagación de los rayos de luz que aumenta desde el centro. El resultado de este fenómeno radial es el sombreado en los extremos de la imagen. Por ello, la imagen es más brillante en el centro que en los bordes. Según la configuración óptica que se emplee y el proceso de toma de medidas, el efecto puede variar su importancia. [\[111\]](#), [\[112\]](#)

5.5.1.1.4. IMPERFECCIÓN EN LOS SENSORES

A la hora de fabricar los sensores, puede haber imperfecciones en los píxeles, que se manifiestan como ruido en cada pixel. Es posible corregir esta imperfección junto con el sombreado tomando una imagen con iluminación plana. Esta iluminación plana puede ser generada con una esfera de Ulbricht, que es el mejor sistema para obtener un frente plano de radiación. Se establece además un tiempo de exposición lo suficientemente grande para asegurarse de estar cerca de la saturación del sensor, garantizando que haya un nivel de señal significativo para mostrar la desviación radial que se produce por el sombreado y las imperfecciones en los píxeles. Se toman varias imágenes con una iluminación plana para determinar el factor de corrección que se deberá aplicar. Esta corrección se debe aplicar en relación a cada pixel.

En el horno solar de la PSA, los rayos de luz forman un ángulo máximo de 50° aproximadamente con respecto al eje óptico de la cámara, por lo que se trabaja con óptica paraxial. Sin embargo, el blanco sobre el que se toman las imágenes representa un pequeño porcentaje del campo de visión de las lentes, por lo que el efecto de sombreado es cuantitativamente insignificante en el proceso de medida. Además, como se van a comparar dos medidas (el blanco lambertiano frente al receptor) tomadas con el

mismo sistema óptico, incluyendo cámara, lente y filtros, se ha decidido no realizar esta corrección para evitar manipulaciones de las imágenes innecesarias.

5.6. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA DE IRRADIANCIA

Los ensayos se llevan a cabo en un día soleado, sin nubes, en concreto el día 20 de junio de 2018. El horno solar SF60 está preparado con el blanco lambertiano, el radiómetro y la cámara instalados. El blanco lambertiano se monta junto con el receptor diseñado para este fin, en una mesa móvil, que permite ir intercambiando la posición del blanco, el radiómetro y el receptor en el foco.

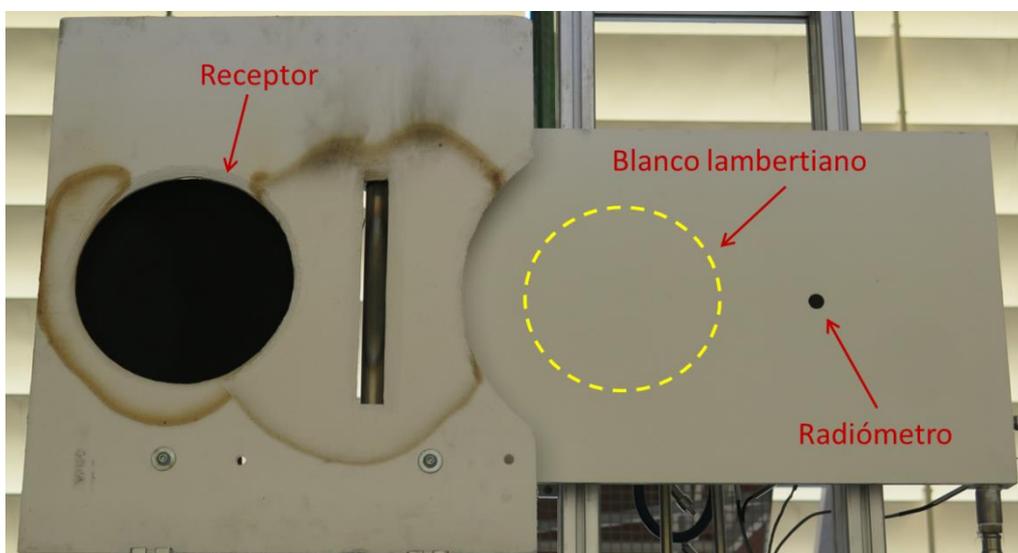


Figura 5.6.1. Montaje dispositivo experimental con el receptor, blanco lambertiano y radiómetro

En la Figura 5.6.1 se puede observar el montaje experimental diseñado para este ensayo. A la izquierda se sitúa el receptor, insertado en una plancha de alúmina que sirve para proteger el receptor y todo su cableado (termopares y refrigeración); en la parte central el blanco lambertiano y el radiómetro situado a la derecha, ambos refrigerados. Cada una de estas tres partes se sitúa sistemáticamente en el foco del concentrador, siguiendo el mismo orden siempre.

Abriendo paulatinamente el atenuador del horno para ir dejando pasar más radiación, se consiguen 20 niveles de irradiancia que cubren el rango de operación de las centrales de torre, entre $0\text{--}1000\text{ kW m}^{-2}$. A medida que se alcanzan cada uno de estos niveles de irradiancia, se toman 3 imágenes (receptor, blanco lambertiano y radiómetro). Junto con cada imagen, se han guardado las variables que pueden condicionar la medida, como son:

Capítulo 5. Medida de Irradiancia en un Receptor de Reducida Superficie (<1 m²)

- Tiempo de exposición de la cámara: 50 ms para el blanco lambertiano y 500 ms para el receptor y el radiómetro
- Fecha y hora
- DNI (W m⁻²)
- Velocidad y dirección del viento
- Pirómetro: se guarda la señal en mV y en °C
- Radiómetro: se tienen dos señales, el voltaje y la irradiancia en kW m⁻²
- Temperatura de los 3 termopares situados en el receptor (°C)
- Temperatura de entrada y salida del agua de refrigeración del receptor (°C)
- Shutter: posición del atenuador en cada nivel (%)

Estas variables permiten identificar si el ensayo tiene repetibilidad, es decir, que es posible volver a hacer el ensayo en las mismas condiciones, con el mismo diseño experimental. Además, debe de ser un experimento reproducible, pudiendo recrear todos los resultados a partir de los datos originales. [121], [122]

De los 20 niveles ensayados, se tuvieron que descartar 2 de ellos debido a desplazamientos observados en el foco, causados por ráfagas de viento que movieron el heliostato. También es necesario cuantificar la variación de DNI en el transcurso de la toma de las tres imágenes de un mismo nivel, ya que si hay una variación grande, la medida no sería correcta. En la mayoría de los niveles, esta variación de DNI es menor del 0.1 %.

Además, hay que tener en cuenta la temperatura que alcanza el receptor en el ensayo, con el objetivo de saber si la propia radiación térmica que emite el cuerpo afecta a la medida de irradiancia que capta la cámara digital. La cámara capta la radiación proveniente del receptor dentro de su ancho de banda espectral de trabajo, tanto la que emite como la que refleja, por lo que se debe analizar en primera instancia si la radiación térmica emitida por el mismo está en el mismo rango de longitudes de onda que la cámara. Para simular esta situación, se utiliza la ley del cuerpo negro de Planck, para el Sol a una temperatura de 5800 K (5527 °C), junto con la de dos cuerpos negros a 814 °C, que es la temperatura máxima que alcanza el blanco lambertiano y otro cuerpo negro a 572 °C, temperatura que máxima que alcanza el receptor. La diferencia de temperaturas entre el blanco lambertiano y el receptor es debida a que cada uno cuenta con un sistema propio de refrigeración, totalmente independientes el uno del otro. Se obtiene la radiancia de cada cuerpo según su temperatura, como se puede observar en la Figura 5.6.2.

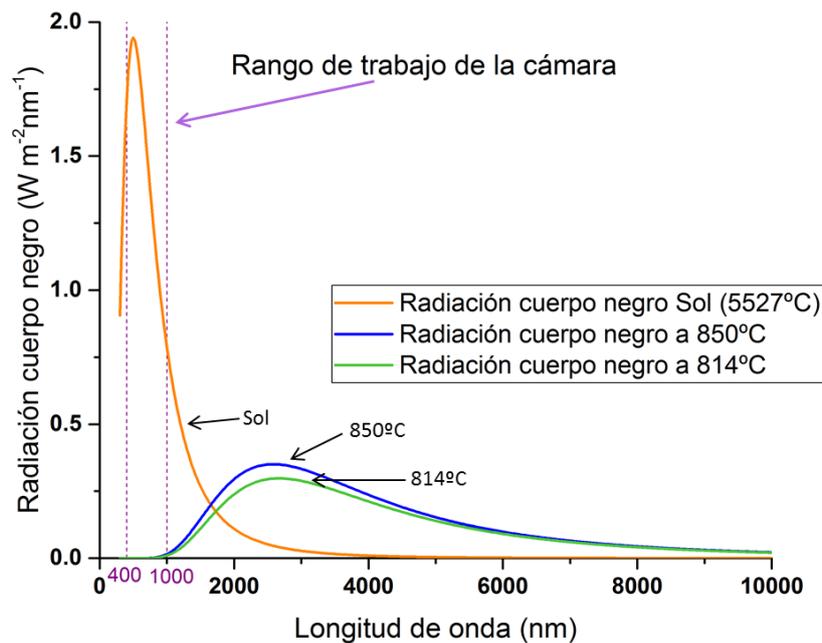


Figura 5.6.2. Radiación de cuerpo negro de Planck a la temperatura del Sol (5527 °C), temperatura máxima que alcanza el blanco lambertiano (814 °C) y temperatura máxima del receptor (572 °C)

Es necesario saber si la emisión de esta radiación térmica se produce en el rango espectral de trabajo de la cámara digital utilizada. El rango de longitudes de onda en las que emite un cuerpo a 814 °C o 572 °C no afecta a la medida de las imágenes tomadas por la cámara, la cual opera entre 400-1000 nm, como se puede distinguir en la Figura 5.6.2. Por lo tanto, las medidas de la cámara no están perturbadas por la emisión de radiación térmica del receptor durante su operación. Para que la emisión de un cuerpo afectara a la cámara, y emitiera en el rango de 400 a 1000 nm, dicho cuerpo debería estar a una temperatura mínima de 2900 K aproximadamente.

Las medidas tomadas se distribuyen en 20 niveles, como se ha comentado anteriormente, empezando por el nivel de 1000 kW m⁻², y disminuyendo la irradiancia hasta alcanzar el mínimo de 50 kW m⁻².

Para realizar las medidas se toman tres imágenes consecutivas del radiómetro, receptor y del blanco lambertiano, en cada uno de los 20 niveles de irradiancia, con sus correspondientes tiempos de exposición (radiómetro y receptor 500 ms, blanco lambertiano 50 ms). Un ejemplo de las tres imágenes tomadas para un nivel de irradiancia son la Figura 5.6.3 a), b) y c), las cuales han sido escogidas debido a que es el rango usual al que trabajan las centrales de torre, de 700 kW m⁻² aproximadamente:

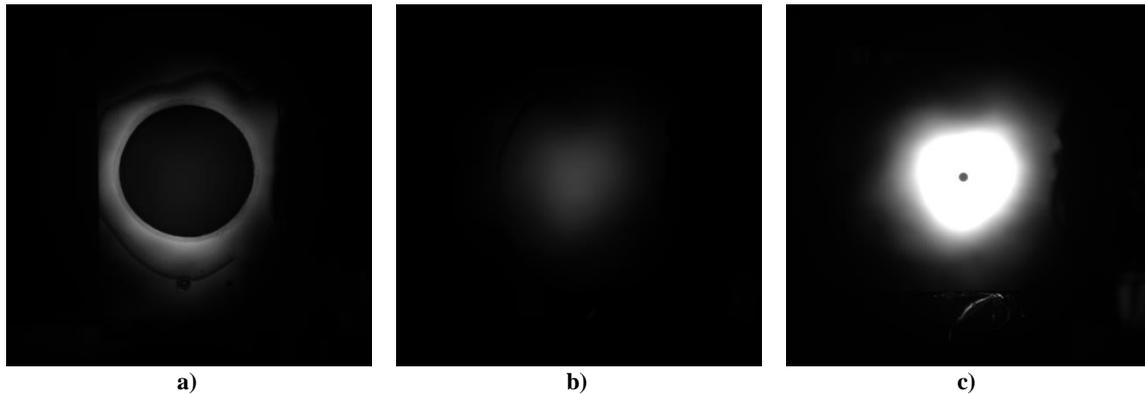


Figura 5.6.3. Nivel de irradiancia 690 kWm^{-2} . a) Receptor, 20 junio, 2018, Hora 11:46:12. b) Blanco lambertiano, 20 junio, 2018, Hora 11:46:31. c) Radiómetro 20 junio, 2018, Hora 11:45:37

Estas tres imágenes son tomadas y tratadas mediante el software de adquisición y tratamiento de imágenes ImagePro Plus (IPP) 7.0 (Media Cybernetics®). El procedimiento es el que se explica a continuación.

Antes de empezar con el tratamiento de imágenes, se mide el tamaño del receptor (Apartado 5.3), para aplicarlo al tratamiento de imágenes y poder calibrar la imagen espacialmente. Se hace corresponder el tamaño del receptor con los píxeles que ocupa en la imagen. De esta manera, se obtiene lo que mide en unidades de longitud cada pixel (m pixel^{-1}). Una vez obtenida la calibración espacial, se procede al tratamiento de imágenes.

En primer lugar, se escoge un área de interés (AOI, *area of interest*) circular, de un diámetro de 8.9 mm dentro de la superficie del radiómetro. El software proporciona el valor del nivel de gris medio dentro del área, su desviación estándar, el valor máximo y mínimo del nivel de gris y la suma de todos los niveles de gris en este AOI. El número de píxeles de esta área circular escogida es de 992, y contiene un área central de la parte frontal del radiómetro donde se sitúa el transductor de éste, disco de constantán y la zona de contacto de este disco con el cobre. Se puede observar con más detalle el área de interés, AOI, escogida para el radiómetro en la Figura 5.6.4:

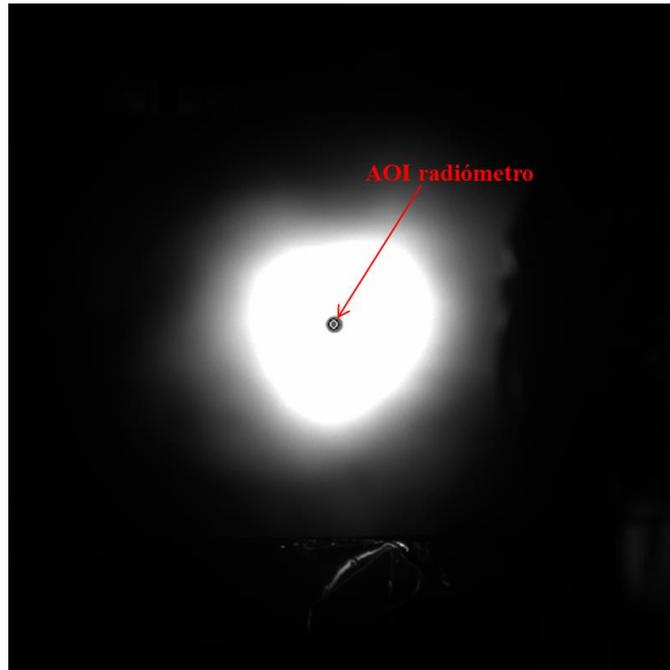
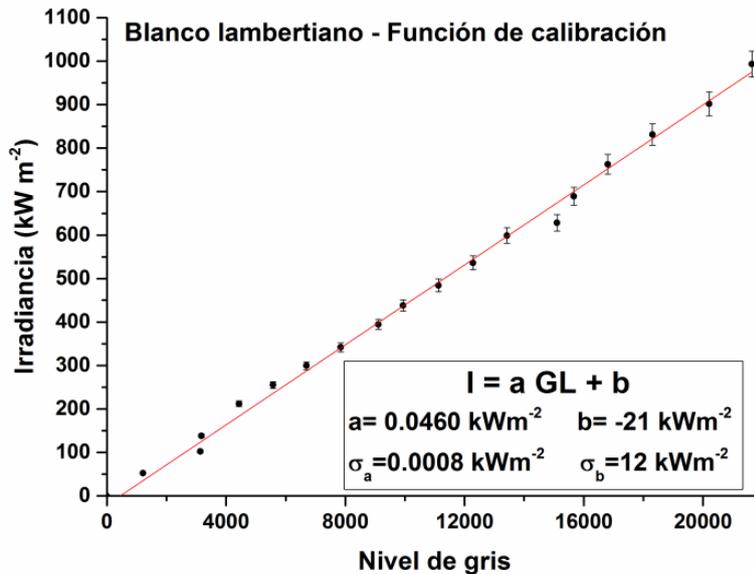


Figura 5.6.4. Imagen del radiómetro con el AOI circular seleccionado en su interior

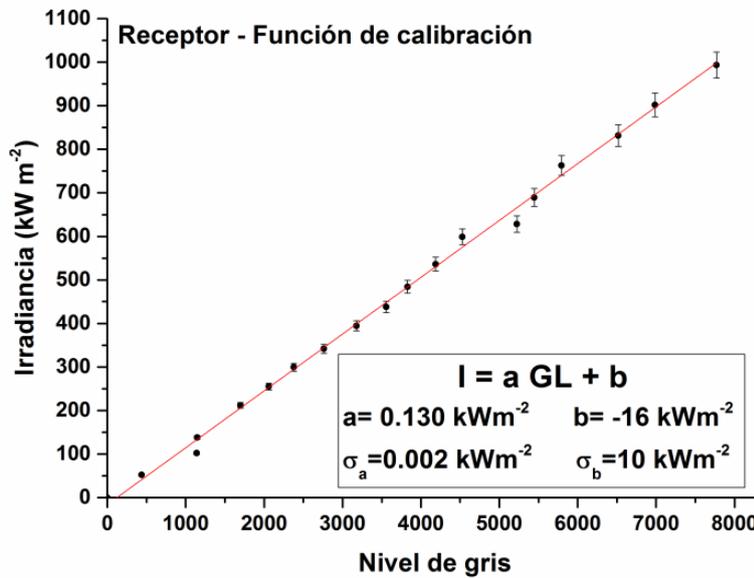
Después de seleccionar y ajustar el AOI correspondiente al radiómetro, se selecciona esta misma área para las otras dos imágenes del blanco lambertiano y del receptor. Se guardan los datos del nivel de gris medio y su desviación estándar proporcionados por el IPP, junto con el valor de irradiancia medida por el radiómetro en el momento de la imagen.

Se repite el procedimiento para todos los niveles de irradiancia. Se efectúa la calibración de la cámara respecto del blanco lambertiano, que es la medida de referencia para esta hipótesis, y respecto del receptor, en función de las medidas adquiridas y procesadas anteriormente. Se establece una relación lineal entre los niveles de gris que capta la cámara en el interior del AOI seleccionada frente a los valores de irradiancia medidos por el radiómetro en el momento de la medida de la imagen. De esta manera se obtienen dos funciones de calibración de la cámara correspondientes al blanco lambertiano y al receptor (Figura 5.6.5 a) y Figura 5.6.5 b)). Las funciones de calibración para cada sistema permiten transformar las imágenes de niveles de gris a mapas de distribución de irradiancia, en kWm⁻².

La calibración se realiza en torno al mediodía solar, hora a la que se efectúa el ensayo, con el fin de evitar posibles variaciones en la DNI, que afectarían a la medida, como se explica en el Apartado 5.5.1.1.1. Además, el ensayo se realiza seguido, sin pausas, para reducir lo máximo posible estas variaciones de DNI.



a)



b)

Figura 5.6.5. Funciones de calibración de: a) Blanco lambertiano, b) Receptor

En la Figura 5.6.5 se muestran los ajustes obtenidos para los dos sistemas, dónde a , b , σ_a y σ_b son los valores de la pendiente, la ordenada el origen y sus correspondientes errores, resultando una función de calibración de la siguiente forma:

- Blanco lambertiano: $I_B = 0.0460 GL_B - 21$, (kW m⁻²)
- Receptor: $I_R = 0.130 GL_R - 16$, (kW m⁻²)

En las dos funciones de calibración, tanto la del blanco lambertiano como la del receptor, se puede apreciar la linealidad de la cámara. Según la información proporcionada por el fabricante de la cámara, al medir, se puede producir una desviación de la linealidad del 0.5% [123]. Esta desviación es debida a la conversión analógica-digital de la señal. Además, esta linealidad se puede apreciar en la Figura

5.6.5, en la respuesta lineal de los niveles de gris a medida que se va aumentando la irradiancia sobre la superficie que se está estudiando. El error cometido en estas calibraciones es menor del 2 %, dentro del cual está contenido este 0.5 %.

Como se ha comentado en el Apartado 5.5.1.1.2, los fabricantes de cámaras digitales fuerzan un offset para el valor de 0 kW m⁻², cuando la cámara está tapada y no le llega luz. Este offset corresponde con un valor positivo en el nivel de gris, GL=99 en el caso de este test. Debido a este offset, la gráfica obtenida de calibración no pasará por el punto (0,0), sino que pasará por el punto (0,b), dónde b es el valor de la ordenada en el origen. Esto hace que la recta de calibración posea una ordenada en el origen negativa. Para I=0 kW m⁻², hay un valor GL>0, por lo que será necesario que b<0 para que la ecuación se cumpla:

$$I = a GL + b, I=0 \rightarrow b < 0$$

Las imágenes tomadas y las calibraciones obtenidas se pueden usar para comprobar la hipótesis inicial planteada en el Apartado 5.2. La manera de comprobar la hipótesis es escoger un punto de cada imagen y tomar su nivel de gris. Se sustituyen estos valores de niveles de gris, tanto para el receptor como para el blanco lambertiano, en la Ecuación 5.2.6. Como se ha comentado anteriormente, los tiempos de exposición están fijados (radiómetro y receptor 500 ms, blanco lambertiano 50 ms), y las reflectancias son las obtenidas en el Apartado 5.3.1. El cociente de niveles de gris es del orden del cociente entre las reflectancias y tiempos de exposición, por lo que se puede predecir el nivel de gris de una de las superficies a partir del nivel de gris de la otra:

$$GL_B \approx GL_R \frac{\tau_B \rho_B}{\tau_R \rho_R}$$

Esta hipótesis corresponde con una aproximación, pues la reflectancia con la que se efectúan los cálculos son datos de reflectancias medidas a temperatura ambiente. Sin embargo, el ensayo realizado no es a temperatura ambiente, sino que las superficies del receptor y del blanco alcanzan temperaturas mucho mayores, por lo que la reflectancia va variando en función de esta temperatura.

Se aplican estas funciones de calibración a las imágenes, con el objetivo de conseguir transformar los niveles de gris (GL) a irradiancias (kW m⁻²). Las imágenes de la distribución de irradiancias que se obtienen con estos ajustes corresponden con la Figura 5.6.6:

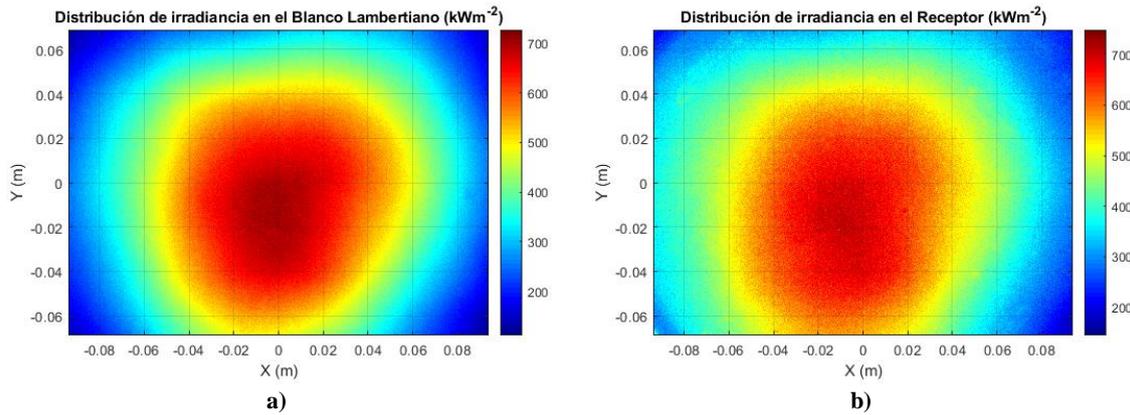


Figura 5.6.6. Distribución de irradiancia para el nivel de 690 kWm⁻². a) Blanco lambertiano. b) Receptor

Como se predijo con la hipótesis inicial, las dos distribuciones de irradiancia son similares, debido a que ambas superficies actúan como excelentes difusores, independientemente de la posición en la que se sitúe la cámara con la que se toman las imágenes, es decir, las superficies actúan como óptimas superficies lambertianas.

La pequeña diferencia entre las dos imágenes radica en el error cometido al medir sobre la superficie blanca y la negra. Este error asociado a cada valor de irradiancia que se obtiene al aplicar la función de calibración de la Figura 5.6.5, viene dado por la Ecuación 5.6.1:

$$\sigma_I = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial a}\right)^2 \sigma_a^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial GL}\right)^2 \sigma_{GL}^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial b}\right)^2 \sigma_b^2} = \sqrt{GL^2 \sigma_a^2 + a^2 \sigma_{GL}^2 + \sigma_b^2} \quad \text{Ecuación 5.6.1}$$

Con esta ecuación se calculan las bandas de error de cada distribución de irradiancia para la Figura 5.6.6, comprendida entre unos niveles de irradiancia entre 150 hasta 900 kW m⁻², que da como resultado:

- Blanco lambertiano (150-900) kW m⁻²: (±9.7 %, ±2.5 %)
- Receptor (150-900) kW m⁻²: (±16.7 %, ±2.8 %)

El rango de errores obtenido es mayor para el receptor que para el blanco lambertiano, debido en parte a las diferencias entre las reflectancia del blanco lambertiano (pintado con Amercoat, 80 % de reflectancia en el rango de 400-1000 nm en el que trabaja la cámara) con el receptor (pintado con Pyromark 2500, 4 % de reflectancia en este mismo rango de longitudes de onda). Una mayor reflectancia en el blanco lambertiano unido a un tiempo de exposición adecuado (50 ms) ha dado lugar a una mayor relación señal-ruido en las imágenes de éste en comparación con las del receptor. Además, se puede observar que cuanto mayor es la irradiancia, menor es el error con el que se mide.

Capítulo 5. Medida de Irradiancia en un Receptor de Reducida Superficie (<math><1 \text{ m}^2</math>)

Para comparar mejor las dos distribuciones de irradiancias obtenidas, se efectúan dos cortes en las imágenes, uno horizontal y otro vertical, que pasan por el centro de la imagen (el punto (0,0) que se puede observar en la Figura 5.6.6 con los ejes). Estos perfiles permiten analizar y cuantificar de una manera objetiva la diferencia entre las dos medidas del blanco y el receptor. La información proporcionada por los cortes corresponde con el valor de irradiancias a lo largo de la línea que corta la imagen.

La Figura 5.6.7 y la Figura 5.6.8 corresponden con los perfiles mencionados anteriormente, dónde se puede observar que las discrepancias entre la medida sobre el blanco lambertiano y sobre el receptor son muy reducidas, teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas a cada medida.

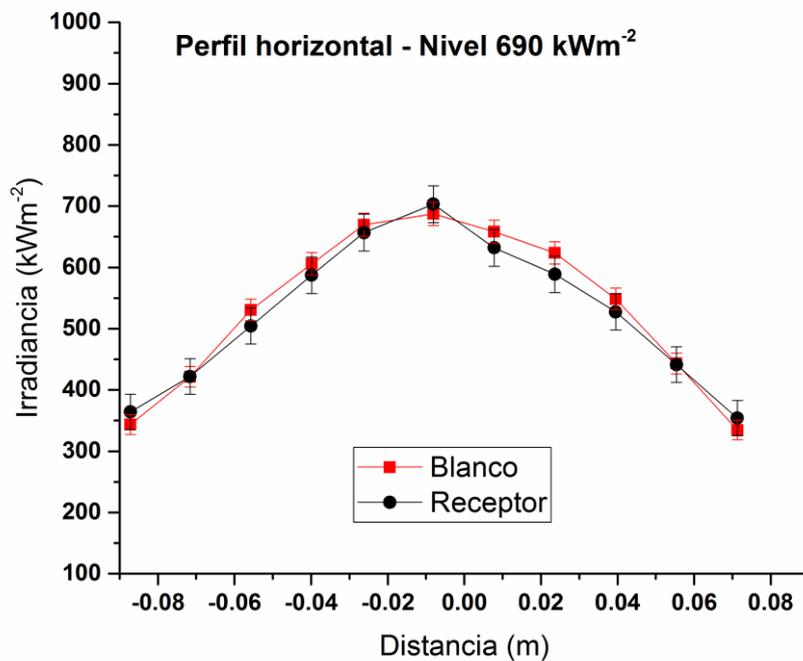


Figura 5.6.7. Perfil horizontal de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 690 kW m⁻²

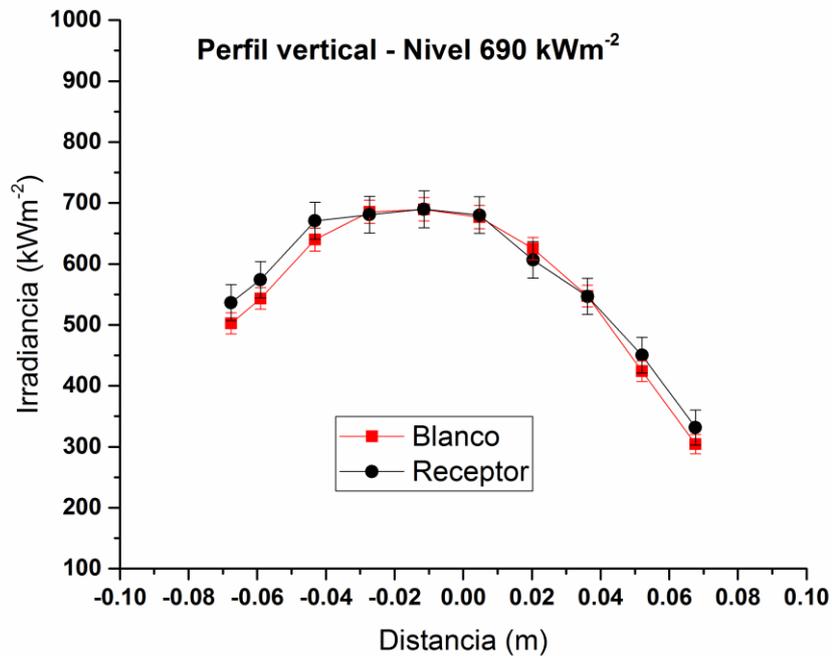


Figura 5.6.8. Perfil vertical de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 690 kW m⁻²

Es posible cuantificar la diferencia entre ambas medidas, comparando ambas irradiancias, como se ha hecho en la Figura 5.6.9 y Figura 5.6.10. El valor de la pendiente, a , proporcionada en las dos figuras, indica el grado de similitud entre los perfiles de ambas distribuciones de irradiancia. En ambas gráficas, la diferencia entre los perfiles en las distribuciones de irradiancia sobre el blanco lambertiano y sobre el receptor es de 1.8 %.

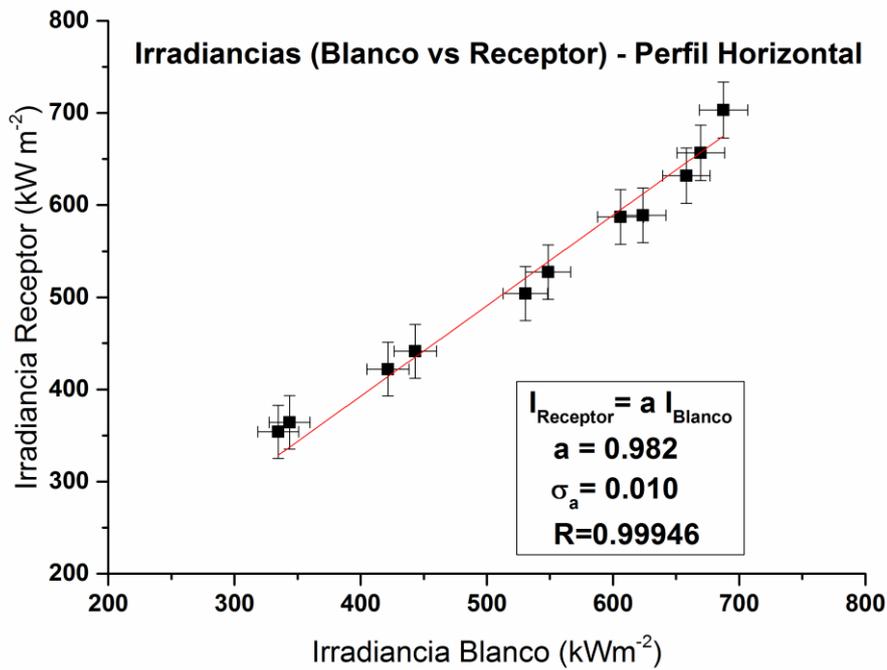


Figura 5.6.9. Perfil horizontal. Nivel 690 kW m⁻²

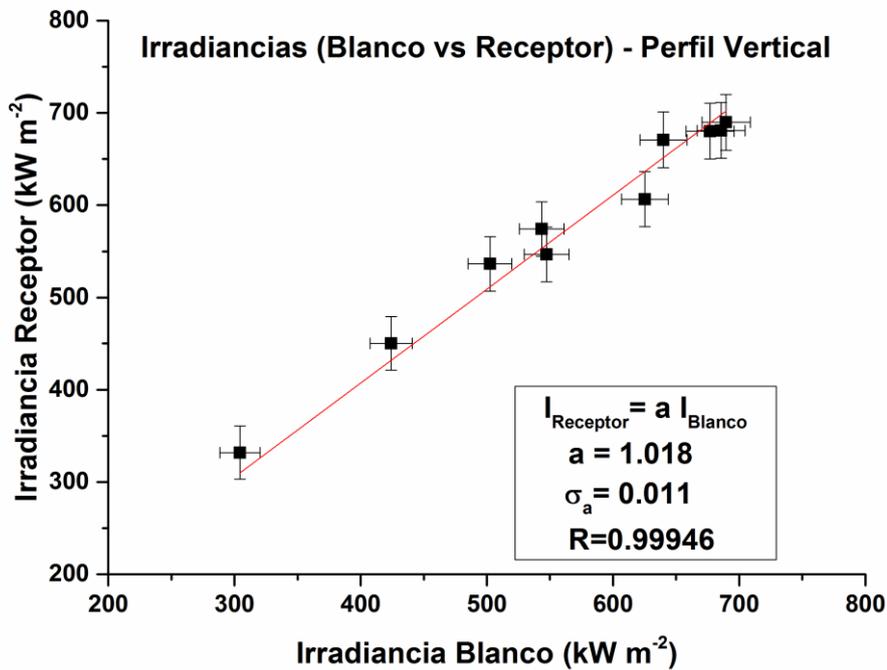


Figura 5.6.10. Perfil vertical. Nivel 690 kW m⁻²

La discrepancia tan reducida obtenida valida el método de medida de irradiancias propuesto en esta tesis. No sólo en el nivel de irradiancia de 690 kW m⁻²,

rango en el que se operan las centrales de torre comerciales, se corrobora, sino que en otros niveles de irradiancia se obtienen unos resultados similares. Estos resultados se muestran a continuación, y corresponden con niveles altos de irradiancia, y bajos, 900 kW m⁻² y 500 kW m⁻², respectivamente.

5.6.1. NIVEL DE IRRADIANCIA ALTO (900 kW m⁻²)

El punto de partida para cualquier nivel que se quiera analizar son las dos funciones de calibración obtenidas en la Figura 5.6.5 a) y b). Se aplica esta calibración a las imágenes tomadas de cada nivel y se obtiene la distribución de irradiancia tanto en el receptor como en el blanco lambertiano. En este caso, para el nivel de 900 kW m⁻², ambas distribuciones corresponden con la Figura 5.6.1.1 a) y b).

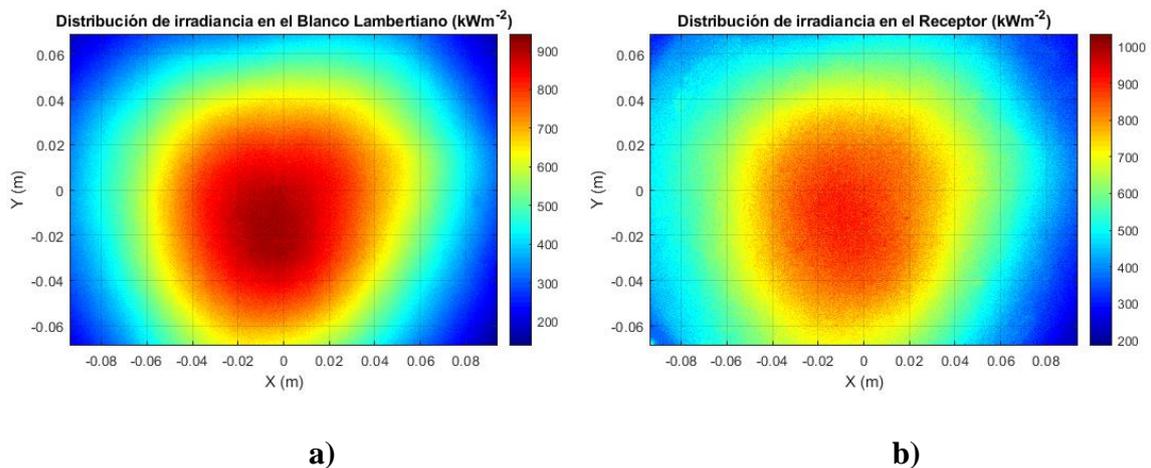


Figura 5.6.1.1. Distribución de irradiancia para el nivel de 900 kWm⁻². a) Blanco lambertiano, b) Receptor

La Figura 5.6.1.2 y Figura 5.6.1.3 muestran los cortes centrales (horizontal y vertical) en la distribución de irradiancia de la Figura 5.6.1.1. Como se podía apreciar en el nivel de 690 kW m⁻² también, en las intensidades más bajas los errores cometidos son algo más elevados que en las de intensidades mayores.

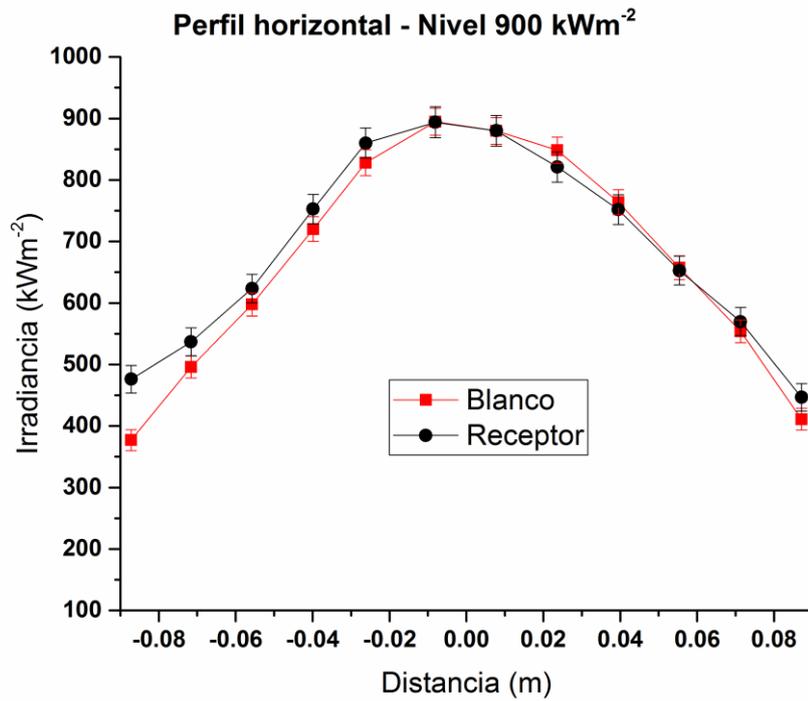


Figura 5.6.1.2. Perfil horizontal de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 900 kW m⁻²

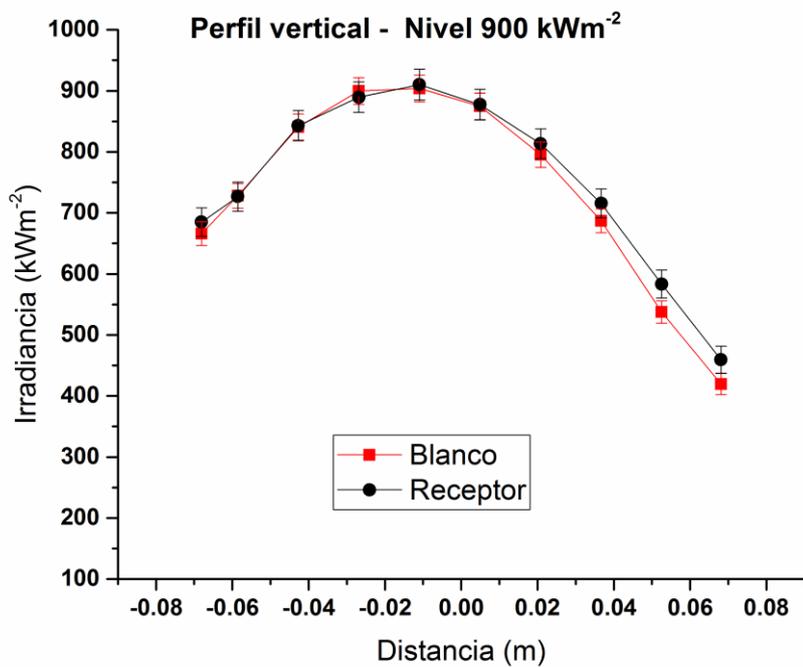


Figura 5.6.1.3. Perfil vertical de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 900 kW m⁻²

Al representar la irradiancia obtenida del receptor frente a la del blanco lambertiano en cada perfil, se obtiene la Figura 5.6.1.4 y Figura 5.6.1.5, que corresponden al corte horizontal y al vertical, respectivamente. Una vez más, se obtienen para ambos cortes unas discrepancias entre las irradiancias medidas con el blanco lambertiano frente al receptor menores del 2 % para el nivel de 900 kW m⁻².

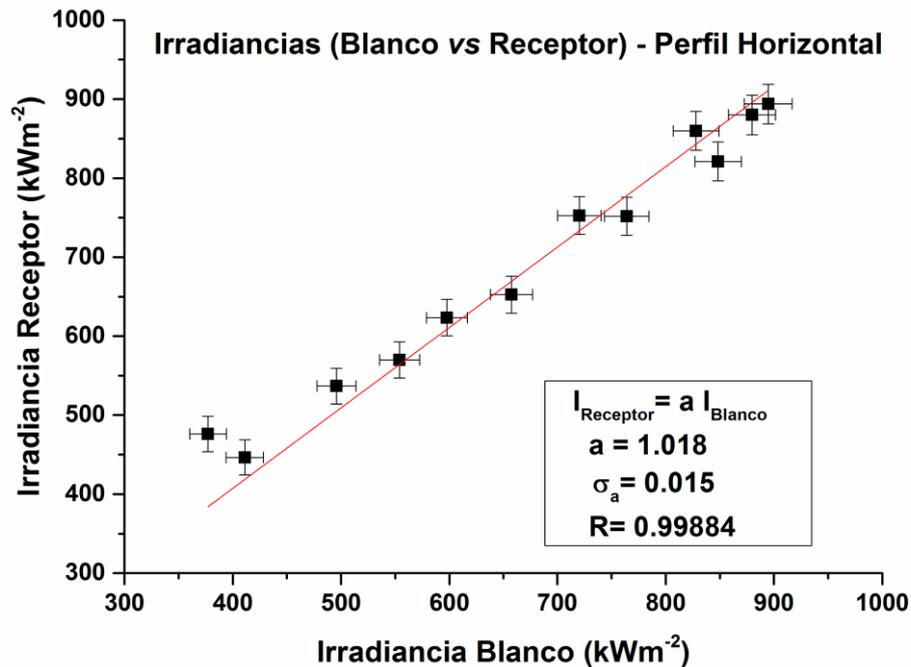


Figura 5.6.1.4. Perfil horizontal. Nivel 900 kW m⁻²

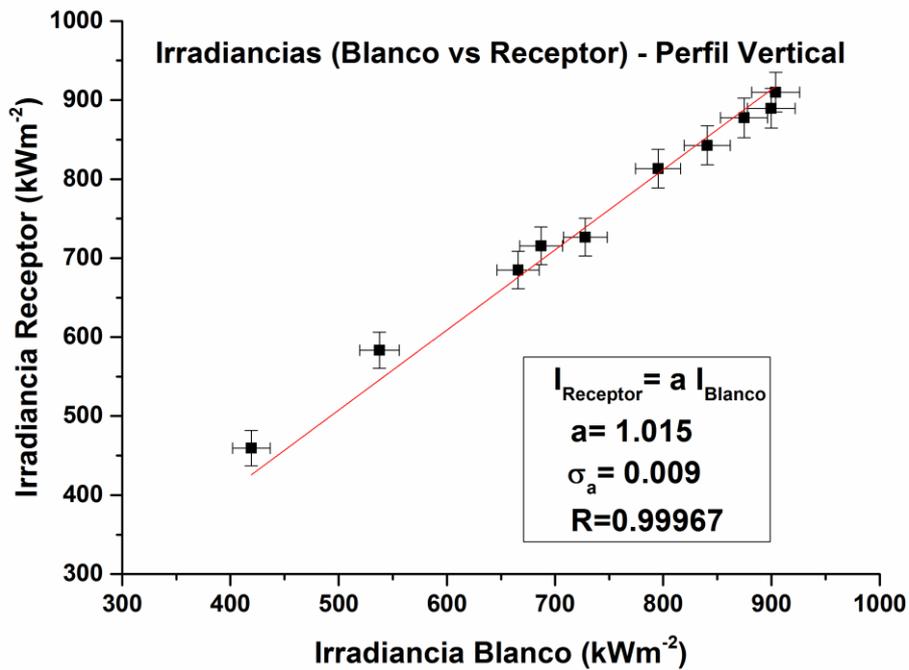


Figura 5.6.1.5. Perfil vertical. Nivel 900 kW m⁻²

5.6.2. NIVEL DE IRRADIANCIA BAJO (500 kW m⁻²)

Con el fin de poder comprobar y tener distintos resultados para corroborar la hipótesis propuesta en esta tesis, es necesario también saber qué pasa en los niveles más bajos de irradiancias. Estudiando estos niveles bajos, se estudia a su vez el comportamiento de la incertidumbre cometida al medir con este sistema, ya que, como se ha explicado anteriormente, cuanto más alto sea el nivel de irradiancia en el que se esté midiendo, más baja será su incertidumbre. Por el contrario, en este caso de un nivel bajo de irradiancia, se observan incertidumbres más altas.

Usando las funciones de calibración que nos permiten transformar las imágenes tomadas con la cámara digital a la distribución de irradiancia correspondiente, se obtienen las Figura 5.6.2.1 a) y Figura 5.6.2.1 b).

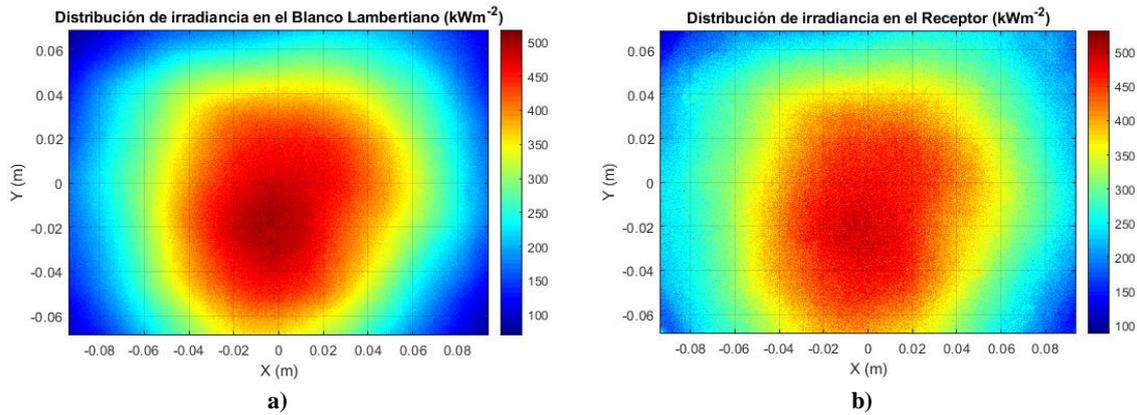


Figura 5.6.2.1. Distribución de irradiancia para el nivel de 500 kW m^{-2} . a) Blanco lambertiano. b) Receptor

Como en el apartado anterior, se realizan los cortes en la imagen, horizontal y verticalmente (Figura 5.6.2.2 y Figura 5.6.2.3 respectivamente), y a continuación representamos para cada corte, la medida de irradiancia del receptor frente a la del blanco lambertiano. Como se puede apreciar en la Figura 5.6.2.4 y en la Figura 5.6.2.5, la discrepancia sigue siendo menor al 2 %.

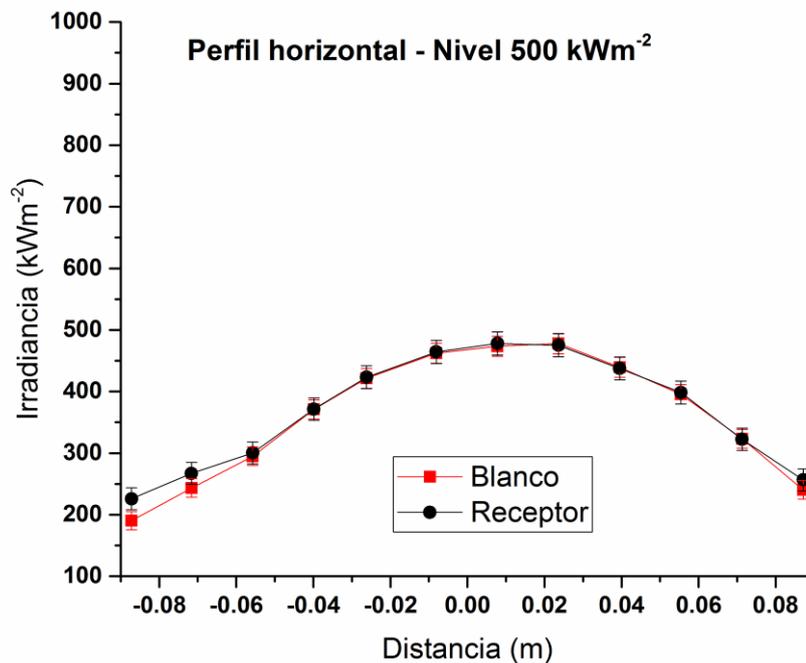


Figura 5.6.2.2. Perfil horizontal de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 500 kW m^{-2}

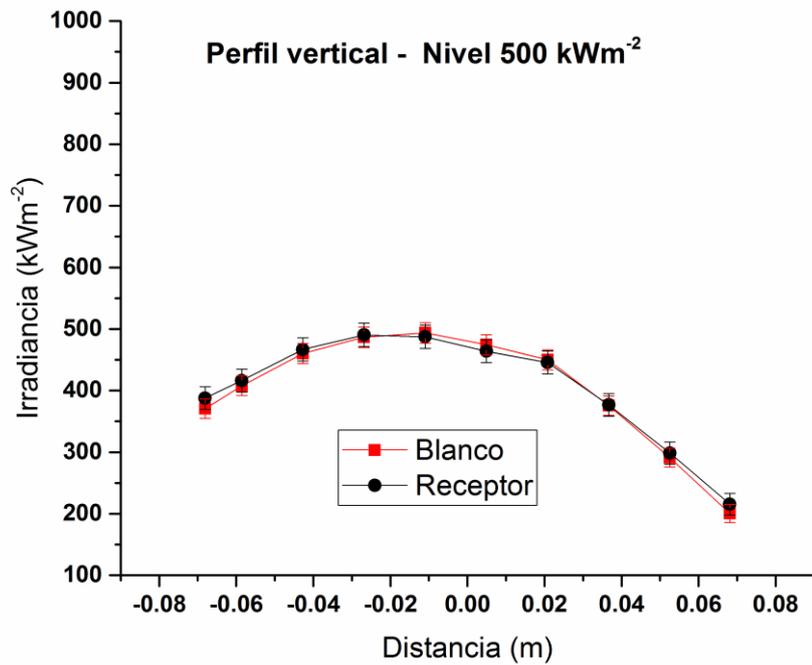


Figura 5.6.2.3. Perfil vertical de irradiaciones del blanco lambertiano y receptor. Nivel 500 kW m⁻²

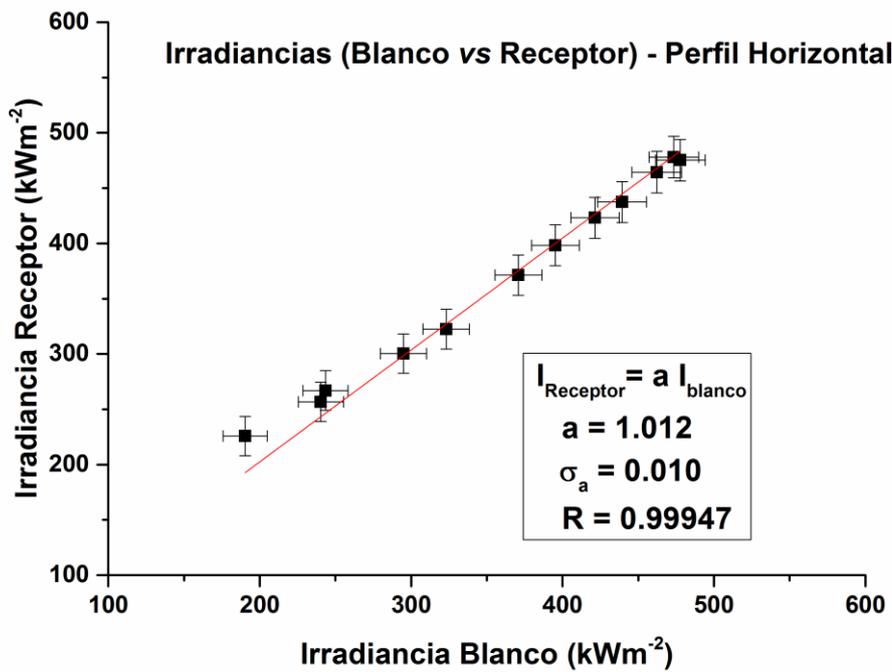


Figura 5.6.2.4. Perfil horizontal. Nivel 500 kW m⁻²

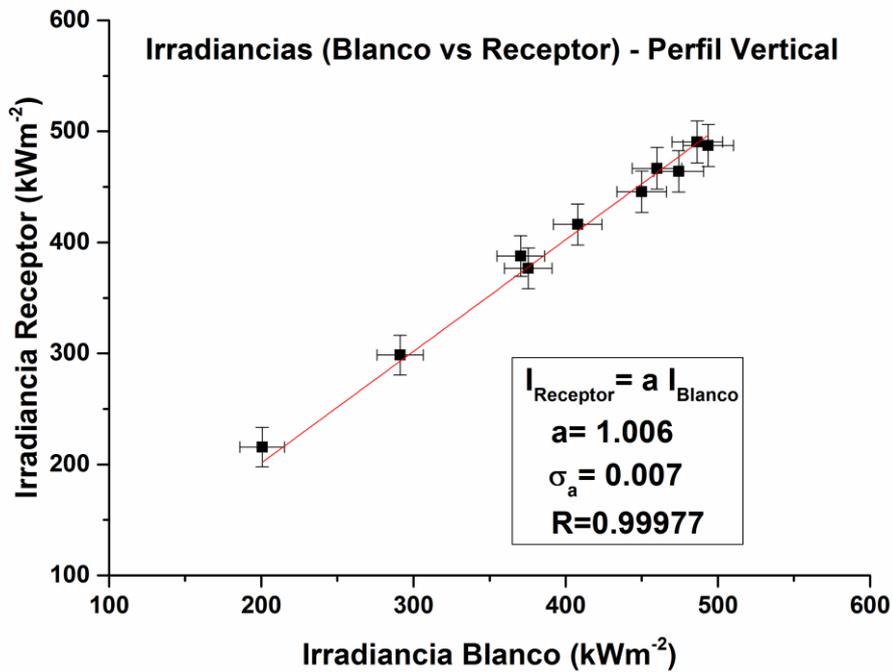


Figura 5.6.2.5. Perfil vertical. Nivel 500 kW m⁻²

En este apartado de la tesis se han podido ver los resultados de la hipótesis propuesta inicialmente. El primer resultado remarcable es que la discrepancia entre la medida de distribución de irradiancia sobre el blanco lambertiano y sobre el receptor es menor al 2 %, por lo que queda validado el método. Además, se ha comprobado que se comete un error menor cuando las irradiancias son mayores. Para corroborar esta afirmación, se han presentado los distintos niveles de irradiancia, y se ha visto que son consistentes, validando los resultados y la repetitividad del procedimiento. La razón por la cual se comete un error mayor a niveles bajos de irradiancia tiene que ver con el ruido de fondo de la cámara digital y la menor relación señal-ruido a estos. Es por eso que, al subir el nivel de irradiancia, el ruido de fondo es pequeño en comparación con la medida realizada sobre la superficie a medir, y con ello, disminuye el error cometido.

5.7. MEDIDA DE LA POTENCIA

La potencia total que hay dentro del área del receptor y de la misma área para el blanco lambertiano, puede ser obtenida a partir de las imágenes del blanco y del receptor. Una vez se han aplicado las calibraciones en intensidad y en espacio a las

imágenes con el software IPP, tal como se ha visto en el Apartado 5.6, se selecciona el área de dentro del receptor donde se va a calcular la potencia. Este área de interés se escoge con un diámetro algo más pequeño que el del receptor, sin tocar los bordes que podrían afectar a la medida, debido al recubrimiento de alúmina que hay alrededor del receptor para protegerlo (Figura 5.7.1).

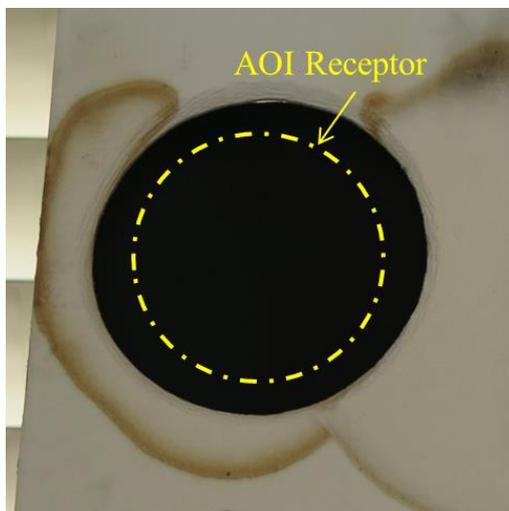


Figura 5.7.1. AOI del receptor

Se debe conocer una variable que afecta en el tratamiento de imágenes, denominada “factor geométrico”. Esta variable proporciona las medidas de cada píxel de la imagen, en unidades de superficie, es decir, da información sobre cuánto mide cada píxel. El factor geométrico se calcula con la siguiente fórmula:

$$FG = \frac{H V}{n_{py} n_{px}} \left[\frac{m^2}{\text{píxel}} \right] \quad \text{Ecuación 5.7.1}$$

Dónde H es la longitud horizontal del área de interés, V la longitud vertical, n_{px} es el número de píxeles del eje horizontal (*eje x*), y n_{py} es el número de píxeles en el eje vertical (*eje y*).

Una vez obtenido el factor geométrico, FG, se puede calcular la potencia como el producto de la irradiancia por este factor:

$$P = \sum_{i=1}^n I_i FG \quad \text{Ecuación 5.7.2}$$

Dónde n es el número de píxeles dentro del área seleccionada del receptor e I_i es la irradiancia en kW m⁻² de cada pixel.

Con esta fórmula se puede calcular la potencia contenida dentro del área del receptor, a partir de las calibraciones hechas sobre las imágenes. El siguiente paso es

Capítulo 5. Medida de Irradiancia en un Receptor de Reducida Superficie (<1 m²)

calcular el error de dicha potencia. Para ello, es necesario conocer el error del factor geométrico, y de la irradiancia. A partir de la Ecuación 5.7.1, se utiliza el método de las derivadas parciales para calcular su error al considerar que H y V son variables independientes, teniendo en cuenta que ΔH, ΔV equivalen a ±1mm:

$$\Delta FG = \left(\frac{\partial FG}{\partial H} \right) \Delta H + \left(\frac{\partial FG}{\partial V} \right) \Delta V \quad \text{Ecuación 5.7.3}$$

$$\Delta FG = \frac{V}{n_{px} n_{py}} \Delta H + \frac{H}{n_{px} n_{py}} \Delta V \quad \text{Ecuación 5.7.4}$$

Se repite el cálculo del error mediante derivadas parciales para la potencia, y se obtiene el error final de la potencia, como:

$$\Delta P = \left(\frac{\partial P}{\partial I} \right) \Delta I + \left(\frac{\partial P}{\partial FG} \right) \Delta FG \quad \text{Ecuación 5.7.5}$$

$$\Delta P = FG \Delta I + I \Delta FG \quad \text{Ecuación 5.7.6}$$

Dónde P es la potencia, I es la suma de las irradiancias dentro del área de interés (suma de las irradiancias de cada pixel), y ΔI es la suma de los errores de cada irradiancia. Para el cómputo de I, se tienen en cuenta N=351633 píxels, que representan la imagen del receptor.

Las potencias obtenidas para los tres niveles se presentan en la Tabla 5.7.1:

Nivel de irradiancia (kW m ⁻²)	Superficie	Potencia (kW)	DNI (W m ⁻²)	Atenuador (%)
900	Blanco lambertiano	14.4 ± 0.7 (±4.9%)	906	40
	Receptor	15.8 ± 0.8 (±5.1%)	906	40
690	Blanco lambertiano	11.3 ± 0.6 (±5.3%)	910	33
	Receptor	12.3 ± 0.7 (±5.7%)	911	33
500	Blanco lambertiano	8.0 ± 0.5 (±6.3%)	911	26
	Receptor	8.7 ± 0.6 (±6.9%)	910	26

Tabla 5.7.1. Potencia en el receptor y en el blanco lambertiano para los niveles de 900, 690 y 500 kW m⁻². DNI y porcentaje del atenuador en el momento de la toma de cada imagen

CAPÍTULO 6.

MEDIDA DE IRRADIANCIA EN UN RECEPTOR DE REDUCIDA SUPERFICIE (1 m²)

En este capítulo se documentan los ensayos efectuados en el marco de un proyecto europeo, dentro del cual se ha medido irradiancia con la hipótesis propuesta en esta tesis. Se presentan las medidas realizadas y se comparan con las medidas del sistema de referencia, el sistema ProHermes. Por último, se comparan las medidas de potencia obtenidas durante los ensayos.

“Solo cuando nuestro inteligente cerebro y nuestro corazón humano trabajan juntos, podemos alcanzar nuestro mayor potencial”

Jane Goodall (1934-)

(Antropóloga y Mensajera de la Paz de las Naciones Unidas)

6.1. INTRODUCCIÓN

En el Capítulo 5 se ha presentado un nuevo método para medir distribuciones de irradiancia directamente sobre la superficie de un receptor de reducida superficie. Este método cuantifica en primer lugar el grado de homogeneidad y difusividad de la superficie. En este capítulo se estudian estas dos variables para un nuevo prototipo de receptor de mayor superficie que ha sido evaluado en la PSA. Una vez estudiadas la homogeneidad y la difusividad del nuevo receptor, se efectúan las medidas de las distribuciones de irradiancia sobre el mismo.

Un nuevo prototipo de receptor ha sido evaluado en la torre CRS de la PSA. En este capítulo se ha estudiado la homogeneidad, la difusividad, y se han tomado los datos necesarios para medir irradiancia. Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto Capture. Uno de los objetivos de este proyecto es desarrollar un receptor de aire volumétrico, abierto, con estructura cerámica. El material cerámico del que está fabricado es carburo de silicio. Al igual que en el capítulo anterior, se han realizado dos tipos de medidas de irradiancia, con el fin de contrastar los resultados. La primera medida es sobre la superficie del receptor, y la segunda es la medida con el blanco lambertiano.

Para preparar el ensayo, se realizan los mismos pasos que se han explicado en el Capítulo 5. En primer lugar, se eligen una cámara y lente apropiadas para la toma de imágenes del receptor. En este caso, debido a que no estamos en el horno solar, sino en la torre CRS, debe ser una lente que se pueda adaptar a distancias más grandes, ya que el receptor está más lejos de la cámara de lo que lo estaba en el horno solar. Además, debe poder situarse y conectarse en el centro del campo de heliostatos, para tener una mejor visión del receptor y no interferir en los rayos concentrados que proyectan los heliostatos. La cámara digital escogida es la misma que la utilizada en el ensayo del horno solar, Hamamatsu®, modelo ORCA-flash4.0 v2 CMOS, descrita en el Apartado 5.5.1.1. Tal como se comenta en este apartado mencionado, el análisis de los datos se basa en la respuesta lineal de la cámara [123]. Al utilizar la misma cámara, se consigue una mejor comparación entre los resultados obtenidos en el ensayo del horno solar y los obtenidos en el ensayo del proyecto Capture en el CRS.

Una vez escogida la cámara, se escoge el radiómetro que será utilizado para calibrar el sistema cámara-blanco para transformar las imágenes digitales en distribuciones de irradiancia. En este ensayo se ha escogido también un radiómetro Gardon, descrito en el Capítulo 3, con un rango de medida de irradiancia hasta 1249 kW m⁻², distinto al escogido en el Capítulo 5. Por último, es necesario disponer de un sistema alternativo al propuesto, fiable, que sirva de referencia para medir irradiancia. En la torre CRS se dispone de un sistema de barra móvil lambertiano. Este sistema ha sido ampliamente validado [76], [91], por lo que se utiliza como referencia para contrastar los resultados obtenidos con el nuevo método propuesto.

A continuación, se procede a explicar los ensayos realizados en la torre CRS de la PSA, así como a la discusión de los resultados obtenidos.

6.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO CAPTURE Y RECEPTOR

El receptor evaluado en este capítulo se encuentra dentro del marco del proyecto europeo Capture. En este proyecto participan hasta 13 entidades de países como España, Francia, Inglaterra, Suiza, Alemania y Bélgica. El objetivo principal del Capture es reducir significativamente el coste de la energía solar concentrada, con el fin de conseguir ser competitivos en el mercado de la energía eléctrica [124]. Para conseguir este objetivo, se pretende aumentar la eficiencia de las plantas de torre y reducir el LCOE (*Levelized Cost Of Electricity*), desarrollando un receptor solar volumétrico de aire atmosférico novedoso y acoplarlo a una turbina de gas mediante el empleo de intercambiadores de calor de aire atmosférico a aire presurizado, llamados regeneradores. Al mismo tiempo, se pretende desarrollar heliostatos de pequeño tamaño y bajo coste, además de estrategias y metodologías de apunte efectivas del campo de heliostatos, desarrollando una estrategia de apunte múltiple dinámica. El objetivo final es unir todas estas innovaciones en el concepto de una planta multi-torre con ciclo combinado desacoplado.

Esta tesis se centra en la parte del nuevo prototipo de receptor. Este prototipo está compuesto por un receptor volumétrico, que permite operar a temperaturas por encima de 1000 °C con una eficiencia térmica superior al 80 %. Mediante el uso de los regeneradores, que actúan como una red de intercambiadores de calor de lecho fijo con alta eficiencia, y que trabajan en modos alternos, es posible separar la alta temperatura a presión atmosférica producida en el receptor solar, de las altas presiones que se necesitan para el ciclo Brayton. La forma de operar de los regeneradores usados en el Capture consiste en la operación en modo alterno de una fase de calentamiento sin presurizar, y un período de enfriamiento presurizado. Los regeneradores de lecho fijo son más baratos y capaces de funcionar en condiciones de operación duras, además de ser mucho más eficientes que otros intercambiadores de calor aire-aire. Estos regeneradores están conectados tanto al receptor solar para su fase de calentamiento, como a un turbocompresor y una microturbina de 80 kWe de potencia, empleada en la fase de enfriamiento [124].

Un receptor volumétrico es un tipo de receptor formado por material poroso, en el cual la radiación penetra en profundidad. La radiación solar concentrada calienta el material poroso, el cual a su vez transfiere el calor al fluido de trabajo, que es el aire, en su paso a través del receptor. Este aire es forzado a atravesar el receptor por convección forzada. El material usado en la estructura porosa para este proyecto es carburo de silicio (SiC), el cual permite alcanzar temperaturas de salida del aire de hasta 1400 °C.

Capítulo 6. Medida de Irradiancia en un Receptor de Reducida Superficie (1 m^2)

El receptor está constituido por módulos de copa cerámica, de forma cuadrada. Estos absorbedores cuadrados tienen dimensiones de $140 \times 140 \text{ mm}$ (Figura 6.2.1). Este diseño por módulos facilita que si alguno de ellos se estropea se pueda desmontar fácilmente, así como para otras tareas de mantenimiento de los módulos.



Figura 6.2.1. a) Módulo $140 \times 140 \text{ mm}$ de carburo de silicio. b) Zoom en el módulo poroso del receptor

Como se puede apreciar en la Figura 6.2.1. b), el absorbedor o módulo tiene una estructura cerámica porosa, la cual permite que la radiación solar concentrada penetre en profundidad, aumentando la transferencia de calor al aire, mejorando el efecto volumétrico y aumentando de esta manera la eficiencia. 35 módulos idénticos forman el receptor, ordenados en 5 filas \times 7 columnas (Figura 6.2.2). Este receptor ha sido instalado en la torre CRS de la PSA para su evaluación, como se explica en el Apartado 6.4.



Figura 6.2.2. Receptor Capture formado por 35 módulos

El material del que está fabricado el receptor es carburo de silicio. Este material posee una reflectancia muy baja, entre 5 y 9 %, lo cual hace que se refleje una mínima parte de la radiación concentrada que llega a la superficie del receptor y se absorba la mayor parte de ésta. En la Figura 6.2.3 se puede observar la reflectancia hemisférica en

función de la longitud de onda, del SiC. Además, se ha marcado con rayas naranjas la franja del rango espectral en el que trabaja la cámara CMOS utilizada para este ensayo (entre 400 y 1000 nm).

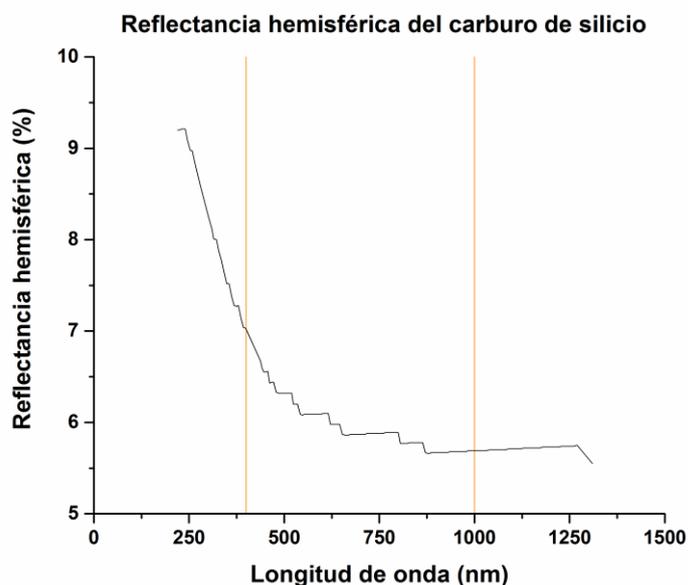


Figura 6.2.3. Reflectancia hemisférica (%) del SiC

6.3. CARACTERIZACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL RECEPTOR

En el Capítulo 5, en el Apartado 5.4, se explican los distintos tipos de reflexión que puede sufrir la radiación al incidir sobre una superficie: difusa o especular. En esta tesis es necesario centrarse en que las superficies sean difusoras perfectas. El motivo es que es necesario que la superficie del receptor refleje la misma cantidad de radiación en todas las direcciones, para poder captarla con la cámara digital, evitando posibles distorsiones por direccionalidad. A estas superficies se les llama superficies lambertianas, tal y como se ha explicado en los capítulos anteriores.

Para saber si la superficie de este nuevo prototipo de receptor volumétrico corresponde con una superficie lambertiana, se aplica el mismo método de caracterización de superficies lambertianas que se ha explicado en el Apartado 5.4 [113]. Dicho método consiste en estudiar la homogeneidad de la superficie en primer lugar, y a continuación, hacer un estudio de la luminancia en función del ángulo.

En primer lugar, haciendo uso de la cámara digital escogida, descrita en el Apartado 5.5.1.1, se toma una imagen sin radiación concentrada del receptor ya montado en la torre, y se estudia la dispersión o falta de homogeneidad de su superficie. Al observar la Figura 6.3.1 se pueden apreciar las 35 copas del receptor volumétrico, y

la dispersión que hay entre ellas, que es del 5.3 %. A simple vista, tal como se puede apreciar tanto en la Figura 6.2.2 a simple vista y en la Figura 6.3.1 con algo más de detalle, la superficie de las copas no es exactamente igual. Esto se debe a diversos factores, entre ellos el proceso de fabricación de las mismas. Sin embargo, aunque a simple vista se aprecian tonalidades distintas entre algunas de las copas, la dispersión es baja, por lo que se puede proceder al segundo paso de este método de caracterización de superficies lambertianas, el estudio de la luminancia.

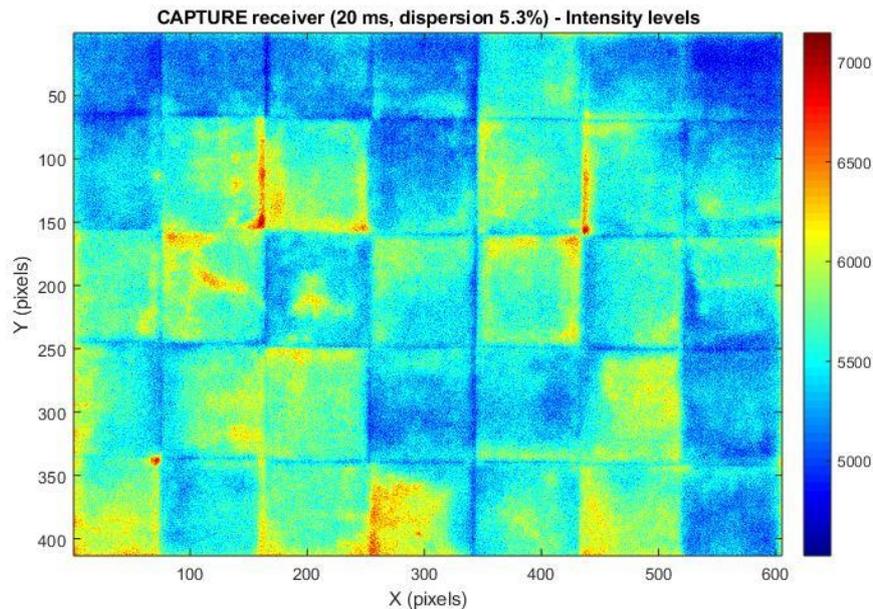


Figura 6.3.1. Dispersión en la superficie del receptor del proyecto Capture

La segunda parte del método de caracterización de superficies lambertianas consiste en el análisis de las variaciones de luminancia para distintos ángulos, bajo condiciones de radiación difusa. En el Apartado 5.4 se describe el procedimiento seguido, así como el luminancímetro usado. El luminancímetro es el MAVO-SPOT 2 (Figura 5.4.4), que cuenta con una exactitud en la medida del 3 %. Tal y como se procede en el caso del receptor circular del Capítulo 5, se sitúa el luminancímetro a 1 metro de distancia del centro del receptor, en diferentes ángulos: $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 40^\circ$, $\pm 50^\circ$, $\pm 60^\circ$ y $\pm 70^\circ$ (Figura 6.3.2).



Figura 6.3.2. Test para estudio de la luminancia de la superficie del receptor en función del ángulo de medida

Se sitúa el luminancímetro en cada una de las diferentes posiciones angulares marcadas en el suelo, y se mide la luminancia procedente de la misma zona del receptor en cada caso. La iluminación de la habitación en la que se han realizado las medidas es tenue, para eliminar posibles variaciones en la luminosidad del ambiente externo, que podrían introducir distorsiones en la medida. El test se ha efectuado con 4 muestras de absorbedores volumétricos del proyecto, situadas en un soporte fabricado para el test, tal como se puede apreciar en la Figura 6.3.2. Las desviaciones con las que se toma la medida vienen dadas por la Ecuación 5.4.1, y su incertidumbre asociada por la Ecuación 5.4.2. Los resultados de este test vienen dados en la Tabla 6.3.1 y Figura 6.3.3. En este test, no se ha medido luminancia por encima de ángulos de $\pm 50^\circ$, ya que se observaba una distorsión al medir. El área que proyecta el luminancímetro para medir, situados a 1 metro de distancia del centro del receptor corresponde con un círculo de 1.7 cm de diámetro. Sin embargo, al situarnos a más de 50° y apuntar al receptor, parte de ese círculo proyectado no cae dentro del receptor, por lo que se estaría midiendo una superficie distinta alrededor del exterior del receptor, introduciendo distorsiones en la medida.

Ángulo (°)	Luminancia (cd m ⁻²)	Desviación (%)	Incertidumbre (%)
-50	12.7	6.5	4.7
-40	12.06	1.1	4.3
-30	11.92	-0.1	4.2
-20	11.86	-0.6	4.2
-10	11.87	-0.5	4.2
0	11.93	0.0	4.2
10	11.68	-2.1	4.1
20	11.8	-1.1	4.2
30	11.78	-1.3	4.2
40	11.93	0.0	4.2
50	12.16	1.9	4.4

Tabla 6.3.1. Medidas de luminancia en función de la variación angular en copas volumétricas de SiC

Al analizar las medidas tomadas con el luminancímetro (Figura 6.3.3), se observa que la superficie del receptor se comporta como una superficie lambertiana, dentro del ángulo de apertura del campo de heliostatos del CRS.

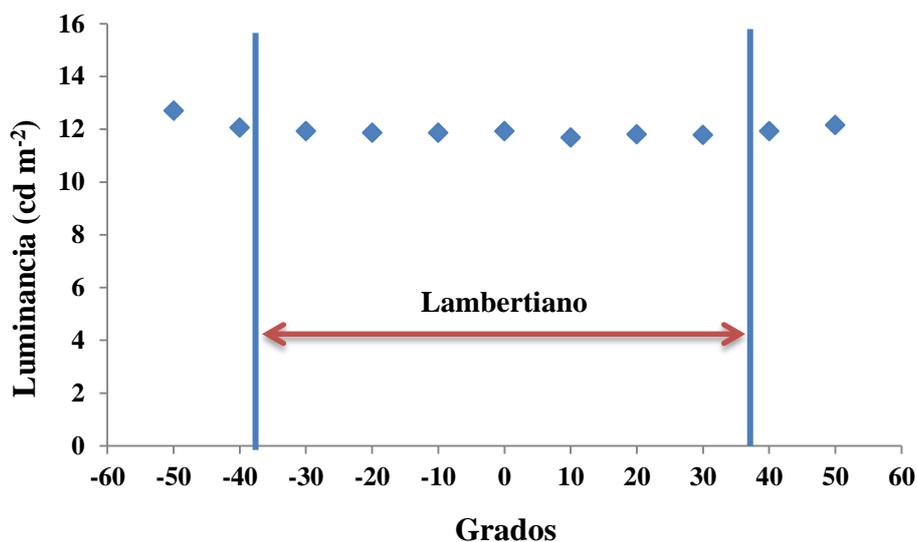


Figura 6.3.3. Variación angular de la luminancia en la superficie del receptor del Capture

El ángulo de apertura del campo de heliostatos del CRS, como se explicará en el Apartado 6.5.2, equivale a $\pm 36^\circ$ en el eje horizontal, y a $\pm 15^\circ$ en el eje vertical. Con estos resultados, se puede concluir que para cualquier punto dentro del campo de heliostatos que se sitúe la cámara digital, el comportamiento de la superficie del receptor será lambertiano (Figura 6.5.2.1).

6.4. ENSAYO EN LA INSTALACION DE TORRE CRS

En el Capítulo 5 se ha demostrado experimentalmente la hipótesis inicial de esta tesis al medir alta irradiancia directamente sobre la superficie del receptor. El siguiente paso en la tesis es validar la hipótesis con un receptor de distinto tipo y, además, de mayor tamaño. Aprovechando la coyuntura del proyecto europeo Capture, descrito en el Apartado 6.2, en el cual se iba a medir irradiancia utilizando un blanco lambertiano en la torre CRS de la PSA, se realizó un ensayo para medir irradiancia directamente sobre la superficie del receptor. En el caso de la torre CRS, se tiene un sistema de referencia de medida de irradiancia, basado en un blanco lambertiano, que es una barra móvil que pasa por delante del receptor, interceptando la radiación concentrada, y reflejándola para que la pueda detectar la cámara digital. Además, se ha instalado un radiómetro cercano al receptor, que sirve para calibrar ambos sistemas de medida, tanto el de referencia como el que se quiere validar en esta tesis.

Los ensayos efectuados para el proyecto Capture se realizaron entre febrero y julio del 2020, con un pequeño periodo de inactividad debido a restricciones por la pandemia del Covid-19. Finalmente, el ensayo para comprobar la hipótesis de la tesis, se realizó el día 03 de junio de 2020.

6.4.1. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DE TORRE SSPS-CRS

Los ensayos se han realizado en la planta SSPS-CRS de la PSA. Esta instalación es un sistema de receptor central, compuesto por un campo de heliostatos y una torre que contiene un receptor, donde se dirige toda la radiación solar que concentra el campo de heliostatos (Figura 6.4.1.1). Este sistema tiene capacidad para operar a altos niveles de irradiancia (entre 200 y 1000 kW m⁻²). Se pueden acoplar ciclos Rankine o Brayton para producción de electricidad. En el caso de este proyecto, los regeneradores están acoplados a una microturbina con ciclo Brayton. Una de las ventajas más importantes de los sistemas de energía termosolar es que se puede almacenar energía mediante almacenamiento térmico. En el caso de las centrales de torre, se puede disponer de un almacenamiento superior a 4500 horas al año.

La instalación SSPS-CRS fue inaugurada en 1981 y dispone de una torre de 43 metros de altura. Inicialmente se utilizó con un receptor cuyo fluido de trabajo era sodio líquido, que actuaba a su vez como medio de almacenamiento térmico. Actualmente, se usa para evaluar pequeños prototipos de receptores dentro del rango de 200 a 500 kW_{th}. La torre es de metal, y tiene tres plataformas de ensayo. Las dos primeras están preparadas para evaluar receptores para aplicaciones termoquímicas, mientras que la tercera plataforma, situada a 42 m se utiliza para evaluar receptores volumétricos [125].



Figura 6.4.1.1. Instalación SSPS-CRS

Esta instalación dispone de un campo de heliostatos compuesto por 91 heliostatos de primera generación, con un área de 39.3 m^2 . Además, tiene 20 heliostatos en el norte de segunda generación, con un área de 52 m^2 y 65 m^2 . Hace unos años, el campo fue mejorado con energía fotovoltaica. Cada heliostato es ahora una unidad autónoma que cuenta con energía fotovoltaica y con un centro de control con comunicaciones por radio (Figura 6.4.1.2). Gracias a estas mejoras, no son necesarios cables o canales a lo largo de todo el campo. La reflectancia nominal promedio del campo es del 90 %. El campo tiene un error de seguimiento de 1.2 mrad por eje. Bajo condiciones típicas de 950 W m^{-2} , la capacidad total del campo es de $2.5 \text{ MW}_{\text{th}}$ y su irradiancia pico es 2.5 MW m^{-2} . El 99 % de la potencia se focaliza en una circunferencia de diámetro 2.5 m , mientras que el 90 % se focaliza en una circunferencia de 1.8 m de diámetro.



a)



b)

Figura 6.4.1.2. a) Heliostatos autónomos campo CRS. b) Parte del campo de heliostatos y torre

Capítulo 6. Medida de Irradiancia en un Receptor de Reducida Superficie (1 m^2)

En la torre CRS hay un sistema de medida de alta irradiancia que usaremos de referencia. Este sistema está basado en un método indirecto, y se llama ProHERMES 2 (Programmable Helioostat and Receiver Measuring System) [91]. Está compuesto por una cámara digital, un blanco lambertiano y un radiómetro. El blanco lambertiano tiene forma de barra y es móvil, por lo que también recibe el nombre de barra móvil. La barra móvil pasa por delante de la apertura del receptor, interceptando la radiación solar concentrada y reflejándola, en el plano de medida. Al reflejar la radiación concentrada, la cámara digital situada en el centro del campo de heliostatos toma una imagen en unidades de niveles de gris. Para transformar esta imagen a unidades de irradiancia, se usa un radiómetro. En este caso, el radiómetro está situado cerca del receptor, como se puede apreciar en la Figura 6.4.1.3 a). Así, el blanco lambertiano pasa por delante del radiómetro a lo largo de su trayectoria (Figura 6.4.1.3. b), permitiendo relacionar el nivel de gris del área del blanco, con la medida de irradiancia tomada por el radiómetro.

El radiómetro instalado es tipo Gardon con refrigeración por agua, fabricado por la empresa Vatel. El rango del mismo es de 0 a 1249 kW m^{-2} . El diámetro de su cara frontal es de 25.4 mm. Tiene un recubrimiento de Zynolyte®, para maximizar la absorción de la superficie de medida. La empresa Vatel proporciona una constante de calibración de laboratorio de $124.85 \text{ kW m}^{-2} \text{ mV}^{-1}$. Sin embargo, se usa una constante de calibración corregida para radiación solar, obtenida en el laboratorio de radiometría de la PSA, de $120.48 \text{ kW m}^{-2} \text{ mV}^{-1}$ [90], [91]. Esta constante se obtiene al multiplicar la constante de laboratorio dada por la empresa Vatel, por el factor 0.965, factor obtenido teórica y experimentalmente [90], [91]. La irradiancia medida con el radiómetro tiene una incertidumbre del $\pm 3 \%$. El modelo de radiómetro es 1000-1, y su número de serie es 7481 [Anexo A].

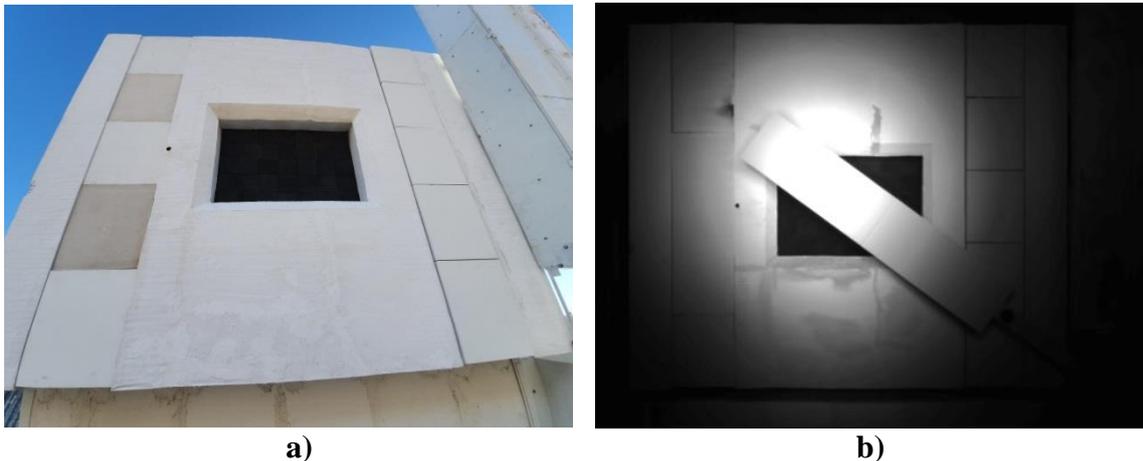


Figura 6.4.1.3. a) Receptor Capture y radiómetro. b) Barra móvil pasando por delante del receptor

6.5. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA DE IRRADIANCIA

Los ensayos en la torre SSPS-CRS del proyecto Capture empezaron en febrero del 2020, pero debido a la pandemia del Covid-19 tuvieron que paralizarse durante 3 meses. Se reanudaron los ensayos en junio de 2020, cuando se tomaron las medidas para la comparación del nuevo método con el método del blanco lambertiano.

El procedimiento de ensayo para el proyecto Capture consistía en ir aumentando la irradiancia sobre el receptor, hasta llegar a un estado estable. Conforme se iban añadiendo heliostatos que concentraban la radiación solar, se esperaba unos minutos para que se estabilizara el sistema, y a continuación se tomaban dos medidas de irradiancia. Primero se medía la irradiancia con el método de esta tesis, es decir, tomando una imagen del receptor con la cámara digital, y guardando los datos de irradiancia, en kW m⁻², proporcionados por el radiómetro. A continuación, se medía la irradiancia con el sistema de referencia ProHERMES 2, explicado en el Capítulo 4.

Para conseguir diferentes niveles de irradiancia sobre el receptor, se escogen diferentes grupos de heliostatos. Cada grupo de heliostatos enfoca a cinco puntos diferentes del receptor, que son: alto este, alto oeste, bajo este, bajo oeste y centro. El mínimo número de heliostatos enfocado al receptor fue 6, y el número máximo fue 44 heliostatos. La potencia máxima alcanzada en este experimento en la superficie del receptor fue 329 kW. Cada vez que se iban añadiendo grupos de heliostatos, se hacía la medida de irradiancia, que consistía en tomar una imagen del receptor, y a continuación medir con el blanco lambertiano. La temperatura de salida del aire durante el ensayo para este día osciló entre 222 °C y 586 °C. Además de la temperatura de salida del aire, también se registraban y guardaban los datos de la temperatura ambiente, DNI (W m⁻²), velocidad y dirección del viento, irradiancia del radiómetro (kW m⁻²), así como la temperatura a través de los regeneradores mediante termopares (°C). Por otro lado, el tiempo de exposición de la cámara digital fue diferente para cada caso debido a la diferente reflectancia de cada superficie: 3 ms para las medidas con la barra móvil, y 12 ms para las medidas sobre el receptor.

Tal y como se ha explicado en el Apartado 6.4.1, el CRS dispone de una barra móvil lambertiana para medir la distribución de irradiancia sobre el receptor. Esta barra móvil permanece en un contenedor, fuera del foco, para preservar la barra en perfectas condiciones, como se observa en la Figura 6.5.1. Al guardarla en este contenedor, no se la somete constantemente a niveles elevados de irradiancia que puedan dañarla. Cuando la barra móvil pasa por delante de la apertura del receptor, su trayecto dura pocos segundos, por lo que no es necesario refrigerarla.

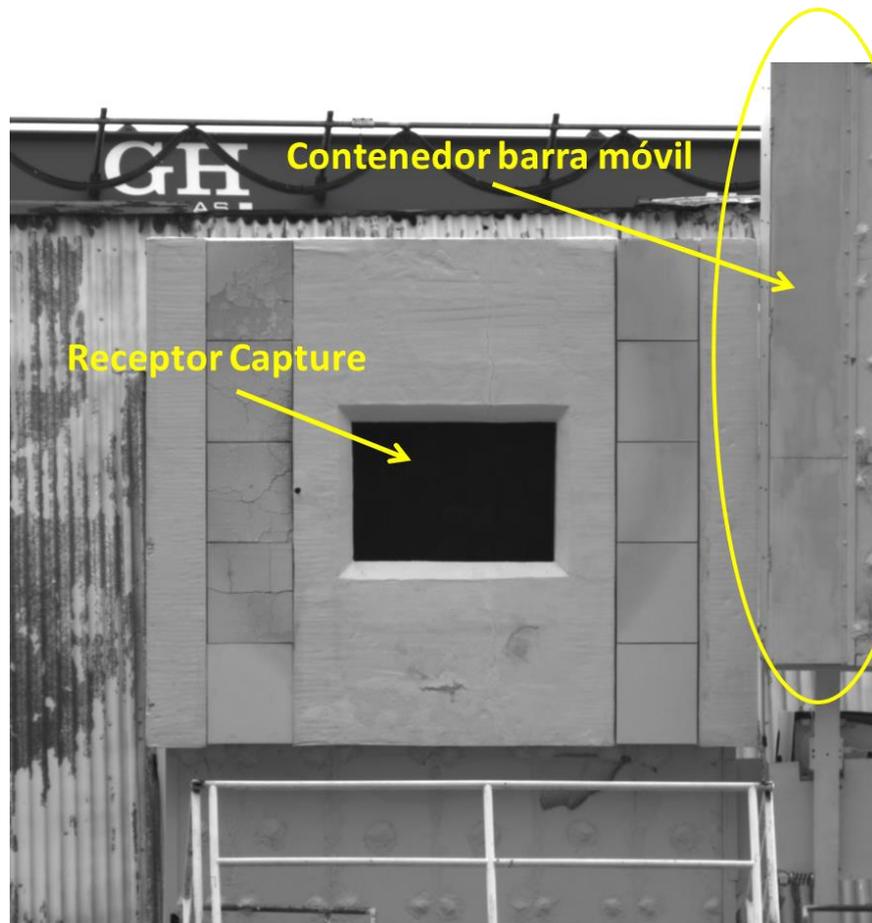


Figura 6.5.1. Vista del receptor y el contenedor de la barra móvil

El sistema de medida de irradiancia en el CRS es el ProHERMES 2B, basado en el procedimiento de medida indirecto [64], [76]. Como se vio en el Capítulo 5, el sistema captura la distribución de irradiancia, tomando una imagen con una cámara digital de la barra móvil en su camino por delante de la apertura del receptor. En este caso, la cámara digital usada es la misma que la descrita en el Apartado 5.5.1.1, de la marca Hamamatsu®, modelo ORCA-flash4.0 v2 con sensor CMOS de 16 bits. Para calibrar el sistema cámara-blanco, se hace un ensayo en el que se va variando la radiación solar concentrada incidente sobre el receptor, variando el número de heliostatos enfocados en él. La calibración del sistema se hizo el día 03 de junio del 2020, el mismo día del ensayo. Para la calibración, se tomaban imágenes de la barra móvil pasando a través de la apertura del receptor, y se registraban las medidas del radiómetro instalado. El radiómetro está situado lo más cerca posible del receptor, tal como se muestra en la Figura 6.4.1.3 b), en la que la barra móvil está pasando por delante del receptor, y a la izquierda en la imagen se puede ver el radiómetro.

El proceso de toma de imágenes del blanco lambertiano consiste en tomar una secuencia de 30 imágenes mientras la barra se desplaza por delante del receptor. A continuación, con el software ImagePro Plus ® (IPP), se utiliza un programa escrito específicamente para este ensayo, en el que se tratan todas las imágenes. El programa

selecciona el área dentro de la barra móvil de cada una de las 30 imágenes, y las superpone en una sola imagen. De esta manera, se crea una sola imagen en la que se aprecia la radiación solar concentrada reflejada por la barra móvil, en unidades de niveles de gris. Para transformar esta imagen a unidades de irradiancia, se relaciona la irradiancia medida por el radiómetro en el momento anterior a que pase la barra por encima del radiómetro. De esta manera, podemos relacionar el nivel de gris del área que ocuparía el radiómetro, en el blanco lambertiano, con la radiación medida por el radiómetro. Así se pueden transformar los niveles de gris de la imagen en unidades de irradiancia, kW m⁻². La calibración del blanco lambertiano es la que se muestra en la Figura 6.5.2.

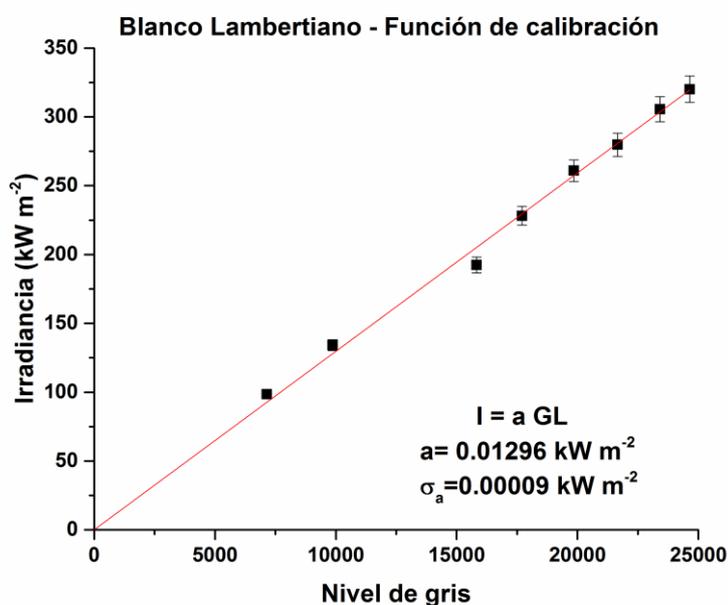


Figura 6.5.2. Función de calibración del sistema cámara-blanco

Dado que se les ha sustraído a todas las imágenes el ruido de fondo o “dark”, la recta de ajuste pasa por el punto (0,0). El ruido de fondo de la cámara [60], [111], explicado en el Apartado 5.5.1.1.2, se obtiene tomando una imagen con la cámara tapada, para los tiempos de exposición de cada imagen. En el caso de las imágenes para el blanco lambertiano, el tiempo de exposición es de 3 ms.

La ecuación para obtener la irradiancia sobre el blanco lambertiano es la que se ha representado en la Ecuación 6.5.1:

$$I = a GL \tag{Ecuación 6.5.1}$$

El resultado de la calibración para el día 03 de junio de 2020 es el siguiente:

$$I_B = 0.01296 GL_B$$

La incertidumbre asociada a la Ecuación 6.5.1, en la medida de la irradiancia con el sistema ProHermes 2B, viene dada por la Ecuación 6.5.2:

$$\sigma_I = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial a}\right)^2 \sigma_a^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial GL_B}\right)^2 \sigma_{GL_B}^2} = \sqrt{GL_B^2 \sigma_a^2 + a^2 \sigma_{GL_B}^2} \quad \text{Ecuación 6.5.2}$$

Aplicando la Ecuación 6.5.1 y la Ecuación 6.5.2 a las imágenes tomadas con la cámara digital en unidades de niveles de gris, es posible transformarlas a unidades de irradiancia, obteniendo la distribución de irradiancias sobre la superficie del blanco lambertiano. Este método es el utilizado como referencia en esta tesis, como se ha explicado anteriormente.

6.5.1. MEDIDAS EN EL LABORATORIO: CARACTERIZACIÓN DE LA SUPERFICIE DE LAS COPAS DEL RECEPTOR CAPTURE

El receptor del proyecto Capture está formado por 35 copas o módulos de carburo de silicio, como se ha visto en el Apartado 6.2. Estas copas se fabrican una a una, y luego se ensamblan en una estructura. En la Figura 6.2.2 se aprecia cómo están colocadas las 35 copas del receptor. Al observar esta misma figura, se puede apreciar a simple vista, que las copas son diferentes unas de otras. Se pueden apreciar distintas tonalidades de negro en cada copa. Esta diferencia entre cada copa, hace sospechar que las propiedades radiativas como la reflectancia o absortancia no serán exactamente iguales. Si tuvieran distinta reflectancia, ante una misma cantidad de radiación solar concentrada incidente, cada copa reflejaría una cantidad de radiación solar diferente.

En las especificaciones de este receptor volumétrico de carburo de silicio, no se incluyen las propiedades radiativas, como la absortancia o reflectancia, de cada copa. De lo único de que se dispone es de la reflectancia hemisférica del carburo de silicio, dada en la Figura 6.2.3, para una muestra de este material de superficie lisa. Sin embargo, este receptor es de un material poroso, por lo que la reflectancia será algo distinta a la de la Figura 6.2.3. Dado que no se dispone de esta información esencial para poder utilizar el método de medida de irradiancia sobre una superficie planteado en esta tesis, ha sido necesario hacer un *estudio de laboratorio* para comprobar y cuantificar las diferencias entre las copas del receptor.

El objetivo del estudio es corroborar la hipótesis de que las copas tienen distintas propiedades radiativas entre ellas, y cuantificar esa diferencia. Para llevarlo a cabo se dispone de la instalación CRS, con su torre y su campo de heliostatos Martin-Marietta [112], [113]. En esta instalación, además, se cuenta con la cámara Hamamatsu®, y el sistema ProHERMES 2B. Este estudio consta de dos fases experimentales principales.

Capítulo 6. Medida de Irradiancia en un Receptor de Reducida Superficie (1 m^2)

En la primera fase se utiliza la superficie blanca lambertiana pintada con Amercoat®, cuyas propiedades ópticas son conocidas, como se refleja en la Figura 5.3.1.1. Se hace incidir sobre ella radiación solar concentrada por los heliostatos del campo, y se sitúa el blanco lambertiano en un plano paralelo a las copas del receptor. Este plano está situado a 20 cm del receptor. Al situar el blanco en el plano paralelo, se intercepta dicha radiación antes de incidir sobre las copas, y se registra su efecto con valores de intensidad, en niveles de gris, que son proporcionados para la cámara CMOS de Hamamatsu®. Estos niveles de gris están asociados a un área de interés (AOI), correspondiente a cada una de las 15 copas objeto de este estudio. En la segunda fase, utilizando la misma cámara digital, se registran los valores de intensidad, en niveles de gris, procedentes de la superficie del receptor, correspondientes con las mismas 15 áreas de interés que en la primera fase.

Tanto en este estudio de laboratorio como en el ensayo del receptor del día 03 de junio de 2020, se han escogido las 15 copas centrales. Esto es debido a que la protección de alúmina que tiene el receptor tapa una pequeña parte externa de las copas de los bordes introduciendo reflejos que afectan a la medida, distorsionándola. Estos efectos, así como el número asignado a cada una de las copas centrales escogidas, se pueden observar en la Figura 6.5.1.1.



Figura 6.5.1.1. Copas centrales seleccionadas del receptor

Se han ido introduciendo diferentes niveles de radiación solar concentrada incidente, mediante estrategias de apunte de diferentes grupos de heliostatos, tanto sobre el blanco lambertiano como sobre el receptor. Con las diferentes estrategias de apunte, se ha podido estudiar cómo se comporta cada copa bajo diferentes niveles de radiación

solar concentrada incidente. Además, se han comparado todas las copas entre sí, para observar las diferencias entre ellas. Para ello, se han tomado imágenes, en niveles de gris, con la cámara digital del blanco lambertiano y del receptor, mientras se iba variando la cantidad de heliostatos enfocados sobre ellos. Estos datos se han representado en la Figura 6.5.1.2. En el eje de abscisas se ha representado el nivel de gris promedio (GL Blanco) del área de interés de cada copa, en la superficie blanca lambertiana. En el eje de ordenadas se ha representado el nivel de gris promedio del área de interés de cada copa (GL Receptor), en cada una de las imágenes tomadas. Este proceso se ha repetido para cada una de las 15 copas centrales del receptor Capture y se han graficado los resultados en la Figura 6.5.1.2. Además, este estudio incluye necesariamente a la copa 34 pues, como se verá más adelante, es la única copa del receptor donde la irradiancia procedente del campo solar coincide con la recibida por el radiómetro, permitiendo así la efectiva calibración de sus GL. Dicha copa 34 aporta, por tanto, el verdadero valor de irradiancia sobre una porción de superficie del receptor. Se le denomina copa de referencia en el proceso de corrección propuesto para la correcta extrapolación de su medida al resto del receptor.

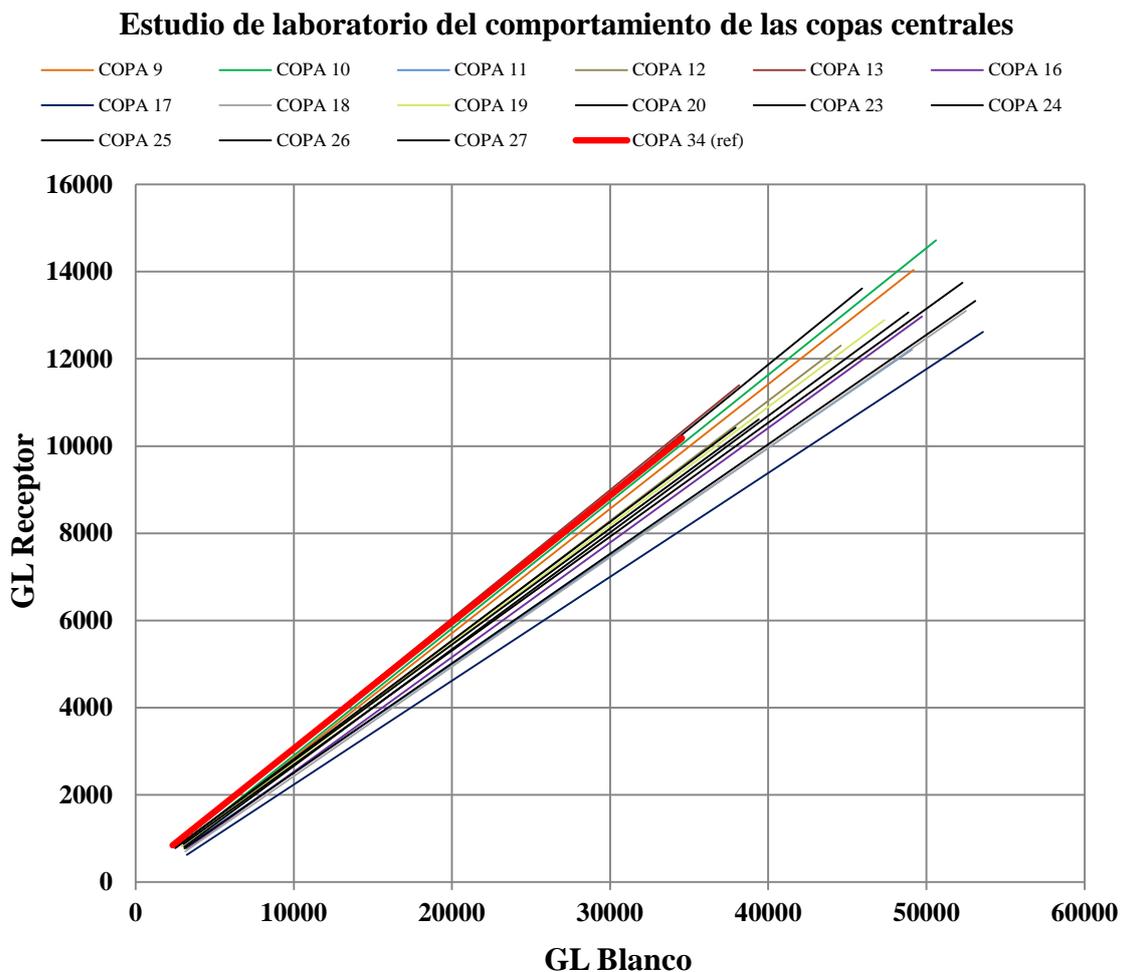


Figura 6.5.1.2. Estudio de laboratorio del comportamiento de las copas del receptor Capture

Capítulo 6. Medida de Irradiancia en un Receptor de Reducida Superficie (1 m²)

Al observar la Figura 6.5.1.2, se constata cómo cada una de las copas reacciona de una manera distinta ante un mismo estímulo de radiación solar concentrada incidente. Por ejemplo, a un nivel de GL Blanco dado, se puede apreciar cómo la copa 17 (línea azul inferior) se comporta de una manera muy diferente a la copa 34 (línea roja). Además, se observa que a mayor nivel de GL Blanco, mayor es la diferencia en el comportamiento de las copas entre sí (GL Receptor). Estas diferencias son cuantificables y ponen de manifiesto que para medir irradiancia, se necesitará una compensación o corrección entre copas.

Estos hechos experimentales obligan a añadir un factor de corrección (FC) entre cada una de las copas estudiadas y la copa 34 que, tal y como se ha mencionado anteriormente, es la única copa del receptor cuyos GL han podido ser efectivamente calibrados con la medida directa del radiómetro. Es necesario cuantificar la diferencia entre la respuesta de la copa usada como referencia para medir irradiancia, y el resto de las copas. En los ensayos que se han realizado en la torre CRS para validar el método de medida de alta irradiancia sobre la superficie del receptor de esta tesis, se ha calculado el factor de corrección para cada medida, ya que las copas usadas de referencia han ido variando a lo largo de los ensayos para la medida de irradiancia, como se explicará más adelante.

Para calcular el factor de corrección respecto a la copa 34 de referencia, es necesario calcular primero el comportamiento, al que se ha denominado respuesta, ξ_i , de cada copa. La respuesta de la copa-*i* se obtiene a partir de la Figura 6.5.1.2, calculando la pendiente del ajuste lineal (ξ_i). En cada copa, se puede obtener la pendiente de la recta que pasa por el origen de coordenadas, ξ_i , que es una variable adimensional, ya que resulta del cociente entre dos niveles de gris. El error de ξ_i es el error de la pendiente que se obtiene al hacer el ajuste lineal. Los valores de la respuesta de cada copa y su error aparecen en la Tabla 6.5.1.1.

Número de copa	ξ_i	Error ξ_i	Error (%)
Copa 9	0.2828	0.0013	0.46
Copa 10	0.2876	0.0016	0.56
Copa 11	0.247	0.003	1.08
Copa 12	0.275	0.004	1.32
Copa 13	0.301	0.005	1.68
Copa 16	0.2578	0.0018	0.70
Copa 17	0.2324	0.0017	0.74
Copa 18	0.246	0.003	1.00
Copa 19	0.271	0.004	1.42
Copa 20	0.271	0.005	1.78
Copa 23	0.268	0.002	0.91
Copa 24	0.2514	0.0015	0.61
Copa 25	0.263	0.003	0.98
Copa 26	0.297	0.004	1.47
Copa 27	0.277	0.005	1.72

Tabla 6.5.1.1. Pendiente ξ_i de la respuesta de cada copa y su error asociado

Capítulo 6. Medida de Irradiancia en un Receptor de Reducida Superficie (1 m²)

Una vez obtenida ξ_i , se calcula el factor de corrección, a partir de la Ecuación 6.5.1.1, que relaciona la pendiente de la copa de referencia, ξ_{ref} , con la pendiente de la copa sobre la que se está midiendo, ξ_i .

$$\xi_{ref} = FC \xi_i \quad \text{Ecuación 6.5.1.1}$$

A partir de la Ecuación 6.5.1.1 se puede despejar el factor de corrección (FC), obteniendo la Ecuación 6.5.1.2:

$$FC = \frac{\xi_{ref}}{\xi_i} \quad \text{Ecuación 6.5.1.2}$$

Este factor de corrección es, por tanto, el factor por el que hay que multiplicar la respuesta de la copa-i, para normalizar y homogeneizar la respuesta óptica de todas las copas a la de la copa de referencia, que se usará más adelante en la medida de irradiancia incidente en el receptor, según el método propuesto en esta tesis.

6.5.2. MEDIDA DE IRRADIANCIA SOBRE RECEPTOR VOLUMÉTRICO

La medida de irradiancia sobre el receptor se ha realizado el mismo día de la calibración del sistema cámara-blanco (ProHERMES 2B), el día 03 de junio de 2020. El procedimiento seguido para la calibración sobre el receptor es similar. Tal como se ha explicado al principio del Apartado 6.5, se iban introduciendo diferentes grupos de heliostatos sobre el receptor, consiguiendo diferentes niveles de irradiancia. Una vez se estabilizaba el sistema, se tomaban imágenes del receptor con la cámara digital. En el caso de las imágenes del receptor, el tiempo de exposición óptimo era 12 ms.

Para alcanzar distintos niveles de irradiancia, se seleccionaron 44 heliostatos, divididos en 8 grupos. Cada uno de los grupos se iba añadiendo sucesivamente, enfocando a los puntos señalados en la Tabla 6.5.2.1. El campo de heliostatos Martin-Marietta y el número respectivo de cada heliostato se puede observar en la Figura 6.5.2.1. Teniendo en cuenta los heliostatos en los extremos del eje horizontal y vertical, se puede calcular la apertura del campo en estos dos ejes, sabiendo que el receptor se encuentra en la cota de 42 m de altura, y con una inclinación de 30°. La apertura es de $\pm 36^\circ$ en el eje horizontal, y de $\pm 15^\circ$ en el eje vertical. Como se vio en la Figura 6.3.3, la superficie del receptor se comporta como una superficie lambertiana dentro de $\pm 45^\circ$. Al ser los ángulos de apertura horizontal y vertical menores que $\pm 45^\circ$, se confirma que el receptor se comportará como una superficie lambertiana en el campo CRS.

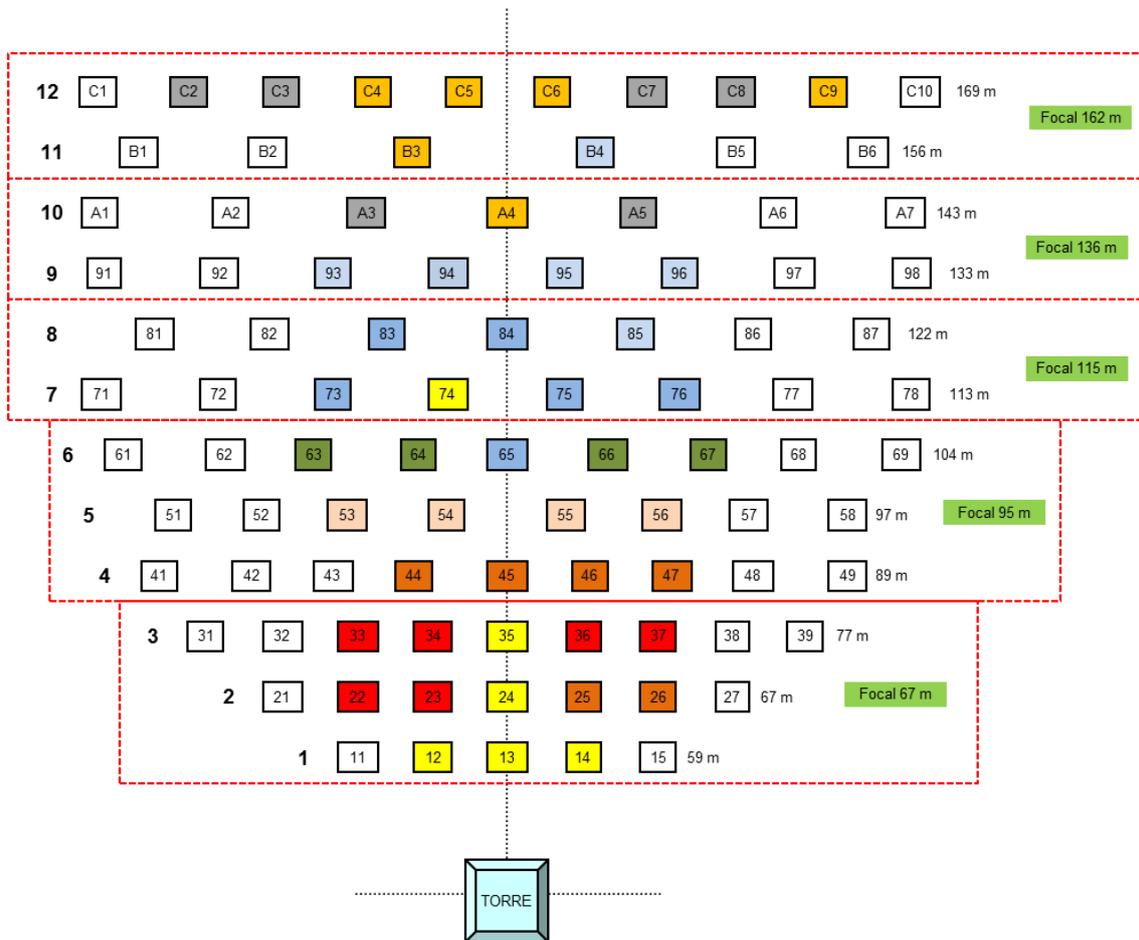


Figura 6.5.2.1. Campo de heliostatos Martin-Marietta

Grupo heliostatos	Número de heliostatos	Lugar de apunte
Grupo 1	C4, C5, B3, A4, C6, C9	Centro
Grupo 2	33, 34, 36, 37, 22, 23	Esquinas (33 Bajo oeste; 34 Alto oeste; 36 Alto este; 37 Bajo este; 22 Bajo oeste, 23, Alto oeste)
Grupo 3	A3, A5, C3, C7, C2, C8	Centro
Grupo 4	44, 45, 46, 47, 25, 26	Esquinas (44 Bajo oeste; 45 Alto oeste; 46 Alto este; 47 Bajo este; 25 alto este; 26 Bajo este)
Grupo 5	93, 94, 95, 96, B4, 85	Centro
Grupo 6	53, 54, 55, 56	Esquinas (53 Bajo oeste; 54 Alto oeste; 55 Alto este; 56 Bajo este)
Grupo 7	75, 76, 83, 84, 73, 65	Centro
Grupo 8	63, 64, 66, 67	Esquinas (63 Bajo oeste; 64 Alto oeste; 66 Alto este; 67 Bajo este)

Tabla 6.5.2.1. Grupos de heliostatos con sus apuntes respectivos

Capítulo 6. Medida de Irradiancia en un Receptor de Reducida Superficie (1 m²)

Los lugares de apunte que se proporcionan en la Tabla 6.5.2.1 son los representados en la Figura 6.5.2.2.

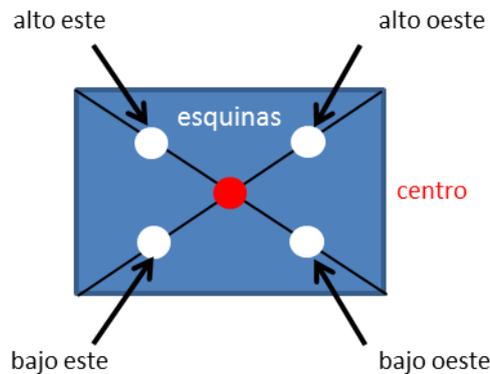


Figura 6.5.2.2. Lugares de apunte sobre el receptor Capture

Cada vez que se añadía un grupo nuevo de heliostatos, se esperaba a que el sistema se estabilizara, y una vez estabilizado, se procedía a realizar la medida de distribución de irradiancia con los dos sistemas, el ProHERMES 2B y el propuesto en esta tesis. La medida de irradiancia consistía en tomar una imagen de la superficie del receptor, con un tiempo de exposición de 12 ms. A continuación, se tomaban imágenes de la barra móvil lambertiana, mientras pasaba por un plano paralelo al receptor, con un tiempo de exposición de la cámara de 3 ms. En la Figura 6.5.2.3 a) y b) se muestran como ejemplo las imágenes tomadas del blanco lambertiano (sistema ProHERMES 2B) y del receptor respectivamente, en el nivel de 600 kW m⁻², con 40 heliostatos enfocados.

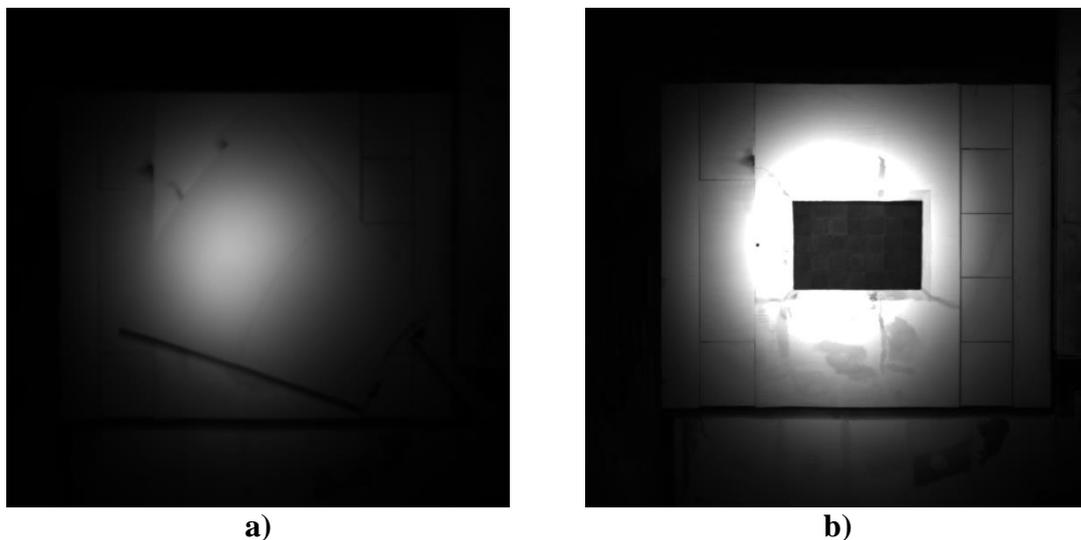


Figura 6.5.2.3. Nivel de irradiancia 600 kW m⁻². a) Blanco lambertiano, 03 junio, 2020, Hora 15:18:02. b) Receptor Capture 03 junio, 2020, Hora 15:17:33

Se han tomado medidas de irradiancia para 8 niveles diferentes, especificados en la Tabla 6.5.2.2.

Niveles	Hora	DNI (W m ⁻²)	Heliostatos	Radiómetro (kW m ⁻²)
1	14:05:35	956	34	260.96
2	14:14:12	953	40	320.12
3	14:25:46	945	44	279.75
4	15:18:02	925	40	305.54
5	15:27:36	923	30	228.19
6	15:32:36	910	24	192.41
7	15:36:41	910	18	134.22
8	15:47:13	899	6	33.73

Tabla 6.5.2.2. Niveles de irradiancia medidos en el ensayo del día 03 junio 2020

Las imágenes son tomadas y tratadas con el mismo software que en el Capítulo 5, ImagenPro Plus (IPP) 7.0 (Media Cybernetics®). Además, el procedimiento para el tratamiento de estas imágenes es el mismo que el definido en el Apartado 5.6. En primer lugar, se realiza la calibración espacial de las imágenes, en la que se hace corresponder el tamaño del receptor con los píxeles que ocupa en la imagen. A continuación, se procede al tratamiento de las imágenes. En el caso de este experimento, el tratamiento de las imágenes es algo diferente al del ensayo realizado en el horno solar.

El tratamiento de las imágenes del receptor se divide en 3 fases. La primera fase, en la que se seleccionan y ajustan las AOI correspondientes para las 15 copas centrales. Las 15 AOI tienen el mismo tamaño y se ajustan a cada copa, pero se evitan los bordes de las mismas. Esto es debido a que, por la estructura dónde se encuentran montadas las copas, en los bordes se cuelan algunos reflejos de la estructura, que contaminan la medida, además de que las copas no están refrigeradas homogéneamente. En la parte externa de las copas, al tener menor espesor y estar sujetas a la estructura, el aire que circula por el receptor no refrigera de manera homogénea la copa, provocando que los bordes estén menos refrigerados. El número de píxeles dentro del AOI de una copa es de 2254 píxeles, correspondientes a 46 píxeles en horizontal y 49 en vertical. Este número de píxeles equivale a un área de 0.014 m² (0.113 m x 0.121 m). Cabe recordar que el lado de cada copa mide 0.14 m. En la Figura 6.5.2.4 están representadas las 15 áreas de interés de las copas, así como el área de interés del radiómetro. El número de píxeles dentro del AOI del radiómetro es de 25 píxeles, 5 píxeles en horizontal y 5 píxeles en vertical.

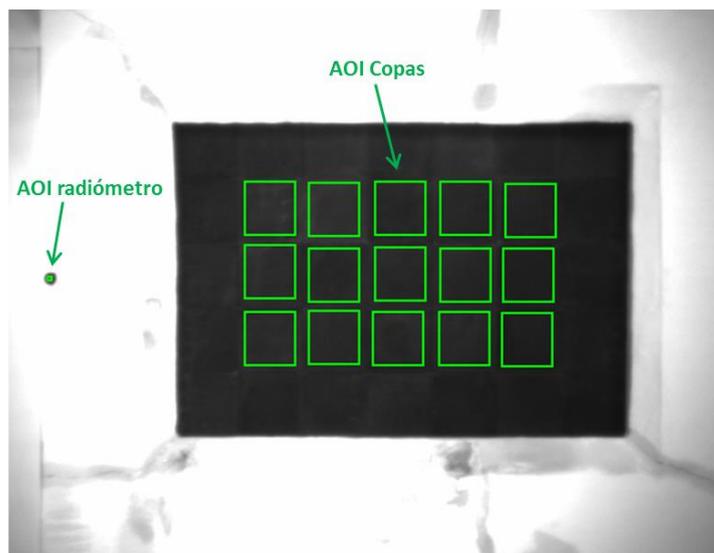


Figura 6.5.2.4. AOI de las 15 copas centrales del receptor Capture y AOI del radiómetro

Una vez están correctamente ajustadas y delimitadas todas las AOI, se guardan todos los valores de nivel de gris medio junto con su desviación estándar, que proporciona el software IPP. En paralelo, se guarda el nivel de gris medio del AOI del radiómetro y su medida de irradiancia que proporcionaba el sistema de adquisición de datos.

La segunda fase en el tratamiento de imágenes tiene como objetivo encontrar un punto en el receptor que tenga la misma irradiancia que en el radiómetro. Al tener varias configuraciones con los distintos grupos de heliostatos (Tabla 6.5.2.1), la irradiancia sobre el radiómetro no es la misma que sobre el receptor. Es por ello que es necesario buscar una zona dentro del receptor con la misma irradiancia que en el radiómetro. Esta fase no sería necesaria si el radiómetro estuviera situado muy cerca o dentro del receptor, ya que en este caso sí que podría relacionarse directamente la irradiancia que proporciona el radiómetro con el nivel de gris del receptor.

Para encontrar una zona de la superficie del receptor sobre la que incida la misma irradiancia, es necesario usar el blanco lambertiano. En los ensayos futuros este paso no será necesario, ya que se intentará situar el radiómetro con una separación mínima del receptor. En el caso de este ensayo, es necesario usar la superficie del blanco como superficie auxiliar. El objetivo es encontrar zonas en las que la irradiancia sea la misma que sobre el radiómetro. La unión de estas zonas forma una línea llamada isolínea de calibración, que se puede apreciar en color azul oscuro en la Figura 6.5.2.5 a) y b).

La tercera fase del tratamiento consiste en guardar el nivel de gris medio dentro del AOI del radiómetro (Figura 6.5.2.4), usando la imagen de la superficie blanca lambertiana. A continuación, se traza la isolínea de calibración siguiendo los puntos que tienen el mismo nivel de gris. Se guarda la isolínea y se aplica a la imagen del receptor

(Figura 6.5.2.5 b). Siguiendo la isolínea, se seleccionan las copas sobre las que pasa la misma.

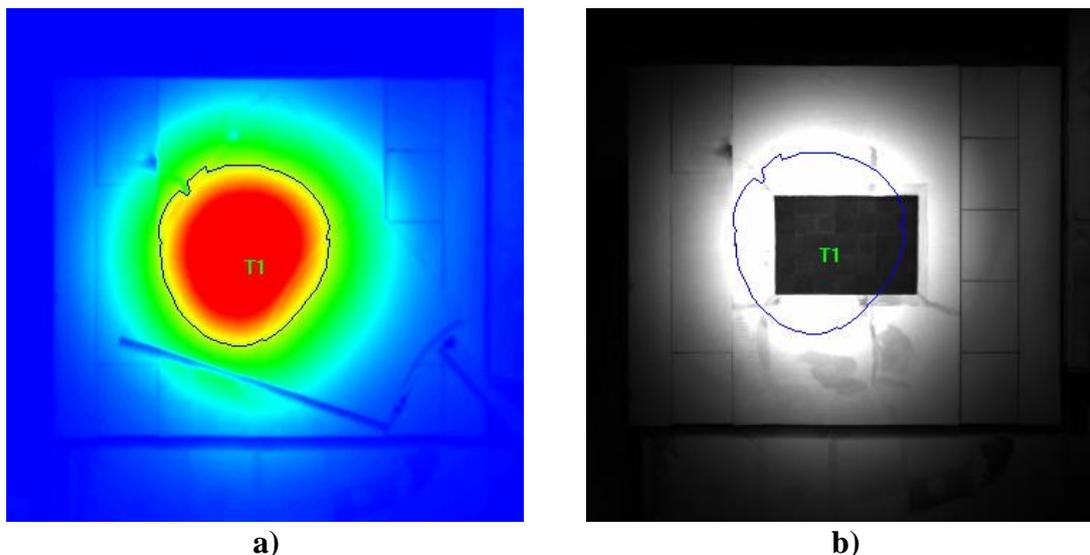


Figura 6.5.2.5. Isolínea que pasa por el radiómetro. 03 junio, 2020, Nivel 600 kW m⁻²

Cuando se tienen todos estos datos, se repiten las tres fases para los 8 niveles de irradiancia, estudiando sobre qué copas pasa cada isolínea de calibración. En total, habrá 8 niveles con 8 isolíneas, es decir, una isolínea por cada nivel.

En la Tabla 6.5.2.3 se muestran para cada nivel, el número de cada copa sobre la que pasa la isolínea. Entre las copas sobre las que pasan las isolíneas, se escoge una de ellas para la calibración. Los criterios de selección son, en primer lugar, escoger la copa que más se repita en los niveles y, en segundo lugar, que la isolínea evite los bordes de las copas, con la mínima desviación estándar entre los niveles de gris.

Observando las copas que más se repiten, están la copa 14, la copa 21 y la copa 34. Entre estas tres copas, la que más se repite es la copa 34, por lo que esta copa es la seleccionada para la calibración. En el nivel 3, la isolínea no pasa por el receptor, por lo que ese nivel queda descartado para la calibración.

NIVEL	HORA	COPAS
Nivel 1	14:05:35	14,21,27,34
Nivel 2	14:14:12	7,14,21,34
Nivel 3	14:25:46	-
Nivel 4	15:18:02	14,21,34
Nivel 5	15:27:36	14,21,34
Nivel 6	15:32:36	13,20,27,33
Nivel 7	15:36:41	27,34
Nivel 8	15:47:13	14,34

Tabla 6.5.2.3. Copas cuyo nivel medio de irradiancia pertenece a la isolínea de calibración

Una vez se ha seleccionado la copa con la que se va a calibrar el receptor, es posible obtener la calibración. Para ello, se representa en una gráfica la irradiancia

medida por el radiómetro en función del nivel de gris medio del AOI de la copa seleccionada como referencia.

Para realizar la calibración, se guarda el nivel de gris medio en el AOI de la copa escogida, la copa 34, y la medida de irradiancia proporcionada por el radiómetro. La calibración está representada en la Figura 6.5.2.6, dónde se han graficado 6 niveles de irradiancia, en función del nivel de gris medio de la copa 34. Se han eliminado los niveles 3 y 6, debido a que la isolínea de estas imágenes no pasaba por la copa 34. El resultado de la pendiente, C_{ref} , de la función de calibración es:

- Copa 34: $I = C_{ref} GL_R$, (kW m⁻²)
- Copa 34: $I = 0.0445 GL_R$, (kW m⁻²)

En el ajuste lineal de la función se ha impuesto que la ordenada en el origen sea 0, es decir, la recta pasa por el punto (0,0). Esto es debido a que a las imágenes tomadas de la superficie del receptor con 12 ms, se les ha eliminado el ruido de fondo de la cámara, restando la imagen tomada del ruido de fondo con el mismo tiempo de exposición.

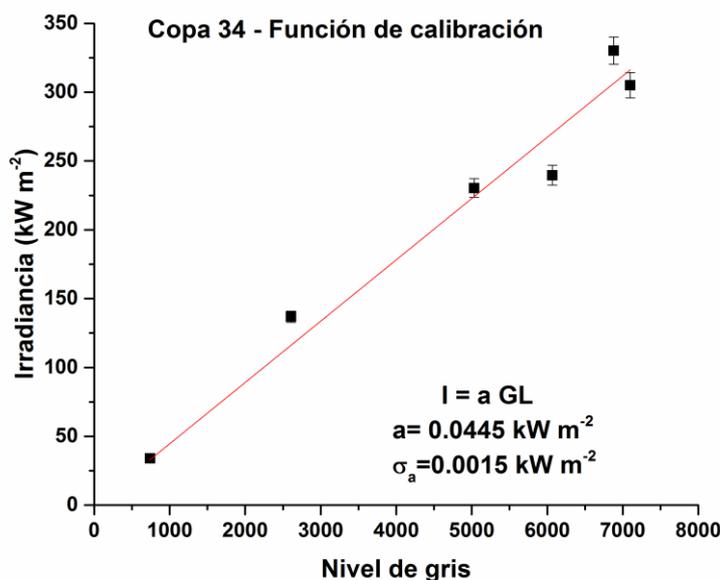


Figura 6.5.2.6. Función de calibración para la Copa 34 del receptor

La función de calibración de la Figura 6.5.2.6 es la función que se debe aplicar a las imágenes tomadas con la cámara digital de la superficie del receptor, con el tiempo de exposición de 12 ms. Este paso permite transformar los niveles de gris de las imágenes tomadas con la cámara, a unidades de irradiancia, en kW m⁻². Sin embargo, tal como se ha comentado y se ha constatado en el Apartado 6.5.1, es necesario hacer una corrección entre las copas del receptor, ya que su superficie tiene diferencias.

La corrección entre las copas se realiza calculando el factor de corrección (Ecuación 6.5.1.2). Para ello, es necesario calcular la pendiente, ξ_i , de cada copa, dado en la Tabla 6.5.1.1. Conocida la copa que va a usarse para calibrar, también denominada copa de referencia, se puede calcular el FC. Los resultados obtenidos para el FC y su error asociado vienen dado en la Tabla 6.5.2.4:

Número de copa	FC	Error FC	Error (%)
Copa 9	1.064	0.017	1.60
Copa 10	1.046	0.018	1.69
Copa 11	1.220	0.017	1.38
Copa 12	1.10	0.02	1.83
Copa 13	1.00	0.02	2.43
Copa 16	1.167	0.016	1.39
Copa 17	1.295	0.015	1.14
Copa 18	1.223	0.017	1.35
Copa 19	1.11	0.02	1.83
Copa 20	1.11	0.02	2.02
Copa 23	1.122	0.018	1.57
Copa 24	1.197	0.016	1.30
Copa 25	1.143	0.018	1.54
Copa 26	1.02	0.02	2.22
Copa 27	1.09	0.02	2.07

Tabla 6.5.2.4. Valores del Factor de Corrección (FC) y su error asociado

El error del factor de corrección viene dado por la Ecuación 6.5.2.1:

$$\begin{aligned} \sigma_{FC} &= \sqrt{\left(\frac{\partial FC}{\partial \xi_{ref}}\right)^2 \sigma_{\xi_{ref}}^2 + \left(\frac{\partial FC}{\partial \xi_i}\right)^2 \sigma_{\xi_i}^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{\xi_i}\right)^2 \sigma_{\xi_{ref}}^2 + \left(-\frac{\xi_{ref}}{\xi_i^2}\right)^2 \sigma_{\xi_i}^2} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 6.5.2.1}$$

Por último, para obtener la irradiancia y la distribución de irradiancia sobre el receptor, se utiliza la función de calibración de la copa de referencia, la copa 34 (Figura 6.5.2.6) y el factor de corrección (Tabla 6.5.2.4), siguiendo la Ecuación 6.5.2.2:

$$I = FC_i C_{ref} \overline{GL}_i \quad \text{Ecuación 6.5.2.2}$$

Dónde FC_i es el factor de corrección de la copa-i, C_{ref} es la pendiente de la función de calibración de la copa de referencia, en este caso la copa 34, y \overline{GL}_i es el valor medio de nivel de gris de la copa-i.

El error correspondiente a la irradiancia viene dado por la Ecuación 6.5.2.3:

$$\begin{aligned} \sigma_I &= \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial FC_i}\right)^2 \sigma_{FC_i}^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial C_{ref}}\right)^2 \sigma_{C_{ref}}^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial GL_i}\right)^2 \sigma_{GL_i}^2} \\ &= \sqrt{C_{ref}^2 GL_i^2 \sigma_{FC_i}^2 + FC_i^2 GL_i^2 \sigma_{C_{ref}}^2 + FC_i^2 C_{ref}^2 \sigma_{GL_i}^2} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 6.5.2.3}$$

Con todos estos resultados, se puede proceder a analizar la distribución de irradiancia obtenida con este nuevo método, siguiendo la Ecuación 6.5.2.2. Al aplicar la calibración, así como el factor de corrección a las imágenes, se obtiene la distribución de irradiancia sobre la superficie del receptor, Figura 6.5.2.7 b). Además, se puede comparar esta distribución con la distribución obtenida con el sistema de referencia, ProHermes 2, en la Figura 6.5.2.7:

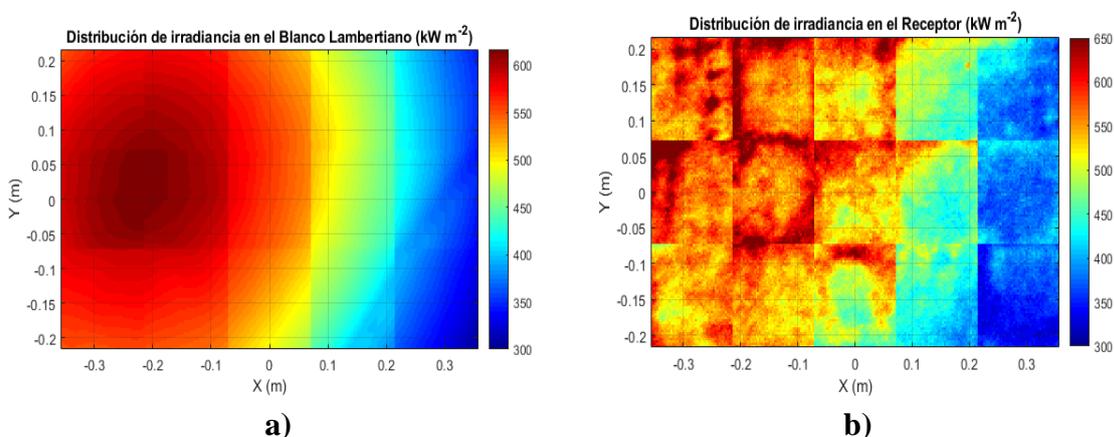


Figura 6.5.2.7. Distribución de irradiancia para el nivel 600 kW m⁻². a) Blanco Lambertiano. b) Receptor

Como se predijo con la hipótesis inicial, ambas distribuciones de irradiancia son cualitativamente similares. En este caso, debido a la superficie porosa del receptor volumétrico que se está analizando, se observan algunas diferencias. Estas diferencias son debidas a que la superficie del blanco lambertiano es una superficie ideal, homogénea, lambertiana, y además lisa. En el caso de la superficie de un receptor real como el que se estudia, ésta nunca será ideal y, aunque se comporta como lambertiana, no es lisa, por lo que al tomar la imagen directamente de la superficie del receptor, se pueden observar los detalles de su superficie. Por otra parte, en los bordes de las copas se pueden apreciar irradiancias mayores que en el centro de la copa. Este efecto es debido a que en los bordes, las copas tienen un grosor mucho menor, como se aprecia en la Figura 6.5.2.8, y es la parte en la que las copas están sujetas a la estructura que contiene el receptor. Esta estructura, unido al menor grosor de los bordes, provoca que algunos fotones de luz sean reflejados y sean captados con la cámara digital. Además, el aire que entra en el receptor volumétrico, que sirve para refrigerar el receptor, refrigera de manera más eficiente el centro de las copas que los bordes, ya que, al entrar el aire por los bordes, choca contra la estructura del receptor y no refrigera tan eficientemente.



Figura 6.5.2.8. Vista de perfil de una copa del receptor Capture

El error cometido en la medida de la irradiancia viene dado por la Ecuación 6.5.2.3. En la Figura 6.5.2.9 se representa la incertidumbre asociada a cada una de las 15 copas centrales del receptor Capture, al medir irradiancia. Estas incertidumbres varían entre un 13 y 15 %.

13 %	14 %	14 %	13 %	14 %
14 %	13 %	14 %	14 %	13 %
13 %	13 %	15 %	14 %	14 %

Figura 6.5.2.9. Incertidumbre en la irradiancia al medir sobre cada copa. Nivel 600 kW m⁻²

La incertidumbre en la medida con el sistema de la barra móvil (ProHermes 2B), se ha calculado siguiendo la Ecuación 6.5.2, obteniendo una incertidumbre entre un ± 2 y un ± 8 %.

Por lo tanto, las incertidumbres asociadas a cada uno de los sistemas comparados en la medida de irradiancia, son:

- Método barra móvil, sistema ProHermes 2B (30-700) kW m⁻²: [± 2 , ± 8] %
- Método tesis, Receptor (30-700) kW m⁻²: [± 8 , ± 16] %

El rango de incertidumbre asociado al sistema de referencia ProHermes 2B es menor que el asociado al método propuesto en la tesis. Una de las principales razones de esta diferencia es por la diferencia entre la reflectancia de la superficie de la barra móvil, pintada con pintura blanca, Amercoat, con un 80 % de reflectancia, frente a la

reflectancia del carburo de silicio, que varía entre un 5 % y 7 % en el rango espectral de la cámara, 400-1000 nm. Esta diferencia entre las reflectancias da lugar a que, al tomar imágenes con la cámara digital, los diferentes niveles se caracterizan mejor con la superficie blanca al ser la relación ruido/señal menor.

Además, el tiempo de exposición escogido para las imágenes del receptor, tiene ciertas limitaciones. Estas limitaciones son debidas a la saturación que se produce en la imagen por la protección que tiene el receptor a su alrededor, cuya superficie es blanca. El tiempo de exposición escogido para el receptor, 12 ms, estaba limitado por la saturación entorno al radiómetro. Los reflejos de la superficie blanca de alrededor del radiómetro saturaban la imagen, saturando los píxeles correspondientes al radiómetro. Al estar saturados los píxeles dónde se situaba el radiómetro, era necesario disminuir el tiempo de exposición de la cámara, hasta que el radiómetro se hiciera visible. Al disminuir el tiempo de exposición de la cámara, los niveles en los que se trabaja para la superficie negra, eran menores, aumentando la relación ruido/señal y la incertidumbre en la medida de irradiancia. Los niveles máximos en el receptor captados por la cámara son 15000 GL, mientras que en el blanco son hasta 45000 GL. Es necesario recordar que la cámara tiene 16 bits, por lo que tiene 65535 niveles de GL.

Para comparar con mayor precisión las dos distribuciones de irradiancias, representadas en la Figura 6.5.2.7, se efectúa un corte horizontal a éstas, que pasa por el centro de la imagen (el punto (0,0)). Con ello, se obtiene un perfil de irradiancias que permite analizar y cuantificar de manera objetiva la diferencia entre las medidas de los dos sistemas. En la Figura 6.5.2.10 se ha representado el perfil de irradiancias obtenido con los dos sistemas, el de la tesis (Receptor) y el ProHermes 2B (Blanco), junto con las incertidumbres asociadas a cada una de las medidas de los sistemas.

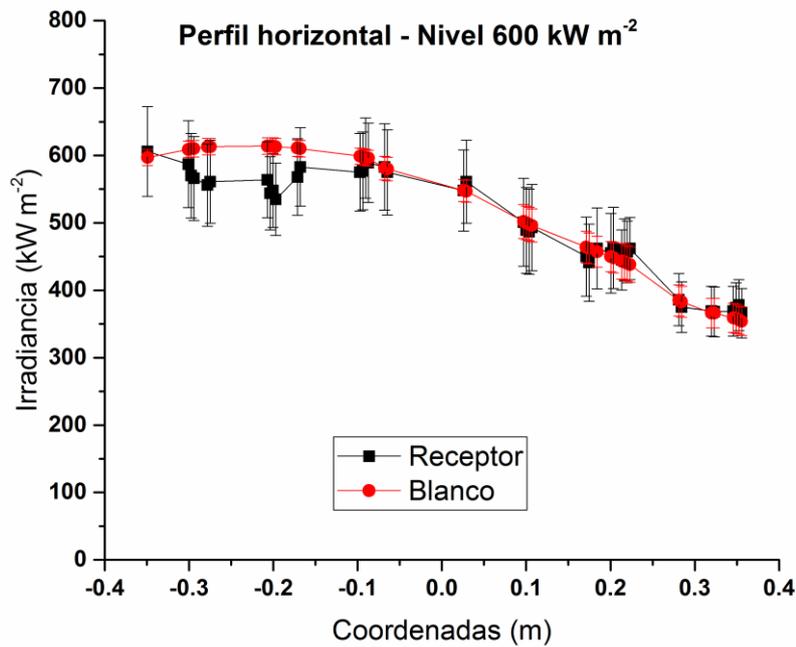


Figura 6.5.2.10. Perfil horizontal de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 600 kW m⁻²

La diferencia que se puede apreciar entre ambos métodos se puede cuantificar. Para cuantificar esta diferencia, se comparan ambas irradiancias, representadas en la Figura 6.5.2.11. Tal como se explicó en el Capítulo 5, el valor de la pendiente a , proporcionada en las figuras, indica el grado de similitud entre los perfiles de ambas distribuciones de irradiancia. La diferencia entre los perfiles en las distribuciones de irradiancia sobre el blanco lambertiano y sobre el receptor es del 4.5 %.

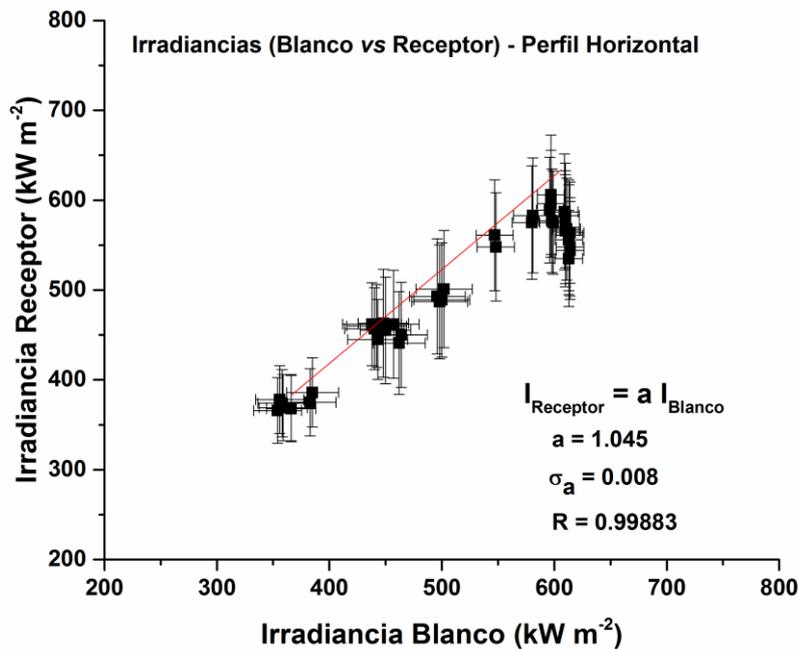


Figura 6.5.2.11. Perfil horizontal. Nivel 600 kW m⁻²

La discrepancia, menor del 5 %, valida el método de medida de irradiancias propuesto en esta tesis. Se han analizado las discrepancias obtenidas para diferentes niveles, entre el método del blanco lambertiano y el método propuesto en la tesis, sobre el receptor, y se han obtenido unas discrepancias menores. Estos resultados se muestran a continuación, y corresponden con niveles de irradiancia de 450 kW m⁻² y 500 kW m⁻².

6.5.2.1. NIVEL DE IRRADIANCIA 450 kW m⁻²

El siguiente nivel analizado es el de 450 kW m⁻². Para analizarlo, se sigue el mismo procedimiento que para el nivel de 600 kW m⁻². Las funciones de calibración utilizadas son las obtenidas en la Figura 6.5.2, para el blanco lambertiano, y en la Figura 6.5.2.6, para el receptor. Las calibraciones permiten transformar las imágenes tomadas con la cámara digital, en unidades de niveles de gris, a unidades de irradiancia, kW m⁻². Para el nivel de 450 kW m⁻², utilizando los dos sistemas de medida de irradiancia, se obtienen las distribuciones representadas en la Figura 6.5.2.1.1 a) y b).

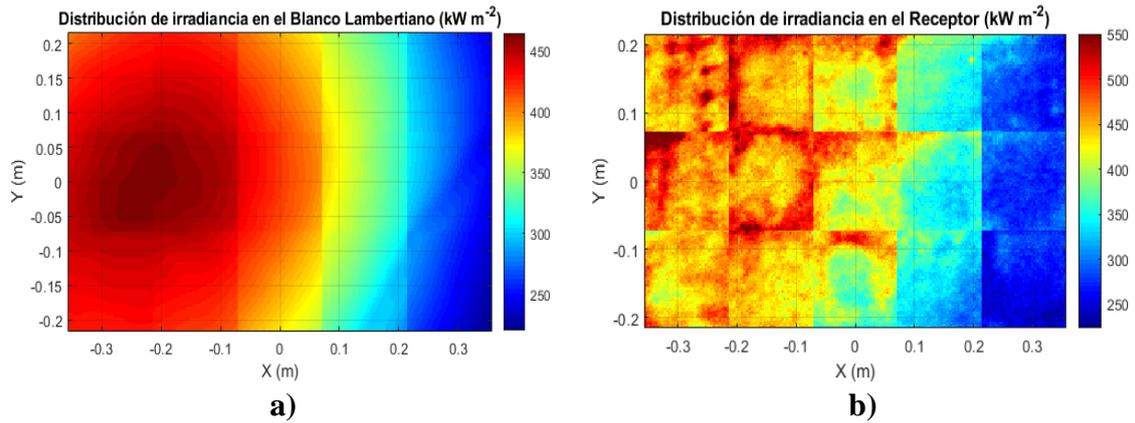


Figura 6.5.2.1.1. Distribución de irradiancia para el nivel 450 kW m^{-2} . a) Blanco Lambertiano. b) Receptor

La incertidumbre en la medida de irradiancias sobre el receptor, obtenida con el método de esta tesis, se ha representado en la Figura 6.5.2.1.2, dónde se observa el porcentaje de error que se comete al medir sobre cada copa. Las incertidumbres varían entre 8 y 14 %.

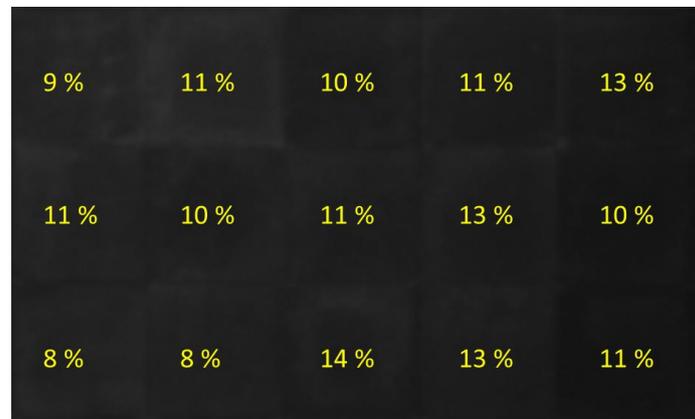


Figura 6.5.2.1.2. Incertidumbre en la irradiancia al medir sobre cada copa. Nivel 450 kW m^{-2}

Se realiza un corte horizontal en ambas distribuciones de irradiancias en la Figura 6.5.2.1.1 a) y b). El corte horizontal se ha representado en la Figura 6.5.2.1.3, junto con su incertidumbre.

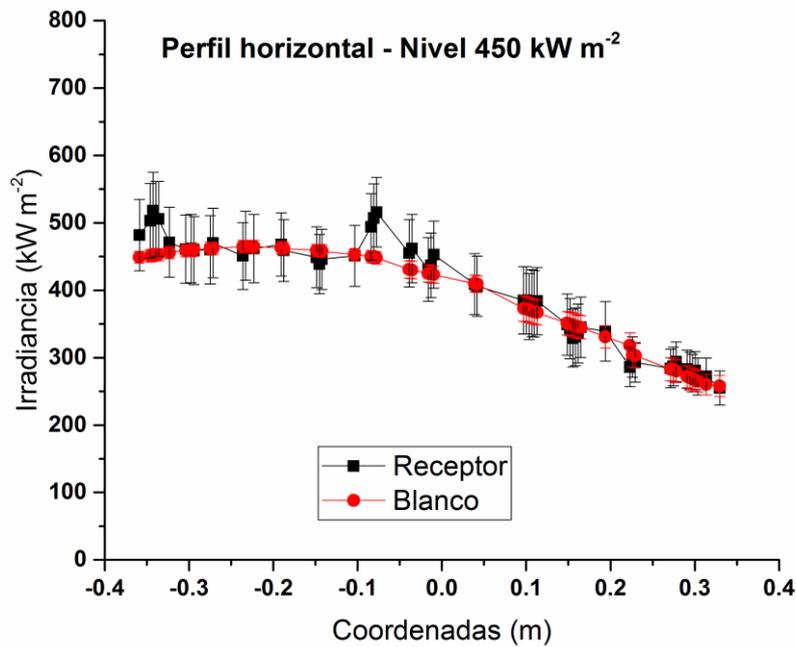


Figura 6.5.2.1.3. Perfil horizontal de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 450 kW m⁻²

Procediendo de igual manera que en el nivel anterior, para cuantificar la discrepancia entre las medidas de ambos sistemas, se ha representado en la Figura 6.5.2.1.4 la irradiancia obtenida con el sistema de referencia, ProHermes 2B, y el sistema de esta tesis, el del receptor. La discrepancia obtenida para este nivel de 450 kW m⁻² es del 2 %. De esta manera se valida una vez más el método de medida de irradiancias de esta tesis.

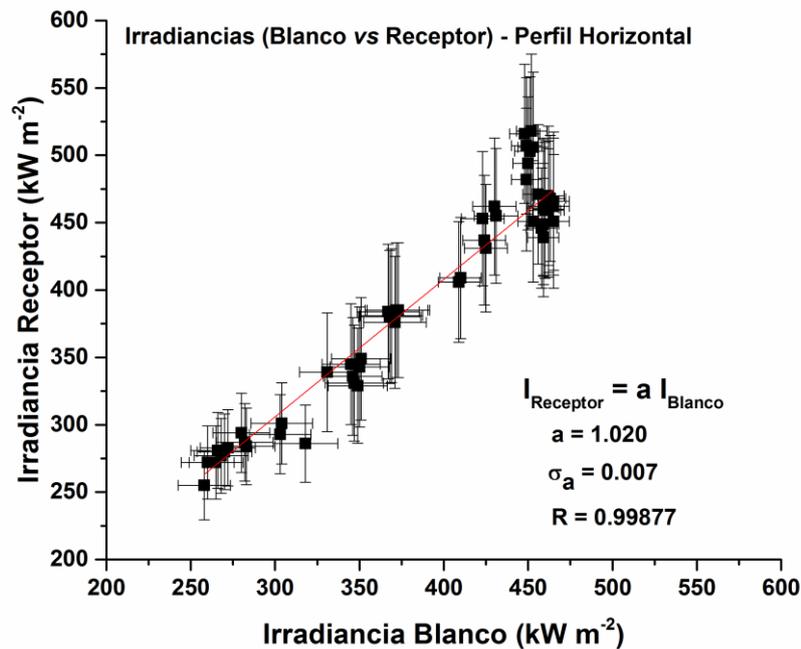


Figura 6.5.2.1.4. Perfil horizontal. Nivel 450 kW m⁻²

6.5.2.2. NIVEL DE IRRADIANCIA 500 kW m⁻²

Se ha comprobado el método de medida de irradiancia sobre la superficie del receptor, propuesto en esta tesis, en otro día distinto al de los niveles descritos anteriormente. Los niveles de 450 y 600 kW m⁻² son medidas realizadas el día de la calibración, el 3 de junio de 2020. Para comprobar que el método sigue siendo válido, se ha comprobado un día diferente, el 5 de junio de 2020, mientras se procedía con los ensayos del proyecto Capture. La medida de este apartado se tomó el día 5 de junio de 2020, a las 12:58:13 h.

Para medir irradiancia sobre el receptor y sobre la barra móvil, se aplican las mismas funciones de calibración que las obtenidas el día de la calibración, el 3 de junio de 2020. Las distribuciones de irradiancia obtenidas para ambos métodos son las representadas en la Figura 6.5.2.2.1 a) y b).

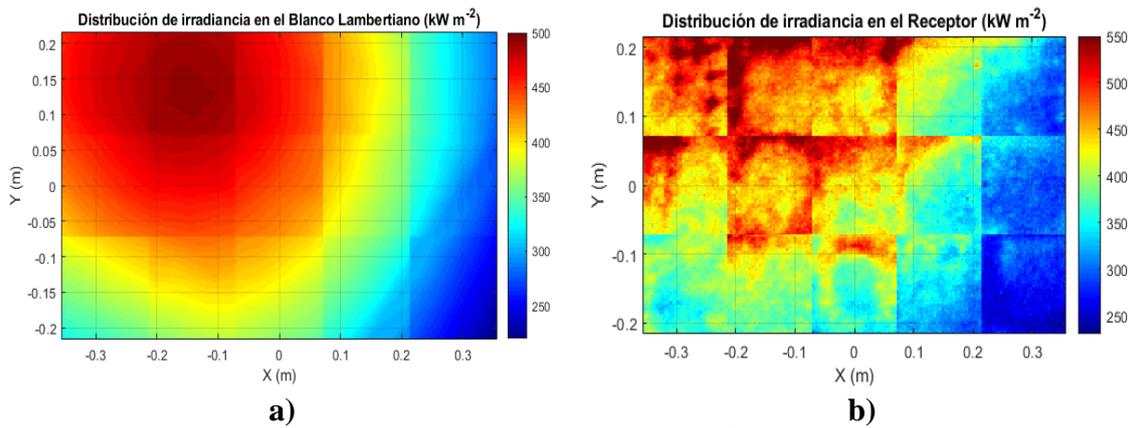


Figura 6.5.2.2.1. Distribución de irradiancia para el nivel 500 kW m^{-2} . a) Blanco Lambertiano. b) Receptor

Procediendo de igual manera que en los niveles anteriores, mediante la Ecuación 6.5.2.3, se calcula la incertidumbre asociada a la medida de irradiancia en el método de medida propuesto en esta tesis, obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 6.5.2.2.2. El rango de incertidumbres varía entre el 13 y 16 %.



Figura 6.5.2.2.2. Incertidumbre en la irradiancia al medir sobre cada copa. Nivel 500 kW m^{-2}

Una vez se han hallado las incertidumbres correspondientes al medir sobre cada copa, se realiza un corte que pasa por el centro de la imagen, como se ha hecho en los niveles anteriores. El corte horizontal se ha representado en la Figura 6.5.2.2.3, donde se pueden comparar las irradiancias obtenidas con cada uno de los dos métodos analizados en la tesis, junto con su error correspondiente.

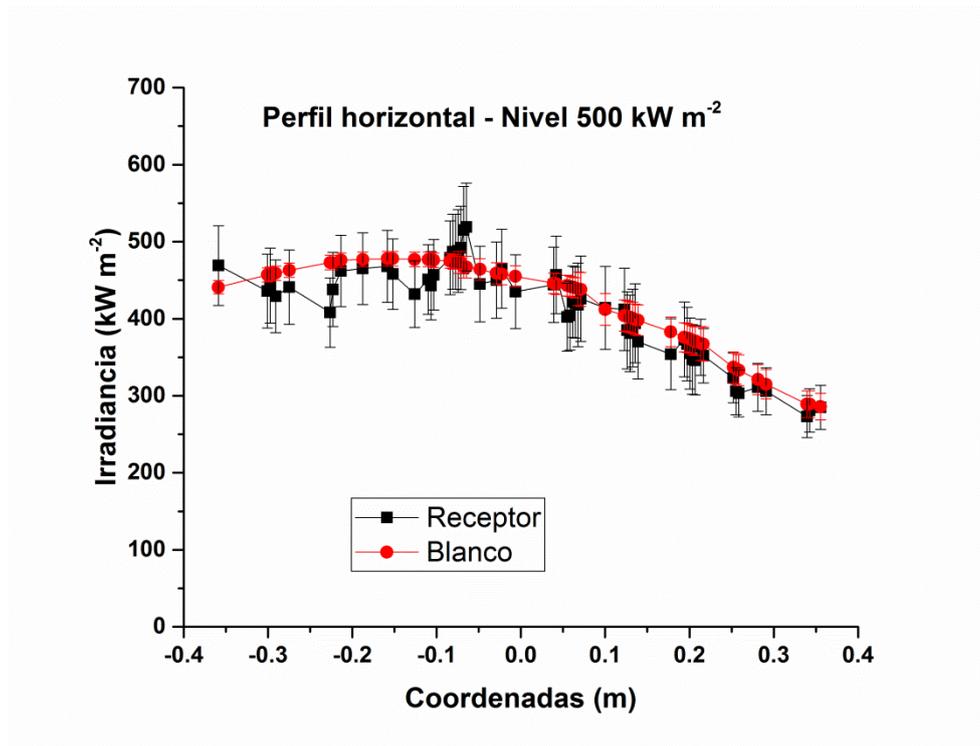


Figura 6.5.2.2.3. Perfil horizontal de irradiancias del blanco lambertiano y receptor. Nivel 500 kW m^{-2}

Por último, se representan ambas irradiancias en la Figura 6.5.2.2.4, para cuantificar la diferencia entre los valores de irradiancias obtenidos con ambos métodos. A partir de la pendiente de la recta obtenida, como se ha analizado anteriormente, se puede calcular la discrepancia entre los métodos. La discrepancia obtenida para este nivel es de un 3.3 %. Por lo tanto, el método es válido, aunque se trate de medidas efectuadas en días diferentes. Este hecho, unido a los dos niveles estudiados y analizados anteriormente, valida el método de medida sobre la superficie del receptor propuesto en esta tesis.

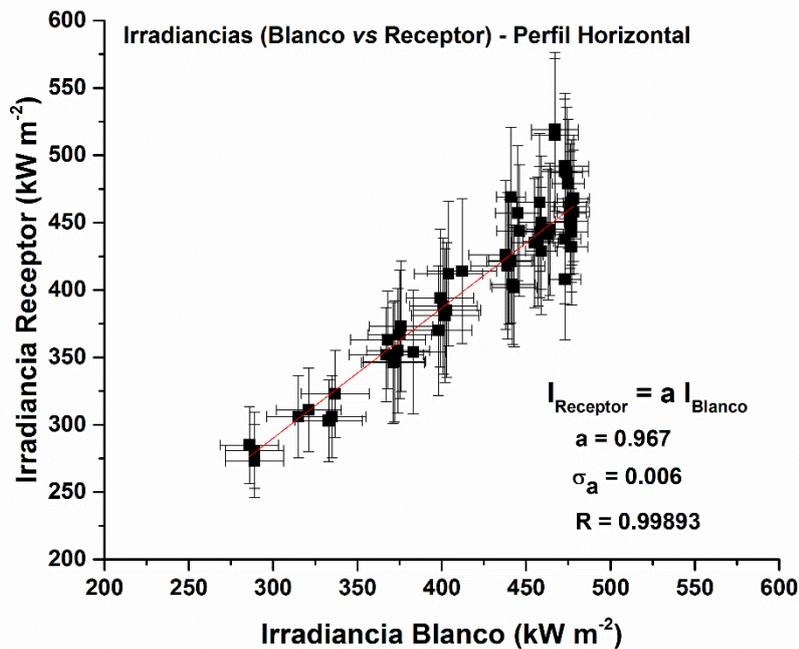


Figura 6.5.2.2.4. Perfil horizontal. Nivel 500 kW m⁻²

En este apartado se han analizado las medidas tomadas con el método propuesto en la tesis. Se ha estudiado la superficie del receptor volumétrico de carburo de silicio y sus características. Al estudiar las características de la superficie del receptor evaluado, se ha observado que era necesaria una corrección entre las diferentes copas al hacer la medida de irradiancia. Esta corrección ha permitido obtener las irradiancias y validar el método de medida sobre la superficie del receptor. Analizando las discrepancias del método de la barra móvil, ProHermes 2B, y el método de la tesis, se observa que la diferencia es menor del 5 %, llegando a obtener discrepancias de tan sólo 2 % midiendo en días diferentes al día en el que se efectuó la calibración. Estos resultados validan el método propuesto en la tesis.

6.6. MEDIDA DE LA POTENCIA

La potencia total que hay en el área escogida del receptor y del blanco lambertiano se obtiene tal como se explicó en el capítulo anterior, en el Apartado 5.7. El área escogida es el conjunto de las áreas de interés escogidas para las 15 copas centrales, representadas en la Figura 6.5.2.4. Las imágenes tratadas tienen aplicadas la calibración en intensidad y la calibración espacial. En primer lugar, se calcula el factor geométrico, siguiendo la Ecuación 5.7.1. A continuación se calcula mediante la Ecuación 5.7.2 la potencia y su error asociado con la Ecuación 5.7.6.

Capítulo 6. Medida de Irradiancia en un Receptor de Reducida Superficie (1 m²)

Las potencias obtenidas en la superficie del receptor, y en el blanco lambertiano, para los 3 niveles de irradiancia estudiados, se presentan en la Tabla 6.6.1:

Nivel de irradiancia (kW m ⁻²)	Superficie	Potencia (kW)	Diferencia	DNI (W m ⁻²)
600	Blanco lambertiano	104 ± 4 (±4.1 %)	0 %	925
	Receptor	104 ± 11 (±11.5 %)		929
450	Blanco lambertiano	78 ± 3 (±3.9%)	- 3.8 %	927
	Receptor	81 ± 9 (±11.1%)		929
500	Blanco lambertiano	81 ± 4 (±4.9%)	-2.5 %	921
	Receptor	83 ± 10 (±12.1%)		924

Tabla 6.6.1. Potencia en el receptor y en el blanco lambertiano para los niveles de 600, 450 y 500 kW m⁻². DNI en el momento de la toma de la imagen

Tal como se ha visto con las incertidumbres asociadas a las irradiancias que se obtienen para las medidas sobre la superficie del receptor, en el caso de la potencia, la incertidumbre sigue siendo mayor en el receptor que en el blanco lambertiano.

Las potencias obtenidas, teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas a la medida, comparando los resultados del blanco lambertiano y del receptor, son consistentes entre sí. Al comparar los perfiles de irradiancia de los apartados anteriores, y los resultados obtenidos para las potencias, tanto del Capítulo 5 [120], como de este capítulo, el método propuesto de medida de irradiancia de esta tesis ha sido corroborado y validado.

CONCLUSIONES

Las centrales termosolares de torre se han encontrado con una problemática que afecta a un gran número de centrales comerciales. Se trata de la falta de un sistema de medida de potencia solar incidente sobre el receptor. El conocimiento de esta variable afecta a los cálculos del rendimiento global de la planta. Es decir, en las centrales comerciales únicamente se hacen estimaciones del rendimiento, a partir de simulaciones, pero no se conoce el valor real de dicha variable.

Esto supone un problema ya que, al no conocer la eficiencia real de la planta, no es posible conocer la transformación real de radiación solar a electricidad. Esto afecta de múltiples maneras a las centrales, entre ellas en las estimaciones económicas, pudiendo ocasionar desviaciones en los beneficios esperados en las centrales.

La eficiencia global de una planta de torre depende de las eficiencias de cada uno de los componentes, como se pudo estudiar en la Ecuación 1.2.2. La eficiencia del receptor, según la Ecuación 1.2.3, depende directamente de la potencia total incidente sobre el receptor. Si la potencia total incidente sobre el receptor no se conoce, no es posible saber con exactitud ni la eficiencia del receptor, ni la eficiencia global de la planta.

Además, si la distribución de irradiancia sobre la superficie del receptor es conocida, puede ayudar a mejorar la seguridad de estas centrales. Actualmente sólo se llevan a cabo medidas de temperatura del receptor mediante cámara de infrarrojos, lo cual es insuficiente ya que hay un retardo entre la irradiancia (causa) y la temperatura (efecto). Al conocer la distribución de irradiancia, es posible encontrar con prontitud fallos en la estrategia de apunte del campo solar o errores en los heliostatos, que puedan provocar sobrecalentamientos que deriven en una mal función o averías en el receptor.

Por todas estas razones, es necesario realizar un estudio para resolver esta problemática, proponiendo una solución real y aplicable para medir la irradiancia incidente sobre los receptores en las centrales comerciales de torre.

Esta tesis ha propuesto una hipótesis a partir de la cual es posible medir la alta irradiancia solar sobre el receptor sin el uso de elementos auxiliares, que afecten al diseño y operación de la torre, tales como superficies lambertianas, fijas o móviles, así como los mecanismos que las accionan. El método propuesto únicamente necesita de un sistema de cámara digital junto con radiómetro. La cámara se sitúa en el campo de heliostatos, por lo que no perturba ni al diseño ni a la operación de la planta. Por otra parte, el radiómetro puede ser instalado en las inmediaciones del receptor, sin afectar al diseño del receptor ni a su estructura u operación.

Una vez propuesta la hipótesis, expuesta en el Apartado 5.2, se han realizado dos experimentos para validar el método. Los dos experimentos han consistido en un ensayo en el horno solar SF60 en la PSA, con un receptor de pequeño tamaño (25 cm de

diámetro), y un ensayo en la torre SSPS-CRS en la PSA, con un receptor de 1 m^2 de superficie. Se demostró previamente que las superficies de ambos receptores tenían un comportamiento lambertiano dentro de un rango angular amplio, propiedad necesaria para medir irradiancia correctamente.

Tal como se ha descrito en el Capítulo 5, se ha realizado un ensayo en el horno solar SF60. En el ensayo se midieron distribuciones de irradiancias comprendidas entre 150 y 900 kW m^{-2} . Para comparar los resultados del método propuesto en la tesis, se realizaron las mismas medidas con el método de referencia de blanco lambertiano, descrito en el Apartado 5.5.1. El horno solar dispone de una mesa de ensayos móvil, que permitía ir situando consecutivamente el receptor, el blanco lambertiano y el radiómetro en el foco. Cada vez que los tres elementos se situaban en el foco, la cámara digital tomaba imágenes de los mismos.

Las imágenes tomadas por la cámara son matrices en las que cada elemento corresponde con el nivel de gris o brillo que refleja la superficie a la que se está mirando. En esta tesis se pretende medir la irradiancia a partir de estas imágenes. Para ello, es necesario transformar las imágenes en unidades de niveles de gris a unidades de irradiancia (kW m^{-2}). La transformación se realiza mediante la calibración del sistema cámara-elemento, entendiendo elemento como la superficie que se está estudiando, en este caso el blanco lambertiano o el receptor. Por lo tanto, se realizaron dos calibraciones, una calibración para el sistema cámara-blanco, y otra para el sistema cámara-receptor.

Ambas calibraciones se han realizado relacionando la medida de irradiancia del radiómetro con el nivel de gris de las imágenes de la superficie. Para ello, se situaba el radiómetro en el foco y se registraba la medida de irradiancia. A continuación, se situaban el blanco lambertiano y el receptor sucesivamente en el foco y se tomaba una imagen de cada superficie. Relacionando el nivel de gris en el área que ocupaba el radiómetro al medir, con la medida de irradiancia del radiómetro, se obtenía la función de calibración. Las dos calibraciones que se han obtenido son las dadas en el Apartado 5.6, en la Figura 5.6.5. Una vez se han obtenido las calibraciones, se aplican a las imágenes, obteniendo las distribuciones de irradiancia sobre el blanco lambertiano y sobre el receptor. Los resultados de las dos distribuciones se han comparado, y se ha obtenido una discrepancia entre la medida de irradiancia sobre el blanco y el receptor de menos del 2 %. Los errores cometidos en estas medidas oscilan entre el $\pm 2.5 \%$ y $\pm 9.7 \%$ para el blanco lambertiano, y entre el $\pm 2.8 \%$ y $\pm 16.7 \%$ para el receptor. Por otro lado, se hizo un cálculo de la potencia escogiendo un área de interés del tamaño del receptor, obteniendo una discrepancia entre las medidas menor del 8 %. Estos resultados han validado el método propuesto.

Las discrepancias entre las medidas de irradiancia y de potencia obtenidas son debidas a diversos factores. El principal factor es debido a las diferencias entre las reflectancias del blanco lambertiano, que está pintado con Amercoat, con un 80 % de

reflectancia en el rango de longitudes de onda que trabaja la cámara, y la pintura del receptor, Pyromark 2500, con una reflectancia del 4 % en este mismo rango. Por otra parte, al tener el blanco lambertiano una mayor reflectancia y fijando un adecuado tiempo de exposición para cada una de las superficies, se ha obtenido una mayor relación señal-ruido en las imágenes del blanco en comparación con las del receptor, aumentando considerablemente el error en la medida del receptor. Estos errores también se podrían haber reducido reduciendo el área de interés escogida del radiómetro, ya que como se vio en el Apartado 3.3, la parte del radiómetro encargada de realizar la medida es la lámina delgada y circular de constantán, que ocupa una parte pequeña de la cara frontal del radiómetro. Se ha observado que a mayores irradiancias, las incertidumbres son menores, debido a estos factores mencionados.

La medida de irradiancia en superficies pequeñas no constituye en sí un problema, ya que como se ha visto en el Capítulo 4, existen diversos sistemas de medida de irradiancia para receptores prototipo de reducido tamaño. Para el caso del ensayo en el horno solar, además del tamaño reducido del receptor, sí es posible la medida de irradiancia gracias a la posibilidad de exponer el radiómetro y el receptor a una misma cantidad de irradiancia gracias a la infraestructura de la instalación. Tanto el tamaño del receptor como la posibilidad de no intercambiar la posición de los elementos y someterlos a la misma irradiancia son las mayores dificultades que enfrenta esta medida. La complicación al medir en superficies extensas aumenta al aumentar la superficie sobre la que se pretende medir irradiancia. Estos son los problemas que se han encontrado en las grandes centrales de torre comerciales. Con el fin de tratar de resolver este problema, en esta tesis se ha realizado un escalado, utilizando el nuevo método de medida sobre un receptor de mayor tamaño.

El segundo ensayo que se ha realizado para esta tesis se ha desarrollado en la instalación de torre SSPS-CRS de la PSA, en el marco del proyecto internacional Capture. Tal como se ha descrito en el Apartado 6.2, se ha ensayado un prototipo de receptor volumétrico de carburo de silicio, de 1 m^2 de superficie. Al igual que en el ensayo en el horno SF60, en este ensayo también se han comparado los resultados obtenidos mediante el método de la tesis con los resultados con el método del blanco lambertiano. En el caso de la instalación SSPS-CRS, se disponía de una barra móvil lambertiana, descrita en el Apartado 6.4.1. Los dos sistemas de medida de referencia, el blanco lambertiano del horno y la barra móvil del SSPS-CRS, están basados en el método de blanco lambertiano explicado en detalle en el Apartado 4.2.1. Este método ha sido ampliamente validado, como se ha explicado en este apartado.

Los ensayos efectuados durante el proyecto Capture, en los que se validó el método propuesto para medir irradiancia directamente sobre la superficie del receptor, se realizaron en junio de 2020. Estos ensayos estaban programados para fechas anteriores, pero debido a la pandemia del Covid-19, se tuvieron que retrasar unos meses, reanudando los ensayos en junio de 2020.

El método de medida de irradiancia propuesto en esta tesis parte de la base de la necesidad de homogeneidad en la superficie del receptor. Además, es necesario que la superficie se comporte como una superficie lambertiana dentro del ángulo de apertura del campo de heliostatos. Sin embargo, al estudiar la homogeneidad del receptor volumétrico de carburo de silicio, se detectó una dispersión entre las copas que lo forman del 5.3 %. Debido a esta falta de homogeneidad entre las 35 copas del receptor, ha sido necesario efectuar un estudio de su comportamiento bajo diferentes niveles de radiación solar concentrada incidente, comentado en el Apartado 6.5.1. Este estudio ha puesto de manifiesto las diferencias entre las propiedades radiativas de cada copa (Figura 6.5.1.2), y ha cuantificado dicha diferencia, obligando a añadir un Factor de Corrección (FC) entre las copas en la medida de irradiancia. Este FC ha permitido resolver las diferencias entre las propiedades radiativas de cada copa y solventar esa falta de homogeneidad entre ellas.

Una vez obtenido el FC entre las copas, dado en la Tabla 6.5.1.1, se ha procedido a la calibración de los sistemas cámara-blanco y cámara-receptor. El receptor se ha calibrado respecto a la copa 34, y a continuación se ha aplicado el FC sobre cada una de las copas, permitiendo obtener los mapas de las distribuciones de irradiancias sobre el receptor. Estos resultados se han comparado con los resultados obtenidos mediante el sistema de referencia de la barra móvil, obteniendo una discrepancia menor al 5 % entre las distribuciones. Además, se ha obtenido la potencia incidente sobre las 15 copas centrales del receptor, con ambos métodos, obteniendo una discrepancia entre las potencias menores del 3.8 %. Estas discrepancias tan bajas entre el nuevo método propuesto en esta tesis y el método de referencia, junto con los datos obtenidos del ensayo en el horno solar, validan el nuevo método ampliamente.

Las incertidumbres con las que se han obtenido las medidas para el receptor volumétrico de carburo de silicio están comprendidas entre $\pm 8\%$ y $\pm 16\%$, para el rango de irradiancias de 30 a 700 kW m⁻². Para el sistema de referencia de la barra móvil, las incertidumbres están comprendidas entre $\pm 2\%$ y $\pm 8\%$. Al observar las incertidumbres se observa que cuanto mayor sea la relación señal-ruido, menor será la incertidumbre. Al introducir un FC para cada copa, éste provoca un aumento en la incertidumbre de la medida. Por otra parte, en el ensayo del Capture se ha tenido en cuenta lo aprendido en el ensayo del horno, consiguiendo perfeccionar y refinar el método de medida y su cálculo de incertidumbres. Por ello, se ha escogido un área de interés del radiómetro, ajustada a la lámina circular de constantán del centro de la parte frontal del radiómetro, reduciendo así la dispersión, y reduciendo por tanto la incertidumbre en la medida.

A partir de dos ensayos realizados en instalaciones diferentes de la PSA, con dos tipos diferentes de receptores, y efectuando un escalado en el tamaño de los receptores, se ha conseguido validar el nuevo método de medida de irradiancia sobre la superficie de receptores, poniendo de manifiesto el potencial para su uso en las centrales de torre comerciales. Además, se ha comprobado que es válido para cualquier superficie lambertiana, tanto para casos más desfavorables en los que pueda haber falta de

homogeneidad, como se ha visto en el Capítulo 6 con las copas del receptor del Capture, como para casos más favorables en los que la superficie sea homogénea, como puede ser el receptor fabricado para el ensayo del horno o un receptor de tubos.

Un valor añadido de esta investigación es que, al utilizar la superficie del receptor, permite observar o registrar cambios en ella, caracterizando la superficie, evitando y previniendo fallos en la seguridad y en el mantenimiento del receptor. Con ello, se pueden evitar fallos o roturas en el receptor, que supondrían períodos de paro de la central, que conllevan a pérdidas económicas. Para prevenir estos posibles fallos, sólo es necesario tomar una imagen del receptor, en condiciones de radiación solar difusa, con la que es posible caracterizar su superficie. Este método puede realizarse todos los días como medida de prevención y mantenimiento del receptor.

FUTUROS TRABAJOS

Como consecuencia del estudio y la investigación expuestos en esta tesis, se pueden plantear diferentes líneas de investigación a seguir a partir de ella.

- 1) En esta tesis se ha probado la viabilidad de un nuevo método de medida de irradiancia proveniente de un campo solar de torre sobre la superficie de un receptor volumétrico de carburo de silicio. Aunque se ha validado el método al medir irradiancia sobre el receptor comentado, mediante la relación entre los niveles de gris detectados con un dispositivo de visión sobre un radiómetro y un área concreta de la superficie del receptor, se ha constatado también que dicha relación exige que las superficies de ambos elementos (radiómetro y área del receptor) estén irradiados por una misma irradiancia, que es la magnitud física de referencia detectada y medida por el radiómetro. Esta exigencia experimental garantiza que pueda establecerse una correlación matemática fiable entre los niveles de gris mencionados. Una vez establecida la correlación, se puede medir sobre la totalidad de la superficie calibrada del receptor sin la intervención del radiómetro. Esta metodología presenta, en determinados entornos de trabajo, serias dificultades, como en el caso de las centrales de torre. En ellas, las restricciones de seguridad propias del entorno de trabajo, las dimensiones del receptor, así como la distribución no homogénea de irradiancia proveniente del campo solar, impiden la detección de una irradiancia, equivalente a la del radiómetro, sobre la superficie del receptor sin la intervención de superficies auxiliares lambertianas (fijas o móviles).

Para solucionar estos inconvenientes se propone como nueva línea de investigación de futuros trabajos, el añadir al método de medida propuesto en esta tesis un nuevo dispositivo denominado “Unidad de Calibración de la Superficie del Receptor (UCSR)”. Dicho dispositivo tiene por objeto alcanzar la mencionada calibración de la superficie del receptor, pero desde una ubicación compatible con el funcionamiento seguro de la planta y prescindiendo de la intervención de superficies auxiliares. Este nuevo dispositivo consiste en una pieza o probeta del receptor con un radiómetro instalado en su centro. Su finalidad es la de garantizar la exigencia experimental de la detección de un nivel de irradiancia equivalente a la del radiómetro sobre la superficie del receptor, representada en este caso por la probeta. A continuación, es posible proceder a la correlación de niveles de grises entre ambos, lo que directamente se logra gracias a su proximidad y posiciones relativas, de modo que la superficie de la probeta queda así calibrada con plenas garantías. La ubicación de la UCSR en la torre no es relevante, siempre que los niveles de irradiancia que reciba sean significativos. Estos niveles de irradiancia pueden conseguirse con radiación concentrada marginal, como la provocada por el desbordamiento o spillage. Además, los resultados de la calibración de la probeta del receptor son directamente extrapolables a la totalidad de la superficie de éste, siempre que la naturaleza de la radiación incidente y los materiales irradiados por ésta sean idénticos, que es el caso. Finalmente, como el dispositivo de visión o cámara digital encargado de la detección de los niveles de gris de la UCSR y superficie del receptor es el mismo, los posibles cambios superficiales entre la probeta y el receptor, derivados de la distinta agresión de la irradiancia, envejecimiento, etc. serán inmediatamente detectados y corregidos, garantizando así la correcta medida sobre el receptor a lo largo de su vida.

Un prototipo de la UCSR se ha construido en la PSA, sobre una copa del receptor del proyecto Nexttower, a la cual se le ha realizado una perforación en su centro con una Water-Jet Machine (corte por chorro de agua), para la instalación de un radiómetro Vatell de 1 pulgada de diámetro. El dispositivo se ha instalado ya en la torre CESA-I, en el escudo del receptor. Los ensayos correspondientes a este proyecto comenzarán en los próximos meses, durante los cuales se realizarán ensayos con la UCSR.

- 2) La segunda línea que se plantea es la posibilidad de ensayar la Unidad de Calibración con una pieza de un receptor de tubos. Este ensayo se podría realizar también en una central comercial, para comprobar sus resultados. De hecho, en esta tesis estaba planificada una estancia de 4 meses en el centro de investigación CSIRO, en Australia, en la que estaba planificado realizar un ensayo con un receptor de tubos a pequeña escala. Esta estancia tuvo que ser cancelada debido a las restricciones por la pandemia del Covid-19. Se espera que en futuras investigaciones se puedan realizar este tipo de ensayos.
- 3) Por último, es posible seguir con el estudio del nuevo método en la medida de irradiancia con dos propósitos: medir irradiancias y comprobar la efectividad del método en la seguridad y prevención de posibles fallos en el receptor. Como se ha

comentado, es posible comparar con simples imágenes con radiación solar difusa el estado del receptor, localizando puntos en los que las propiedades del receptor se hayan visto modificadas. Este propósito sería muy útil ya que ayudaría a mejorar la seguridad de la planta, a la vez que proporcionaría la medida de la potencia incidente sobre el receptor.

“Tenemos que creer en nosotros mismos o nadie más lo hará, debemos culminar nuestras aspiraciones con competencia, valentía y determinación”

Rosalyn Yallow (1921-2011)

(Premio Nobel Medicina)

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IPCC, *Calentamiento global de 1.5°C. Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global*. 2018.
- [2] “Venus’ Atmosphere: Composition, Climate and Weather | Space.” <https://www.space.com/18527-venus-atmosphere.html>.
- [3] NASA, “Overview | Venus – NASA Solar System Exploration.” <https://solarsystem.nasa.gov/planets/venus/overview/>.
- [4] “PROYECTO DE LEY DE CAMBIO CLIMÁTICO Y TRANSICIÓN ENERGÉTICA EXPOSICIÓN,” 2020.
- [5] “IEA, Global electricity generation mix, 2010-2020, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electricity-generation-mix-2010-2020>.” .
- [6] “IEA, Electricity mix in the European Union, January-September 2020, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electricity-mix-in-the-european-union-january-september-2020>.” .
- [7] “IEA, Global energy-related CO2 emissions, 1990-2020, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-related-co2-emissions-1990-2020>.” .
- [8] Red Eléctrica de España, “Balance eléctrico nacional 2019.” https://www.ree.es/es/datos/balance/balance-electrico?start_date=2019-01-01T00:00&end_date=2019-12-31T23:59&time_trunc=year&systemElectric=nacional.
- [9] Red Eléctrica de España, “Balance eléctrico nacional mensual.” https://www.ree.es/es/datos/balance/balance-electrico?start_date=2020-01-01T00:00&end_date=2021-05-31T23:59&time_trunc=month&systemElectric=nacional.
- [10] N. Unidas, *Acuerdo de París*. 2015.
- [11] BOE, “Boletín Oficial del Estado. Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética.” *Boletín Of. del Estado*, pp. 26798–26800, 2021.
- [12] M. Blanco and L. Ramirez, *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*. Woodhead Publishing, 2017.
- [13] “Solar Energy | Energy Matters.” <https://narasimhancs.wordpress.com/category/solar-energy/>.
- [14] A. L. Avila-Marin, “Análisis termofluidodinámico de absorbedores volumétricos de porosidad gradual con mallas metálicas: Estudio experimental a escala de laboratorio y desarrollo de un modelo de no equilibrio térmico local,” 2016.
- [15] “Mapas de recursos solares y datos GIS para más de 180 países | Solargis.”

<https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/world>.

- [16] J. Fernández-Reche, “Contribuciones a la Caracterización Óptica de Heliostatos y Campos de Heliostatos para Sistemas de Receptor Central,” Universidad de Almería, 2020.
- [17] *Romero Álvarez, M., Zarza Moya, E. y Blanco Muriel, M. Centrales Electricas Termosolares. En Tecnologías Energéticas e Impacto Ambiental (editado por CIEMAT), capítulo 14, páginas 259-282. McGraw Hill Profesional, Madrid (2001). ISBN 84-481-3360-9. .*
- [18] Ciemat Unidad de Formacion en Energia y Medioambiente, *Curso sobre Sistemas Solares Termicos de Concentracion*. 2007.
- [19] Keith Lovegrove and Wes Stein, Eds., *Concentrating solar power technology*. Woodhead Publishing, 2012.
- [20] G. España, SOLARPACES, and ESTELA, “Energía Solar Térmica de Concentración,” 2009.
- [21] “Cortesía de la Plataforma Solar de Almería.” .
- [22] R. Osuna *et al.*, “PS10, Construction of a 11MW solar thermal tower plant in Seville, Spain,” *Solar-PACES Conf. Seville, Spain, June*, no. January 2006, pp. 20–23, 2006.
- [23] SENER, “Planta solar térmica Gemasolar,” 2017.
- [24] S. Relloso and E. García, “Tower Technology Cost Reduction Approach after Gemasolar Experience,” *Energy Procedia*, vol. 69, pp. 1660–1666, 2015.
- [25] A. L. Ávila-Marín, “Volumetric receivers in Solar Thermal Power Plants with Central Receiver System technology: A review,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 891–910, 2011.
- [26] Ministerio de Energia de Chile and D. Z. für L. R. (DLR), “Sistema de torre solar,” 2014.
- [27] T. Tan and Y. Chen, “Review of study on solid particle solar receivers,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 265–276, 2010.
- [28] “Actividades de I+D+i - ICTS.”
<https://www.ciemat.es/portal.do?TR=C&IDR=143>.
- [29] “Plataforma Solar de Almería.” <http://www.psa.es/es/index.php>.
- [30] Plataforma Solar de Almería-CIEMAT, “Annual Report 2020. Plataforma Solar de Almería,” Almería, Spain, 2020.
- [31] J. Duffie and W. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, 2nd Editio. Wiley-Interscience Publication, 1980.
- [32] Francis LeBlanc, *An introduction to Stellar Astrophysics*. John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2010.

- [33] Y. Goswami, *Principles of Solar Engineering*, 3rd Editio. CRC Press, 2015.
- [34] “ENERGÍA SOLAR TÉRMICA (PARA PRINCIPIANTES): Radiación solar.” <http://enersolartermica.blogspot.com/2013/02/radiacion-solar.html>.
- [35] C. A. Gueymard, “A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations,” *Sol. Energy*, vol. 168, pp. 2–9, Jul. 2018.
- [36] C. G. Abbot and F. E. Fowle, “The value of the Solar Constant of Radiation,” *Astrophys. J.*, vol. 16, pp. 11–12, 1911.
- [37] ASTM, “Standard specifications for solar constant and air mass zero solar spectral irradiance. Standard E490-73a,” 1974.
- [38] NREL, “2000 ASTM Standard Extraterrestrial Spectrum Reference E-490-00 | Grid Modernization | NREL.” <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-astm-e490.html>.
- [39] I. International Organization for Standarization, “Space environment (natural and artificial) - Earth upper atmosphere. ISO 14222 standard,” 2013.
- [40] “NASA/Marshall Solar Physics.” <https://solarscience.msfc.nasa.gov/feature1.shtml>.
- [41] A. J. P. Aparicio, M. C. Gallego, M. Antón, and J. M. Vaquero, “Relationship between solar activity and direct solar irradiance in Madrid (1910–1929),” *Atmos. Res.*, vol. 235, no. March 2019, p. 104766, 2020.
- [42] R. Siegel and J. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer*, Third Edit. Hemisphere Publishing Corporation, 1992.
- [43] F. P. Incropera and D. P. Dewitt, *Fundamentos de transferencia de calor*, Cuarta Edi. Pearson Educación, 1999.
- [44] M. Romero Tous, *Energia Solar Térmica*. Ediciones CEAC, 2009.
- [45] Jose A. Sobrino, *Teledetección*. Universidad de Valencia, 2000.
- [46] NREL, “SMARTS (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine).” <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/smarts.html>.
- [47] Christian A Gueymard, “Interdisciplinary applications of a versatile spectral solar irradiance model : A review,” vol. 30, pp. 1551–1576, 2005.
- [48] C. Gueymard, “SMARTS code (version 2.9.5). User’s manual,” p. 50, 2006.
- [49] J. Ballestrín *et al.*, “Solar extinction measurement system based on digital cameras. Application to solar tower plants,” *Renew. Energy*, vol. 125, pp. 648–654, 2018.
- [50] F. J. Batlles, F. J. Barbero, and G. López, *Radiación solar y aspectos climatológicos de Almería 1990-1996*. Universidad de Almería, 1998.

- [51] W. Ross McCluney, *Introduction to radiometry and photometry*. 1994.
- [52] J. Webster, *The Measurement, Instrumentation and sensors Handbook*. IEEE Press, 1999.
- [53] J. Ballestrín, “Response Estimates on the volumetric Refos receiver, REFOS-T01-IN-C02,” Almería, Spain, 1999.
- [54] J. Ballestrín, “Medida de Flujo y Temperatura en Plantas de Receptor Central, HELITOSAL-SC-CS-01,” Almería, Spain, 2010.
- [55] 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.
- [56] J. Ballestrín, C. A. Estrada, M. Rodríguez-Alonso, C. Pérez-Rábago, L. W. Langley, and A. Barnes, “Heat flux sensors: Calorimeters or radiometers?,” *Sol. Energy*, vol. 80, no. 10, pp. 1314–1320, 2006.
- [57] K. Krueger, “Design and Characterization of a Concentrating Solar Simulator,” University of Minnesota, Tesis doctoral, 2012.
- [58] A. Gallo, “Análisis de la tecnología de horno rotativo para el tratamiento de material granular con radiación solar concentrada,” Universidad de Almería, Tesis doctoral, 2019.
- [59] R. Gardon, “An instrument for the direct measurement of intense thermal radiation,” *Rev. Sci. Instrum.*, 1952.
- [60] J. Ballestrín and M. Rodríguez-Alonso, “Proyecto MEPSOCON : Calibración de Radiómetros de Alta Irradiancia Solar,” Almería, Spain, 2006.
- [61] J. Ballestrín, C. A. Estrada, M. Rodríguez-Alonso, C. Pérez-Rábago, L. W. Langley, and A. Barnes, “High-heat-flux sensor calibration using calorimetry,” *Metrologia*, vol. 41, no. 4, pp. 314–318, 2004.
- [62] J. Ballestrín, S. Ulmer, A. Morales, A. Barnes, L. W. Langley, and M. Rodríguez, “Systematic error in the measurement of very high solar irradiance,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 80, no. 3, pp. 375–381, 2003.
- [63] 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.
- [64] J. Ballestrín *et al.*, “Calibration of high-heat-flux sensors in a solar furnace,” *Metrologia*, vol. 43, no. 6, pp. 495–500, 2006.
- [65] E. Schmidt, “Device for the measurement of heat,” Patent Number 1528383, 1925.
- [66] S. Hevey and L. Langley, “United States Patent : Schmid-Boelter gage. Vatel Corporation,” Patent Number: 6186661, 2001.
- [67] P. B. Tarigan, “SBG01 Water cooled heat flux sensor according to Schmidt-

- Boelter,” *Journal of Chemical Information and Modeling*, vol. 53, no. 9. pp. 1689–1699, 2013.
- [68] E. A. Sullivan and A. G. McDonald, “Mathematical model and sensor development for measuring energy transfer from wildland fires Mathematical model and sensor development for measuring energy transfer from wildland fires,” no. January 2014, 2015.
- [69] V. Corporation, S. H. Flux, O. Principles, T. Schmidt-boelter, T. Measurements, and A. Vatell, “Use of the Vatell Schmidt-Boelter Heat Flux Sensor.”
- [70] W. Reix, “Heat flux meter calibration. Technical notes,” 2005.
- [71] C. T. Kidd, “Determination of the uncertainty of experimental heat flux calibrations,” 1983.
- [72] Hukseflux Thermal Sensors, “Hukseflux Thermal Sensors USER MANUAL SBG01,” 2016.
- [73] J.M.Kendall, “Primary Absolute Cavity Radiometer,” 1969.
- [74] J. M. Kendall, “Radiometer for Accurate ($\pm 1\%$) Measurement of Solar Irradiances Equal to 10,000 Solar Constants,” 1981.
- [75] 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.
- [76] J. Ballestrín, “Direct heat-flux measurement system (MDF) for solar central receiver evaluation,” Almería, Spain, 2001.
- [77] R. M. Davis, G. J. Antoine, T. E. Diller, and A. L. Wicks, “Measurement Of Surface Heat Flux And Temperature,” no. March 1994, pp. 203–218, 1994.
- [78] J. Terrell and J. Hager, “Heat flux microsensor measurements and calibrations,” Blacksburg, Vatell Corporation.
- [79] J. M. Hager, S. Simmons, D. Smith, S. Onishi, L. W. Langley, and T. E. Diller, “Experimental performance of a heat flux microsensor,” *Proc. ASME Turbo Expo*, vol. 4, 1990.
- [80] V. Corporation, “Use of the Vatell Heat Flux Microsensor. Hfm-6, hfm-7, & hfm-8 Operator’s manual,” no. 540, pp. 1–18, 2015.
- [81] “Improving heat fluxmeter calibration for fire testing laboratories (HFCAL)–Final report,” 2002.
- [82] U. Groer and A. Neumann, “Development and test of a high flux calorimeter at DLR Cologne,” *J. Phys. IV JP*, vol. 9, no. 3, 1999.
- [83] A. Ferriere, J.-F. Robert, J. Kaluza, and A. Neumann, “Concentrated solar flux measurements: Results of the second solarpaces fluxmeter intercomparison campaign,” pp. 3–8.
- [84] “First Report from the FORUM Heat Flux Measurement Working Group,” 2002.

- [85] A. Neumann, C. Willsch, J. Ballestrin, and E. Guillot, “Intercomp 2006 SolLab Radiometer Intercomparison Campaign 2006,” 2006.
- [86] “SFERA III - Solar Facilities for the European Research Area.” <https://sfera3.sollab.eu/>.
- [87] M. M. Elsayed, K. A. Fathalah, and O. M. Al-Rabghi, “Measurements of solar flux density distribution on a plane receiver due to a flat heliostat,” *Sol. Energy*, vol. 54, no. 6, pp. 403–411, 1995.
- [88] A. Ferriere, G. P. Rodriguez, and J. A. Sobrino, “Flux Distribution Delivered by a Fresnel Lens Used for Concentrating Solar Energy,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 126, no. 1, p. 654, 2004.
- [89] A. Ferriere and B. Rivoire, “An instrument for measuring concentrated solar-radiation: A photo-sensor interfaced with an integrating sphere,” *Sol. Energy*, vol. 72, no. 3, pp. 187–193, 2002.
- [90] J. Ballestrin, “A non-water-cooled heat flux measurement system under concentrated solar radiation conditions,” *Sol. Energy*, vol. 73, no. 3, pp. 159–168, 2002.
- [91] J. Ballestrin and R. Monterreal, “Hybrid heat flux measurement system for solar central receiver evaluation,” *Energy*, vol. 29, no. 5–6, pp. 915–924, 2004.
- [92] S. Ulmer, W. Reinalter, P. Heller, E. Lüpfer, and D. Martínez, “Beam Characterization and Improvement with a Flux Mapping System for Dish Concentrators,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 124, no. 2, p. 182, 2002.
- [93] C. K. Ho and S. S. Khalsa, “A Photographic Flux Mapping Method for Concentrating Solar Collectors and Receivers,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 134, no. 4, p. 041004, 2012.
- [94] M. M. Mokhtar, S. A. Meyers, I. Rubalcaba, M. Chiesa, and P. R. Armstrong, “A model for improved solar irradiation measurement at low flux,” *Sol. Energy*, vol. 86, no. 3, pp. 837–844, 2012.
- [95] V. Pozzobon and S. Salvador, “High heat flux mapping using infrared images processed by inverse methods: An application to solar concentrating systems,” *Sol. Energy*, vol. 117, pp. 29–35, 2015.
- [96] M. Offergeld, M. Röger, H. Stadler, P. Gorzalka, and B. Hoffschmidt, “Flux density measurement for industrial-scale solar power towers using the reflection off the absorber,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2126, no. July, 2019.
- [97] M. Ebert, D. Benitez, M. Röger, R. Korzynietz, and J. A. Brioso, “Efficiency determination of tubular solar receivers in central receiver systems,” *Sol. Energy*, vol. 139, pp. 179–189, 2016.
- [98] R. Monterreal and A. Neumann, “Advanced Flux Measurement System for Solar Tower Plants,” in *Proceeding of the 7th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies*.

- [99] “Monterreal, R: Comunicación personal, 2021.” .
- [100] P. Garcia, A. Ferriere, and J. J. Bezian, “Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system applications: A comparative review,” *Sol. Energy*, vol. 82, no. 3, pp. 189–197, 2008.
- [101] N. C. Cruz, J. L. Redondo, M. Berenguel, J. D. Álvarez, and P. M. Ortigosa, “Review of software for optical analyzing and optimizing heliostat fields,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, no. May 2016, pp. 1001–1018, 2017.
- [102] C. K. Ho, “Software and Codes for Analysis of Concentrating Solar Power Technologies,” 2008.
- [103] “Cerro Dominador. Concentrated Solar Power.” <https://cerrodominador.com/>.
- [104] “Fernández V, Silva M, Romero M. WinDelsol 1.0. In: Proceedings of the 15th Task III meeting within IEA SolarPACES on solar technology and applications, vol. 19. Cologne, Germany; 2001.”
- [105] R. Monterreal, “Software developments for system analysis and optimization,” in *Proc. of the IEA SolarPACES task III Workshop on Simulation of Solar Thermal Power Systems*, 2000.
- [106] R. Monterreal, “New computer code for solar concentrating optics simulation,” *J. Phys. IV JP*, vol. 9, no. 3, pp. Pr3-77, Mar. 1999.
- [107] M. A. Blanco MJ, Amieva JM, “The an open source approach to the simulation of solar concentrating systems,,” in *Proc. IMEC2005, Orlando, FL, USA*, 2005, pp. 157–64.
- [108] M. V. Blanco MJ, Mutuberria A, Garcia P, Gastesi R, “Preliminary validation of Tonatiuh,” in *Proceedings of the 15th SolarPACES Conference*, 2009.
- [109] M. D. Blanco MJ, Mutuberria A, “Experimental validation of Tonatiuh using the Plataforma Solar de Almería secondary concentrator test campaign data,,” in *Proceedings of the 16th SolarPACES Conference*, 2010.
- [110] ANSYS, “Ansys Fluent. Fluid Simulation Software.” <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>.
- [111] A. Mansouri, F. S. Marzani, and P. Gouton, “Development of a Protocol for CCD Calibration: Application to a Multispectral Imaging System,” *Int. J. Robot. Autom.*, vol. 20, no. 2, 2005.
- [112] J. Kelcey and A. Lucieer, “Sensor correction of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing,” *Remote Sens.*, vol. 4, no. 5, pp. 1462–1493, 2012.
- [113] J. Ballestrín *et al.*, “Diagnosis of a Lambertian target in solar context,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 119, no. February, pp. 265–269, 2018.
- [114] Tempil, “Pyromark 2500 Flat Black Testing (1074° F). Tempil,” no. 908, p. 9273.

- [115] C. K. Ho, A. R. Mahoney, A. Ambrosini, M. Bencomo, A. Hall, and T. N. Lambert, “Characterization of Pyromark 2500 for High-Temperature Solar Receivers,” *ASME 2012 6th Int. Conf. Energy Sustain. Parts A B*, vol. 136, no. February 2014, p. 509, 2012.
- [116] A. Fernández-García *et al.*, “Parameters and method to evaluate the reflectance properties of reflector materials for concentrating solar power technology, SolarPACES Official Reflectance Guideline Version 3.0,” no. March, 2018.
- [117] R. Monterreal, “Calibration and Analysis of Heliostats,” in *Sfera summer school*, 2013.
- [118] J. Fernández-Reche *et al.*, “PSA Solar furnace: A facility for testing PV cells under concentrated solar radiation,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, no. 15, pp. 2480–2488, 2006.
- [119] J. Kaluza and A. Neumann, “Measurement of Solar Radiation with CCD-Cameras: Influence of the Spectral Characteristic,” in *Proceedings of the International Solar Energy Conference. Solar Engineering 1998*, 1998, pp. 425–428.
- [120] J. Ballestrín *et al.*, “Simplifying the measurement of high solar irradiance on receivers. Application to solar tower plants,” *Renew. Energy*, vol. 138, pp. 551–561, 2019.
- [121] S. N. Goodman, D. Fanelli, J. P. A. Ioannidis, and J. P. A. Ioannidis, “What does research reproducibility mean?,” *Sci. Transl. Med.*, vol. 8, no. 341, p. 341ps12, 2016.
- [122] P. Patil, J. Leek, P. Patil, and R. D. Peng, “A statistical definition for reproducibility and replicability,” *bioRxiv*, p. 066803, 2016.
- [123] Hamamatsu Photonics France, “Linearity comparison Response,” 2019.
- [124] M. Mesanovic and N. Philippsen, “Capture Project- Competitive Solar Power Towers.”
- [125] Plataforma Solar de Almería, “Annual Report 2019 - Plataforma Solar de Almería,” 2019.

ANEXOS

ANEXO A

FICHAS DE CALIBRACIÓN DE LOS RADIÓMETROS

Las hojas de calibración proporcionadas por la empresa Vatell de los radiómetros Gardon se adjuntan en este anexo.



Certificate of Calibration

Customer:	DISC Corporation
Model Number:	TG1000-1
Serial Number:	9881
Date Calibrated:	06-04-2013
Recalibration Due Date:	06-04-2014

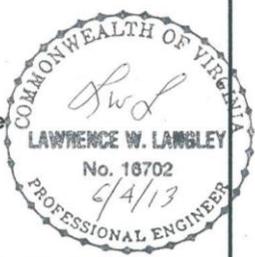
Thermogage Circular Foil Heat Flux Transducer

Sensor Scale Factor*:	64.70 W / cm ² / mV
Sensor Sensitivity*:	0.015 mV / W / cm ²
Sensor Range:	0 - 647 W / cm ²
Sensor Coating:	Colloidal Graphite
Emissivity:	0.82
Resistance:	1 ohms
Ambient Temperature:	23°C
Humidity:	45%
Reference Pyrometer:	MI60 #5972; Cert. 4-28-12

*Scale factor and sensitivity are for incident radiant heat flux. The sensitivity is the reciprocal of the scale factor; both are provided here for convenience.

These calibrations were performed using instruments whose accuracy is traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST) and following procedure MAP002 as set in the Vatell Quality Assurance Manual.

Calibrated By: 



E-MAIL: nki@vatell.com HOME PAGE: <http://www.vatell.com> FAX: (540) 933-3010 PHONE: (540) 961-3576
PO BOX 66, CHRISTIANSBURG, VA 24068 • 240 JENNIE LE ROAD, CHRISTIANSBURG, VA 24073

Figura 1. Certificado de Calibración Radiómetro empleado en el ensayo en el horno SF60. Número de serie #9881

Certificate of Calibration

Customer:	Amelec S.L.
Model Number:	1000-1
Serial Number:	7481
Date Calibrated:	10-22-2002
Recalibration Due Date:	10-22-2003

Thermogage Circular Foil Heat Flux Transducer

Sensor Scale Factor*:	12.485 W / cm ² / mV
Sensor Sensitivity*:	0.080 mV / W / cm ²
Calibrated Heat Flux Level:	0 - 187 W / cm ²
Sensor Coating:	Zynolyte

* Scale factor and sensitivity are for incident heat flux based on an emissivity of 0.94 at 2 microns. The scale factor is the reciprocal of the sensitivity; both are provided here for convenience.

These calibrations were performed using instruments whose accuracy is traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST) and following procedures set in the Vatec Quality Assurance Manual.

Calibrated by:



Figura 2. Certificado de Calibración Radiómetro empleado en el proyecto Capture. Número de serie #7481

*“Por encima de todo, no temas los momentos
difíciles. De ellos sale lo mejor”*

Rita Levi-Montalcini (1909-2012)

(Premio Nobel Medicina)

