

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Análisis preliminar del Receptor Volumétrico de Vidrio



Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

Javier Martínez Lezaun
Tutor UPNA: Álvaro Martínez Echeverri
Tutor CENER: Iñigo Pagola Barrio
Pamplona, Junio de 2015





CENER

ADitech

CENTRO NACIONAL DE
ENERGÍAS RENOVABLES

FUNDACIÓN CENER-CIEMAT

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa





AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a mis tutores, Álvaro Martínez e Iñigo Pagola, el tiempo dedicado en la ayuda de este proyecto. De la misma forma, agradezco las facilidades aportadas por CENER y su personal para la consecución del mismo.

RESUMEN

El receptor volumétrico de vidrio es un sistema innovador de receptor volumétrico promovido por CENER. La característica diferenciadora del receptor es que posee una serie de tubos de vidrio que reflejan parte de la radiación solar hacia el interior del receptor. Además, está recubierto con una carcasa y contiene un cuerpo poroso detrás de los tubos como cuerpo negro.

El objetivo es obtener un nuevo tipo de receptor para la central de torre. Con estos tubos de vidrio, se pretende conseguir un receptor con menores pérdidas térmicas y con mejor distribución de temperaturas dentro del receptor.

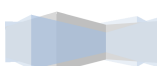
En este trabajo, se ha comprobado que el receptor volumétrico de vidrio tiene un mejor comportamiento térmico que los receptores volumétricos convencionales: las pérdidas térmicas son menores y la temperatura del fluido caloportador aumenta conforme se acerca a la salida del receptor, puesto que, éste alcanza mayores temperaturas en su interior.

ABSTRACT

The glass volumetric receiver is an innovative system of the volumetric receiver developed by CENER. The main distinguishing characteristic is that it has a set of glass tubes, which reflect part of the solar radiation into the receiver. In addition, it is covered with a case and contains a porous body behind the tubes that works as black body.

The objective is to obtain a new receiver type for the central receiver system. The aim of these glass tubes is to get a receiver with lower heat losses and with better temperatures distribution inside the receiver.

This work has proved that the glass volumetric receiver has better thermal behavior than conventional volumetric receivers: the heat losses are lower and the heat transfer fluid temperature increases as it approaches to the receiver exit, because the receiver reaches major temperatures inside it.





PALABRAS CLAVE

- Tecnologías de Energía Solar de Concentración (CSP)
- Torre Central
- Receptor Volumétrico de Vidrio
- Transmisión de Calor: Convección y Radiación
- Reflexión

KEY WORDS

- Concentrating Solar Power (CSP)
- Central Receiver System
- Glass Volumetric Receiver
- Heat Transmission: Convection and Radiation
- Reflection





NOMENCLATURA

Símbolo	Nombre	Unidad
n	Índice de refracción	-
q	Flujo de calor por unidad de superficie	$W m^{-2}$
k	Conductividad térmica	$W m^{-1} K^{-1}$
∇T	Gradiente del campo de temperatura en el interior del material	$K m^{-1}$
\dot{Q}_{conv}	Flujo de calor en convección	W
h_{conv}	Coefficiente de película en convección	$W m^{-2} K$
A_{rec}	Área de intercambio en convección	m^2
T_s	Temperatura cuerpo caliente en convección	K
T_∞	Temperatura cuerpo frío en convección	K
\dot{Q}	Flujo de calor	W
A_{rec}	Área de emisión radiante	m^2
σ	Constante de Boltzman	$W m^{-2} K^{-4}$
T_z	Temperatura del cuerpo caliente en radiación	K
T_o	Temperatura del cuerpo frío en radiación	K
Ψ	Acimut	$^\circ$
α	Elevación	$^\circ$
β	Zenit	$^\circ$
θ	Ángulo de incidencia	$^\circ$
Φ	Ángulo de refracción	$^\circ$
r	Reflectividad	-
t	Transmisividad	-
a	Lado del triángulo equilátero	mm
h	Altura del triángulo equilátero	mm
A_Δ	Área del triángulo equilátero	mm^2
A_g	Área del espesor del tubo	mm^2
N	Número de reflexiones en el tubo	-
L	Longitud recorrida entre dos reflexiones consecutivas	m
d_{int}	Diámetro interior del tubo	m
X	Longitud recorrida por el rayo	m
E	Energía no reflejada	-
e	Energía cedida en cada intervalo	-
$x(T_{max})$	Posición de temperatura máxima del tubo	mm
$a_{receptor}$	Lado del receptor cuadrático	m
$A_{receptor}$	Área del receptor cuadrático	m^2
d_{tubo}	Diámetro del tubo	mm
L_{tubo}	Longitud del tubo	mm
$Reflec_{tubo}$	Reflectividad del tubo	-
d, d_{ext}	Diámetro exterior del tubo	mm
e	Espesor del tubo	mm
l	Posición del tubo	mm
T_1	Temperatura del cuerpo negro	K



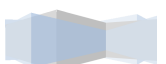


T_2	Temperatura del tubo	K
T_3	Temperatura del exterior	K
D	Diámetro del receptor	m
ϵ_1	Emisividad cuerpo negro	-
ϵ_2	Emisividad tubo de vidrio	-
ϵ_3	Emisividad exterior	-
N_t	Número de tubos del receptor	-
A_1	Área del cuerpo negro (hipótesis)	m^2
A_2	Área del tubo de vidrio (hipótesis)	m^2
A_3	Área del exterior (hipótesis)	m^2
A_T	Área del receptor circular	m^2
$A_{\text{espesor_unitario}}$	Área del espesor (hipótesis)	m^2
A_e	Área efectiva	m^2
F_{12}	Fracción de energía que sale de la superficie del cuerpo negro (1) y llega a superficie del tubo (2)	-
F_{13}	Fracción de energía que sale de la superficie del cuerpo negro (1) y llega al exterior (3)	-
F_{21}	Fracción de energía que sale de la superficie del tubo (2) y llega a superficie del cuerpo negro (1)	-
F_{22}	Fracción de energía que sale de la superficie del tubo (2) y llega a superficie del tubo (2)	-
F_{23}	Fracción de energía que sale de la superficie del tubo (2) y llega al exterior (3)	-
R_{12}	Resistencia del factor de forma F_{12}	m^{-2}
R_{13}	Resistencia del factor de forma F_{13}	m^{-2}
R_2	Resistencia del tubo de vidrio (2) a la radiación	m^{-2}
R_{23}	Resistencia del factor de forma F_{23}	m^{-2}
R_1	Resistencia del cuerpo negro (1) a la radiación	m^{-2}
R_3	Resistencia del exterior (3) a la radiación	m^{-2}
J_1	Radiación que sale del cuerpo negro (emitida y reflejada)	$W m^{-2}$
J_2	Radiación que sale del tubo (emitida y reflejada)	$W m^{-2}$
J_3	Radiación que sale del exterior (emitida y reflejada)	$W m^{-2}$
E_{b1}	Radiación que sale del cuerpo negro (emitida)	$W m^{-2}$
E_{b2}	Radiación que sale del tubo (emitida)	$W m^{-2}$
E_{b3}	Radiación que sale del exterior (emitida)	$W m^{-2}$
\dot{Q}_1	Transferencia de calor que aporta el cuerpo negro (1) por radiación	W
\dot{Q}_{12}	Transferencia de calor que aporta el cuerpo negro (1) al tubo (2) por radiación	W
\dot{Q}_{13}	Transferencia de calor que aporta el cuerpo negro (1) al exterior (3) por radiación	W
\dot{Q}_2	Transferencia de calor que recibe el tubo (2) por radiación	W
\dot{Q}_{23}	Transferencia de calor que aporta el tubo (2) al exterior (3) por radiación	W
\dot{Q}_3	Transferencia de calor que recibe el exterior (3) por radiación	W





h_{Torre}	Longitud de la torre	m
h_{Receptor}	Altura a la que se encuentra el receptor	m
D_{Carcasa}	Diámetro de la carcasa	m
$N_{\text{Heliostatos}}$	Número de heliostatos	-
$A_{\text{Heliostato}}$	Área de un heliostato	m^2





ÍNDICE

1. OBJETIVOS	10
2. INTRODUCCIÓN	11
2.1 ENERGÍA Y ELECTRICIDAD.....	11
2.2 FUENTES DE ENERGÍA.....	11
2.2.1 Fuentes de energía convencionales.....	12
2.2.2 Fuentes de energía renovables	12
2.3 SITUACIÓN ENERGÉTICA	12
3. ENERGÍA SOLAR.....	15
3.1 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	15
3.2 ENERGÍA SOLAR TÉRMICA	15
4. TECNOLOGÍAS DE ENERGÍA SOLAR DE CONCENTRACIÓN(CSP)	16
4.1 INTRODUCCIÓN.....	16
4.2 SITUACIÓN ACTUAL	17
4.3 TIPOS.....	18
4.3.1 Sistema lineal fresnel (CLF).....	18
4.3.2 Sistema cilindro-parabólico (CCP).....	19
4.3.3 Sistema de disco parabólico (Stirling).....	21
4.3.4 Sistema de torre con receptor central.....	21
5. SISTEMA DE TORRE CON RECEPTOR CENTRAL.....	23
5.1 COMPONENTES.....	24
5.1.1 Heliostatos.....	24
5.1.2 Receptor.....	28
6. RECEPTOR VOLUMÉTRICO	32
6.1 INTRODUCCIÓN.....	32
6.2 VENTAJAS	33
6.3 DESVENTAJAS	33
6.4 TIPOS.....	33
7. RECEPTOR VOLUMÉTRICO DE VIDRIO.....	36
7.1 EL VIDRIO COMO MATERIAL DE TRABAJO: CARACTERÍSTICAS DEL VIDRIO	36
7.2 FUNCIONAMIENTO.....	37
7.3 COMPONENTES DEL RECEPTOR	37
7.3.1 Tubos de Vidrio.....	38
7.3.2 Cuerpo Negro	39
7.3.3 Carcasa.....	39
7.4 COMPORTAMIENTO.....	40
7.4.1 Comportamiento Óptico	40





7.4.2	Comportamiento Térmico.....	40
8.	PRIMER ESTUDIO: COMPORTAMIENTO ÓPTICO.....	43
8.1	COMPORTAMIENTO EN LA CARA FRONTAL DEL TUBO.....	43
8.2	COMPORTAMIENTO EN EL INTERIOR DEL TUBO.....	46
8.3	DESPLAZAMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA TEMPERATURA.....	48
9.	SEGUNDO ESTUDIO: DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA.....	52
9.1	INFORMACIÓN PREVIA	52
9.1.1	<i>Comportamiento del Sol</i>	52
9.2	DATOS	54
9.3	RESULTADOS.....	55
10.	TERCER ESTUDIO: GEOMETRÍA ÓPTIMA.....	59
10.1	DATOS	59
10.2	RESULTADOS.....	60
11.	CUARTO ESTUDIO: PÉRDIDAS TÉRMICAS.....	67
11.1	DATOS	67
11.2	RESULTADOS.....	68
11.3	RECEPTOR SIN TUBOS.....	70
12.	QUINTO ESTUDIO: INSTALACIÓN DE SISTEMA DE TORRE.....	71
12.1	DATOS	71
12.2	RESULTADOS.....	73
12.2.1	<i>Cuerpo Negro</i>	73
12.2.2	<i>Tubo Central</i>	75
12.2.3	<i>Potencia incidente</i>	76
13.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	77
14.	LISTA DE FIGURAS	79
15.	LISTA DE TABLAS	81
16.	BIBLIOGRAFÍA.....	82
17.	ANEXOS.....	84
17.1	ANEXO 1: PROGRAMA R– ENERGÍA ABSORBIDA EN CADA INTERVALO DEL TUBO.....	84
17.2	ANEXO 2: PROGRAMA R – CÁLCULO DE PÉRDIDAS TÉRMICAS.....	85
17.3	ANEXO 3: TONATIUH Y R – INSTALACIÓN DE TORRE CON RECEPTOR CENTRAL.....	86
17.3.1	<i>Generación del conjunto de tubos (Tonatiuh)</i>	86
17.3.2	<i>Generación del campo de heliostatos (Tonatiuh)</i>	90
17.3.3	<i>Representación del Cuerpo Negro (R)</i>	91
17.3.4	<i>Representación del Tubo Central (R)</i>	93

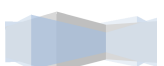




1. OBJETIVOS

El **objetivo principal** del documento es el **estudio preliminar** del receptor volumétrico de vidrio para sistemas de torre, que permita la introducción en el mercado de este nuevo producto. Para ello, este receptor debe alcanzar una serie de metas:

- El receptor volumétrico de vidrio debe sufrir menores **pérdidas térmicas** que los receptores volumétricos convencionales. Las pérdidas térmicas son uno de los principales problemas de los receptores volumétricos de sistema de torre.
- El receptor volumétrico de vidrio debe conseguir una **temperatura de salida del fluido caloportador** alta, es decir, debe trabajar a altas temperaturas. Este objetivo permitirá que el fluido de la central posea mayor energía y, como consecuencia, la central termosolar alcanzará una mayor eficacia.
- El receptor volumétrico de vidrio debe poseer una **distribución de temperaturas** progresiva y suave. Este método permite un aporte de energía constante al fluido caloportador, aumentando su temperatura de salida. Además, con el hecho de que el receptor tenga una distribución de temperaturas suave, se pretende evitar que se creen **puntos calientes** en el receptor, disminuyendo de este modo roturas por choque térmico.
- El **comportamiento óptico** del receptor volumétrico de vidrio debe favorecer el funcionamiento del mismo. Las reflexiones que se producirán en los tubos trasladarán energía hacia el interior del receptor, lo que permitirá alcanzar una temperatura mayor en ese lugar y unas pérdidas térmicas menores.





2. INTRODUCCIÓN

2.1 *Energía y electricidad*

En la sociedad actual, un recurso básico y fundamental es la **energía**. La energía puede ser eléctrica, mecánica, térmica, química.... Ésta otorga al ser humano una serie de servicios para el día a día como puede ser encender una bombilla, elevar objetos, calentar agua o incluso, mover un automóvil tras la inflamación de un combustible.

Sin duda, la base del sistema energético actual es la **electricidad**, ya que, es fácil la obtención de otro tipo de energías a partir de ésta, se puede generar de forma sencilla con diferentes recursos y se puede transportar grandes distancias con pequeñas pérdidas. Sin embargo, el principal inconveniente al que se intenta hacer frente en numerosos departamentos de I+D del sector energético es la ineficacia de almacenar la electricidad con diferentes dispositivos como puede ser una batería. Como consecuencia, las centrales eléctricas deben estar operativas en todo momento para generar una determinada cantidad de electricidad en función del consumo.

El sistema eléctrico se divide en cuatro procesos esenciales que representan el ciclo de vida de la electricidad: generación, transporte, distribución y consumo. La generación de electricidad se puede llevar a cabo por fuentes de energía convencionales o por fuentes de energía renovables.

2.2 *Fuentes de energía*

Las fuentes de energía son los recursos utilizados por el ser humano para producir energía. Estos recursos pueden obtenerse tanto de fuentes agotables como de fuentes inagotables. Las fuentes de energía agotables son **fuentes de energía convencionales**. Las fuentes de energía inagotables son **fuentes de energía renovables**.

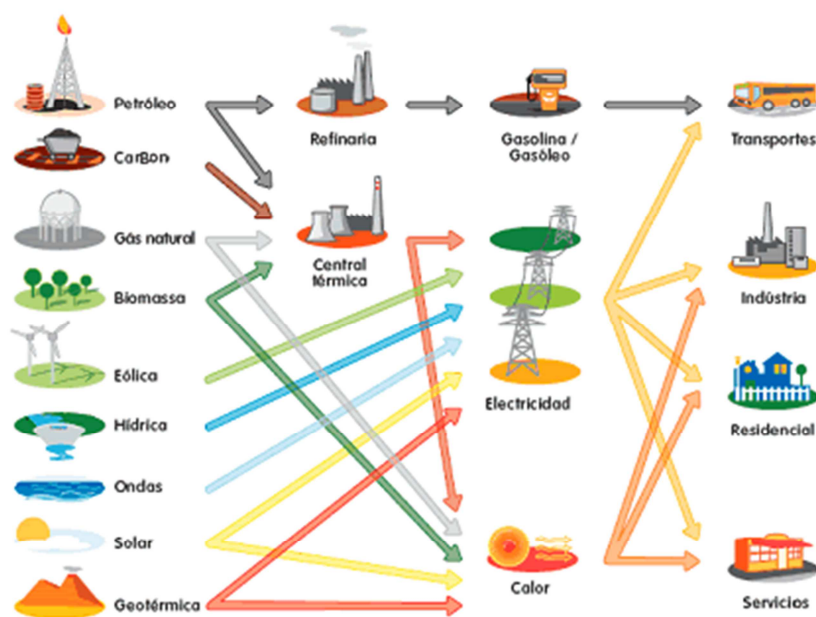


Figura 1. Fuentes de energías [2]





2.2.1 Fuentes de energía convencionales

Las **fuentes de energía convencionales** son aquellas procedentes de recursos finitos (combustibles fósiles) que son insostenibles en el futuro o con un impacto medio ambiental elevado. Son las fuentes con más avances tecnológicos y las que cubren la mayor parte de la demanda energética. Sin embargo, causan un gran impacto en el medio ambiente y se irán extinguiendo poco a poco.

2.2.2 Fuentes de energía renovables

Las **fuentes de energía renovables** son aquellas que proceden de recursos inagotables como pueden ser agua, viento, Sol, entre otros, y que no tienen un gran impacto sobre el medioambiente. Se tratan de fuentes de energía limpias, sostenibles, repartidas a lo largo de todo el planeta y con perspectiva de ser el futuro energético del planeta. No obstante, actualmente, la inversión inicial es elevada y, en algunos casos, no son competitivas. Los tipos de fuentes de energía renovables presentes en la actualidad son:

- **Biomasa:** utiliza la materia orgánica para generar energía. La biomasa sirve tanto para producir calor o electricidad como para formar combustibles para el mercado de la automoción como son el biodiésel, el bioetanol y el biogás.
- **Eólica:** usa el viento como fuente de energía. La energía eólica ha sido utilizada por el ser humano desde muchos siglos atrás con las velas de los barcos y los molinos para moler grano o bombear agua. En la actualidad, esta energía se utiliza para generar electricidad a través de aerogeneradores. Por ahora, es la energía con más potencia generada.
- **Geotérmica:** emplea el calor interior de La Tierra como fuente de energía. En este tipo de energía existe energía geotérmica de baja entalpía (genera calor) y de alta entalpía (produce electricidad).
- **Hidráulica:** aprovecha la velocidad del agua para producir energía. La energía hidráulica es la energía renovable más antigua utilizada para la generación de energía. Se suele distinguir entre gran hidráulica y mini hidráulica, puesto que, la gran hidráulica no se considera sostenible y la mini hidráulica sí.
- **Marina:** utiliza la energía del mar (olas, mareas y corrientes) como fuente de energía. Esta energía puede generar mucha electricidad, no obstante, la inversión necesaria es muy elevada.
- **Solar:** usa la radiación procedente del Sol para generar energía. La energía solar puede ser fotovoltaica (produce electricidad), térmica (produce calor o electricidad).

2.3 Situación energética

Es una realidad que el consumo de electricidad ha subido como la espuma en las últimas décadas. Esta subida exponencial está relacionada con el desarrollo tecnológico a nivel global que experimenta el planeta. Ante esta demanda, se han tenido que idear nuevas formas de obtener electricidad de forma limpia y sostenible, energías renovables.

En la **Figura 2**, se puede ver la progresión de la electricidad generada en los últimos 30 años y las diferentes fuentes utilizadas para ello. Como se puede observar, el uso de **combustibles fósiles** (azul), ha ido aumentando de forma continua y, actualmente, representa más del 50% de la energía producida. Por el contrario, otras fuentes de energía convencional como son la **energía nuclear**





(verde) y la **hidroeléctrica** (rojo) han disminuido porcentualmente. Para finalizar, se puede apreciar que las **energías renovables** comienzan a adquirir una pequeña cuota de mercado de la energía total producida. Por consiguiente, se tienen previsiones de que este tipo de fuentes de energía se convierta en el sustento fundamental del futuro, obteniendo cuotas de mercados altas.

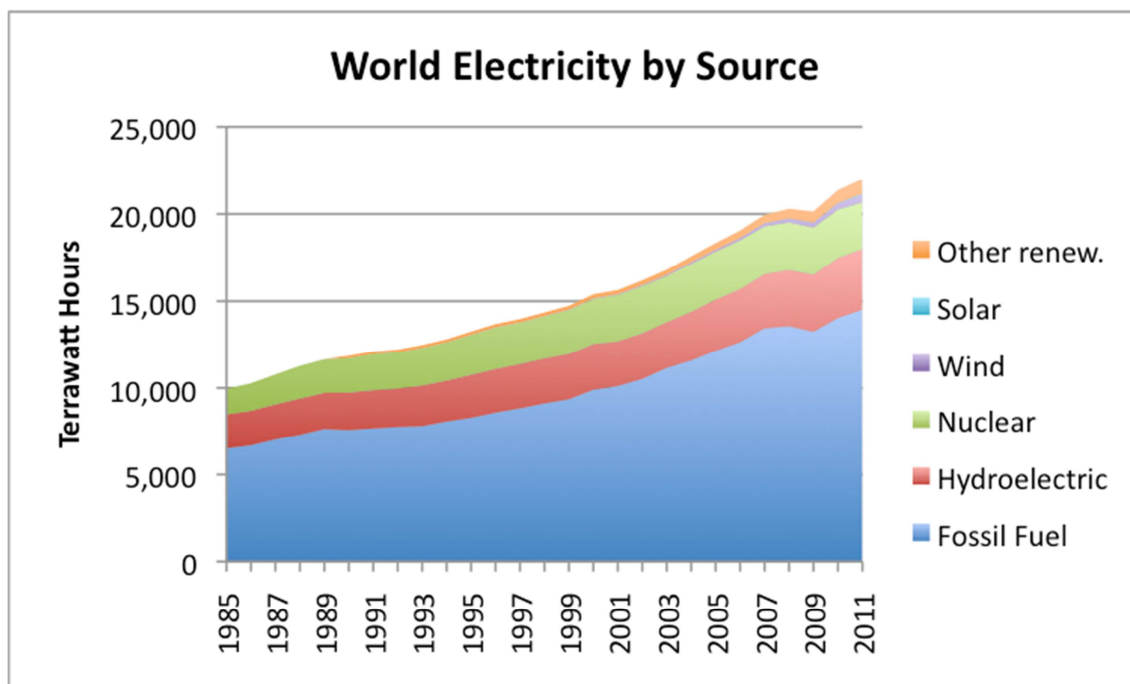


Figura 2. Energía mundial por recurso (basada en BP's 2012 Statistical Review of World Energy) [4]

Si nos centramos en España, un país pionero en colocar instalaciones de energías renovables, el panorama cambia. Actualmente, las energías renovables generan una parte importante de la electricidad que se consume y su cuota de mercado frente a la cuota mundial es considerablemente superior, ya que, en 2010, la electricidad producida por las renovables fue de un 20%, si se deja a un lado la hidráulica (Figura 3).

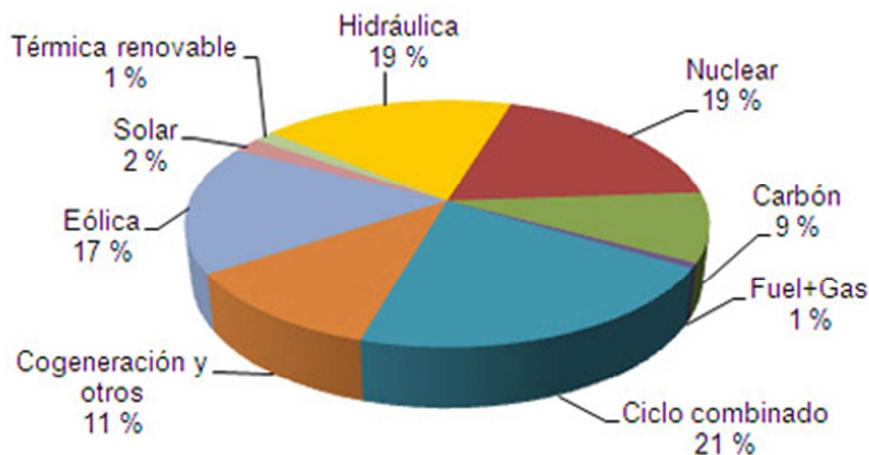


Figura 3. Repartición de la generación de electricidad en España.(Datos de Red Eléctrica de España) [5]





En la **Figura 4**, se advierte que en 2012 el 12,2% de la energía utilizada en España fue generado por energías renovables, debido a la gran dependencia de España sobre los combustibles fósiles en el sector del transporte.

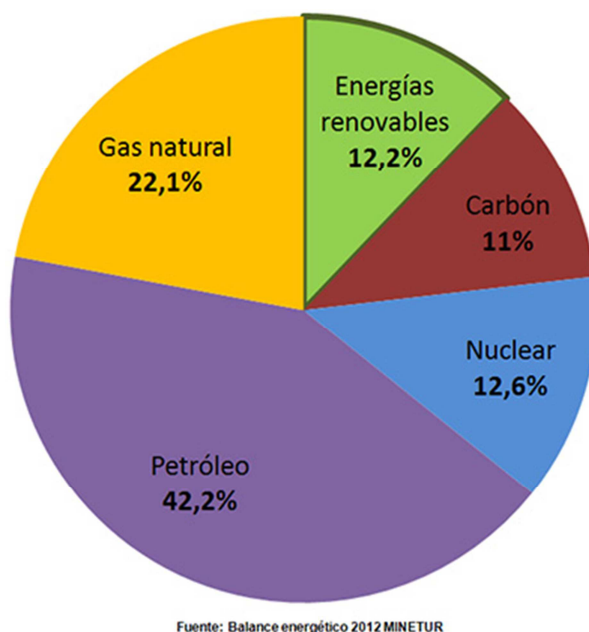


Figura 4. Balance energético 2012 MINETUR [6]

Dentro de las energías renovables, las dos energías más utilizadas para la generación de electricidad son la eólica y la solar fotovoltaica. No obstante, la **solar térmica** está en auge y se han creado instalaciones de alta temperatura que pueden producir electricidad, convirtiéndose en una buena alternativa en un futuro cercano.





3. ENERGÍA SOLAR

La **energía solar** es una fuente de energía de origen renovable de la que se aprovecha la radiación electromagnética procedente del Sol. Según el modo de aprovechamiento de la energía solar, se puede distinguir entre **energía solar fotovoltaica** y **energía solar térmica**.

3.1 *Energía solar fotovoltaica*

Este tipo de energía solar capta la energía con unas láminas metálicas, cuyo nombre es células o paneles fotovoltaicos. En concreto, su función es absorber los fotones de la luz y emitir electrones para ser capturados y producir corriente eléctrica. Sus aplicaciones son la generación de electricidad para uso propio o uso industrial.

3.2 *Energía solar térmica*

La **energía solar térmica** utiliza paneles que absorben el calor de la radiación para aportar a través de un intercambiador de calor energía calorífica a un fluido. Sus aplicaciones son dispares, según el tipo de producción y la temperatura de funcionamiento. Se separan en:

- **Instalaciones de baja temperatura:** se utilizan para la producción de agua caliente sanitaria, calentamiento de piscinas o apoyo a la calefacción o climatización de un edificio.
- **Instalaciones de alta temperatura:** se utilizan para la producción de electricidad. Para ello, se utilizan sistemas de concentración que permite alcanzar temperaturas más elevadas. Se usa principalmente en la industria debido a la gran superficie de terreno necesario para la obtención de electricidad.





4. TECNOLOGÍAS DE ENERGÍA SOLAR DE CONCENTRACIÓN(CSP)

4.1 Introducción

En la actualidad, existe un campo muy importante dentro de la energía solar térmica, las **tecnologías de energía solar de concentración**, conocidas internacionalmente como **CSP** (Concentrating Solar Power). Estas instalaciones generan electricidad a partir de la **radiación directa** del Sol concentrada.

El proceso consiste en focalizar los rayos solares en un área reducida a través de unos espejos llamados **heliostatos**. La radiación aporta un calor al fluido caloportador del receptor que se usa para accionar una turbina que, a su vez, produce electricidad.

Habitualmente, los heliostatos, que se encuentran anclados al terreno, contienen un sistema por el cual, los espejos giran en función de la posición del Sol, consiguiendo de manera efectiva, que la radiación reflejada termine siempre en el mismo punto (**receptor**). Este movimiento se asemeja al realizado por los girasoles a lo largo del día que giran de Este a Oeste. El principio es el mismo que en las lentes o lupas, donde los rayos de una superficie grande convergen en una superficie más pequeña. De este principio surge el nombre de **concentrador solar**.

La aplicación de esta tecnología es industrial, ya que, el área necesaria para realizar la concentración y la energía obtenida son muy altas.

En función de la movilidad y forma del receptor se pueden clasificar en cuatro tipos:

	Receptor lineal: El receptor tiene forma tubular y posee un área elevada.	Receptor puntual: El receptor se considera como un solo punto, su forma es cilíndrica o esférica.
Receptor fijo: Se trata de un mecanismo independiente del movimiento del concentrador.	Sistema lineal Fresnel	Sistema de torre con receptor central
Receptor móvil: El receptor se mueve al compás que marca el concentrador.	Sistema cilindro-parabólico	Sistema de disco parabólico (Stirling)

Tabla 1. Tipos de sistemas de concentración

Se hablará de **sistema de concentración bidimensional (2D)**, cuando los heliostatos giran conforme a un único eje y la radiación incidente procede de dos dimensiones. Pertenecen a este grupo tanto los sistemas lineales Fresnel como los sistemas cilindro-parabólicos.





Mientras que, se hablará de **sistema de concentración tridimensional (3D)**, cuando los heliostatos giran en dos ejes y la radiación que incide sobre el receptor, procede de las tres dimensiones. Pertenecen a este grupo los sistemas de torre con receptor central y los sistemas de discos parabólicos Stirling.

Al concentrarse en un solo punto, la temperatura obtenida/m²reflejado es mayor. El principal problema de este tipo de energía es la cantidad de energía térmica perdida debido al gradiente de temperaturas entre el receptor y el ambiente.

La principal ventaja frente a otras instalaciones renovables de generación de electricidad, es la capacidad de almacenar energía en el fluido caloportador y, de esta manera, conseguir una independencia mayor de las energías renovables.

4.2 Situación actual

La energía solar de concentración es un sector en auge como se observa en la **Figura 5**. Esta tecnología se encuentra muy desarrollada en **España y Estados Unidos**, debido principalmente a la cantidad de horas solares diarias y a las amplias zonas desérticas que contienen ambos países para el funcionamiento de estas plantas.

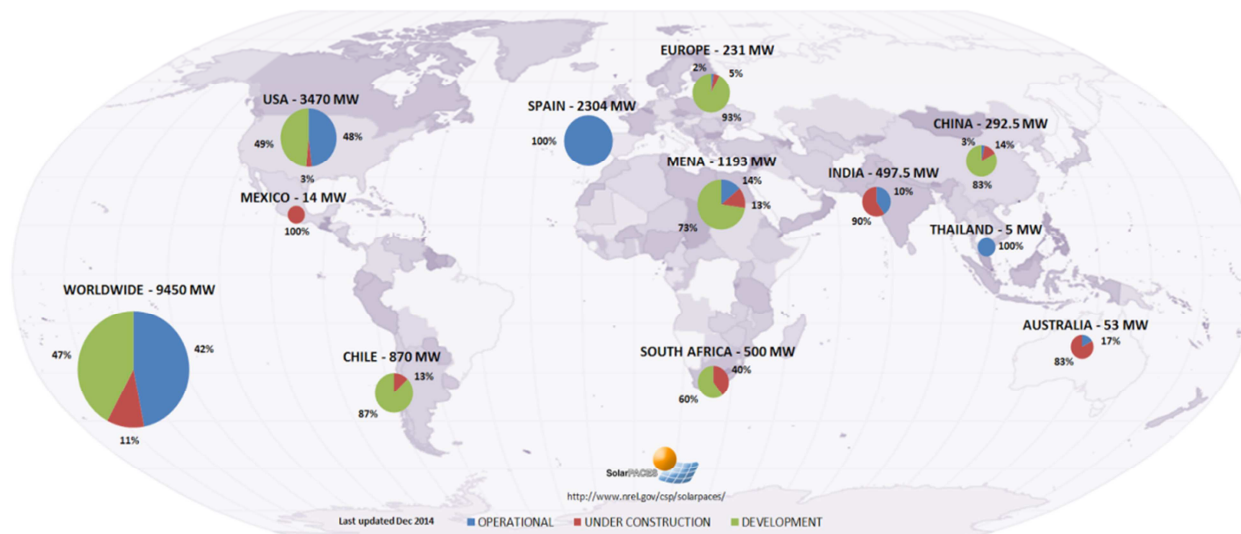


Figura 5. Potencia de CSP distribuida por países: operativa (azul), en construcción (rojo) y por construir (verde) [9]

Se puede apreciar en la **Figura 5** que otros países han demostrado interés en esta tecnología con numerosos proyectos en proceso. Entre los países se encuentran varias potencias económicas emergentes: **Sudáfrica, India o China**.

En cuanto a España, contiene todas sus centrales en operación, sin ningún nuevo proyecto, ya que, las nuevas políticas y la crisis han afectado al sector. Sin embargo, la potencia instalada en el territorio es elevada (2304 MW) convirtiéndose en la primera potencia mundial del sector.

A partir de la **Figura 6** se aprecia que esta tecnología ha crecido en España exponencialmente en los últimos cinco años. Por otro lado, en Abril de 2015, el 2% de la demanda fue satisfecha por la





tecnología CSP española que se divide en 50 centrales localizadas mayoritariamente en el Sur de la península.

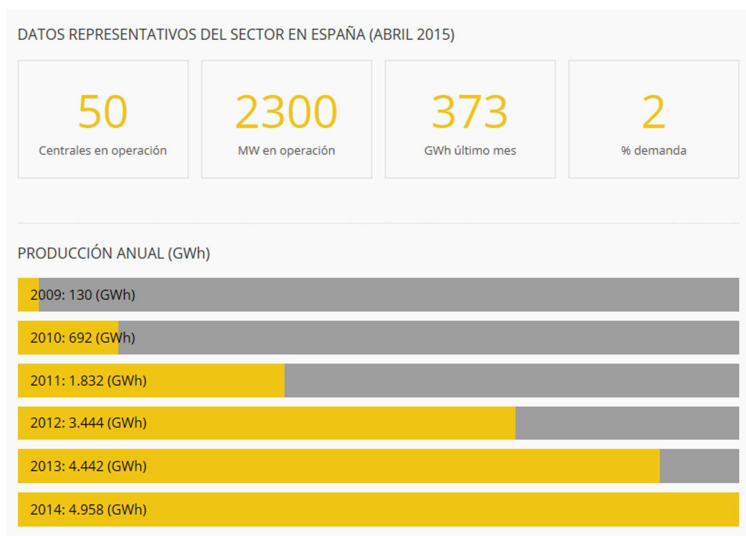


Figura 6. Datos de CSP en España, mes de Abril; Progresión de la producción de potencia anual por CSP en España [8]

4.3 Tipos

4.3.1 Sistema lineal fresnel (CLF)

Los **concentradores lineales Fresnel** o compact linear Fresnel (CLF) tienen las características de poseer un único receptor tubular fijo y unos concentradores (heliostatos) con forma curva que se mueven en un solo eje. Su tecnología comienza a desarrollarse en estos momentos, y por esta razón, aún no se comercializan.

Su temperatura de trabajo es similar a los sistemas cilindros-parabólicos debido a que poseen un grado de concentración semejante. Su creación atiende a la necesidad de reducir el coste de la electricidad de origen solar térmico, formando un sistema híbrido entre el cilindro-parabólico y el de torre con receptor central.

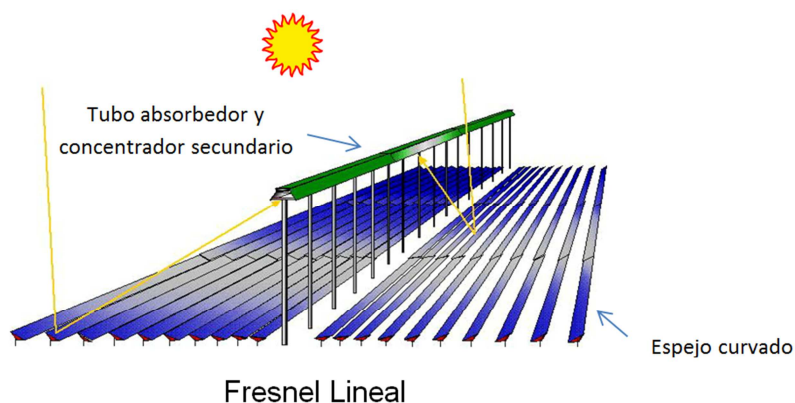


Figura 7. Tecnología Fresnel [17]





Entre sus ventajas destaca que el coste de inversión es menor. Para ello, utiliza estructuras, receptores y espejos más ligeros y económicos. Aprovecha mejor el terreno, (60%-70%), frente a los cilindros parabólicos y los de torre (33%).

Sin embargo, su rendimiento es menor al beneficiarse de una fracción de la radiación solar directa menor. Además, al utilizar un receptor más barato, posee altas pérdidas térmicas porque no alberga un buen aislamiento, y el ángulo de incidencia en los heliostatos más alejados es muy elevado.

Los sistemas lineales Fresnel están pensados para utilizar como fluido caloportador el agua. En la actualidad, existen dos empresas que promueven estos sistemas de forma comercial:

- **AREVA:** es una empresa francesa que está desarrollando una gran central termosolar de tipo Fresnel en la India.
- **NOVATEC:** es una empresa alemana que ha construido dos centrales termosolares Fresnel en Calasparras, Murcia. Sus potencias son: 1,4 MW y 30 MW.

4.3.2 Sistema cilindro-parabólico (CCP)

Los **sistemas de captadores cilindro-parabólicos (CCP)** están formados por heliostatos parabólicos, que se mueven en un único eje, y por receptores tubulares. Su principal característica es que cada heliostato tiene asociado su propio receptor tubular y que es posible almacenar energía.

En función de la temperatura, se puede utilizar agua hasta 175°C o aceite sintético si la temperatura se encuentra entre 125°C y 400°C. Para evitar la evaporación del fluido es necesario aumentar la presión lo produce una mayor inversión en todos los componentes para trabajar de forma segura. Estos sistemas cilindro-parabólicos son utilizados tanto para la generación de electricidad a través de un ciclo Rankine como para el aporte de energía calorífica a un proceso industrial.

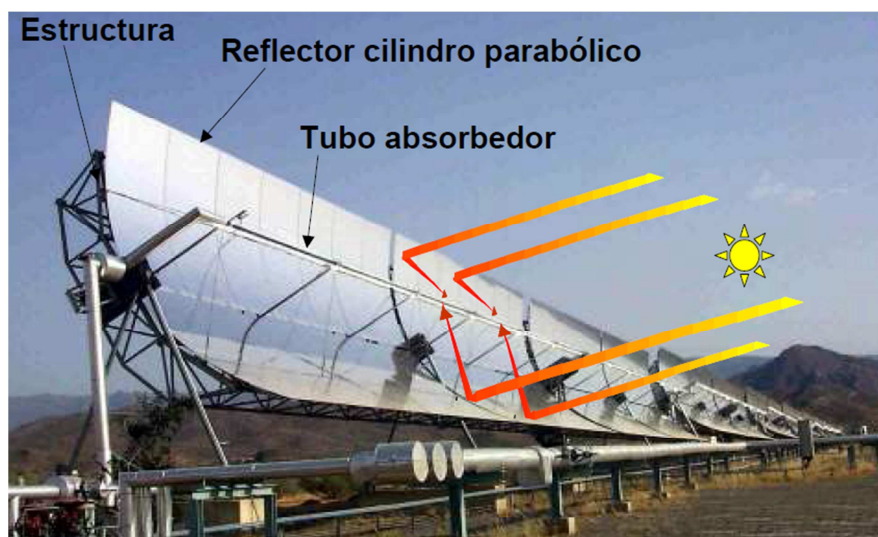


Figura 8. Tecnología Cilindro-parabólico [12]

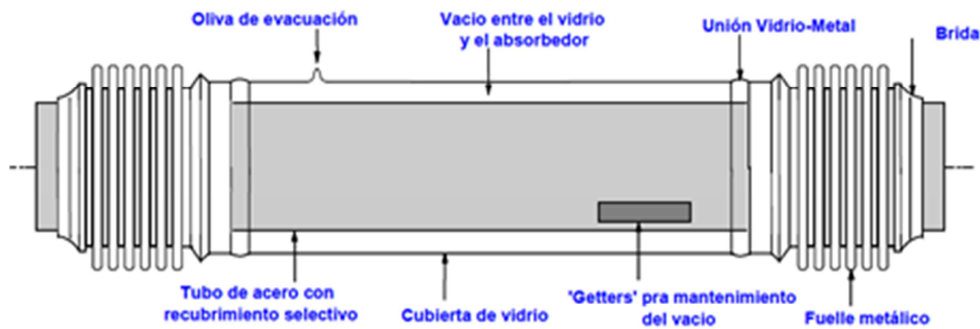
Uno de los componentes principales de los CCP es el **tubo absorbedor** que se divide en dos partes: tubo interior metálico y tubo exterior de cristal. El tubo interior posee un recubrimiento con





una elevada absorptividad para la radiación solar y una emisividad baja, lo que mejora el rendimiento térmico.

En el caso del tubo de cristal, su objetivo es proteger el recubrimiento de los efectos climáticos y reducir las pérdidas térmicas por convección en el tubo absorbedor. El cristal puede recibir un tratamiento antirreflexivo en sus dos caras para aumentar el rendimiento óptico al disminuir la reflexividad del material.



Tubo absorbedor de vacío para CCP.

Figura 9. Tubo de vacío de un CCP [13]

La instalación de los captadores puede estar **orientada** según el eje de rotación de los concentradores hacia **Norte-Sur** o **Este-Oeste**. Si se coloca en la orientación Norte-Sur, se captura un mayor porcentaje de radiación solar directa anual, aunque las diferencias de la potencia suministrada entre las estaciones es elevada, obteniendo más potencia en verano que en invierno. En España las instalaciones son Norte-Sur.

Los CCP se pueden organizar **en serie**, **en paralelo** o **sistema mixto**. Lo habitual es colocar los CCP en serie y en paralelo (mixto). Cuanto mayor sea el número de cilindro-parabólicos en serie, mayor será la temperatura de salida del fluido caloportador. A mayor número de espejos en paralelo, mayor es la potencia térmica nominal del campo solar.



Vista general de una central termosolar con CCPs.

Figura 10. Campo solar de CCP [13]





4.3.3 Sistema de disco parabólico (Stirling)

Los **sistemas de discos parabólicos** contienen un concentrador esférico con forma parabólica y receptores puntuales para cada disco. Por esa razón, cada disco actúa de forma independiente a los demás, buscando la máxima eficiencia particular. Este sistema posee características del sistema cilindro-parabólico y del sistema de torre, como puede ser el seguimiento del Sol en dos direcciones. Por otra parte, el sistema contiene un **motor Stirling** para cada disco que mueve mecánicamente a un generador eléctrico que es el que produce la electricidad.

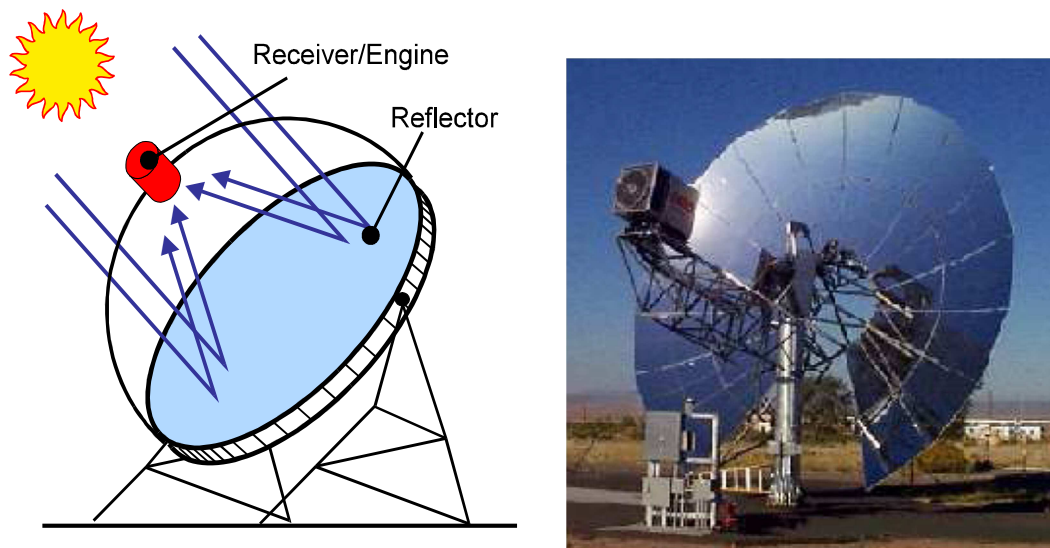


Figura 11. Disco parabólico teórico [17]; Disco parabólico real [13]

Como las temperaturas alcanzadas en estos dispositivos son muy altas, el motor Stirling es la máquina más eficiente para convertir energía térmica en trabajo mecánico.

El receptor suele ser un panel de finos tubos paralelos por donde circula un gas (fluido caloportador), ya sea hidrógeno (H) o helio (He), a altas presiones (5-20MPa). El hidrógeno trabaja termodinámicamente mejor pero tiene problemas de seguridad.

Para una potencia de 5 kW, se necesita un disco de 5,5 m de diámetro y una eficiencia pico del 30%.

Entre las ventajas de este sistema destaca su modularidad, debido a que se puede escoger el número de discos a instalar en función de la potencia deseada.

No obstante, posee una escasa fiabilidad, ya que existen fallos ópticos, mecánicos y eléctricos, y los costes de operación y mantenimiento son muy altos.

4.3.4 Sistema de torre con receptor central

Los **sistemas de torre con receptor central** están compuestos, como su propio nombre indica, por una torre central con un receptor solar en lo alto; y por un campo de heliostatos rodeando la torre mencionada. En España este sistema de torre está bastante desarrollado, con la empresa **CIEMAT** como principal investigadora. Esta tecnología se utiliza principalmente para la generación de electricidad a través de un ciclo Rankine, al poseer temperaturas de trabajo mayores de 500°C.



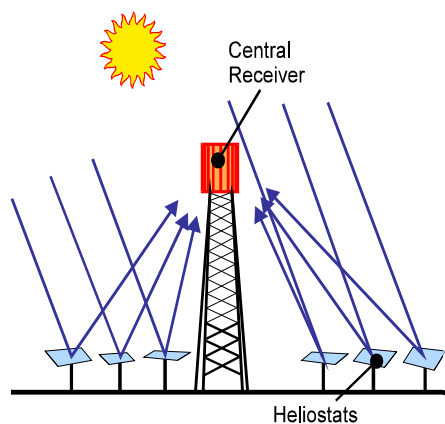


Figura 12. Torre central ideal; Torre central real [17]

A continuación, se comenta información complementaria sobre este tipo de centrales termoeléctricas.





5. SISTEMA DE TORRE CON RECEPTOR CENTRAL

Los **sistemas de torre con receptor central** son junto con los sistemas cilindro-parabólicos las tecnologías con mayor número de instalaciones construidas y las más desarrolladas tecnológicamente.

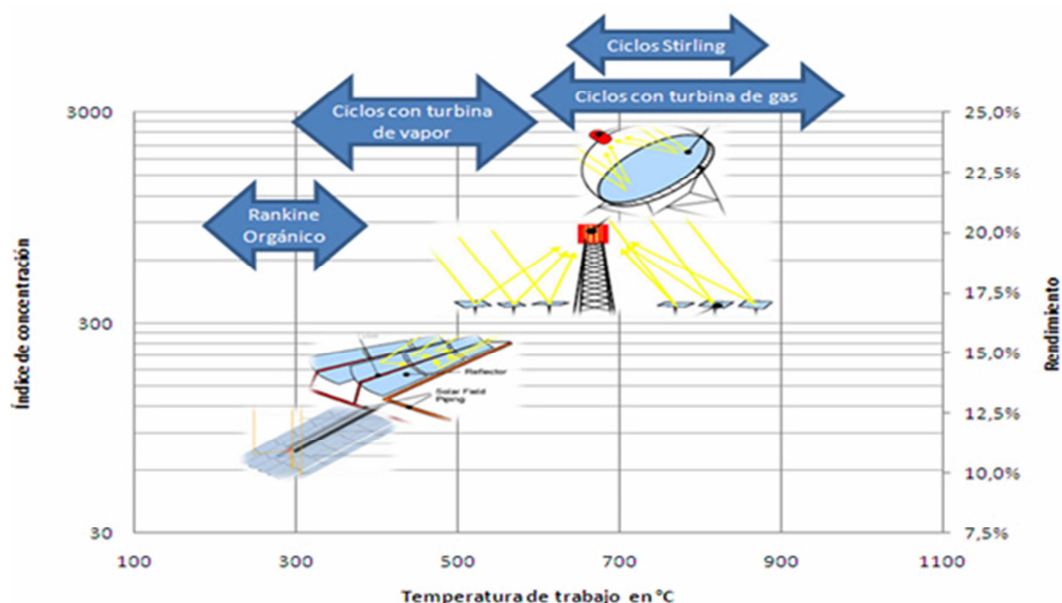


Figura 13. Temperatura, concentración y rendimiento de cada tecnología (orientativo) [14]

La temperatura de trabajo se encuentra por encima de los sistemas cilindro-parabólicos, en torno a 500°C-700°C. Al trabajar con temperaturas más altas, se obtiene una eficiencia mayor. Del mismo modo, se puede comparar los rendimientos de cada tecnología. En el caso del sistema de torre, la producción de electricidad tiene un 18% de eficiencia.

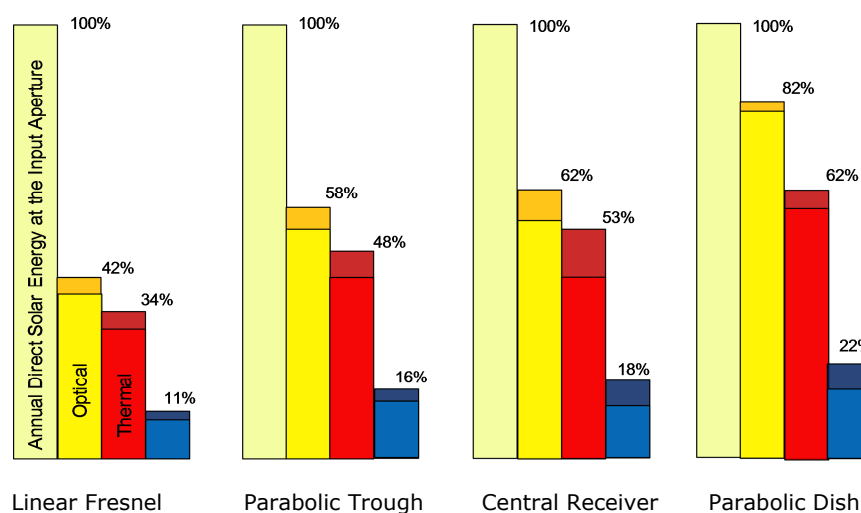


Figura 14. Eficiencia entre las diferentes tecnologías: rendimiento óptico (amarillo), rendimiento térmico (rojo) y rendimiento de generación de electricidad (azul) [18]





5.1 Componentes

Los sistemas de receptor central se dividen en diferentes componentes: **heliostatos**, **receptor**, **sistema de almacenamiento** y **bloque de potencia**.

El sistema de almacenamiento puede ser utilizado en las horas en las que no hay radiación solar a través de sales fundidas, que resisten temperaturas altas de funcionamiento. Para nuestro estudio, los dos componentes que tienen importancia son los heliostatos y el receptor.

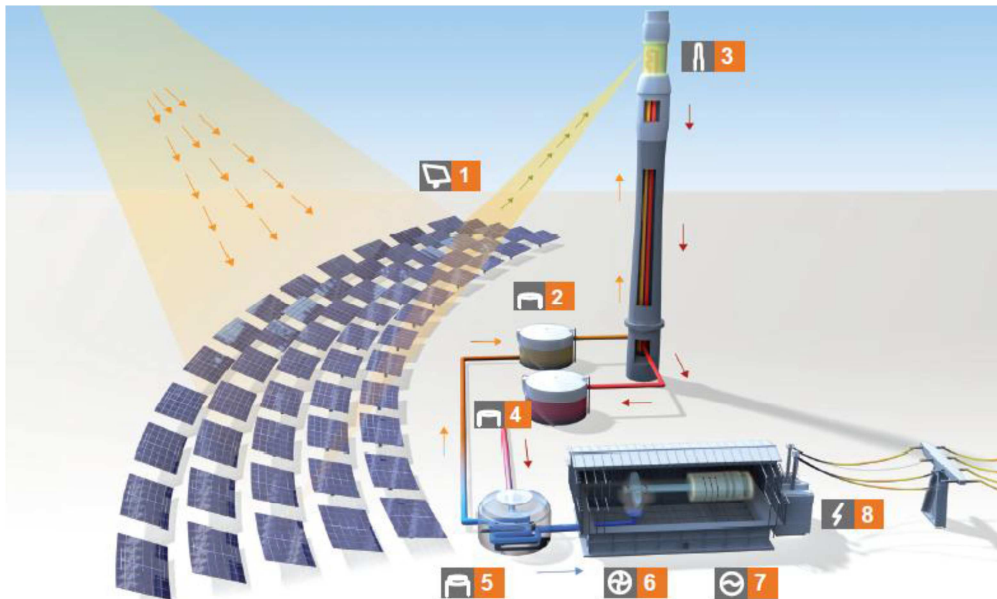


Figura 15. Componentes de una instalación de Torre: heliostatos (1), receptor (3), almacenamiento (2,4) y bloque de potencia (5,6,7,8) [1]

5.1.1 Heliostatos

Los **heliostatos** tienen forma curva y utilizan un sistema de seguimiento del Sol en dos ejes, reflejando la radiación solar en un punto común. El control de este sistema de seguimiento se hace de forma individual para cada heliostato por parte del control central del campo solar. La superficie más usada es el espejo rectangular de vidrio grueso, con espesor de 2,5 mm. En 2013, el precio del heliostato oscilaba entre los 110 y los 180 €/m².



Figura 16. Heliostato [13]





La distribución de los heliostatos puede ser:

- **Distribución Norte:** los heliostatos se colocan al Norte de la torre para orientarse hacia el Sur, donde el Sol aporta más radiación. En este modelo, el aprovechamiento solar es máximo al tener un mejor ángulo de incidencia.



Figura 17. Torre central de distribución Norte [17]

- **Distribución Circular:** los heliostatos se siguen colocando en la parte Norte de la torre, pero debido a la falta de superficie disponible o a la lejanía entre el heliostato y la torre, se opta por colocar los heliostatos alrededor de la torre.



Figura 18. Torre central de distribución circular [13]

Esta distribución depende tanto de la latitud, cuanto mayor sea, mayor es la eficiencia óptica anual de un campo Norte respecto al circular; como de la altura de la torre, a mayor altura (caso distribución Norte), mayor es el coste de la instalación. Por tanto, cada distribución es adecuada en un lugar y para un fin concreto. Por otra parte, la dimensión máxima de la instalación viene determinada por el rendimiento óptico obtenido, que disminuye al aumentar el campo solar.





Errores

En los sistemas de torre, la radiación directa del Sol llega a los heliostatos que reflejan los rayos hacia el receptor. Sin embargo, la potencia real que es absorbida por el receptor, no se corresponde con la potencia ideal. Por ello, se debe considerar que existen diferentes pérdidas de potencia relacionadas con los heliostatos que se deben evitar en el diseño de la planta. Los fenómenos que generan estas **pérdidas de potencia** son:

- **Efecto coseno:** este efecto se produce por la disminución de **área reflexiva**. Esta área disminuye al aumentar al **ángulo de incidencia**, formado por la normal al espejo y la dirección de la radiación solar. Recibe el nombre de efecto coseno por ser proporcional al coseno del ángulo de incidencia. Este efecto depende de la posición solar, de tal manera que, los heliostatos situados en el Norte de la torre (caso de hemisferio Norte) reflejan un número de rayos mayor. Este mismo efecto ocurre a lo largo del día porque la normal del heliostato siempre se encuentra en la bisectriz del ángulo formado por el Sol y el receptor de la torre.

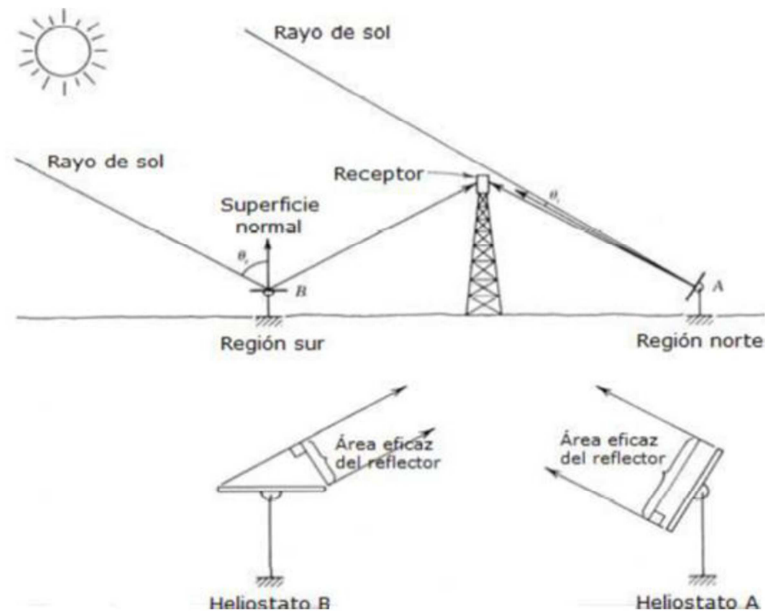


Figura 19. Efecto coseno [1]

- **Bloqueos y sombras:** son pérdidas que se producen por proximidad entre los heliostatos, y al igual que el efecto coseno, generan una menor superficie reflexiva que se traduce en una menor potencia absorbida por el receptor. La solución más sencilla es aportar una separación mayor a los heliostatos, no obstante, el aumento de la superficie utilizada aumenta el precio.



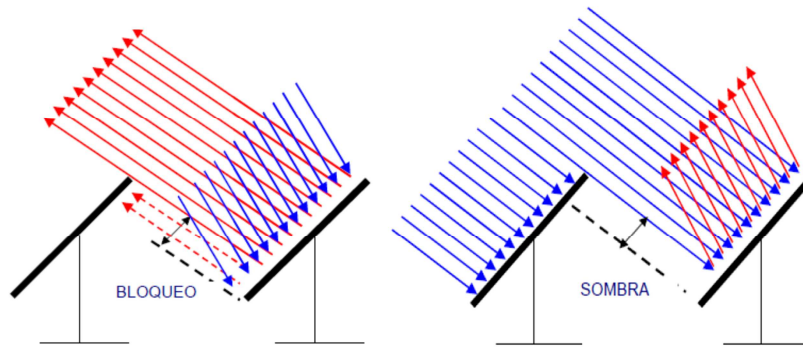


Figura 20. Bloqueo; Sombra [1]

- **Atenuación atmosférica:** este comportamiento se sufre cuando la distancia entre el heliostato y el receptor es elevada. Se debe, como su propio nombre indica, a la atmósfera que dispersa y disocia la radiación reflejada. La solución es acercar los heliostatos más lejanos con una distribución circular.

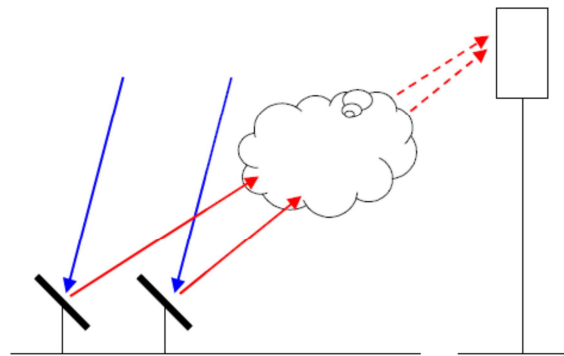


Figura 21. Atenuación atmosférica [1]

- **Spillage:** son pérdidas que se producen por falta de **precisión**, ya sea debida a la precisión del sistema de seguimiento o a un error de la superficie del heliostato. Para solucionarlo, se necesitan mejores materiales de trabajo o aumentar el área del receptor. Sin embargo, la primera opción subirá el precio y la segunda generará mayores pérdidas térmicas.

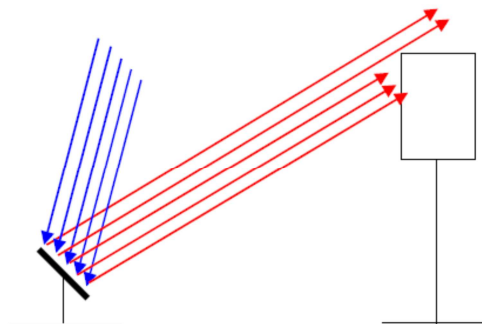


Figura 22. Spillage [1]





5.1.2 Receptor

En las instalaciones de receptor central de torre, el **receptor** se coloca a una determinada altura para evitar problemas de sombras o bloqueo. Por lo que, si se aumenta el número de heliostatos en la misma área, será necesario aumentar la altura de la torre. No obstante, debido a la altura precisada, es necesaria una bomba de mayor potencia para elevar el fluido caloportador hasta esa altura. Este receptor es **puntual y tridimensional**, por ello, dispondrá de temperaturas muy altas al recibir radiación de un gran número de heliostatos.

El tipo de receptor utilizado para cada instalación es diferente porque cada tipo de receptor persigue un objetivo principal distinto. A continuación, se muestran, en una tabla, las diferentes clasificaciones en que se pueden hacer para los receptores y el tipo de receptor utilizado:

	Aspecto considerado	Tipos	Subtipos
Tipos de receptores	Geometría	Externo	
		De cavidad	
	Mecanismo de transferencia	De tubos	
		Volumétrico	
	Fluido de trabajo	Agua/Vapor (sin intercambiador de calor)	Vapor saturado
			Vapor sobrecalentado
		Aire	Atmosférico
			Presurizado
		Sales fundidas	
		Sodio líquido	

Tabla 2. Tipos de receptores

Clasificación de los receptores según su geometría

Desde el punto de vista geométrico, se puede dividir los receptores en:

- **Externo:** es un tipo de receptor que se encuentra totalmente expuesto al **exterior**. Entre sus ventajas se encuentra que no limita geoméricamente la disposición de los heliostatos y que, al ser el más sencillo, es más económico. No obstante, las pérdidas térmicas con el exterior son muy elevadas.



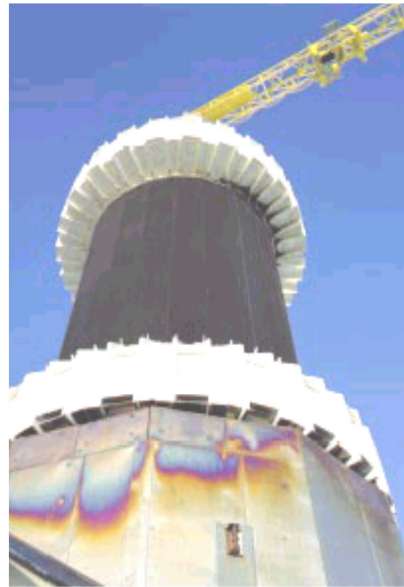


Figura 23. Receptor externo [17]

- **De cavidad:** es un tipo de receptor parcialmente aislado por una **cavidad** que contiene una serie de **espejos** en las caras interiores para conseguir reflejar la radiación hacia el receptor. Entre sus ventajas destaca que las pérdidas térmicas por convección son menores, debido a una menor diferencia de temperaturas entre el receptor y la cavidad. Asimismo, la velocidad del aire en contacto con el receptor es menor (mayor intercambio de calor) y se obtienen temperaturas de trabajo mayores, gracias a una mayor radiación y a unas pérdidas térmicas menores. Los dos principales inconvenientes son la necesidad de una mayor inversión de dinero y la limitación, en parte, de la geometría de los heliostatos.

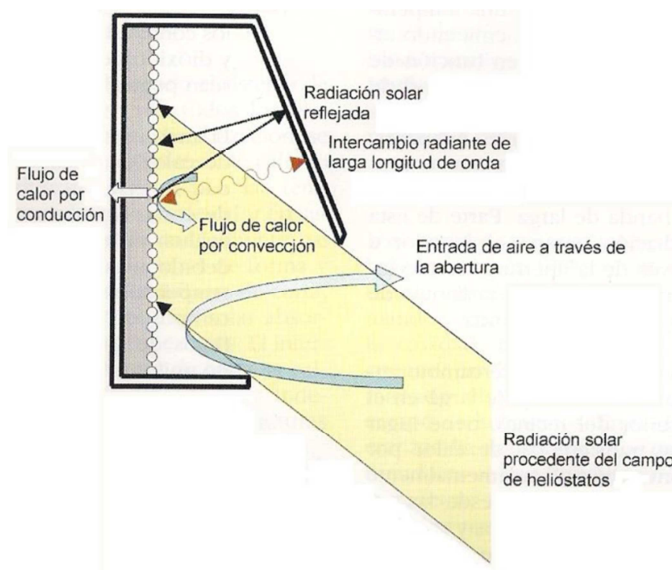


Figura 24. Receptor de cavidad [16]





Clasificación de los receptores según su modo de transferencia de calor

- **De tubos:** es un receptor que recibe la radiación directamente sobre sus **tubos** y, al calentarlos, transmiten el calor recibido al fluido caloportador que circula por el interior de los tubos.

En este tipo de receptores, se producen las tres formas de transmisión de calor: radiación solar que es absorbida por los tubos, conducción que se produce en las paredes del receptor y convección que se realiza entre las paredes interiores de los tubos y el fluido caloportador. Además, se producen pérdidas por radiación de los tubos al exterior y por convección entre las paredes exteriores de los tubos y el exterior.

Entre sus ventajas se encuentra el trabajar únicamente con **un fluido**, lo que aumentará el rendimiento en ese aspecto. Sin embargo, los flujos solares de trabajo son bajos, la transferencia de calor al fluido caloportador no es uniforme en la sección del tubo, la eficiencia es baja y las pérdidas térmicas altas.



Figura 25. Receptor de tubos [17]

- **Volumétrico:** es un tipo de receptor que utiliza un **gas** como fluido caloportador y donde el **receptor no** es completamente **compacto**, si no que existen pequeños huecos para permitir la acción del aire en su interior. En el apartado de receptores volumétricos se especifica su funcionamiento.

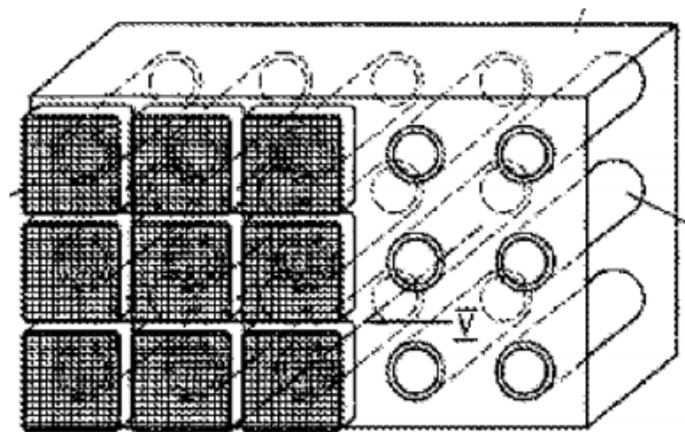


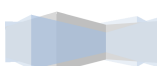
Figura 26. Receptor volumétrico [12]





Clasificación de los receptores según el fluido caloportador

- **Agua/vapor:** se trata de un receptor que utiliza **agua** como fluido caloportador que se calienta conforme circula por los tubos hasta convertirse en **vapor**. Se utiliza para receptores **de tubos**. Es el primer fluido utilizado para un ensayo de receptor central de torre. Según el vapor obtenido en la instalación, se distingue entre:
 - **Vapor Saturado:** tiene escaso riesgo tecnológico trabajar con este fluido y ha demostrado una buena fiabilidad en las centrales instaladas con él.
 - **Vapor Sobrecalentado:** tiene mejor eficiencia que el vapor saturado. No obstante, la inversión inicial es mayor y es difícil de controlar.
- **Sales fundidas:** el **funcionamiento** y su aspecto es similar a los receptores de agua/vapor. El fluido de trabajo es una mezcla de sales de **sodio (Na)** y **potasio (K)** con un bajo punto de fusión (225°C-275°C), lo que permite trabajar a temperaturas de hasta 500°C-565°C. Se utiliza en instalaciones con receptor **de tubos**.
Entre sus ventajas se destaca que las sales no son tóxicas y son estables, baja presión de vapor a altas temperaturas, es inerte al agua, aceptable conductividad térmica en estado líquido y alta capacidad calorífica. Todo ello conlleva a que sea un buen **fluido de almacenamiento**. Por otro lado, es necesario colocar resistencias eléctricas para evitar la solidificación durante el periodo de inactividad, el rango de temperaturas es pequeño (250°C-565°C) y existen incógnitas sobre la durabilidad y la fiabilidad de las sales.
- **Sodio líquido:** este tipo de elemento es poco utilizado debido a que tiene **alta reactividad en** contacto con el **agua**, siendo necesaria un costoso sistema de seguridad. Se utiliza en instalaciones con receptor **de tubos**. Aun así, posee una serie de virtudes que lo hacen atractivo: se trabaja con flujos elevados, buena conductividad térmica y elevado coeficiente de película.
- **Aire:** se trata de un compuesto que está en auge, ya que, se utiliza en los receptores **volumétricos**, que se encuentran en continua mejora. Destaca por su elevada adaptación en función de la temperatura y al hecho de ser gratis. Los receptores volumétricos de aire se dividen en función de la presión de trabajo en **presurizados** y **atmosféricos** (no presurizados).





6. RECEPTOR VOLUMÉTRICO

6.1 Introducción

En este proyecto, el estudio se va a centrar en los **receptores volumétricos**, para ser más preciso, se propone un nuevo receptor volumétrico. Los receptores volumétricos son unos receptores que utilizan como **absorbedor** una **estructura con pequeños huecos**, de tal manera, que se permite el paso de los gases por dentro de la estructura.

Su funcionamiento es simple, el fluido caloportador es succionado por **convección forzada** a través de la estructura, que está caliente debido a la radiación solar, y ésta transfiere por convección calor al fluido a través de la superficie de contacto.

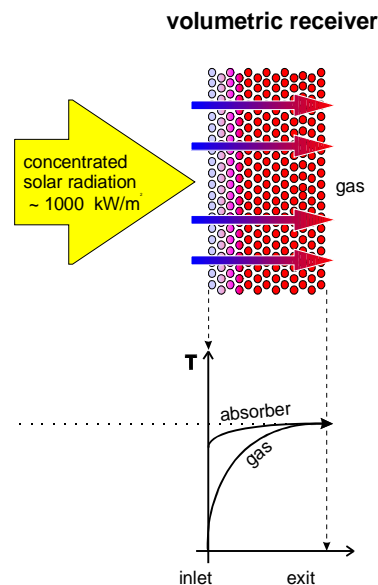


Figura 27. Funcionamiento del receptor volumétrico y distribución de temperaturas [17]

Asiduamente, el **fluido caloportador** es **aire**, gracias a que admite un amplio rango de temperaturas, la disponibilidad es completa y posee una baja inercia térmica. La inercia térmica es el tiempo que tarda un compuesto en alcanzar el equilibrio térmico y, si es bajo, será posible una rápida y buena transmisión de calor. Por el contrario, tiene una baja densidad y una baja conductividad térmica, por lo que se puede llegar a mejorar la transmisión.

Algunas de las características que deben poseer estos receptores son: alta absorción, alta porosidad, alta densidad de celda, resistencia a la temperatura, conductividad térmica y alta permeabilidad.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que la viscosidad de los gases, que es la resistencia a fluir, aumenta al aumentar la temperatura y, por tanto, existe una temperatura máxima de trabajo. Además, la mayoría de los materiales usados en los receptores, tras una posición prolongada al Sol, pierden parte de sus propiedades y es más difícil trabajar con ellos.





6.2 Ventajas

- Son simples y baratos.
- Trabaja a flujos solares altos (1000 kW/m²).
- El comportamiento frente a la transferencia de calor se asemeja a un intercambiador de calor en paralelo, es decir, la temperatura del material aumenta a medida que se atraviesa el receptor al igual que la del aire.
- La temperatura de salida del fluido de trabajo se encuentra entre 600°C y 1300°C. Esta temperatura depende del diseño utilizado.
- El intercambio de energía se transfiere en un volumen, en vez de en una superficie.
- La radiación se transmite en la misma superficie donde se produce la convección (mejor rendimiento térmico). Menores pérdidas térmicas.
- Fluido de trabajo siempre disponible.
- La superficie de contacto es muy elevada, buena transmisión de calor.

6.3 Desventajas

- Existe una incertidumbre sobre la durabilidad, eficiencia y comportamiento térmico.
- No está resuelto el almacenamiento de la energía. Para almacenar será necesario 3 fluido caloportadores: aire, sales fundidas y vapor.
- Necesita un fluido más de trabajo que los receptores de tubos.

6.4 Tipos

Por otro lado, existen muchos tipos de receptores volumétricos diferentes. En función del aspecto considerado, se pueden dividir en:

Tipos de receptores volumétricos	Aspecto considerado	Tipos
	Material	
Cerámico		
Forma		Espuma
		Receptor de canales
		Panal
		Malla
Presión		Presurizado
		Abierto

Tabla 3. Tipos de receptores volumétricos

El material utilizado para el receptor es un factor importante a considerar. Los dos tipos de materiales más utilizados son **metales** y **cerámicas**, siendo más utilizadas las cerámicas porque resisten un rango más amplio de temperaturas. En concreto, el **Carburo de Silicio (SiC)** es uno de los más utilizados. Se trata de un material semiconductor y refractario, que trabaja bien en condiciones extremas de temperatura.





Como el material está directamente relacionado con la forma del receptor volumétrico, se procede a explicar los tipos de estructuras existentes actualmente:

- **Espuma:** es una estructura formada por **poros** distribuidos aleatoriamente por el volumen del receptor, al igual que una esponja. Se clasifican en función de la porosidad, que es el porcentaje de volumen hueco dentro del volumen total.

Uno de los avances de esta técnica es utilizar una espuma del mismo material dividida en dos partes que contienen una densidad de celda diferente. La explicación es sencilla, la parte de la espuma que recibe la radiación, la parte exterior, necesita una mayor área de contacto, debido a que es el lugar donde se produce la mayor transferencia de calor entre el receptor y el gas.

Las espumas son **cerámicas** y se miden en PPI (Pores Per Inch), poros por pulgada.

- **Receptor de canales:** son módulos unidos entre sí que conforman el receptor y, a su vez, se divide cada módulo en canales muy pequeños por los que circula el fluido caloportador.

La **geometría** de los canales es **cuadrada**, lo que facilita y simplifica la fabricación de los módulos. La razón de la división del receptor en módulos, es la posibilidad de un cambio de piezas por deterioro, en cuyo caso, solo será necesario cambiar un módulo y no el receptor completo. Estos módulos son **cerámicos**.

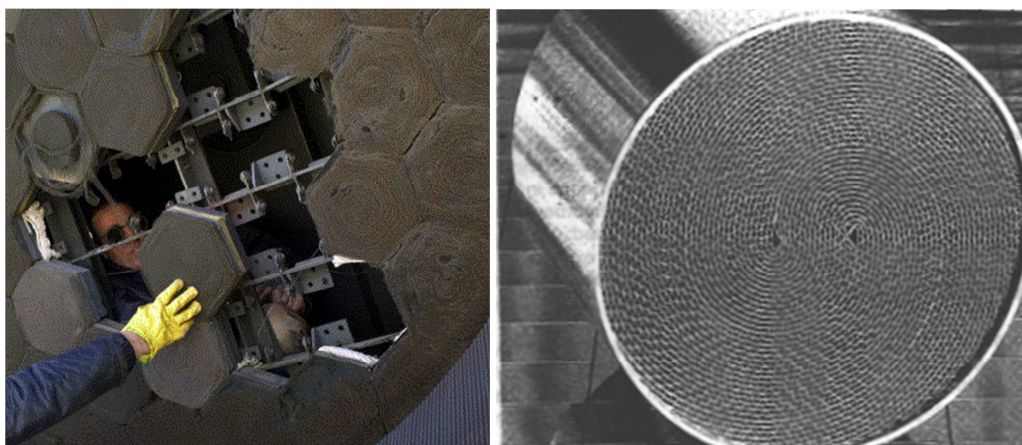
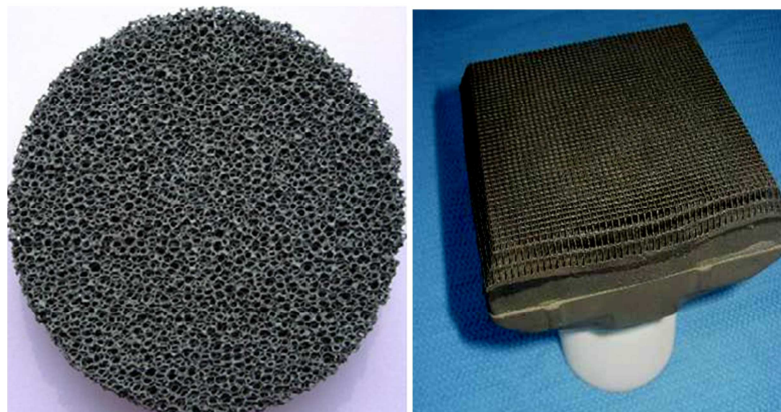


Figura 28. Espuma [12]; Receptor de canales[17]
Panal [17]; Estándar de malla metálica [17]





- **Panal:** son módulos unidos entre sí que conforman el panel, al igual que en el anterior. Los módulos son pequeños paneles compuestos por **hexágonos**. Debido a la geometría, se tiene gran superficie de contacto entre el gas y el receptor para el intercambio de calor. Los paneles también son de materiales **cerámicos**.
- **Malla:** al igual que en los dos casos anteriores, la malla se divide en módulos. Cada módulo contiene varias capas de **alambres superpuestos** con pequeños espacios entre sí, posibilitando el paso del gas a través de los alambres. Este tipo de receptor se fabrica con acero inoxidable (AISI) u otras aleaciones.

Por último, dependiendo de la presión de trabajo del fluido caloportador, se puede hacer una nueva división:

- **Presurizado:** se trata de un receptor volumétrico al que se le añade una **ventana de cristal** transparente que **aísla** el absorbedor del ambiente, y que permite trabajar con presiones más elevadas. Con este método, se consiguen temperaturas de salida del aire de 1100°C porque la alta presión facilita el comportamiento del aire. Además, permite una protección del receptor frente al exterior, tiene una vida útil más elevada y su eficiencia está demostrada.
- **Abierto o no presurizado:** es aquel receptor donde se trabaja a la **presión atmosférica**. Entre sus ventajas destacan que no se producen pérdidas ópticas por el cristal y se reduce el coste de la instalación. Las temperaturas de trabajo se encuentran entre 650°C y 850°C.

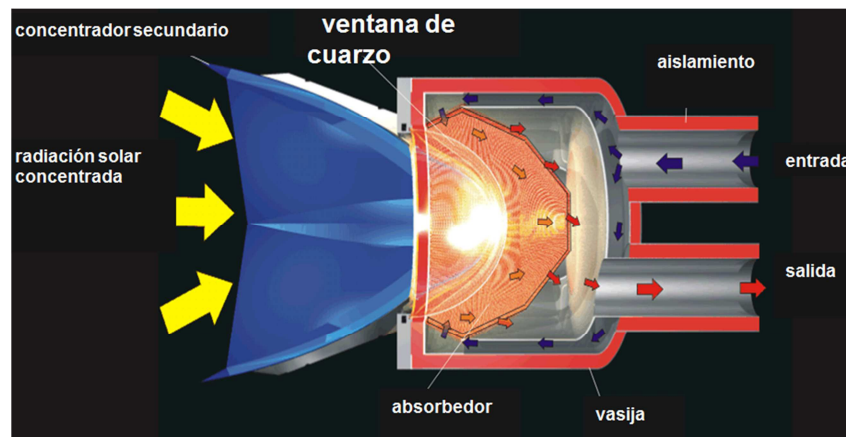


Figura 29. Receptor volumétrico presurizado con concentrador secundario [17]

Tras la información suministrada por las diferentes instalaciones de receptores volumétricos, se aprecia que no se cumple que la temperatura del receptor va aumentando conforme se barre el objeto desde el exterior hasta el final, sino que la temperatura máxima se concentra en la zona del receptor que recibe y absorbe la radiación solar. La consecuencia de este comportamiento es un salto térmico, entre el receptor y el fluido caloportador, decreciente provocando una **transmisión de calor insatisfactoria**.

Un **receptor volumétrico de vidrio** puede albergar la solución a este problema al reflejar parte de la radiación hacia el interior.





7. RECEPTOR VOLUMÉTRICO DE VIDRIO

7.1 *El vidrio como material de trabajo: características del vidrio*

Desde el punto de vista óptico, el **vidrio** es un material con una serie de características interesantes. Sin embargo, es necesario estudiar también su comportamiento térmico. Como existen numerosos tipos de vidrio con diferentes características, se va a estudiar el vidrio SIMAX utilizado por una empresa checa llamada Kavalier que suministra a CENER.

Gracias a los datos suministrados por Kavalier [19], es posible la obtención de cierta información relevante como la composición química, datos físicos, térmicos y ópticos:

SiO ₂	B ₂ O ₃	Na ₂ O + K ₂ O	Al ₂ O ₃
80.6	13	4	2.4

Tabla 4. Composición química (%peso): Dióxido de Silicio IV (SiO₂), Óxido de Boro III (B₂O₃), Óxido de Sodio + Óxido de Potasio (Na₂O + K₂O) y Alumina (Al₂O₃) [19]

Conducción térmica (20-100°C)	1,2 W m ⁻¹ K ⁻¹
Choque de calor resistible	303 °C
Índice de refracción (n)	1,5

Tabla 5. Características relevantes de vidrio [19]

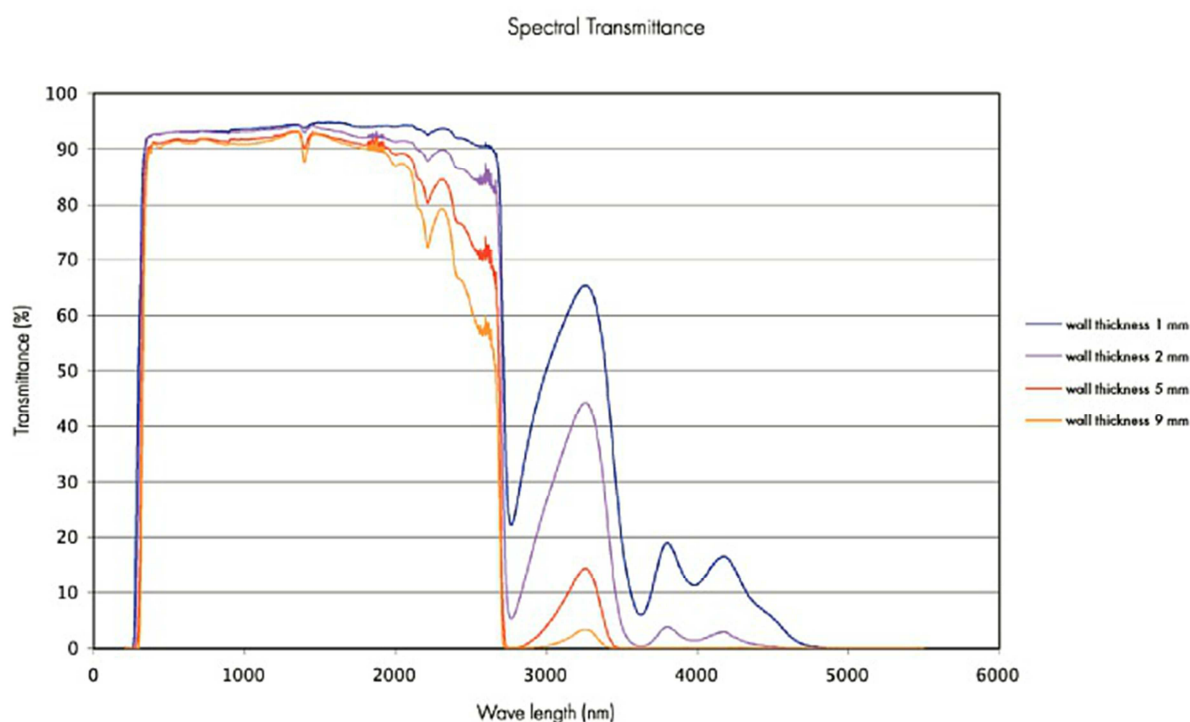


Figura 30. Transmitancia en función de la longitud de onda y del espesor del vidrio [19]





7.2 Funcionamiento

El **receptor volumétrico de vidrio** es una nueva idea que surge por parte de **Marcelino Sánchez González**, director del departamento de energía solar térmica en CENER. Este receptor volumétrico tiene un funcionamiento similar a los anteriores, es decir, es un **receptor abierto**, el aire es succionado por **convección forzada** y pasa por el interior del receptor absorbiendo calor. La principal diferencia reside en el material y forma del receptor.

Como su propio nombre indica, el receptor volumétrico de vidrio, utiliza el **vidrio** como material de trabajo. El objetivo que se persigue es aprovechar la reflexión del vidrio para **trasladar el punto de máxima temperatura** del receptor al lugar más profundo posible y conseguir un mejor intercambio de calor entre el aire y el receptor. Además, al desplazar este punto de máxima temperatura, las **pérdidas térmicas disminuyen**. El comportamiento del vidrio ante radiación solar es principalmente reflexión y transmisión, mientras que otra parte muy pequeña se absorbe.

Como en todos los receptores volumétricos, el material está relacionado con la geometría. Por ello, se considera que, ante la posible fragilidad del vidrio y por un tema óptico, el **cilindro** es la geometría que mejor comportamiento proporciona. Al igual que en los receptores volumétricos cerámicos de canales o de panel, los receptores volumétricos de vidrio poseerán muchas unidades geométricas pequeñas, cuyo fin es alcanzar una **gran superficie de contacto** para que el intercambio de calor entre el aire y el receptor sea grande. Además, para evitar, en la medida de lo posible, los huecos entre los cilindros, se utiliza una distribución compacta que constituya un sólido cilíndrico.

7.3 Componentes del receptor

Para la representación gráfica del receptor volumétrico de vidrio y sus partes, se ha utilizado Unigraphics. **Unigraphics (UG)** es un programa de tipo CAM/CAD utilizado para el diseño de modelos y análisis de los mismos. Ha sido desarrollado por la compañía Siemens PLM Software y es conocido también como Siemens NX o simplemente NX. Su funcionamiento es prácticamente idéntico al programa Solidworks.

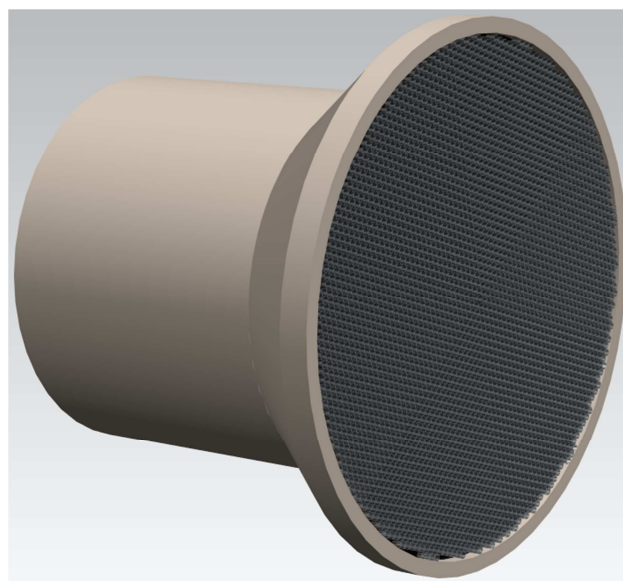


Figura 31. Receptor volumétrico de vidrio



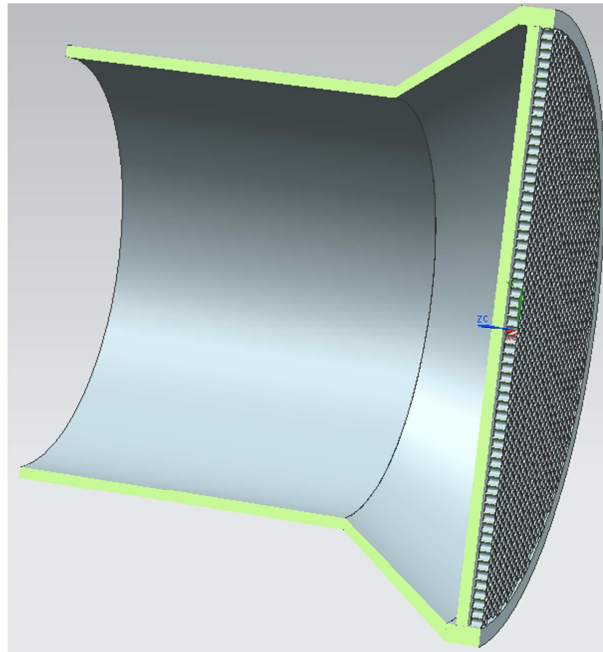


Figura 32. Sección del receptor

El receptor volumétrico de vidrio, tiene una serie de partes o componentes esenciales que son:

7.3.1 Tubos de Vidrio

Los **tubos de vidrio** es la parte diferenciadora de este tipo de receptor volumétrico frente a los demás. Su principal función es la obtención de temperaturas del fluido caloportador más altas conforme progresa por el receptor. Esta función se consigue a través de las **reflexiones de la radiación** en las paredes del vidrio. Parte de esa radiación es absorbida por el vidrio, generando un aumento de temperatura en él. Es recomendable que el vidrio también posea una temperatura elevada, de esta manera el aire recibe calor desde su entrada.

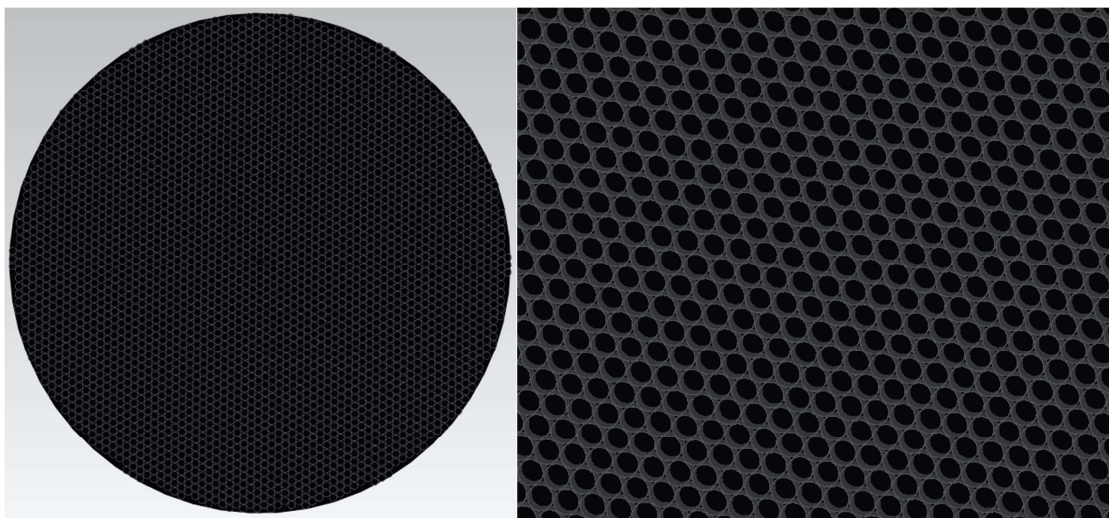


Figura 33. Geometría de los tubos





7.3.2 Cuerpo Negro

El **cuerpo negro** es el elemento que se encarga de absorber la mayor parte de la radiación procedente de los heliostatos. El material utilizado para ello será una **espuma porosa** que permita el paso del aire a través de ella. Su funcionamiento es idéntico a un receptor volumétrico de espuma, salvo que parte de la radiación incidente proviene del propio receptor.

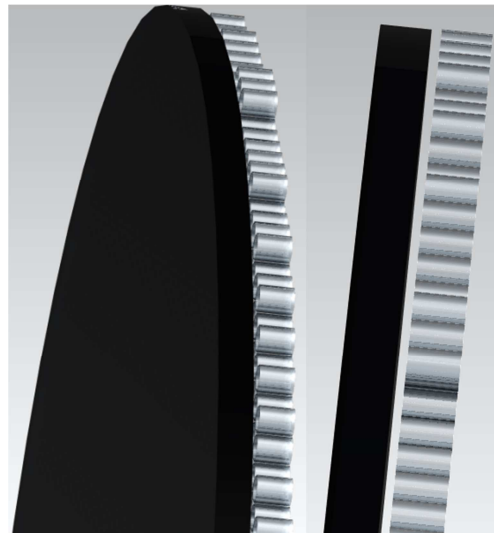


Figura 34. Disposición de los tubos frente al cuerpo negro

7.3.3 Carcasa

La **carcasa** es el elemento que **aísla** este tipo de receptores y evita un mayor número de pérdidas térmicas del vidrio y de la espuma al exterior. La geometría de la carcasa se amolda a los demás componentes del receptor, por lo que puede ser cúbica, cilíndrica, trapezoidal o cónica. Una de las características principales de ella es que posee, en su cara interior, **espejos** que reflejan toda la radiación incidente sobre ellos.

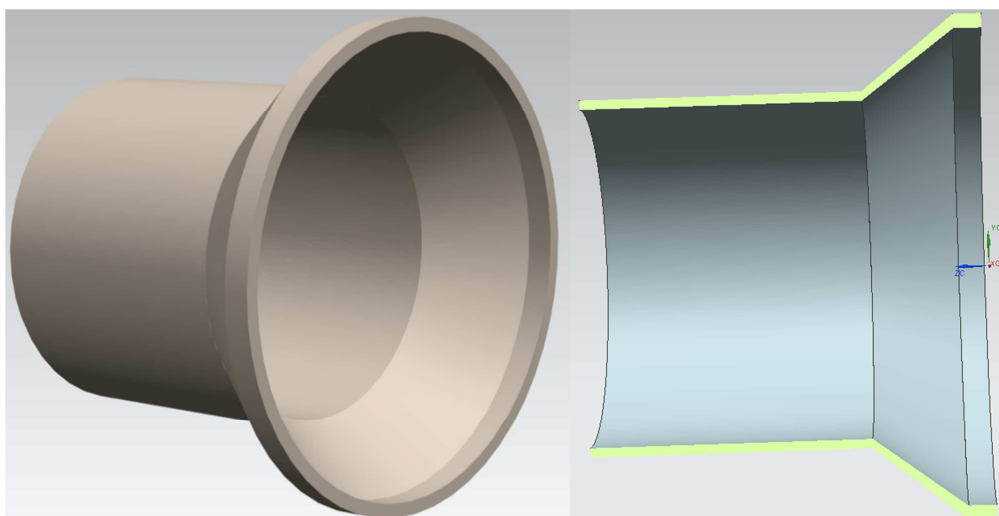


Figura 35. Carcasa





7.4 Comportamiento

Debido a la existencia de estos tubos de vidrio, aunque el principio y el funcionamiento sean los mismos, se modifica tanto el **comportamiento óptico** como el **térmico**.

7.4.1 Comportamiento Óptico

Ante la radiación, un cuerpo tiene diferentes comportamientos: **absorber, transmitir o reflejar**. La fracción de irradiación reflejada por el cuerpo se define como **rendimiento óptico** y determina el comportamiento óptico del cuerpo.

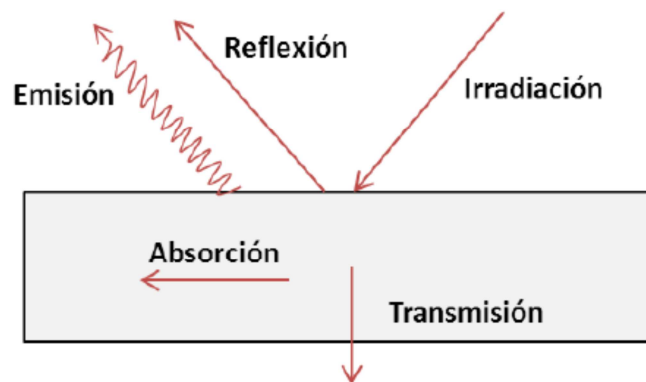


Figura 36. Comportamiento de un cuerpo ante radiación [19]

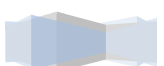
La radiación solar incide sobre los tubos de vidrio, que reflejan, transmiten y absorben una determinada cantidad en función del ángulo de incidencia. Fruto de la radiación, el vidrio se calienta pero a la vez, desplaza los rayos por reflexión hacia la zona más profunda del tubo. En cuanto a la parte de la radiación transmitida, pasa de tubo en tubo aportando calor hasta quedarse sin energía. No se pierde radiación incidente porque se colocan en el interior de la carcasa unos espejos que reflejan la radiación hacia el interior del receptor.

Por tanto, el número de reflexiones que sufren los rayos solares en comparación con otras instalaciones es mayor, lo se traduce en un rendimiento óptico menor, puesto que, las reflexiones no son ideales. Sin embargo, cuando hay reflexión dentro del receptor, las pérdidas benefician al funcionamiento de éste, y no está clara esa desventaja. Los únicos lugares donde se pierde radiación por tema óptico es en los heliostatos (como en todos los demás casos) y en la cara frontal del receptor.

7.4.2 Comportamiento Térmico

Desde un punto de vista básico, el **comportamiento térmico** es el siguiente: la radiación solar incidente aporta calor a los diferentes materiales del receptor y éstos hacen lo propio con el fluido caloportador.

El aporte de energía por parte de los rayos solares es repartido entre el vidrio y el cuerpo negro. En función de la geometría utilizada, se forma la distribución de temperatura del receptor. Por ello, se buscará una geometría que establezca un **reparto progresivo de temperaturas**. Se considera que la carcasa no recibe energía al reflejar todos los rayos solares.





Pérdidas térmicas

Las ganancias y pérdidas térmicas se producen por **transmisión de calor** entre cuerpos. Las tres formas de transmisión de calor son: conducción, convección y radiación.

La **conducción** es la transmisión de calor entre dos partículas próximas que permanecen fijas una frente a la otra. La conducción necesita un medio material de transmisión. Este tipo de transmisión de calor se basa en la ley de Fourier:

$$q = -k \nabla T \quad \text{ec.1}$$

q : flujo de calor por unidad de superficie (W m^{-2})

k : conductividad térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

∇T : gradiente del campo de temperatura en el interior del material (K m^{-1})

En el receptor, no existe contacto directo entre el cuerpo negro y los tubos. Esta característica permite que se evite la conducción entre ellos, al poseer el cuerpo negro una temperatura más alta. Por ello, la conducción se produce, únicamente, entre las partículas de un mismo componente y de los tubos y cuerpo negro hacia la carcasa.

La **convección** es la transmisión de calor que se da entre un sólido y un fluido. Al igual que la conducción, necesita de un medio material pero tiene la particularidad de que este medio de transmisión se desplaza. Esta transmisión sigue la ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h A_{\text{rec}} (T_s - T_{\infty}) \quad \text{ec.2[12]}$$

\dot{Q}_{conv} : flujo de calor (W)

h_{conv} : coeficiente de película ($\text{W m}^{-2} \text{°C}$)

A_{rec} : área de intercambio (m^2)

T_s : temperatura cuerpo caliente (°C)

T_{∞} : temperatura cuerpo frío (°C)

La convección puede ser **natural**, el movimiento del fluido se provoca por diferencia de densidades al crearse una diferencia de temperaturas, o **forzada**, el movimiento del fluido lo producen bombas o ventiladores.

En este caso, la convección se producirá entre el fluido caloportador y el conjunto de tubos de vidrio o entre el fluido caloportador y el cuerpo negro. Para evitar las pérdidas de transmisión de calor por convección, se decide que ésta debe ser forzada. De esta manera, toda pérdida de convección del vidrio y del cuerpo negro favorece el proceso de calentamiento del aire. Por tanto, se puede afirmar que no existen pérdidas térmicas por convección del receptor al exterior.

La **radiación** es la transmisión de calor por ondas electromagnéticas sin necesidad de medio material, es decir, la radiación es la emisión de energía de un cuerpo al entorno. Se basa en un principio que afirma: "Todo cuerpo cuya temperatura sea mayor que el cero absoluto ($T > 0\text{K}$), emite radiación al medio".





Esta emisión se puede cuantificar a partir de la ecuación de la radiación:

$$\dot{Q} = \varepsilon A_{\text{rec}} \sigma (T_z^4 - T_0^4) \quad \text{ec.3[12]}$$

\dot{Q} : flujo de calor (W)

ε : emisividad

A_{rec} : área de emisión radiante (m²)

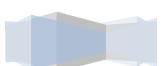
σ : constante de Boltzman = $5,67 \cdot 10^{-8}$ (W m⁻² K⁻⁴)

T_z : temperatura del cuerpo caliente (°C)

T_0 : temperatura del cuerpo frío (°C)

La única forma en la que aporta calor el exterior al receptor es la radiación del Sol. Sin embargo, al poseer el Sol una temperatura muy elevada, esta transmisión de calor es muy elevada. Además, al ser un sistema de torre, se poseerá un campo de heliostatos que concentran la radiación. La principal pérdida térmica del receptor se produce por la emisión de calor por parte del vidrio y del cuerpo negro al propio exterior.

En general, el comportamiento térmico de este tipo de receptores volumétricos es bueno, al poseer un **intercambio de calor entre el fluido caloportador y el receptor progresivo**. La consecuencia que se deriva de ello es una temperatura de salida del fluido caloportador más alta, es decir, mejor rendimiento térmico de la planta.





8. PRIMER ESTUDIO: COMPORTAMIENTO ÓPTICO

En este proyecto, se ha trabajado con receptores volumétricos de vidrio. La finalidad que se ha perseguido con esta idea innovadora es **disminuir las pérdidas térmicas** del receptor central de torre proporcionando la posibilidad de trabajar a **temperatura más altas** y conseguir un **rendimiento térmico superior**.

Se debe considerar que uno de los inconvenientes de los receptores volumétricos de vidrio son las **pérdidas ópticas** producidas. Existen dos tipos de pérdidas de radiación solar: una que no llega a incidir sobre la superficie interior del receptor y otra que es absorbida o transmitida por el vidrio al chocar con la pared del tubo. Estas segundas pérdidas, no son completamente perjudiciales, ya que, la energía perdida es utilizada en el funcionamiento del receptor.

En busca de un rendimiento térmico superior, es necesaria una **transmisión de calor gradual** desde el exterior hasta el cuerpo negro para suministrar energía al fluido caloportador de forma continua a lo largo de todo el recorrido.

8.1 Comportamiento en la cara frontal del tubo

En este apartado, se ha estudiado la cantidad de energía no utilizada debido al choche de la radiación solar sobre la superficie frontal del receptor. Para ello, primero se debe calcular la **reflectividad del vidrio en función del ángulo de incidencia**.

A través del documento [23], se han obtenido una serie de fórmulas que han permitido calcular el **coeficiente de reflexión del vidrio**. En este caso, el **ángulo de incidencia (θ)** es el que se forma a partir de la normal del canto del vidrio y la trayectoria del haz solar:

- **Ley de Snell:**

$$\sin \theta = n \cdot \sin \phi \quad \text{ec.4 [23]}$$

$$\Phi = \arcsin\left(\frac{\sin \theta}{n}\right) \quad \text{ec.5}$$

$$n = \frac{n_2}{n_1} = 1,5$$

n_2 : índice de refracción real del vidrio

n_1 : índice de refracción real del aire

ϕ : ángulo de refracción





- Reflectividad: $r(\theta)$

$$r(\theta) = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\sin(\theta - \phi)}{\sin(\theta + \phi)} \right)^2 + \left(\frac{\tan(\theta - \phi)}{\tan(\theta + \phi)} \right)^2 \right) \quad \text{ec.6 [23]}$$

- Caso $\theta=0^\circ$

$$r_0 = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2} \quad \text{ec.7 [23]}$$

- Transmisividad: $t(\theta)$

$$t(\theta) = 1 - r(\theta) \quad \text{ec.8 [23]}$$

Tras haber realizado los cálculos en Excel con los datos correspondientes (n y θ), se ha representado mediante una gráfica la **dependencia angular** de la reflectividad y de la transmisividad:

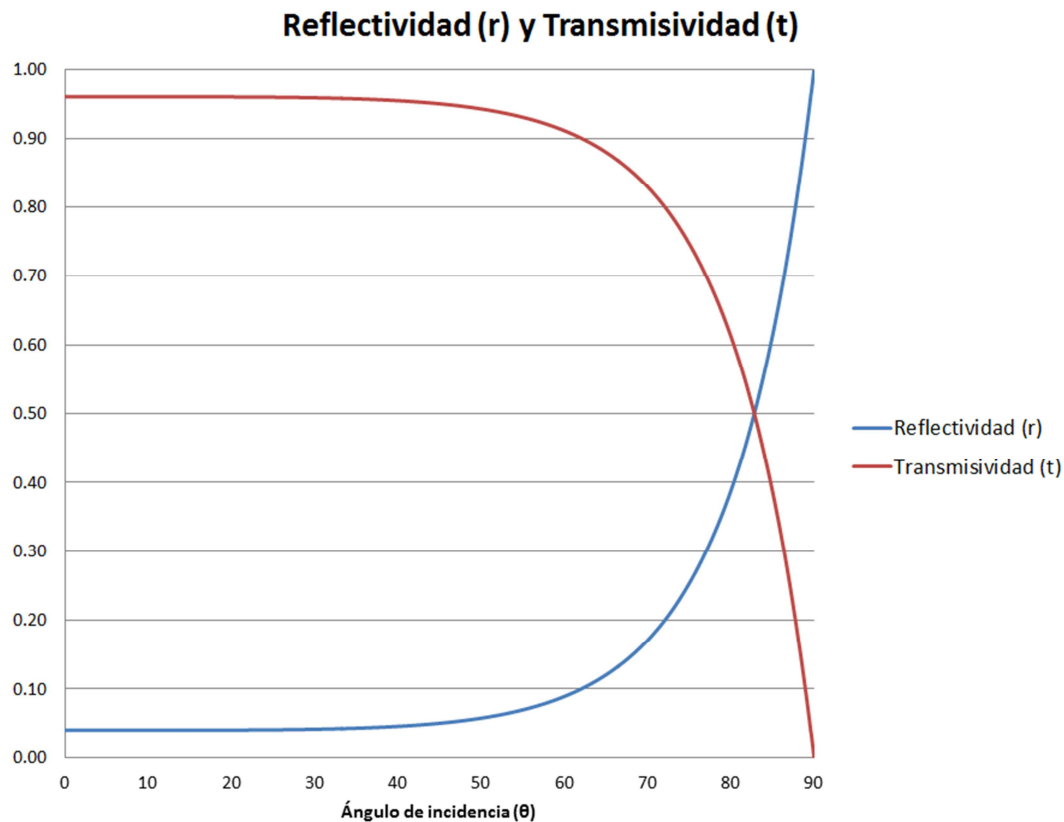


Figura 37. Reflectividad (azul) y Transmisividad (rojo) en función del ángulo de incidencia





A continuación, se ha realizado un barrido desde $\theta = 0^\circ$ hasta $\theta = 90^\circ$ para determinar la radiación total de la que disfruta el interior del receptor. Posteriormente, se ha procedido a calcular el porcentaje de energía capturada para cada ángulo y el porcentaje de energía reflejada por el vidrio frontal.

Por último, se han supuesto tubos de 10 mm de diámetro con espesor de 0,5 mm. La geometría que se repite en la distribución es un triángulo equilátero de lado 10 mm:

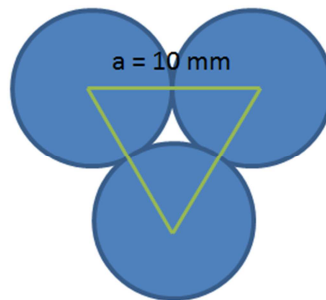


Figura 38. Distribución y geometría de los tubos

El área del triángulo es:

$$\sin 60^\circ = \frac{h}{10} \rightarrow h = 10 \cdot \sin 60^\circ \quad \text{ec.9}$$

$$A_{\blacktriangle} = \frac{10 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm} \cdot \sin 60^\circ}{2} = 0,4330 \text{ cm}^2 \quad \text{ec.10}$$

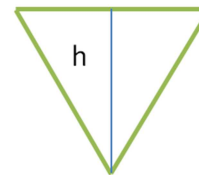


Figura 39. Área del triángulo

El área del espesor es:

$$A_g = \frac{(\pi \cdot 5^2 - \pi \cdot 4,5^2)}{2} = 0,0746 \text{ cm}^2 \quad \text{ec.11}$$



Figura 40. Área interior del triángulo

Por tanto, la fracción de área del vidrio que refleja la radiación es:

$$\%A = \frac{A_g}{A_{\blacktriangle}} = 0,1723 \quad \text{ec.12}$$

$$\% \text{ reflectividad} = \%A \cdot \% \text{ energía reflejada} = 0,1723 \cdot 0,0680 = 0,0117 \quad \text{ec.13}$$

La radiación reflejada por el espesor de los tubos o radiación residual es **1,17%**.





8.2 Comportamiento en el interior del tubo

Para calcular el comportamiento óptico dentro del tubo, se ha utilizado el programa R. R es un programa matemático que permite tanto el **cálculo de operaciones** como la **representación de datos** a través de gráficos. El lenguaje utilizado en el programa se asemeja al utilizado en Matlab o Mathematica. Debido a su sencillez y eficacia, ha formado la base de este trabajo en todos los estudios realizados y es él que ha permitido la representación de los resultados a través de gráficos.

Se han necesitado los datos de reflectividad del vidrio en función del ángulo de incidencia. Como la **reflectividad** solo depende del índice de refracción (n), el ángulo de incidencia (θ) y el ángulo de refracción (ϕ), es la misma al cambiar el espesor del vidrio y, gracias a ello, se ha usado los datos anteriores.

Para comenzar, se ha definido una matriz de dos columnas: ángulo de incidencia (θ) y reflectividad (r), y se ha añadido un nuevo comando que calcula el seno del ángulo. Por otro lado, se ha definido el porcentaje de energía en el cual se considera que los rayos solares no aportan energía calorífica, en este caso 0,1%.

A partir de la energía límite definida, el ángulo de incidencia y la reflectividad, se ha calculado, usando el comando for, el **número de reflexiones (N)** que puede sufrir el rayo antes de perder toda su energía:

$$\sin(\theta) \cdot \text{reflectividad}(\theta)^N = \text{Energía límite} \quad \text{ec.14}$$

Posteriormente, se ha agregado un nuevo dato, el diámetro del tubo ($d_{\text{int}} = 10\text{mm}$) y se ha calculado, usando el comando for, la **distancia recorrida entre dos reflexiones consecutivas (L)**:

$$L = d_{\text{int}} \cdot \tan(\theta) \quad \text{ec.15}$$

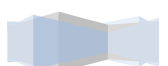
Tras los cálculos del número de reflexiones máximas (N) y la longitud recorrida entre dos reflexiones consecutivas (L), se ha podido determinar la **longitud recorrida por el rayo** en eje longitudinal del tubo (**X**) cuando la longitud del tubo es infinita. Además, se ha calculado la **energía no reflejada (E)**, absorbida o transmitida, en cada choque del rayo con el vidrio. Tanto para la longitud (X) como para la energía (E), es necesario usar un comando *doble for*:

$$X = N \cdot L \quad \text{ec.16}$$

$$E = \sin(\theta) \cdot (\text{reflectividad})^{N-1} \cdot (1 - \text{reflectividad}) \quad \text{ec.17}$$

Finalmente, se ha calculado la **distribución de energía cedida** por la radiación en el vidrio (**e**) en cada intervalo (x) y se han representado los resultados de forma gráfica. La energía cedida (e) es la suma de porcentajes de energía no reflejada (E) de los numerosos rayos incidentes, por tanto, es adimensional. Los comandos utilizados son *for* y *plot*:

$$e(z) = \sum [E(z)] \quad \text{ec.18}$$





Curva de reflectividad en función del ángulo de incidencia

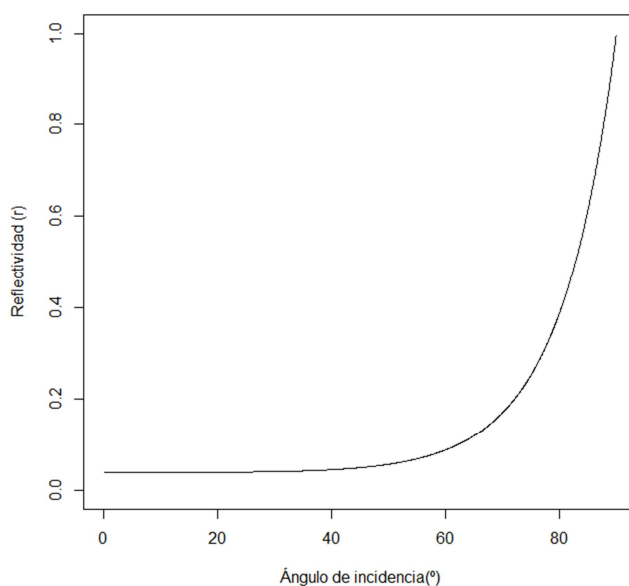


Figura 41. Reflectividad (r) en función del ángulo de incidencia (θ)

Energía acumulada en cada intervalo del tubo

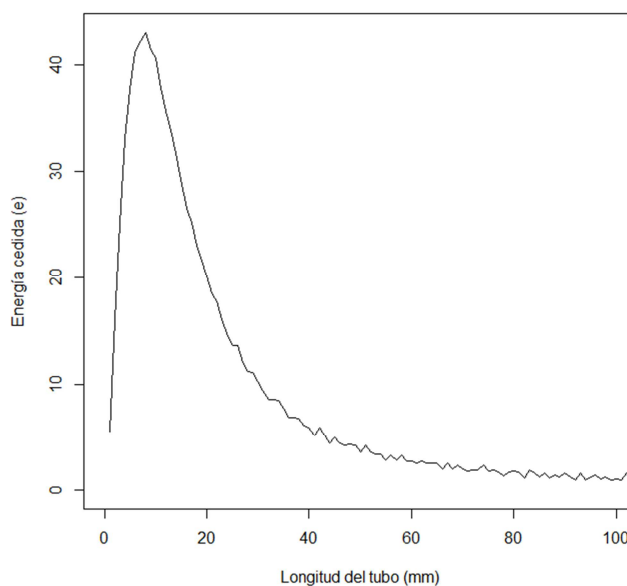


Figura 42. Energía absorbida en cada lugar del tubo

Tras el resultado de la gráfica, se puede concluir que la mayor parte de energía de la radiación incidente se pierde en la primera zona del tubo, es decir, la temperatura máxima del vidrio se encuentra en esa zona, en concreto a 8 mm del comienzo. La consecuencia de este comportamiento es la posibilidad de que el fluido caloportador ceda calor al disminuir la temperatura del vidrio a la largo del tubo.

En el **Anexo 1**, viene el lenguaje de programación utilizado para los cálculos y las gráficas.





8.3 Desplazamiento del punto de máxima temperatura

La idea que se persigue en este **desplazamiento del punto de máxima temperatura** es alejar, en la medida de lo posible, este punto de la superficie frontal del receptor. Si se consigue una distribución de temperaturas gradual, el aporte de energía del vidrio al aire será constante, aumentando su eficacia.

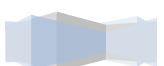
Cuando se trabaja con receptores volumétricos de vidrio se debe tener en cuenta:

- El tipo de transmisión de calor es **convección forzada**, y por tanto, se considera que la única cesión de calor del receptor al exterior es por radiación.
- La durabilidad del material: el vidrio es un material que ante **cambios de temperatura** muy **bruscos** se agrieta. Por tanto, se debe evitar la absorción abusiva de calor por parte de éstos.
- Al tratarse de un cuerpo poco absorbente, la radiación se propaga en todo el volumen. No obstante, su emisividad no es próxima a 0 a temperatura ambiente, sino que se encuentra entre 0,85-0,95 y habrá **pérdidas por radiación** por parte del vidrio.
- Si se decide cambiar la geometría del receptor, se debe tener en mente su **relación dimensional**, es decir, si se aumenta el diámetro del tubo, se deberá aumentar el espesor de sus caras.

Con objeto de obtener el desplazamiento mencionado, se han propuesto 3 posibles mejoras:

- La primera consiste en cambiar la geometría de los tubos. En concreto, se trata de **aumentar el diámetro de los tubos** para permitir que la distancia recorrida por el rayo entre reflexiones sea mayor. Esto se debe a que cada reflexión produce una pérdida de energía en el rayo y, por lo tanto, a mayor número de reflexiones, menor distancia recorrida por el rayo.
Por otro lado, si se aumenta el diámetro del vidrio, la superficie de contacto entre los dos elementos que intercambian calor disminuye y, como consecuencia, la transmisión de calor es menor.
- Otra opción es rechazar la radiación cuyo ángulo de incidencia sobre la pared interna del tubo sea pequeño. Para conseguir este propósito, se propone **orientar el receptor de vidrio hacia los heliostatos** adquiriendo una radiación con un ángulo incidente próximo a 90° y disminuir el número de reflexiones de los rayos.
- Por último, existe la posibilidad de **colocar espejos en la parte interior de la carcasa** para que la radiación que se transmite en el vidrio, se refleje hacia el cuerpo negro colocado en la parte final del receptor volumétrico de vidrio. Esta acción evita parte de las pérdidas por radiación y permite obtener al receptor una mayor radiación incidente.

Con el programa R, se ha decidido calcular los resultados para las diferentes alternativas combinadas entre sí. Los resultados son los siguientes:





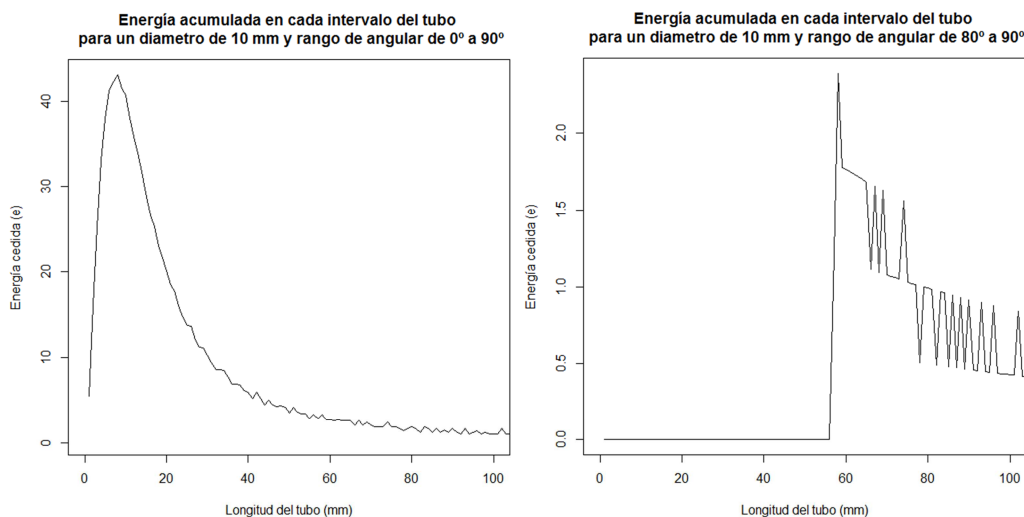
Diámetro: d(mm)	Rango angular: θ (°)	Posición: x (Tmax) (mm)
10	0-90	8
10	80-90	60
20	0-90	15
20	30-90	15
20	45-90	20
30	0-90	20
30	30-90	25
30	60-90	50
40	0-90	30
40	45-90	45
50	0-90	35
50	45-90	55
60	0-90	50
60	45-90	65

Tabla 6. Posición de la temperatura máxima del vidrio en función del diámetro y del rango angular

De las gráficas obtenidas y adjuntadas, se pueden sacar varias conclusiones:

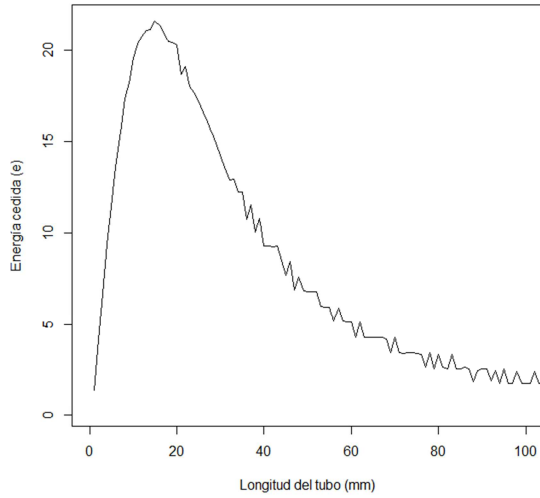
- Al **aumentar el diámetro del tubo**, el máximo de energía acumulada (el punto de temperatura máxima) se desplaza hacia la parte trasera del receptor. Además, la distribución de la energía es más suave. Estas dos características, favorecen el objetivo deseado.
- Al **disminuir el rango angular de incidencia**, se produce un corte de energía acumulada en la parte delantera del receptor, desplazando del mismo modo el punto de temperatura máxima hacia la parte trasera. Este cambio se produce porque la radiación con ángulos de incidencia bajos son los que ceden energía en la parte delantera del receptor, que es lo que no interesa. Sin embargo, la distribución ya no es suave y progresiva.

Se concluye que es necesario aumentar el diámetro de los tubos y definir un rango angular fiable pero evitando los cambios bruscos en la curva.

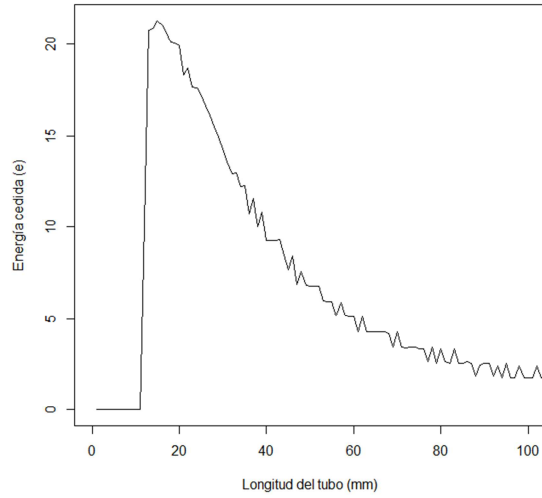




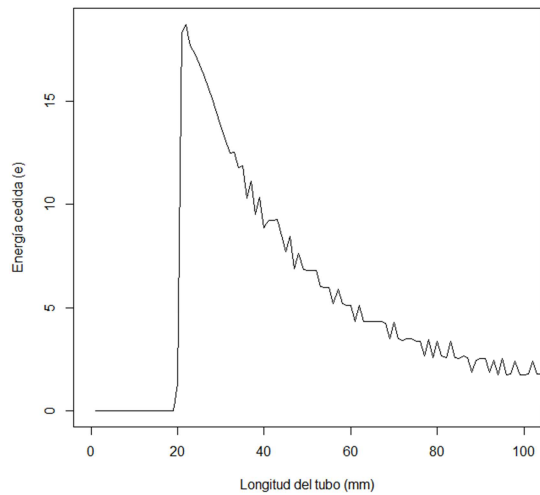
Energía acumulada en cada intervalo del tubo para un diámetro de 20 mm y rango de angular de 0° a 90°



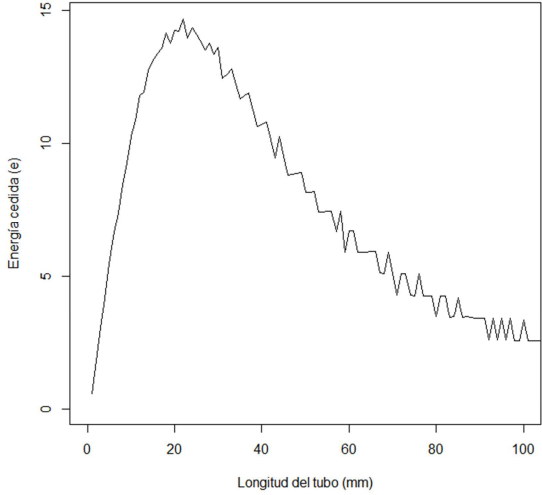
Energía acumulada en cada intervalo del tubo para un diámetro de 20 mm y rango de angular de 30° a 90°



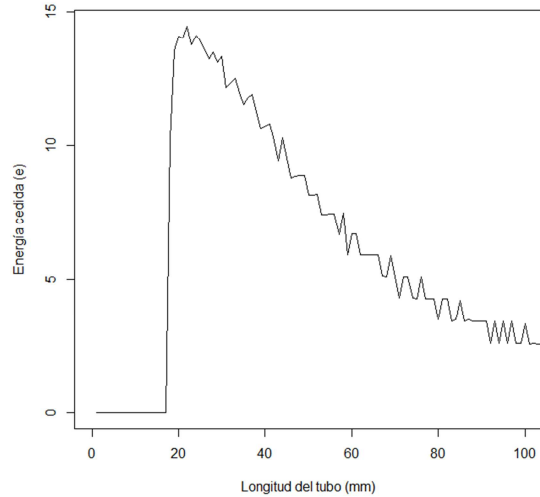
Energía acumulada en cada intervalo del tubo para un diámetro de 20 mm y rango de angular de 45° a 90°



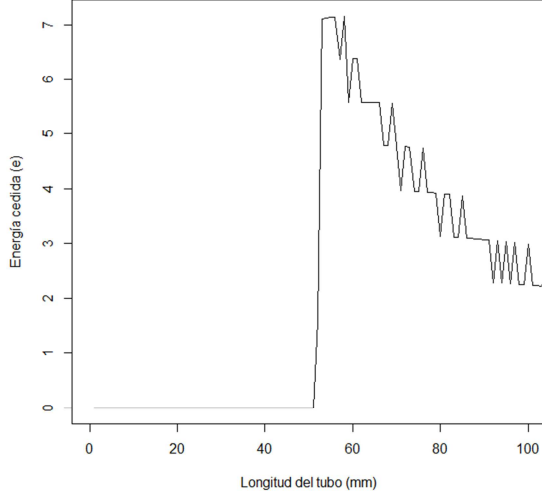
Energía acumulada en cada intervalo del tubo para un diámetro de 30 mm y rango de angular de 0° a 90°



Energía acumulada en cada intervalo del tubo para un diámetro de 30 mm y rango de angular de 30° a 90°



Energía acumulada en cada intervalo del tubo para un diámetro de 30 mm y rango de angular de 60° a 90°



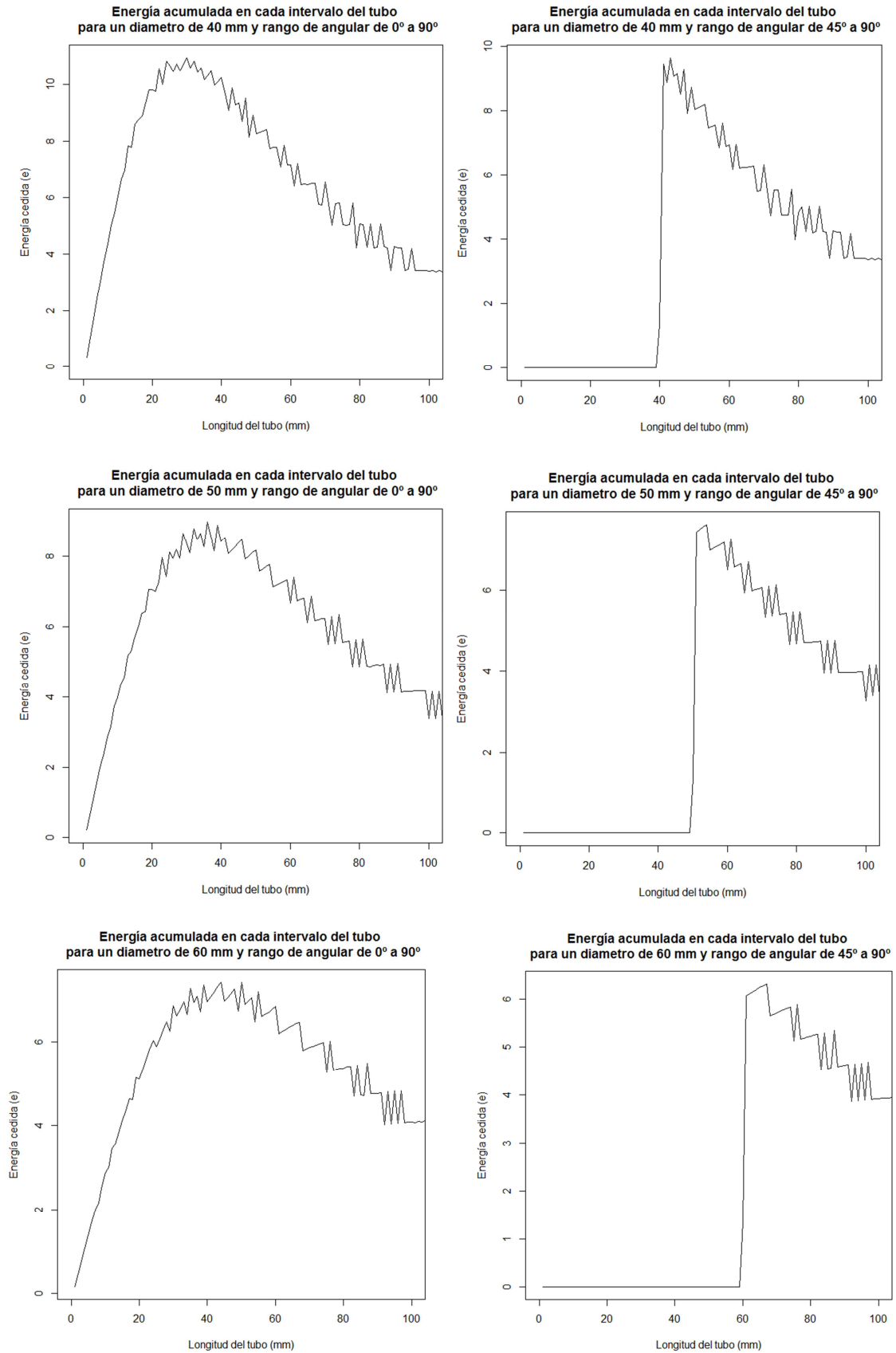


Figura 43. Gráficas de la energía absorbida para diferentes casos





9. SEGUNDO ESTUDIO: DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA

9.1 Información previa

Tonatiuh es un programa que **simula el comportamiento óptico** de los sistemas de concentración solar. Se crea en 2004 en Estados Unidos y en 2006 comienza el apoyo de CENER al programa. Actualmente, su uso es gratuito y existen varios tutoriales en su página web. La principal característica del programa es la facilidad que ofrece para simular una planta real. Existe la posibilidad de definir la posición del Sol, al igual que la distribución de los rayos solares y el número de éstos en las simulaciones. Por otra parte, **aporta**, a través de estas simulaciones, **información** detallada acerca de la **distribución de flujo de potencia** en cada superficie.

9.1.1 Comportamiento del Sol

Es importante un estudio previo del movimiento del Sol que permita entender de forma sencilla los posteriores ensayos de la memoria.

Como se percibe por experiencia propia, la radiación que se recibe del Sol varía a lo largo del día, del año y de la latitud. Si se supone a la Tierra como un cuerpo fijo, el Sol se mueve desde el trópico de Capricornio hasta el trópico de Cáncer durante un año natural. Cuando se encuentra en el trópico de Capricornio, el hemisferio Sur se encuentra en verano y la elevación del Sol es superior en él. El caso contrario se produce cuando el Sol está en el trópico de Cáncer, cuando es el hemisferio Norte, el que disfruta de mayor radiación.

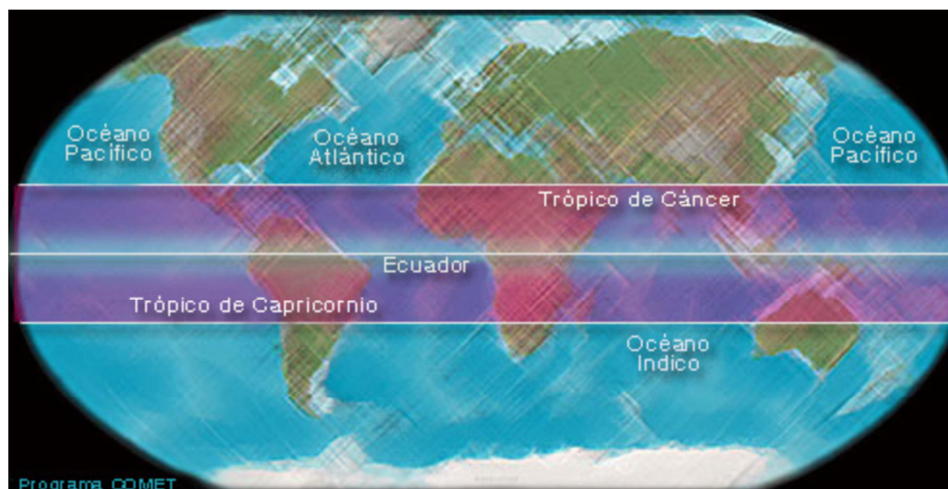


Figura 44. Situación de los trópicos y el Ecuador [20]

Si se considera que ahora es el Sol el cuerpo fijo, la Tierra gira sobre él con una cierta inclinación entre el eje perpendicular a la trayectoria de giro y el eje de rotación propio de la Tierra, a este ángulo se le llama **declinación**. Aunque la declinación es fija para todo el año, como la posición de la Tierra varía para cada estación, la incidencia directa del Sol sobre el planeta también cambia. En diciembre, el Sol incide directamente sobre el hemisferio Sur; en marzo y en septiembre, lo hace sobre el Ecuador; y en junio, incide sobre el hemisferio Norte.



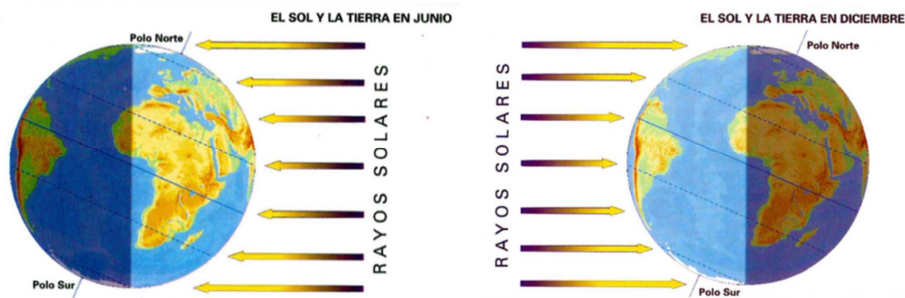


Figura 45. Incidencia del Sol en función de la estación. Declinación [21]

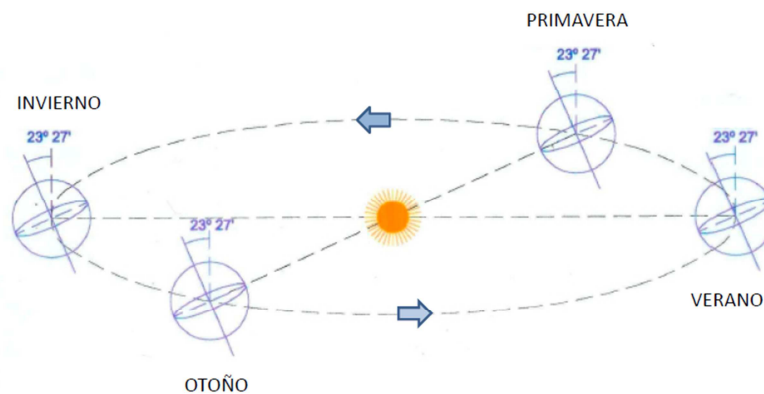
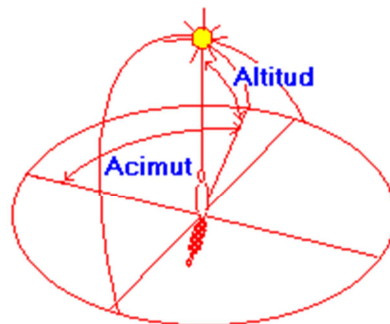


Figura 46. Movimiento de la Tierra alrededor del Sol [21]

Se utilizan dos ángulos para situar el Sol desde la Tierra, el **acimut (Ψ)** y la **elevación** o la **altura (α)**. El acimut (Ψ) es el ángulo que forma la proyección vertical del Sol sobre el punto cardinal Norte, de tal manera que, cuando $\Psi = 90^\circ$, el Sol está en el Este y, cuando $\Psi = 270^\circ$, el Sol está en el Oeste.

La **altura (α)** es el ángulo entre la superficie y el Sol. El ángulo complementario de α , es el **zenit (β)** que es el ángulo entre la normal de la superficie y el Sol. El zenit máximo está relacionado con la latitud del terreno, es decir, el zenit es la diferencia entre la latitud donde se encuentra el Sol y la latitud del lugar. Por ello, el equinoccio de primavera u otoño, el zenit máximo se corresponde con la latitud del lugar.



Ángulos de posición del sol

Figura 47. Ángulos para determinar la posición del Sol [22]





Con el programa Tonatiuh, ha sido posible **visualizar el trayecto** que realiza la radiación desde la atmósfera hasta el receptor. Como primera toma de contacto con el programa, se decide empezar con un ejemplo sencillo. De esta manera, se puede entender el recorrido de los rayos solares en el receptor.

En este ensayo, los dos tipos de elementos definidos son el **cuerpo negro**, que es cuadrado, y los **625 tubos de vidrio**. Estos cuerpos conforman el receptor volumétrico de vidrio. Se supone que no hay heliostatos, y por tanto, que los rayos solares no se concentran en un punto concreto sino que inciden directamente sobre el receptor. El estudio se centra en el cuerpo negro, que se encuentra en posición horizontal, paralelo al suelo.

La principal característica del modelo es que, las dimensiones, son en escala real, lo que ha provocado dificultades a la hora de manejar el modelo en Tonatiuh por la cantidad de tubos simulados.

9.2 Datos

- $a_{\text{receptor}} = 0,5 \text{ m}$
- $A_{\text{receptor}} = a_{\text{receptor}} \cdot a_{\text{receptor}} = 0,25 \text{ m}^2$
- $d_{\text{tubo}} = 0,02 \text{ m} = 2 \text{ cm}$
- $L_{\text{tubo}} = 0,03 \text{ m} = 3 \text{ cm}$
- $\text{Reflec}_{\text{tubo}} = 0,8$

Debido a la incapacidad de poner la reflectividad en función del ángulo de incidencia, se opta por darle un valor fijo. Por tanto, los resultados obtenidos en Tonatiuh son orientativos.

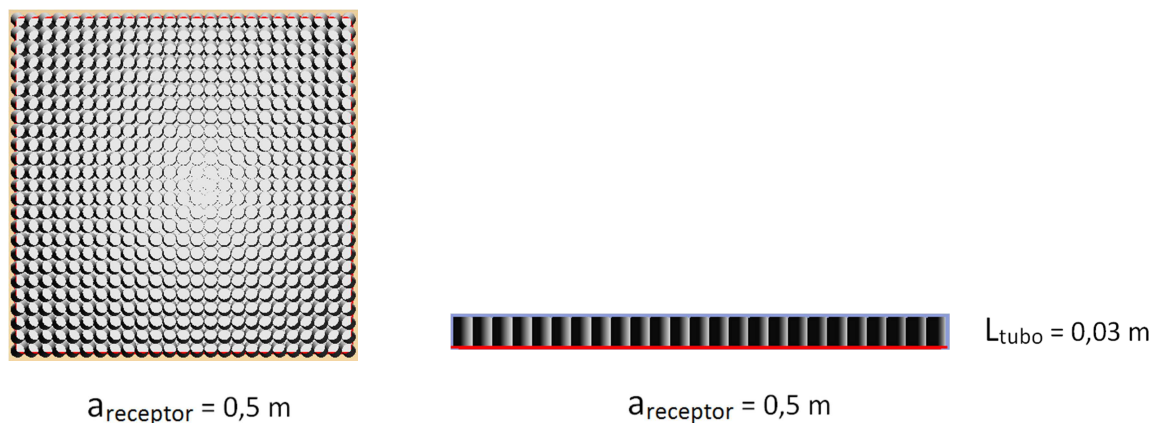


Figura 48. Dimensiones del receptor

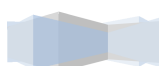
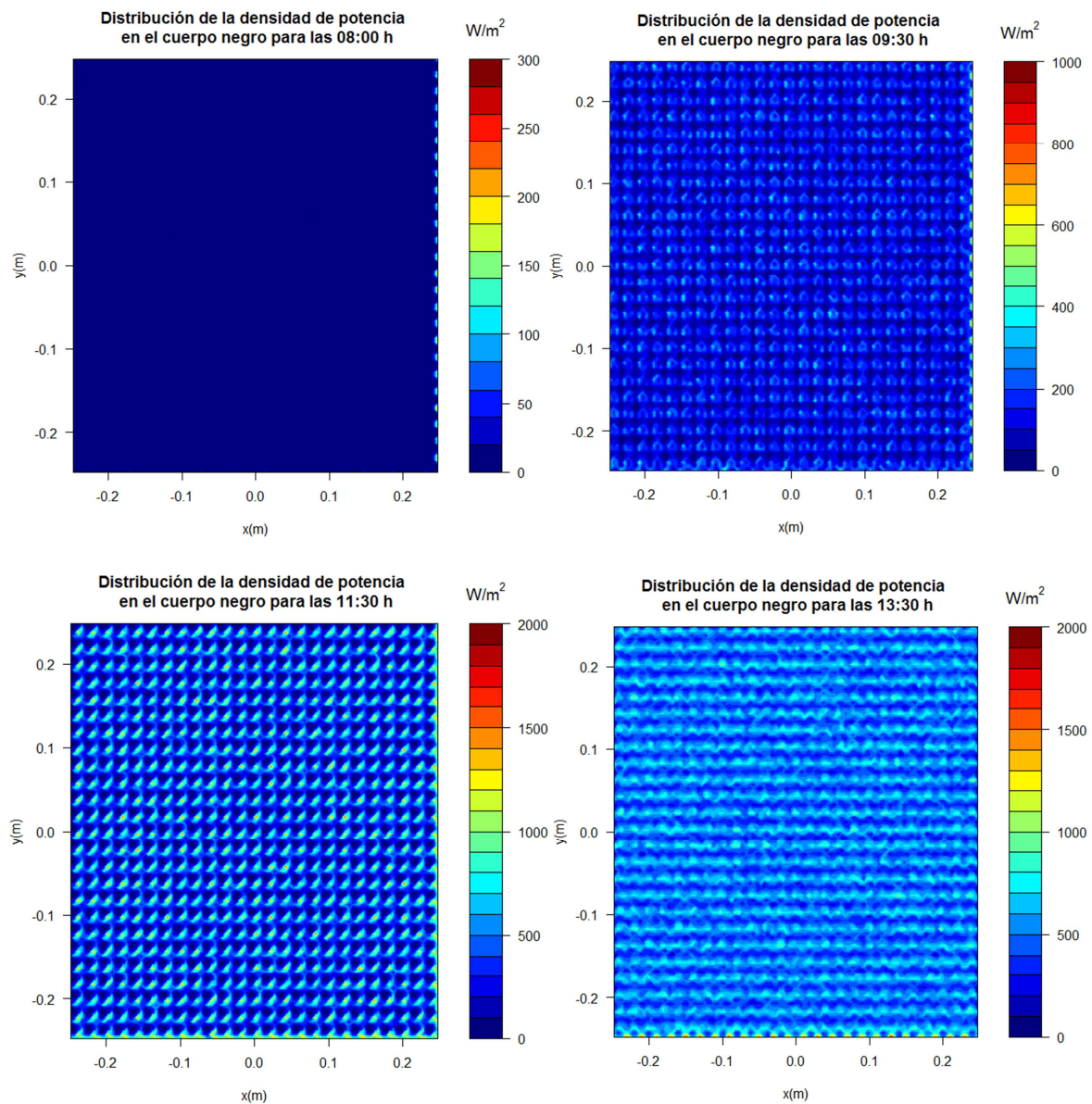




9.3 Resultados

A lo largo del año, la **elevación** del Sol y el **acimut** sufren cambios, por ello, es necesario determinar estos dos ángulos. Para el estudio se ha escogido el **equinoccio** de primavera u otoño en **Sevilla**, cuando la declinación es nula y el Sol incide perpendicularmente sobre el Ecuador.

La finalidad de la simulación es observar la **distribución de potencia absorbida** por el cuerpo negro a lo largo del día. La hora solar central coincide con las 13:30 h. Para evitar resultados simétricos no se ha seguido la misma sucesión de horas desde el amanecer al mediodía que desde el mediodía al atardecer.



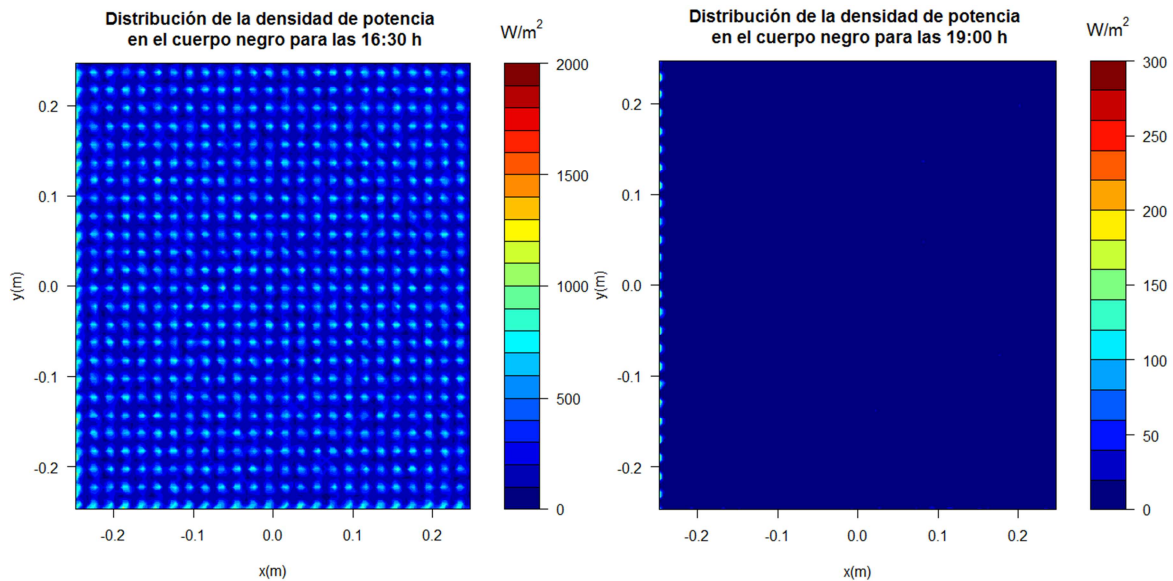


Figura 49. Distribución de potencia del cuerpo negro a lo largo del día

En todas las ilustraciones se muestra la distribución de la densidad de potencia del cuerpo negro, donde el eje y positivo corresponde al Norte y el negativo al Sur, el eje x positivo corresponde al Este y el negativo al Oeste.

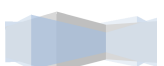
Cuando el acimut es próximo a 90° o 270° , la elevación del Sol es casi nula y se corresponde con los fenómenos del **amanecer** o del **atardecer**. Para estas posiciones, la potencia absorbida es muy baja porque el **área eficaz** es pequeña y, además, la distribución se concentra en determinados puntos por la reflexión de los rayos solares en los tubos.

La distribución y el valor de la densidad de potencia se uniformiza y aumenta, conforme se acerca la elevación del Sol a la máxima, con un acimut de 180° . Estas dos características favorecen el rendimiento térmico de la instalación, es decir, a las 13:30 del mediodía la radiación es máxima y la distribución se reparte a lo largo del cuerpo negro.

Se puede observar que la zona Sur es ligeramente más irradiada que la zona del Norte, ya que, como ya se sabe, la trayectoria del Sol desde el Este hacia el Oeste está curvada hacia el Sur. Esta curvatura cambia con la latitud y también a lo largo del año, según la declinación de la Tierra.

Por otro lado, como es habitual, durante la mañana, la potencia se concentra sobre la zona Este del cuerpo negro y, durante la tarde, ésta se concentra en la zona Oeste del cuerpo.

Tras estas simulaciones se puede concluir que para **ángulos de incidencia bajos**, la mayor parte de la energía es absorbida o transmitida y no llega al cuerpo negro. Por ello, se debe evitar este tipo de ángulo en la instalación termoeléctrica.



Se ha decidido estudiar la repercusión que tiene el hecho de variar el **diámetro de los tubos** y, por consiguiente, el número de tubos. Este estudio, se ha realizado para las 11:30 de la mañana:

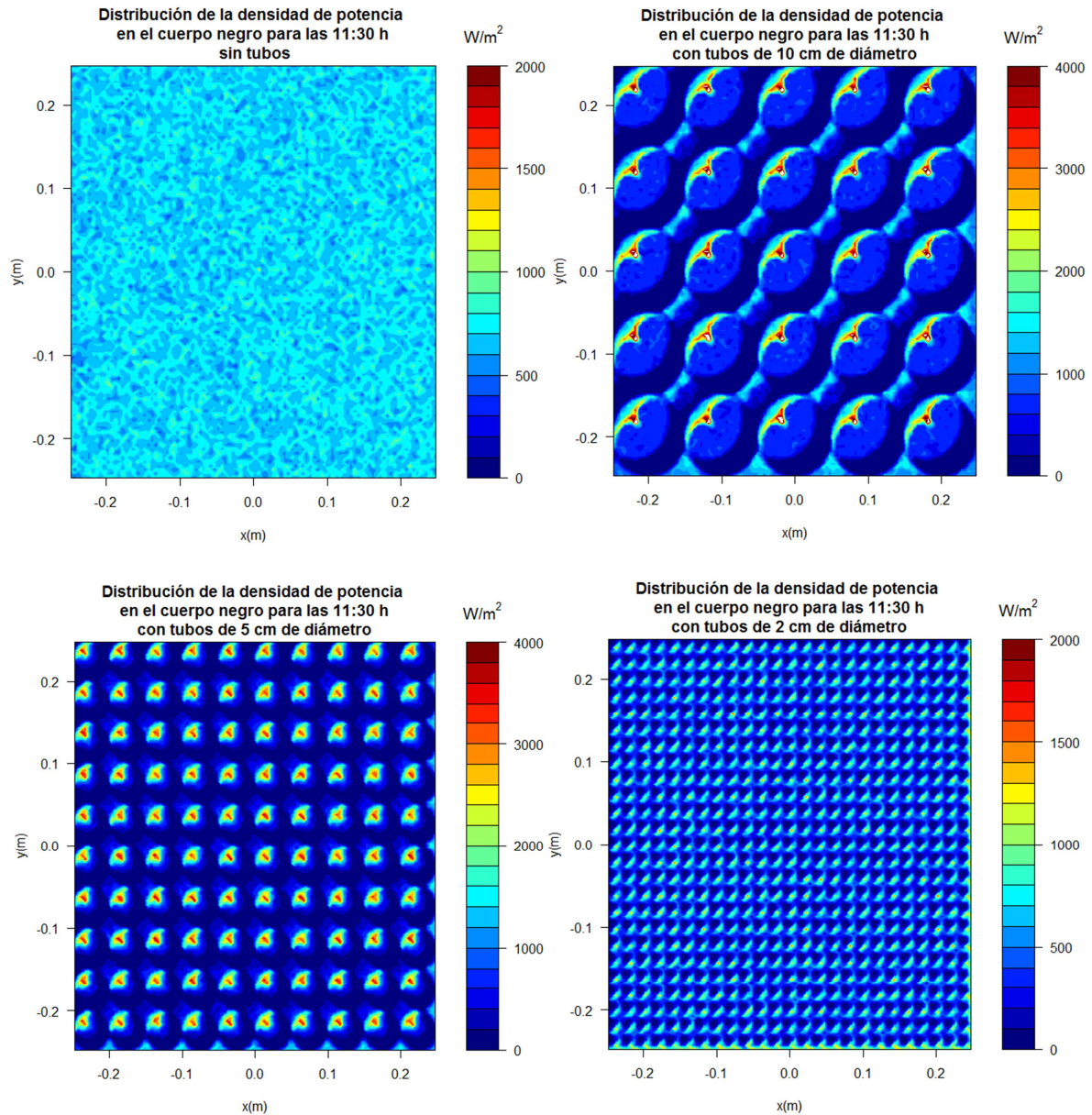
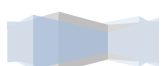


Figura 50. Distribución de potencia del cuerpo negro en función del diámetro tubular

En el caso de no poseer ningún tipo de tubo, la distribución será uniforme para cualquier posición del Sol. No obstante, uno de los objetivos que se persigue es disminuir las pérdidas térmicas, aislando el receptor del ambiente. Por ello, no es una opción.

Conforme aumenta el número de tubos, disminuye el diámetro y la distribución se concentra en **focos de temperatura** debido a las reflexiones del vidrio. Sin embargo, para un número de tubos razonablemente elevado, la distribución de la potencia es mejor al poseer diferencias de temperaturas menos elevadas. Además, el **aislamiento** es mayor y las pérdidas térmicas disminuyen. Por el contrario, las temperaturas máximas estarán próximas al exterior, lo que no interesa en el **intercambio de calor** con el fluido caloportador.



Para finalizar, otro de los factores que está implicado en la densidad de potencia es la **longitud de los tubos**. La longitud de los tubos afecta principalmente a la distribución de la densidad de potencia, cantidad de energía absorbida por el cuerpo negro y el aislamiento:

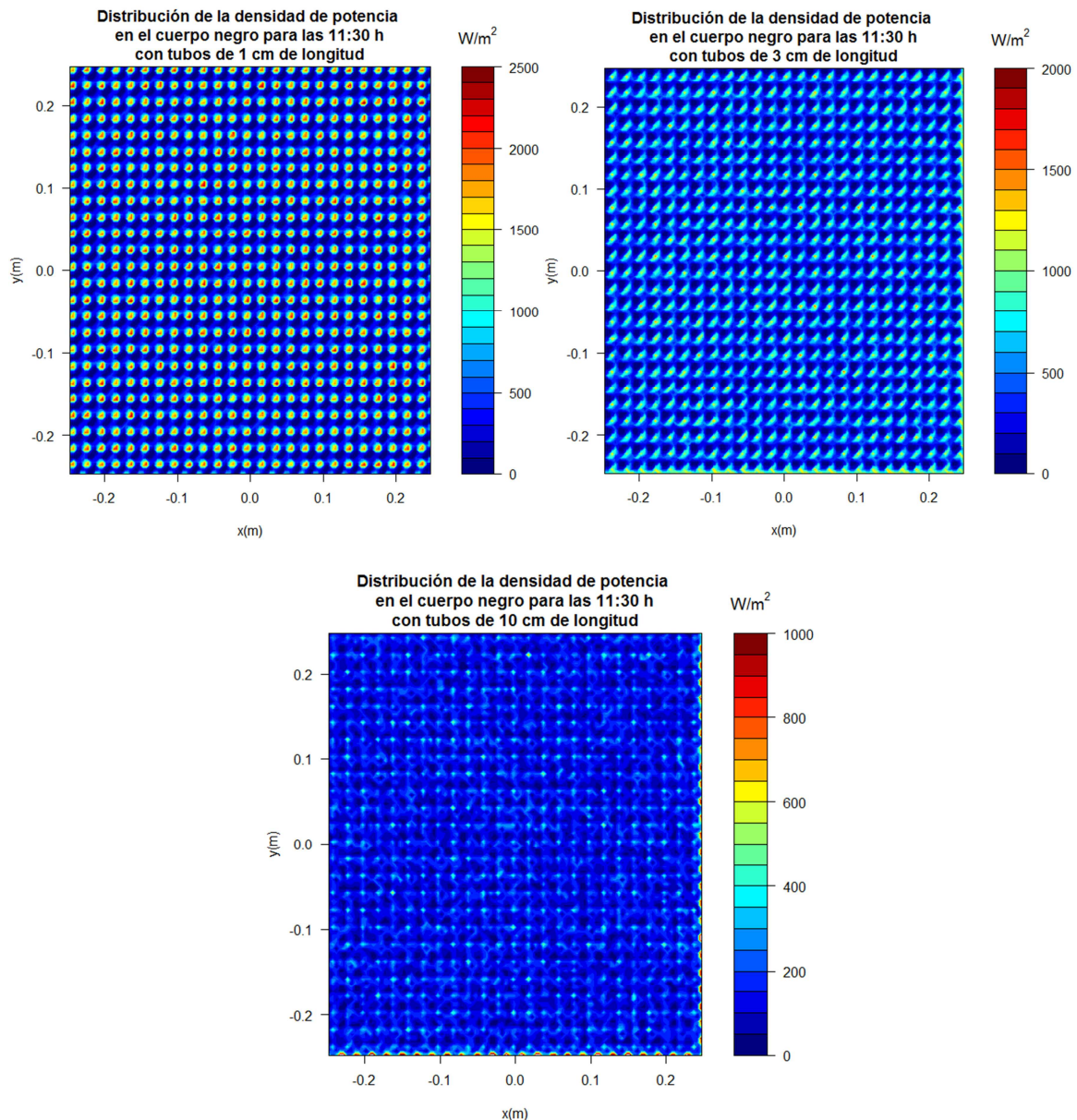


Figura 51. Distribución de potencia del cuerpo negro en función de la longitud tubular

En el caso de poseer poca longitud, se tiene el mismo efecto que aumentar el diámetro: la **distribución** es menos uniforme, la **energía absorbida** por el receptor es mayor al disminuir el número de reflexiones y las **pérdidas térmicas** aumentan al encontrarse el receptor más expuesto.

Como se ha mencionado, el aumento de longitud disminuye la potencia absorbida por el receptor, ya que cada reflexión, al no ser ideal, absorbe energía. No obstante, la radiación solar incidente que no alcanza el cuerpo negro es absorbida por el vidrio, permitiendo calentar el fluido caloportador a lo largo de su recorrido.

En este estudio, no está claro en cuál se obtiene un mejor rendimiento y comportamiento.





10. TERCER ESTUDIO: GEOMETRÍA ÓPTIMA

10.1 Datos

Una vez que se ha determinado la geometría óptima del tubo, se ha decidido que el mejor procedimiento para variar la posición de la temperatura máxima de éste es **augmentar el diámetro**, ya que, es el cambio más sencillo y que menos afecta a la potencia adquirida. No obstante, se debe tener en cuenta que, al aumentar el diámetro de los tubos, disminuye el área de contacto entre el fluido caloportador y el vidrio y, por tanto, la energía intercambiada es menor.



Figura 52. Sección del tubo [19]

Como se observa en las figuras, cuando se refiere al **diámetro (d)**, se trata de la parte exterior del tubo de vidrio. Por tanto, para los cálculos del programa de R, se ha restado a su valor dos veces el **espesor (e)**.

Lo primero que se ha realizado es el cálculo de la energía que no alcanza las caras longitudinales del tubo en Excel, es decir, la cantidad de radiación que choca contra la cara frontal del tubo y es reflejada hacia el exterior. Debido a que el objetivo que se persigue es disminuir el porcentaje de energía perdida, se ha decidido seleccionar dentro del catálogo de Kavalier y para un mismo diámetro de tubo, aquellos productos con un espesor menor:



 pcs	 kg	Code	Weight	Diameter/ mm	Wall thickness / mm	weight range kg
64	6,10	1632246100100	95	10,0 ±0,15	1,0 ±0,04	341,60
49	11,60	1632246200120	237	20,0 ±0,25	1,2 ±0,05	278,40
36	15,20	1632246300140	421	30,0 ±0,40	1,4 ±0,10	228,00
16	10,30	1632246400160	646	40,0 ±0,60	1,6 ±0,10	206,00
12	10,90	1632246500180	912	50,0 ±0,70	1,8 ±0,15	174,40
12	16,00	1632246600220	1336	60,0 ±0,90	2,2 ±0,20	224,00
4	8,10	1632246800250	2036	80,0 ±1,30	2,5 ±0,20	162,00
3	7,70	1632248000250	2561	100,0 ±1,5	2,5 ±0,2	123,2
1	4,60	1632246500300	4634	150,0 ±2,0	3,0 ±0,5	110,40
1	9,20	1632248800500	9226	180,0 ±2,2	5,0 ±0,7	138,00

Tabla 7. Catálogo de Kavalier sobre tubos de vidrio SIMAX [19]





10.2 Resultados

Con los datos de la tabla anterior, se ha calculado la **energía desechada**, en tanto por ciento, tras el choque con la cara frontal del tubo:

Diámetro exterior: d (mm)	Espesor: e (mm)	% Energía desechada
10 ± 0,15	1 ± 0,04	2,22 ± 0,11
20 ± 0,25	1,2 ± 0,05	1,40 ± 0,07
30 ± 0,40	1,4 ± 0,10	1,10 ± 0,09
40 ± 0,60	1,6 ± 0,10	0,95 ± 0,07
50 ± 0,70	1,8 ± 0,15	0,86 ± 0,08
60 ± 0,90	2,2 ± 0,20	0,87 ± 0,09
80 ± 1,30	2,5 ± 0,20	0,75 ± 0,07
100 ± 1,50	2,5 ± 0,20	0,60 ± 0,06
150 ± 2,00	3,0 ± 0,50	0,48 ± 0,09
180 ± 2,20	5,0 ± 0,70	0,67 ± 0,10

Tabla 8. Energía desechada en función del diámetro exterior y del espesor escogido

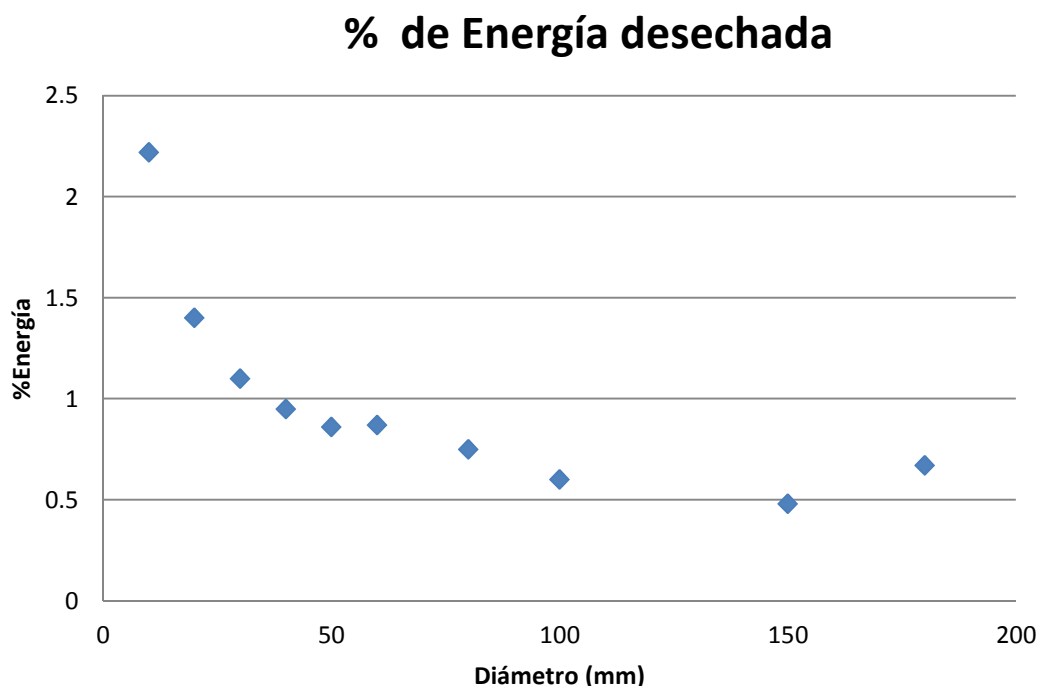


Figura 53. Gráfica de la energía desechada en función del diámetro

Como se puede observar, el diámetro de los tubos es inversamente proporcional a la energía desechada antes de incidir en las caras longitudinales de estos objetos. Este hecho se debe a que, conforme aumenta el diámetro, la **relación** $\frac{\text{Espesor (e)}}{\text{Diámetro (d)}}$ necesaria para dar estabilidad al tubo frente a fuerzas es menor y, por tanto, disminuye el porcentaje de superficie en la cara frontal. Como se





observa en la gráfica, la variación de energía desechada es muy alta entre diámetros pequeños y luego se estabiliza.

El siguiente paso ha consistido en determinar donde se sitúa el **punto con mayor temperatura** dentro del tubo. Para ello, se ha utilizado el mismo procedimiento del realizado en el primer estudio. Se ha aumentado el número de intervalos de medición para obtener gráficas más precisas:

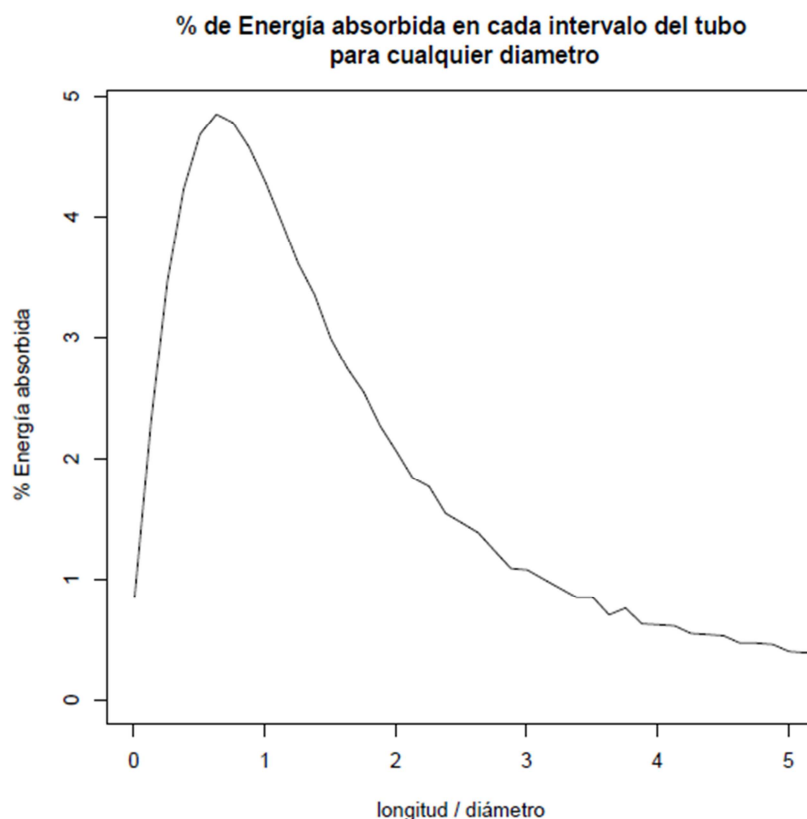


Figura 54. Gráfica estándar de la energía absorbida en un tubo

Al convertir el eje de abscisas en un **eje adimensional**, se observa que, para cualquier valor del diámetro, la curva de energía absorbida es idéntica. Se obtiene un **pico de energía absorbida** para una longitud (l) en función de un diámetro (d), y luego disminuye de forma cuadrática. Este pico se sitúa siempre en la misma posición l:

$$l = 0,7 \cdot d \quad \text{ec.19}$$

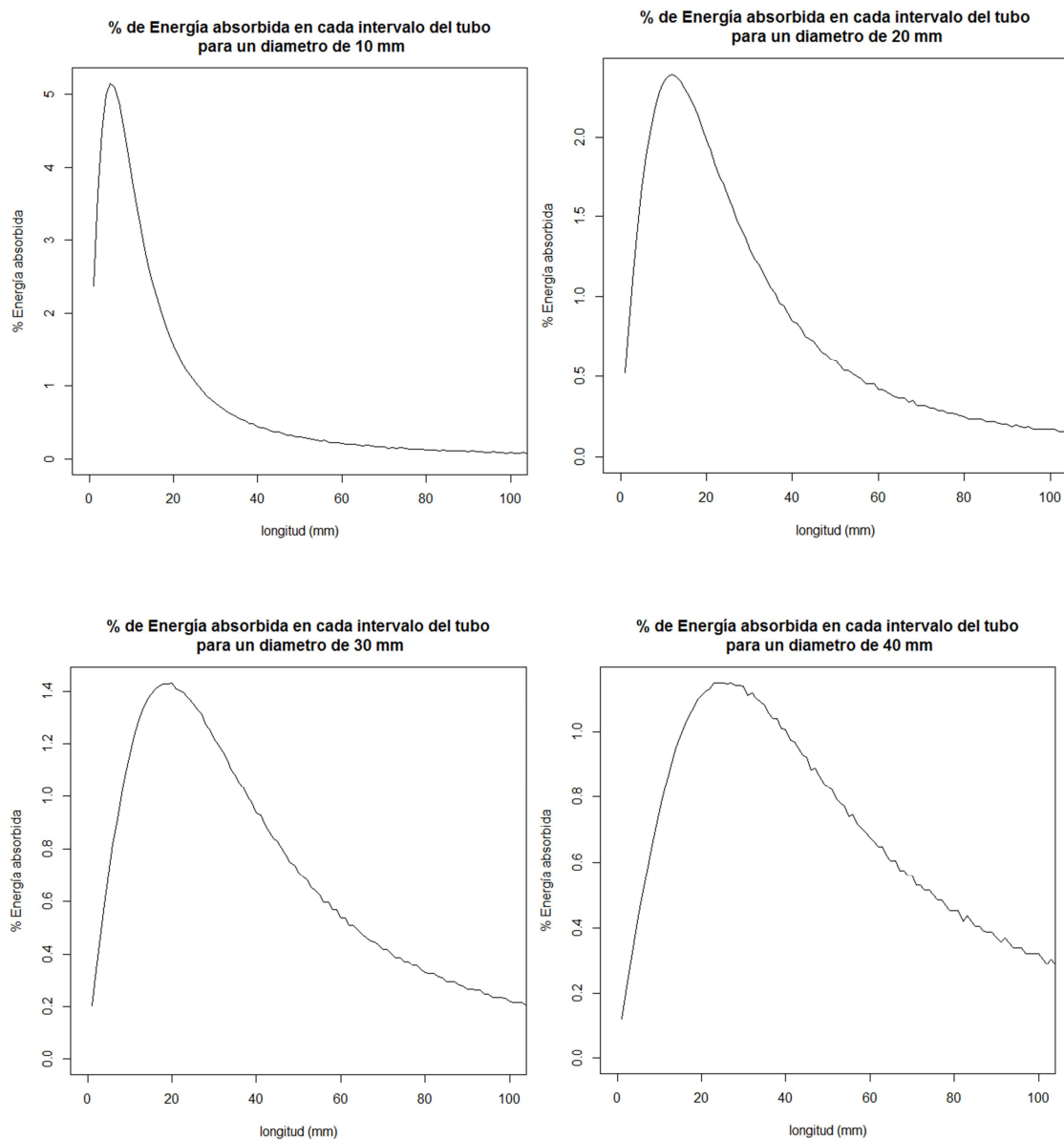
La energía absorbida o acumulada por parte de los tubos es la misma para cualquier diámetro porque se considera la **longitud del tubo infinita**. Toda la energía que no es absorbida es debido al **efecto coseno** y a la **reflectividad**, es decir, según el ángulo de incidencia, la superficie eficaz (número de rayos solares incidentes) aumenta o disminuye. Este porcentaje de energía, representa:

$$\% \text{ Energía absorbida} = \frac{\text{Energía absorbida por intervalo (e)}}{\text{Energía eficaz total (E)}} \quad \text{ec.20}$$





En el caso de que interese determinar a qué distancia se encuentra el punto con máxima temperatura, solo es necesario multiplicar el cociente de 0,7 por el diámetro del tubo. Los resultados son los siguientes:



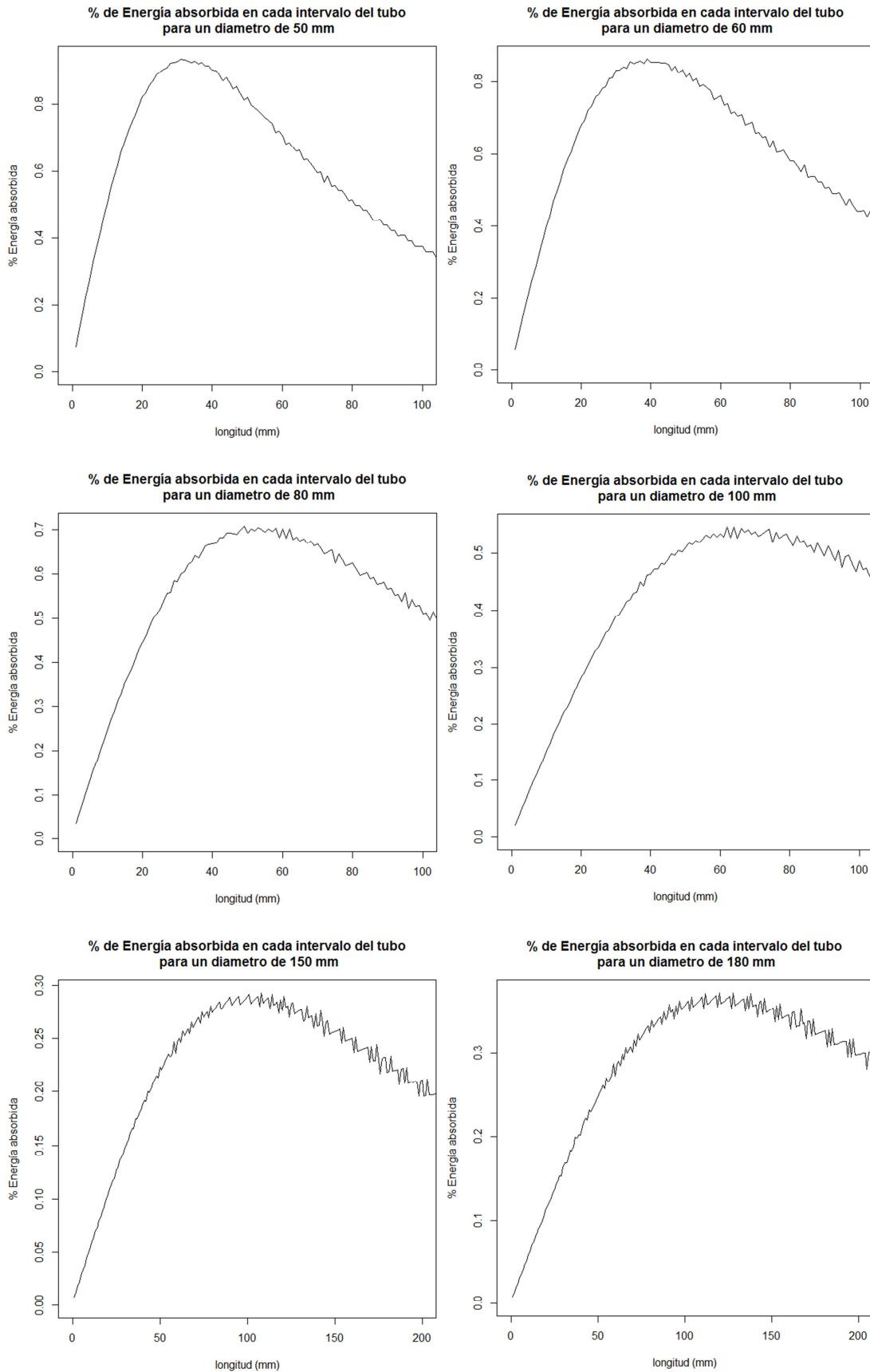


Figura 55. Distribuciones de la energía absorbida para diferentes diámetros de tubo





De esta manera, se muestra qué geometría es favorable en función del porcentaje de energía absorbida por los tubos en cada intervalo y la distribución de esta energía cedida. Interesa una **distribución de temperaturas ascendente y sin variaciones** altas hasta llegar al cuerpo negro, que se encuentra a mayor temperatura. Al aumentar el diámetro, aumenta la distancia de la temperatura máxima, a la vez que, la distribución se suaviza.

De cualquier modo, también es necesario considerar la **superficie de contacto**, debido a que es otro factor que aumenta la transmisión de calor entre el vidrio y el aire.

Tal es así que, si se coge como referencia la superficie de contacto del diámetro mayor y la posición de máxima temperatura del diámetro menor, se puede representar una gráfica con dos curvas, donde el punto de corte representa el **punto óptimo de funcionamiento**:

Punto óptimo

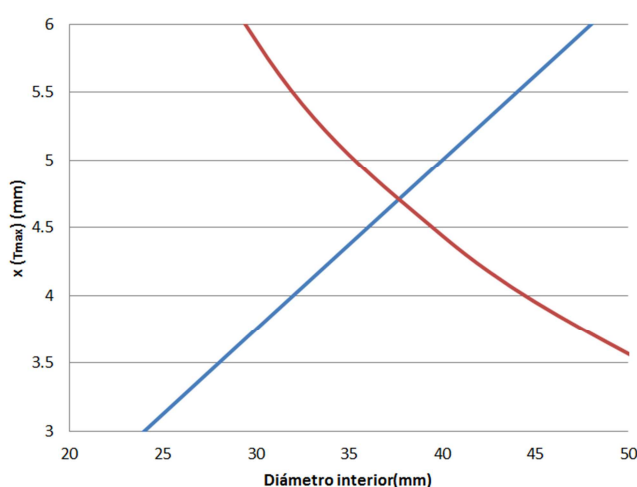
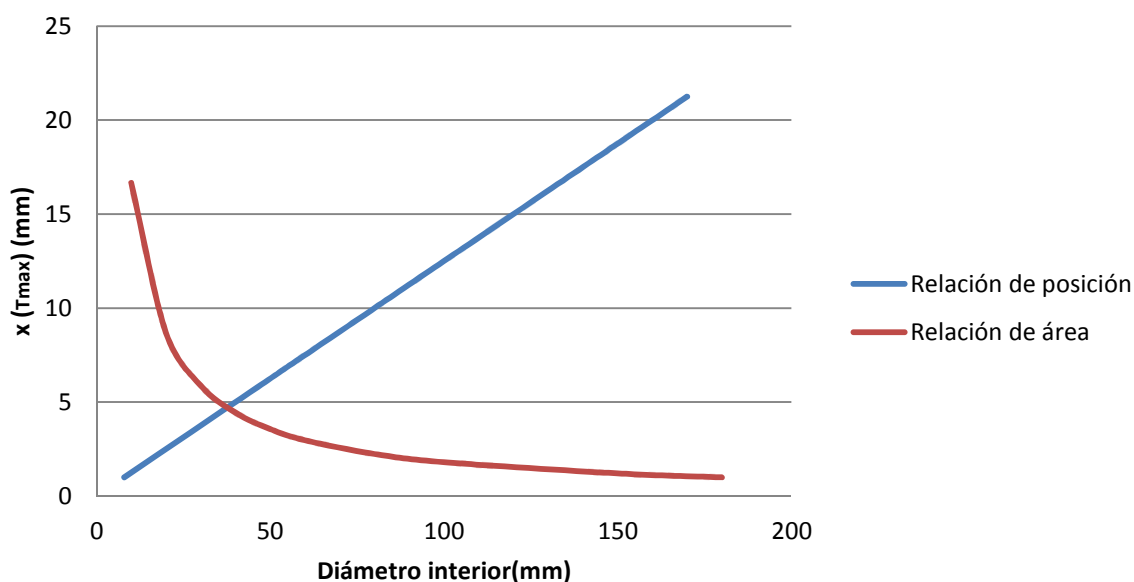


Figura 56. Representación de la curva de la relación de posición y de la curva de relación de área





Diámetro exterior: d (mm)	Diámetro interior: d _{int} (mm)	Posición: x(T _{max}) (mm)	Relación de posición	Relación de superficie de contacto
10 ± 0,15	8 ± 0,16	6 ± 0,16	1	16,66
20 ± 0,25	17,6 ± 0,25	13 ± 0,25	2,2	8,70
30 ± 0,40	27,2 ± 0,41	19 ± 0,41	3,4	5,88
40 ± 0,60	36,8 ± 0,61	26 ± 0,61	4,6	4,44
50 ± 0,70	46,4 ± 0,72	33 ± 0,72	5,8	3,56
60 ± 0,90	55,6 ± 0,92	39 ± 0,92	6,95	2,97
80 ± 1,30	75 ± 1,32	53 ± 1,32	9,375	2,24
100 ± 1,50	95 ± 1,51	67 ± 1,51	11,875	1,8
150 ± 2,00	144 ± 2,06	101 ± 2,06	18	1,21
180 ± 2,20	170 ± 2,31	120 ± 2,31	21,25	1,00

Tabla 9. Relación de posición y relación de superficie para cada diámetro

Tras los resultados obtenidos en los dos estudios, se aprecia claramente que, el **aumento de diámetro**, es beneficioso para el comportamiento del receptor volumétrico dentro de la instalación central de torre porque **aumenta la cantidad de energía utilizada** (energía no reflejada por la cara frontal de los tubos), **divide más uniformemente la energía** que absorben los tubos y **mejora la transmisión de calor** al desplazar la temperatura máxima del vidrio al interior.

Sin embargo, este aumento genera una **disminución** en la **superficie de contacto**, al variar el número de tubos utilizados, lo que conlleva un **peor comportamiento térmico** y un menor porcentaje de fluido en contacto con el material. Por otro lado, no se ha tenido en cuenta que, el incremento de diámetro, puede generar un mayor intercambio entre el ambiente y el receptor por radiación, **aumentando la pérdidas térmicas**.

Si se valoran estos dos puntos de vista por igual, se puede llegar a un valor intermedio que se corresponde con el **corte entre las dos curvas**. Ese punto será el óptimo, situado entre 30 y 40 mm de diámetro interior, es decir, el **diámetro óptimo del fabricante** es 40 mm.



		Code	Weight	Diameter/ mm	Wall thickness / mm	weight range kg
16	10,30	1632246400160	646	40,0 ±0,60	1,6 ±0,10	206,00

Tabla 7. Catálogo de Kavalier sobre tubos de vidrio SIMAX [19]





**% de Energía absorbida en cada intervalo del tubo
para un diámetro de 40 mm**

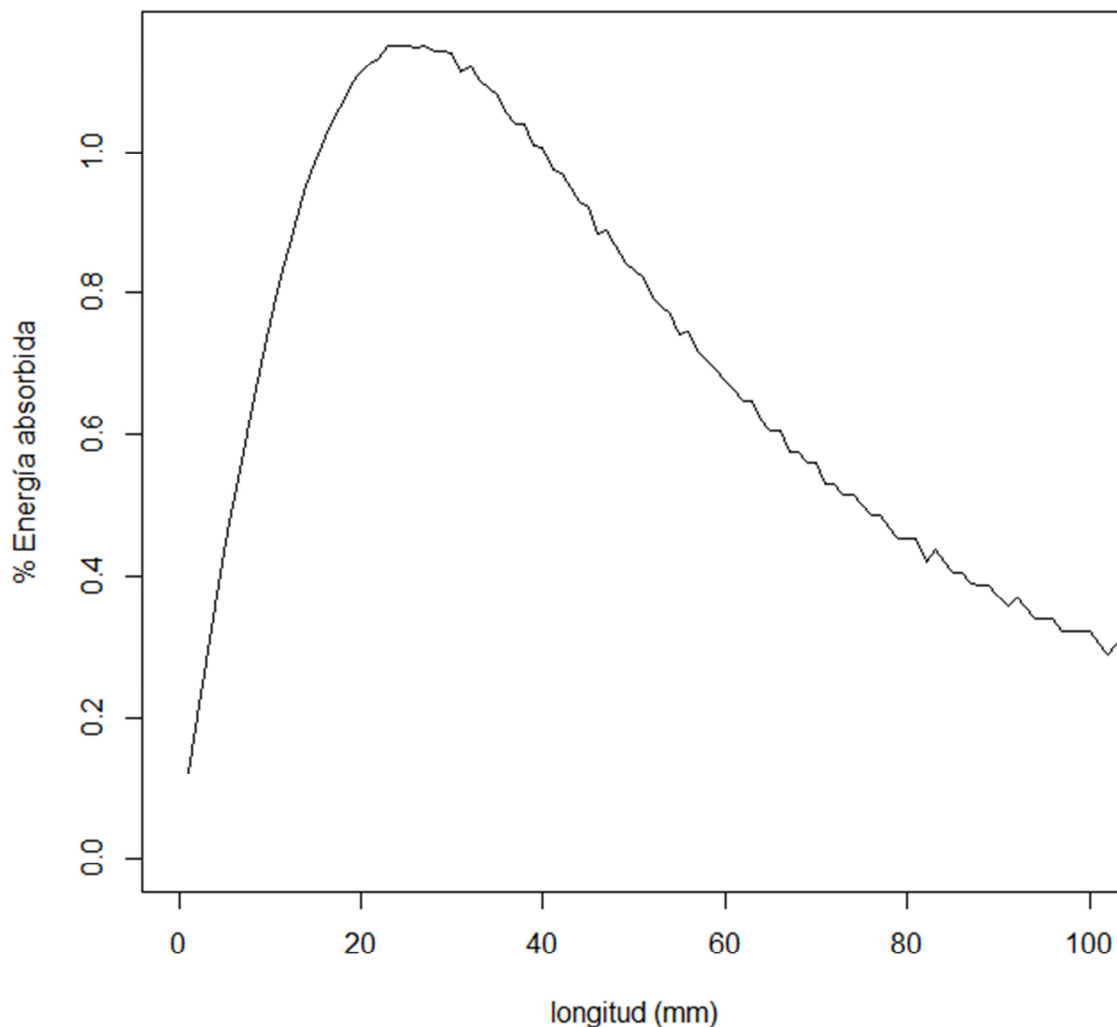


Figura 57. Distribución de la energía absorbida para la geometría escogida

Diámetro exterior: d (mm)	Diámetro interior: d_{int} (mm)	Posición: x(Tmax) (mm)	% Energía desechada	Relación de posición	Relación de superficie de contacto
40 ± 0,60	36,8 ± 0,61	26 ± 0,61	0,95 ± 0,07	4,6	4,44

Tabla 10. Característica del producto escogido





11. CUARTO ESTUDIO: PÉRDIDAS TÉRMICAS

Una vez se ha determinado la geometría de la instalación, se ha realizado un **estudio de las pérdidas térmicas** del receptor. Como ya se sabe, en el receptor no se producen **pérdidas por conducción** entre los tubos y el cuerpo negro porque existe una pequeña distancia entre ellos. Por otro lado, la convección es forzada y, por consiguiente, todas las **pérdidas por convección** proporcionan calor al fluido caloportador, es decir, no se pierde calor en vano, sino que se aporta calor al sistema para su funcionamiento. Por último, existen unas **pérdidas por radiación**, tanto por la emisión del cuerpo negro como por la emisión del vidrio.

Para calcular las pérdidas térmicas del receptor por radiación, se ha procedido a asemejar el caso real con otro imaginario e ideal. La geometría tipo escogida es un **depósito cilíndrico con dos tapas**, donde la pared del cilindro corresponde al vidrio (2) y las tapas al cuerpo negro (1) y al exterior (3). El exterior se comporta como un cuerpo negro, ya que, toda la radiación que incide sobre él es absorbida.

Se han calculado los **resultados en función del área efectiva**, que es el área total del cuerpo negro menos la suma de las áreas de los espesores de cada tubo. De esta manera, también se tiene en cuenta los huecos que se crean entre los tubos y se supone que los comportamientos de éstos son semejantes.

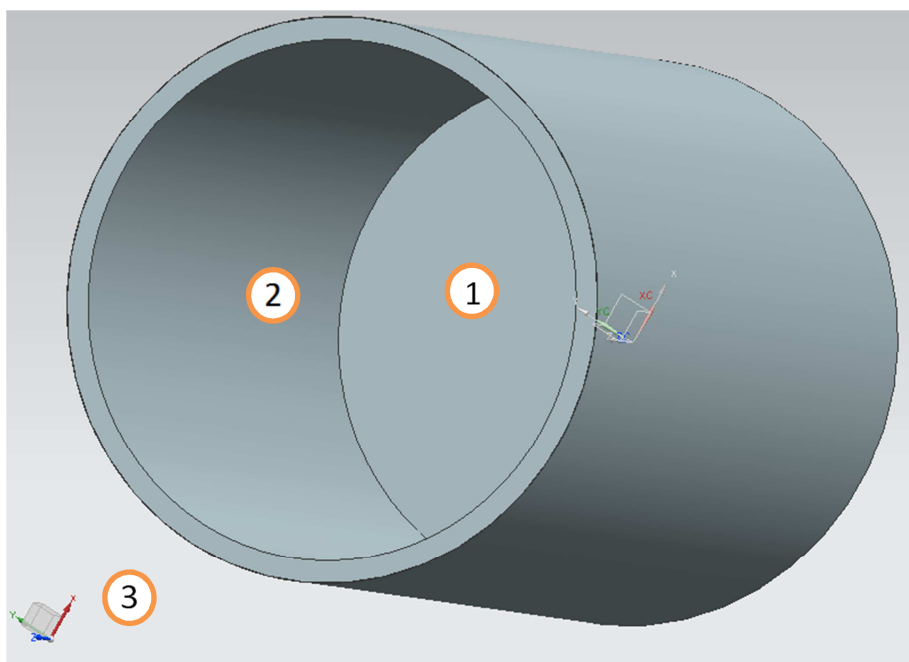


Figura 58. Geometría tipo escogida

11.1 Datos

ϵ_2 (pirex) = 0,9 ;

$\epsilon_1 = \epsilon_3 = 1$ (Cuerpo negro)

σ (constante de Boltzman) = $5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$





$$T_1 = 1000 \text{ }^\circ\text{C} = 1273 \text{ K};$$

$$T_2 = 200 \text{ }^\circ\text{C} = 473 \text{ K};$$

$$T_3 = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$$

$$d_{\text{ext}} = 40 \text{ mm} = 0,04 \text{ m};$$

$$d_{\text{int}} = 36,8 \text{ mm} = 0,037 \text{ m};$$

$$D = 2,534 \text{ m}$$

$$L_{\text{tubo}} = 50 \text{ mm} = 0,05 \text{ m};$$

$$N_t \text{ (número de tubos)} = 3535$$

$$A_1 = A_3;$$

$$A_2 = (4 \cdot L_{\text{tubo}} / d_{\text{int}}) \cdot A_1;$$

$$A_T = (\pi \cdot D^2) / 4 = 5,043 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{espesor_hipótesis}} = (\pi \cdot (d_{\text{ext}}^2 - d_{\text{int}}^2)) / 4 = 1,93 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_e \text{ (área efectiva)} = A_T - A_{\text{espesor_hipótesis}} \cdot N = 4,361 \text{ m}^2$$

11.2 Resultados

El **procedimiento** para el cálculo de las pérdidas térmicas por radiación ha sido el siguiente:

1. Se calcula el **factor de forma** de los diferentes cuerpos:

$$F_{13} + F_{12} = 1 \quad \text{ec.21}$$

[24] Pág.281 → FIGURA 8.13 Factor de forma de radiación para radiación entre discos paralelos:

$$\text{Cociente } d/x = 36,8 / 50 = 0,736$$

$$F_{13} = 0,067$$

$$F_{12} = 1 - F_{13} = 1 - 0,067 = 0,933$$

$$F_{21} + F_{22} + F_{23} = 1 \quad \text{ec.22}$$

$$F_{21} = F_{23} = (A_1/A_2) \cdot F_{12} = 0,172$$

$$F_{22} = 1 - 2F_{21} = 0,657$$

2. Se realiza un esquema del **comportamiento del receptor**. Este comportamiento térmico funciona como un circuito eléctrico con resistencias:

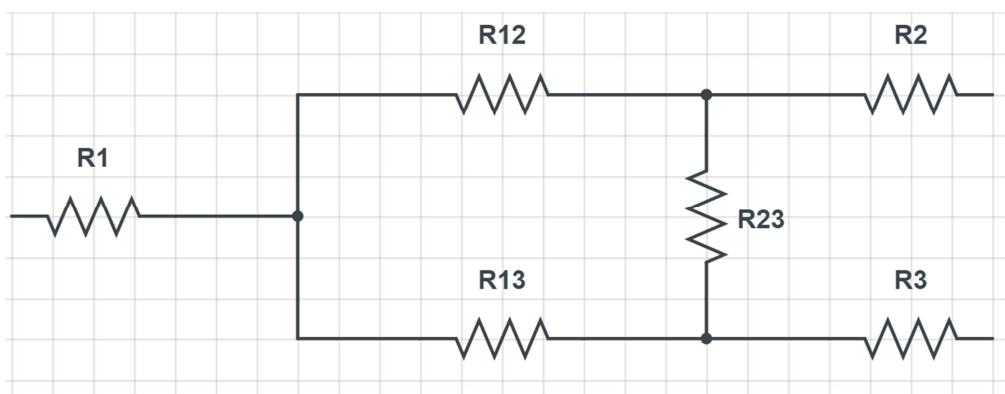


Figura 59. Circuito eléctrico del sistema





$$\begin{aligned} R_{12} &= 1 / (A_1 \cdot F_{12}) = 1,071 / A_1 \\ R_{13} &= 1 / (A_1 \cdot F_{13}) = 15 / A_1 \end{aligned} \quad \text{ec.23}$$

$$\begin{aligned} R_2 &= (1 - \epsilon_2) / (\epsilon_2 \cdot A_2) = 0,020 / A_1 \\ R_{23} &= 1 / (A_2 \cdot F_{23}) = 1,072 / A_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{b1} = J_1 &= \sigma \cdot T_1^4 = 148900,677 \text{ W m}^{-2} \\ E_{b2} &= \sigma \cdot T_2^4 = 2838,100 \text{ W m}^{-2} \\ E_{b3} = J_3 &= \sigma \cdot T_3^4 = 417,882 \text{ W m}^{-2} \end{aligned} \quad \text{ec.24}$$

3. Se calcula el **calor intercambiado** entre los cuerpos:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 \quad \text{ec.25}$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_{12} + \dot{Q}_{13} \quad \text{ec.26}$$

$$\dot{Q}_{12} = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_{23} \quad \text{ec.27}$$

$$\dot{Q}_3 = \dot{Q}_{13} + \dot{Q}_{23} \quad \text{ec.28}$$

$$\dot{Q}_{13} = (J_1 - J_3) / R_{13} = (E_{b1} - E_{b3}) / R_{13} = 9898,853 / A_1 \text{ W m}^{-2} \quad \text{ec.29}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{12} = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_{23} \rightarrow (J_1 - J_2) / R_{12} &= (J_2 - E_{b2}) / R_{13} + (J_2 - J_3) / R_{23} \rightarrow \\ \rightarrow J_2 &= [J_1 \cdot R_2 \cdot R_{23} + E_{b2} \cdot R_{12} \cdot R_{23} + J_3 \cdot R_{12} \cdot R_2] / [R_2 \cdot R_{23} + R_{12} \cdot R_{23} + R_{12} \cdot R_2] = 5478,254 \text{ W m}^{-2} \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_2 = (J_2 - E_{b2}) / R_2 = 129419,338 / A_1 \text{ W m}^{-2} \quad \text{ec.30}$$

$$\dot{Q}_{12} = (J_1 - J_2) / R_{12} = 133864,482 / A_1 \text{ W m}^{-2} \quad \text{ec.31}$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_{12} + \dot{Q}_{13} = 143763,336 / A_1 \text{ W m}^{-2}$$

$$\dot{Q}_3 = \dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 = 14343,997 / A_1 \text{ W m}^{-2}$$

$$\dot{Q}_{23} = (J_2 - J_3) / R_{23} = 4722,274 / A_1 \text{ W m}^{-2} \quad \text{ec.32}$$

Por último, se supone que A_1 es toda el área efectiva del receptor, es decir, que el espacio entre los huecos de los tubos tiene el mismo comportamiento que los propios tubos:

$$A_1 = A_e = 4,361 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}_{13} = 43166,918 \text{ W} = 43,2 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_2 = 564371,850 \text{ W} = 564,4 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{12} = 583756,235 \text{ W} = 583,8 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_{12} + \dot{Q}_{13} = 626923,154 \text{ W} = 626,9 \text{ kW}$$





$$\dot{Q}_3 = \dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 = 62551,304 \text{ W} = 62,6 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{23} = 20592,891 \text{ W} = 20,6 \text{ kW}$$

La **potencia total perdida** por el receptor al exterior es $\dot{Q}_3 = 62,6 \text{ kW}$

11.3 Receptor sin tubos

Las pérdidas térmicas por radiación para un receptor volumétrico con forma de espuma, es decir, en el caso de no tener tubos, son muy sencillas de calcular. Con los datos del anterior apartado, se ha aplicado la ecuación de la radiación para el cuerpo negro:

$$\dot{Q} = \varepsilon A_{\text{rec}} \sigma (T_z^4 - T_0^4) \quad \text{ec.3}$$

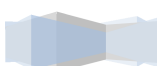
$$\dot{Q}_3 = 1 \cdot 5,043 \cdot 5,670 \cdot 10^{-8} \cdot (1273^4 - 293^4) = 748823,108 \text{ W} = 748,8 \text{ kW}$$

La **potencia total perdida** por el receptor al exterior es $\dot{Q}_3 = 748,8 \text{ kW}$

En el caso de poseer un cuerpo negro como receptor, las pérdidas térmicas por radiación son 10 veces más para las mismas dimensiones. Asimismo, la transferencia de calor se producirá de forma brusca e ineficaz al interaccionar el fluido caloportador y el receptor a lo largo del receptor con un salto térmico descendente.

En este estudio, se puede apreciar claramente que una de las mayores **ventajas** del receptor volumétrico de vidrio es la posibilidad de **trabajar con temperaturas elevadas**, puesto que, las pérdidas térmicas son muchísimo menores que en los demás receptores volumétricos. Este comportamiento, implica un **mayor rendimiento térmico**.

En el **Anexo 2**, se puede ver el programa utilizado para los cálculos del estudio.





12. QUINTO ESTUDIO: INSTALACIÓN DE SISTEMA DE TORRE

Una vez elaborados diferentes estudios para determinar la geometría final del receptor volumétrico de vidrio, se ha **creado una instalación** sencilla en Tonatiuh para observar su funcionamiento desde un punto de vista gráfico. Se debe recordar que este estudio persigue la obtención de un análisis de la radiación incidente sobre el receptor a lo largo de un día. Como ya se ha mencionado en el anterior estudio de Tonatiuh, la reflectividad en Tonatiuh es un valor fijo y, como consecuencia, se pretende calcular una **estimación** del comportamiento de la instalación.

El diseño de este pequeño sistema de Torre con receptor central no ha sido fácil. En primer lugar, se ha dispuesto un receptor con **3535 tubos distribuidos en 2 tipos de filas** que se repiten intercaladamente, lo que disminuye al mínimo la distancia entre tubos. Esta geometría, contiene una **carcasa cilíndrica** para aislar el receptor del exterior.

En segundo lugar, se ha colocado un **cuerpo negro** de las mismas dimensiones que la carcasa en la parte posterior a los tubos. Acto seguido, se ha creado una **torre** con una altura relativamente pequeña porque, en los receptores volumétricos de vidrio, el **ángulo de incidencia** cobra una importancia mayor al ser el responsable de la distribución de temperaturas en los tubos.

Por último, se ha creado el **campo de heliostatos**. Como ya se sabe, el ángulo de incidencia es muy importante para estos receptores y como el receptor es plano y no cilíndrico, se ha decidido que el campo de heliostatos debe ser de distribución Norte. Este paso ha sido el más complicado, ya que, ha sido necesario diseñar uno propio. Este hecho se debe a que los demás campos de heliostatos de torre están diseñados para otro tipo de receptores volumétricos, en los cuales el ángulo de incidencia tiene un papel secundario. Además, han sido necesarios varios ensayos para evitar grandes pérdidas por bloqueos o sombras.

Para determinar la **posición del Sol**, se ha escogido como ejemplo el día 21 de Marzo de 2015 en **Sevilla**, cuando el Sol se encuentra en el Ecuador al ser el equinoccio de primavera. Por otro lado, para obtener resultados fiables, las simulaciones han contenido 1000000 o 10000000 de rayos, en función de la precisión necesaria en cada caso.

12.1 Datos

$$h_{\text{Torre}} = 62,5 \text{ m};$$

$$h_{\text{Receptor}} = 60 \text{ m};$$

$$N_t = 3535 \text{ tubos};$$

$$d_{\text{Tubo}} = 0,04 \text{ m};$$

$$D_{\text{Carcasa}} = 2,534 \text{ m};$$

$$N_{\text{Heliostatos}} = 15 \times 30 = 450 \text{ heliostatos};$$

$$A_{\text{Heliostato}} = 30 \text{ m}^2;$$

En este apartado, se han definido los datos más relevantes, los demás se encuentran en los scripts del programa Tonatiuh junto con sus representaciones en R (**Anexo 3**).



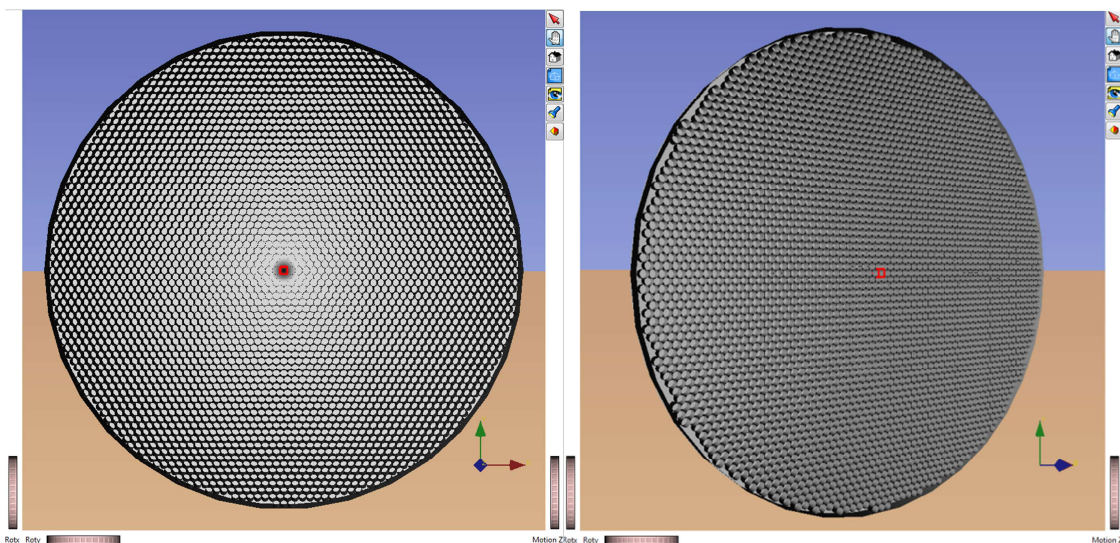
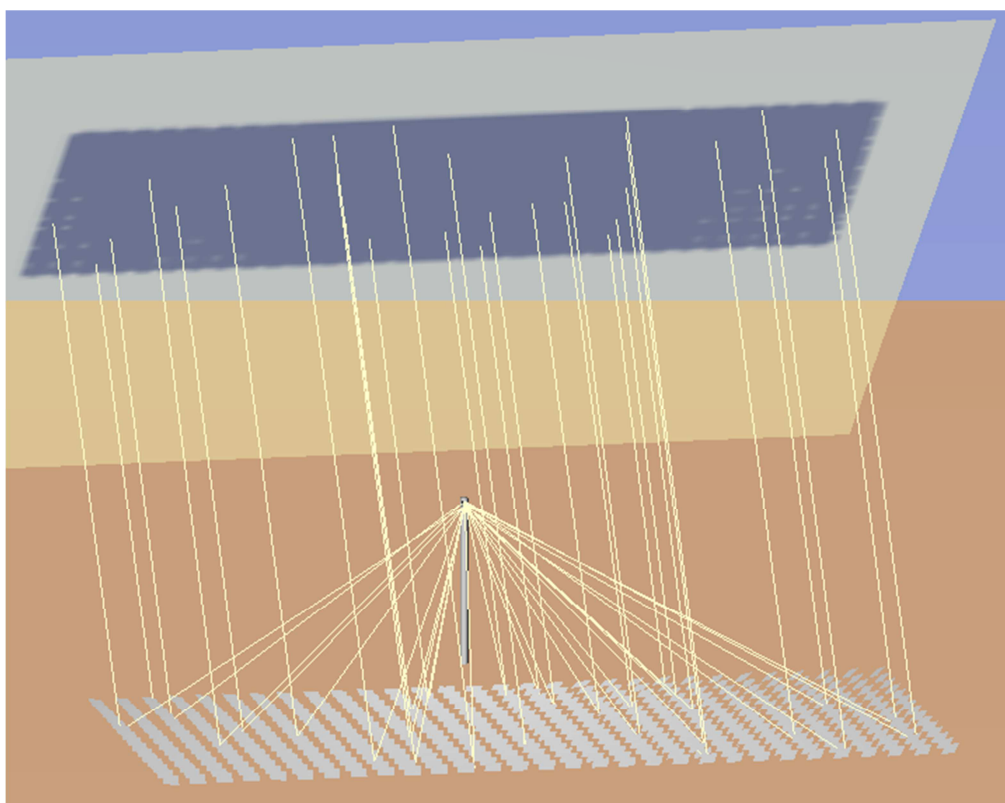


Figura 60. Receptor volumétrico de vidrio en Tonatiuh



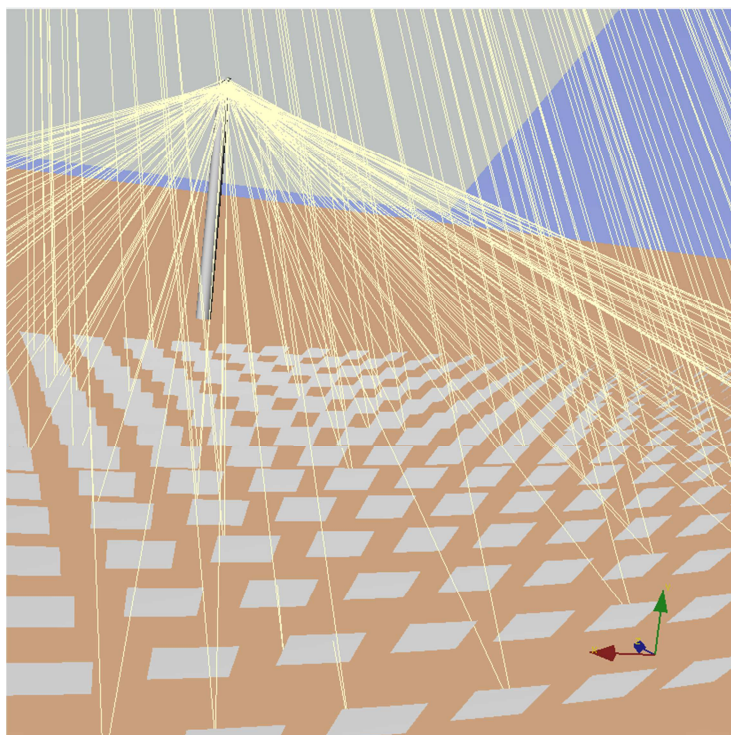


Figura 61. Simulación de la radiación solar en la instalación

12.2 Resultados

Se ha decidido estudiar únicamente dos cuerpos: el **cuerpo negro**, que se encuentra en la parte posterior de los tubos y que **absorbe la mayor parte de la radiación**, y el **tubo central**, donde, idealmente, se concentra la **radiación procedente de los heliostatos** y, por tanto, el tubo con mayor número de rayos de incidencia.

Las gráficas obtenidas plasman la potencia que incide sobre la superficie, no la potencia absorbida. En el caso del cuerpo negro, la potencia incidente y la absorbida es la misma porque se supone que su comportamiento en la absorción es ideal.

12.2.1 Cuerpo Negro

La **distribución de potencia** del cuerpo negro a lo largo de un día no es la misma. La razón de ello es puramente **geométrica**. En las horas centrales del día, el Sol se eleva irradiando con un menor ángulo de incidencia sobre los heliostatos. Por tanto, se consigue una **superficie efectiva** mayor en los heliostatos, que crea a su vez una mayor radiación. Este efecto es perceptible en las escalas de colores de los gráficos, cuyos números aumentan al mediodía.

Del mismo modo, el **efecto coseno** para cada heliostato es diferente porque depende del ángulo que se forma entre la torre y el Sol desde el heliostato. A mayor ángulo, el efecto coseno aumenta y la radiación disminuye. Por otro lado, en el amanecer y en el atardecer, los heliostatos con un mayor ángulo de incidencia distorsionan, debido a los bloqueos y a las sombras, la distribución de la radiación, desplazando la potencia al Oeste (amanecer) o al Este (atardecer).



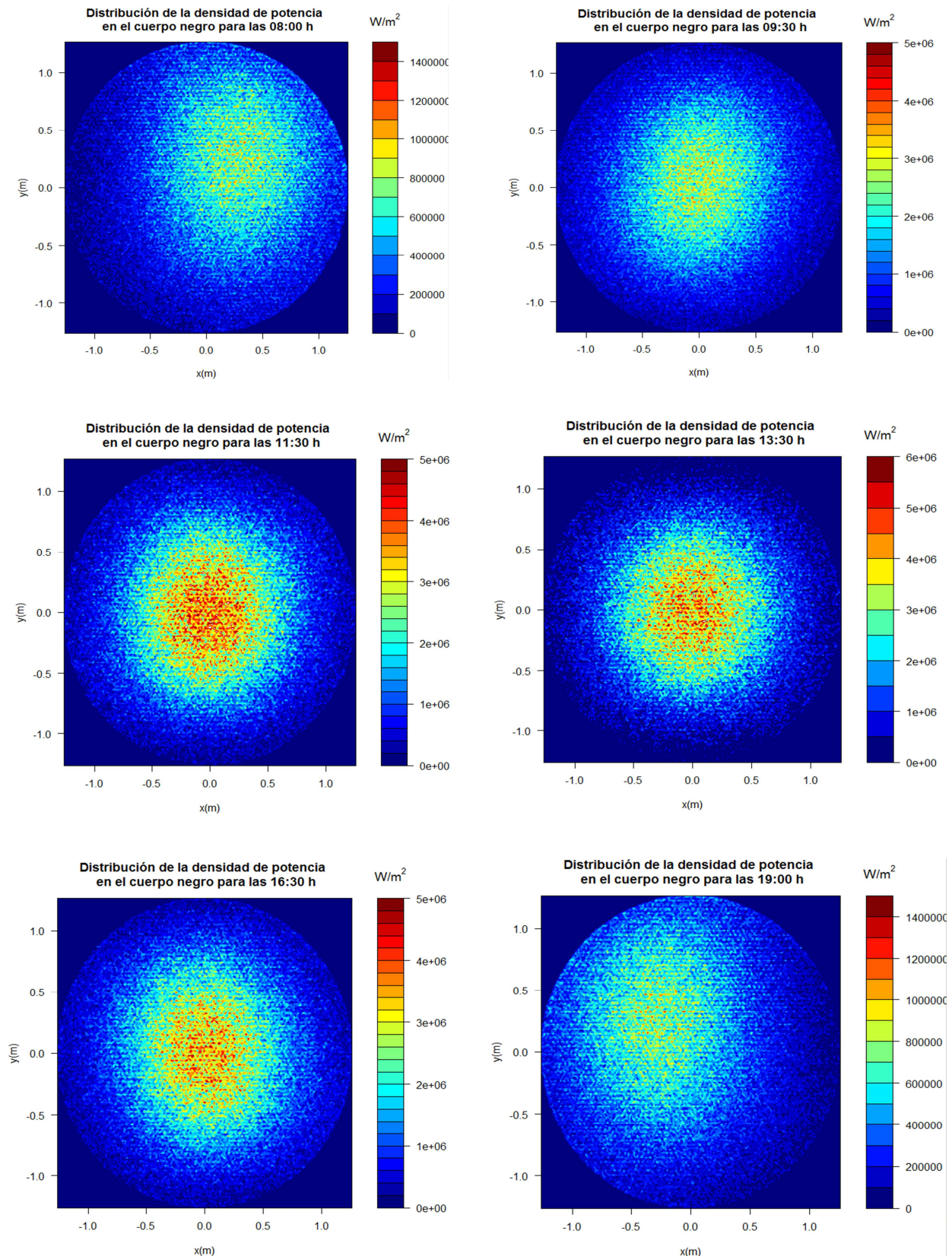
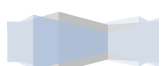


Figura 62. Distribución de la densidad de potencia en el cuerpo negro para diferentes horas del día



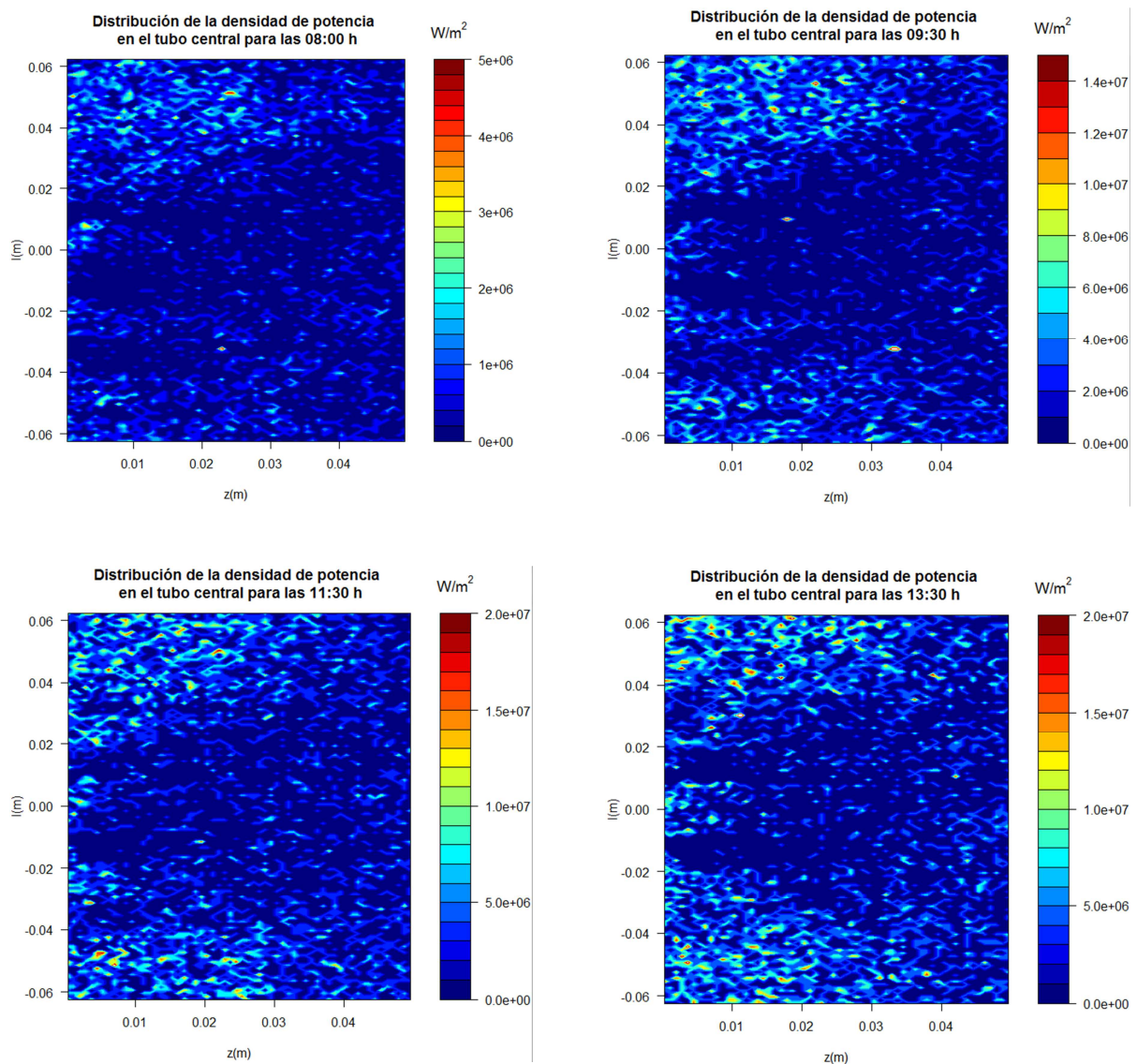


12.2.2 Tubo Central

La otra superficie escogida para el estudio de la potencia es la cara lateral del tubo central. Para su representación, se ha optado por transformar la superficie de tres a dos dimensiones. El eje z es la longitud del tubo y el eje l el perímetro de la circunferencia. En la zona central se encuentra la parte inferior del tubo y en los extremos la parte superior.

Al igual que en el anterior caso, la **potencia incidente** aumenta en las horas centrales del día. Esta potencia se concentra principalmente en la parte superior del tubo y a una distancia próxima al lugar de incidencia. Según el ángulo de incidencia, la radiación incidente será reflejada o no.

Cabe mencionar que, dependiendo de la posición del Sol, la distribución de potencia varía. A la mañana, la radiación es mayor en la parte superior situada al Este porque los heliostatos situados al Oeste de la torre tienen una superficie eficaz mayor e irradian más. A la tarde, el efecto es el contrario.



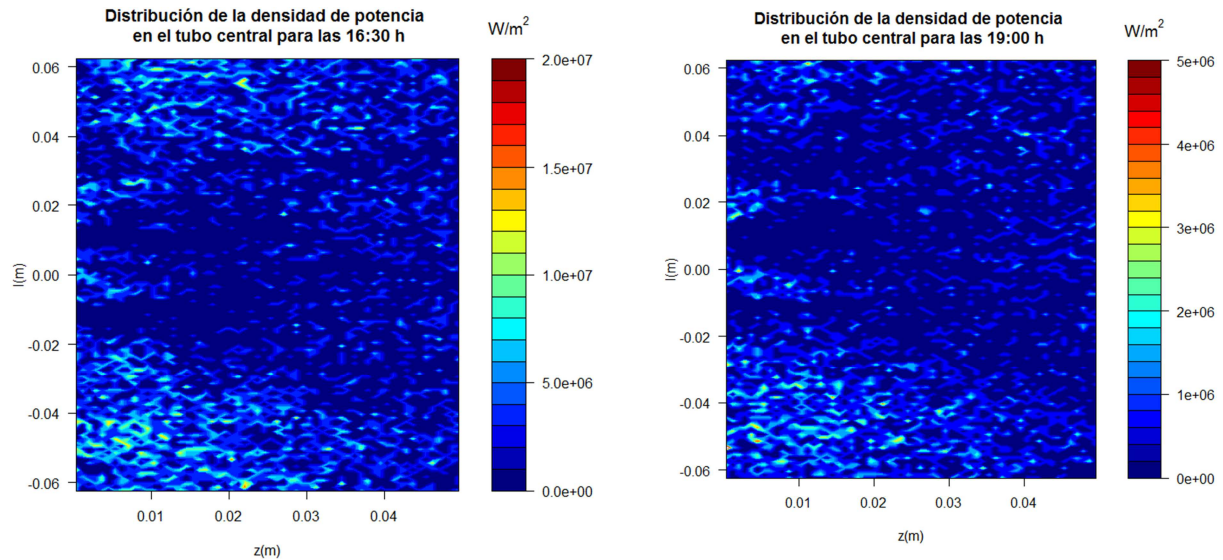


Figura 63. Distribución de la densidad de potencia en el tubo central para diferentes horas del día

Estas gráficas se han realizado con el programa R, el documento completo también se encuentra en el **Anexo 3**.

12.2.3 Potencia incidente

Tras las distribuciones obtenidas, se ha decidido calcular la **potencia total incidente** sobre el cuerpo negro y sobre el tubo central en cada caso. La **Tabla 11** confirma que la potencia aumenta en las horas centrales del día porque el efecto coseno es menor.

	Cuerpo Negro			Tubo central		
	Potencia por fotón (W/fotón)	Número de fotones	Potencia incidente (kW)	Potencia por fotón (W/fotón)	Número de fotones	Potencia incidente (kW)
08:00	6,41	268681	1722,43	0,64	3442	2,21
09:30	19,58	270140	5288,75	1,96	4507	8,82
11:30	32,12	206914	6646,80	3,21	4091	13,14
13:30	36,79	190638	7013,21	3,68	3931	14,46
16:30	26,80	231799	6212,95	2,68	4227	11,26
19:00	6,40	270213	1729,29	0,64	3491	2,23

Tabla 11. Cálculo de la potencia de los diferentes componentes a diferentes horas del día

En la misma tabla, se observa que la potencia que recibe el tubo central es muy baja frente a la que obtiene el cuerpo negro. Como además, la diferencia de **absortividad** de los materiales es muy elevada, el cuerpo negro absorberá la mayor parte de la radiación procedente del Sol.





13. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La **finalidad** de este proyecto es el **progreso de la tecnología central de torre**. Para ello, se ha decidido mejorar uno de sus componentes esenciales, el **receptor**.

Tras los resultados obtenidos en los diferentes estudios del trabajo, se pueden sacar una serie de conclusiones:

- El receptor volumétrico de vidrio se asemeja geoméricamente a los receptores volumétricos de canales. No obstante, debido a la necesidad de reflejar la radiación incidente hacia el interior del receptor, el aumento del **diámetro de los tubos** es obligado.
- El **diámetro** de los tubos de vidrio está **acotado** en las dos direcciones. Se precisa un diámetro grande para que la **distribución de temperaturas** del vidrio siga una curva progresiva y suave. Se requiere un diámetro pequeño para disminuir las **pérdidas térmicas** por radiación y para aumentar la **superficie de contacto** entre el fluido caloportador y los tubos de vidrio.
Como se considera que la importancia de ambos factores es la misma, se ha determinado que el **diámetro óptimo** es aquel con **diámetro interior** de **36,8 mm** y **diámetro exterior** de **40 mm**. Debido a la distribución de temperatura del vidrio para este diámetro óptimo, se ha decretado que la **longitud** de tubo adecuada es de **50 mm**.
- El **comportamiento óptico** del vidrio ante la radiación depende del **ángulo de incidencia (θ)**. Para ángulos de incidencia próximos a 90° , la reflectividad es casi completa. Sin embargo, hasta un ángulo de 80° , el vidrio no refleja ni la mitad de la energía que incide. Esto quiere decir que, el funcionamiento del receptor, depende de factores como la posición del campo de heliostatos, puesto que, cambia el ángulo de incidencia.
- Desde el punto de vista **óptico**, el receptor volumétrico de vidrio tiene mejor **comportamiento** del calculado. En los estudios se supone que la energía no reflejada es absorbida por el tubo. Sin embargo, la mayor parte de la radiación que no se refleja, se transmite hacia los demás tubos y siempre hacia el interior, es decir, la **distribución de temperaturas** será más favorable de la calculada.
- Los estudios de **Tonatiuh** son orientativos al utilizar un coeficiente de reflectividad fijo ($r=0,8$). Esta hipótesis genera un efecto desmesurado de los tubos sobre el cuerpo negro, por lo que posee una **distribución de potencia** más suave.
- Las **pérdidas térmicas** en los receptores volumétricos de vidrio son claramente menores que en los receptores volumétricos convencionales. La principal diferencia se encuentra en las **pérdidas por radiación**. Mientras que en el receptor volumétrico de vidrio parte de la emisión del cuerpo negro es absorbida por los tubos, los receptores volumétricos convencionales no tiene un cuerpo intermedio para disminuir pérdidas.





- En general, el **comportamiento térmico** del receptor volumétrico de vidrio tiene mejor rendimiento que el de los receptores convencionales, al poseer menores **pérdidas térmicas** y un **intercambio de calor**, entre el fluido caloportador y los componentes, más uniforme y constante.
De este modo, con el receptor objeto de este estudio se podrá obtener un fluido a mayor **temperatura de salida** que los convencionales, lo que implica una mayor eficiencia de la central termosolar. Además, el hecho de que el receptor tenga una distribución de temperaturas suave, evitará la existencia de **puntos calientes** en el mismo, disminuyendo las roturas por choque térmico.
- Se puede asegurar que la mayor parte de la **radiación solar** es **absorbida** por el **cuerpo negro** del receptor, mientras que otra pequeña parte es absorbida por los tubos de vidrio. Esta afirmación se debe a que la **absortividad** del cuerpo negro se considera completa y la del vidrio es muy pequeña.
Como consecuencia, el cuerpo negro alcanza temperaturas muy elevadas y el vidrio trabaja a mayor temperatura que el ambiente. De esta manera, el gas comenzará a calentarse conforme circula por los tubos y, finalmente, recibirá por parte del cuerpo negro, una gran cantidad de calor.
- En las horas centrales del día, la **potencia incidente** sobre el receptor es mayor al disminuir el **efecto coseno** que se genera en los heliostatos. En este sentido, se debe priorizar el **diseño de la planta** para esas horas del día.

Los **resultados** obtenidos en los estudios son **esperanzadores**, pero puede que el **comportamiento real** no sea el esperado, como ocurre en los actuales receptores volumétricos, donde la zona más caliente del receptor es la superficie frontal del receptor. Por ello, es indispensable seguir esta rama investigadora a través de **ensayos experimentales**. Estos ensayos deben ratificar el comportamiento óptico y térmico obtenido en este proyecto.

Actualmente, **CENER** está realizando ensayos de temperatura sobre diferentes materiales a través de una lente Fresnel. En el momento de que se disponga de los tubos de vidrio, comenzará el estudio experimental de un **prototipo de receptor volumétrico de vidrio**.





14. LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fuentes de energías [2]	11
Figura 2. Energía mundial por recurso (basada en BP's 2012 Statistical Review of World Energy) [4]	13
Figura 3. Repartición de la generación de electricidad en España.(Datos de Red Eléctrica de España) [5]	13
Figura 4. Balance energético 2012 MINETUR [6]	14
Figura 5. Potencia de CSP distribuida por países:operativa (azul), en construcción (rojo) y por construir (verde) [9]	17
Figura 6. Datos de CSP en España, mes de Abril;Progresión de la producción de potencia anual por CSP en España [8]	18
Figura 7. Tecnología Fresnel [17]	18
Figura 8. Tecnología Cilindro-parabólico [12]	19
Figura 9. Tubo de vacío de un CCP [13].....	20
Figura 10. Campo solar de CCP [13]	20
Figura 11. Disco parabólico teórico [17]; Disco parabólico real [13]	21
Figura 12. Torre central ideal; Torre central real [17].....	22
Figura 13. Temperatura, concentración y rendimiento de cada tecnología (orientativo) [14]	23
Figura 14. Eficiencia entre las diferentes tecnologías: rendimiento óptico (amarillo), rendimiento térmico (rojo) y rendimiento de gnereación de electricidad (azul) [18].....	23
Figura 15. Componentes de una instalación de Torre:heliostatos (1), receptor (3), almacenamiento (2,4) y bloque de potencia (5,6,7,8) [1].....	24
Figura 16. Heliostato [13].....	24
Figura 17. Torre central de distribución Norte [17]	25
Figura 18. Torre central de distribución circular [13].....	25
Figura 19. Efecto coseno [1]	26
Figura 20. Bloqueo; Sombra [1].....	27
Figura 21. Atenuación atmosférica [1]	27
Figura 22. Spillage [1]	27
Figura 23. Receptor externo [17]	29
Figura 24. Receptor de cavidad [16].....	29
Figura 25. Receptor de tubos [17].....	30
Figura 26. Receptor volumétrico [12]	30
Figura 27. Funcionamiento del receptor volumétrico y distribución de temperaturas [17]	32
Figura 28. Espuma [12]; Receptor de canales[17]; Panal [17]; Estándar de malla metálica [17]	34
Figura 29. Receptor volumétrico presurizado con concentrador secundario [17]	35





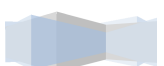
Figura 30. Transmitancia en función de la longitud de onda y del espesor del vidrio [19]	36
Figura 31. Receptor volumétrico de vidrio.....	37
Figura 32. Sección del receptor	38
Figura 33. Geometría de los tubos	38
Figura 34. Disposición de los tubos frente al cuerpo negro.....	39
Figura 35. Carcasa	39
Figura 36. Comportamiento de un cuerpo ante radiación [19]	40
Figura 37. Reflectividad (azul) y Transmisividad (rojo) en función del ángulo de incidencia	44
Figura 38. Distribución y geometría de los tubos.....	45
Figura 39. Área del triángulo	45
Figura 40. Área interior del triángulo.....	45
Figura 41. Reflectividad (r) en función del ángulo de incidencia (θ).....	47
Figura 42. Energía absorbida en cada lugar del tubo.....	47
Figura 43. Gráficas de la energía absorbida para diferentes casos.....	51
Figura 44. Situación de los trópicos y el Ecuador [20].....	52
Figura 45. Incidencia del Sol en función de la estación. Declinación [21].....	53
Figura 46. Movimiento de la Tierra alrededor del Sol [21]	53
Figura 47. Ángulos para determinar la posición del Sol [22].....	53
Figura 48. Dimensiones del receptor	54
Figura 49. Distribución de potencia del cuerpo negro a lo largo del día	56
Figura 50. Distribución de potencia del cuerpo negro en función del diámetro tubular	57
Figura 51. Distribución de potencia del cuerpo negro en función de la longitud tubular	58
Figura 52. Sección del tubo [19].....	59
Figura 53. Gráfica de la energía desechada en función del diámetro.....	60
Figura 54. Gráfica estándar de la energía absorbida en un tubo	61
Figura 55. Distribuciones de la energía absorbida para diferentes diámetros de tubo.....	63
Figura 56. Representación de la curva de la relación de posición y de la curva de relación de área ...	64
Figura 57. Distribución de la energía absorbida para la geometría escogida	66
Figura 58. Geometría tipo escogida	67
Figura 59. Circuito eléctrico del sistema	68
Figura 60. Receptor volumétrico de vidrio en Tonatiuh	72
Figura 61. Simulación de la radiación solar en la instalación.....	73
Figura 62. Distribución de la densidad de potencia en el cuerpo negro para diferentes horas del día	74
Figura 63. Distribución de la densidad de potencia en el tubo central para diferentes horas del día .	76





15. LISTA DE TABLAS

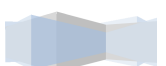
Tabla 1. Tipos de sistemas de concentración.....	16
Tabla 2. Tipos de receptores	28
Tabla 3. Tipos de receptores volumétricos	33
Tabla 4. Composición química (%peso): Dióxido de Silicio IV (SiO_2), Óxido de Boro III (B_2O_3), Óxido de Sodio + Óxido de Potasio ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) y Alumina (Al_2O_3) [19]	36
Tabla 5. Características relevantes de vidrio [19]	36
Tabla 6. Posición de la temperatura máxima del vidrio en función del diámetro y del rango angular	49
Tabla 7. Catálogo de Kavalier sobre tubos de vidrio SIMAX [19]	59
Tabla 8. Energía desechada en función del diámetro exterior y del espesor escogido	60
Tabla 9. Relación de posición y relación de superficie para cada diámetro	65
Tabla 10. Característica del producto escogido	66
Tabla 11. Cálculo de la potencia de los diferentes componentes a diferentes horas del día	76





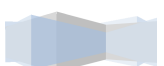
16. BIBLIOGRAFÍA

- [1] PASCUAL SILANES, J. (2014). *Desarrollo de un software de optimización de campos de heliostatos para centrales solares de torre*. Proyecto final de carrera. Pamplona: Universidad Pública de Navarra.
- [2] *Tipos de energía*. <http://tiposdeenergia.info/fuentes-de-energia/> [Consulta: 12 de Abril de 2015]
- [3] *Asociación de Empresas de Energías Renovables*.
<http://www.appa.es/01energias/08tiposfuentes.php> [Consulta: 14 de Abril de 2015]
- [4] TVERBERG, G. (2012). "A Few Insights Regarding Today's Nuclear Situation" en *DoomsteaDinner*, 15 de Agosto. <http://www.doomsteaddiner.net/blog/tag/renewable-energy/> [Consulta: 14 de Abril]
- [5] *El mundo* (2011). 21 de Abril 2011. Madrid.
<http://www.elmundo.es/elmundo/2011/03/04/ciencia/1299267277.html>. [Consulta: 14 de Abril de 2015]
- [6] *Asociación de Empresas de Energías Renovables*.
<http://www.appa.es/01energias/07primaria.php> [Consulta: 14 de Abril de 2015]
- [7] SÁNCHEZ ORTIZ, J.J. *En Buenas Manos*.
<http://www.enbuenasmanos.com/articulos/muestra.asp?art=3041> [Consulta: 15 de Abril de 2015]
- [8] PROTERMOSOLAR. <http://www.protermosolar.com/> [Consulta: 18 de Mayo de 2015]
- [9] HELIOSCSP. *Concentrated Solar Power (CSP) Projects around the World*.
http://www.helioscsp.com/noticia.php?id_not=2949. [Consulta: 18 de Mayo de 2015]
- [10] SOLARPOWER. *Concentrating Solar Power*. <http://solarpower.com/concentrating-solar-power/>. [Consulta: 18 de Mayo de 2015]
- [11] GARCÍA GARRIDO, S. (2012). "Principios de funcionamiento de las centrales solares termoeléctricas" en *Guía técnica de la energía Solar Termoeléctrica*. Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- [12] ZARDOYA ROYO, T. (2014). *Desarrollo de modelos de simulación para receptores volumétricos para centrales solares de torre*. Proyecto final de carrera. Pamplona: Universidad Pública de Navarra.
- [13] ZARZA MOYA, E. (2013). *Estudio Preliminar del Estado del Arte de los Sistemas Solares Térmicos de Concentración*. Ministerio de economía y competitividad. Ciemat.





- [14] ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL DE EIBAR. *Tecnologías Solares Termoeléctricas*.
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/termoelectrica/revision/revision.html>. [Consulta: 18 de Mayo de 2015]
- [15] STINE, W B. y GEYER, M. "Solar Energy Conversion Systems" en *PowerFromTheSun*.
<http://www.powerfromthesun.net/book.html>. [Consulta: 18 de Mayo]
- [16] GONZÁLEZ FUENTES, D. *Estudio de las Diferentes Tipologías de Receptores Volumétricos en Centrales Termosolares*. Proyecto final de carrera. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- [17] CENER (2013). *Receptores solares. Sistemas de alta concentración solar*.
- [18] PAGOLA, I y GASTÓN, M (2013). *CSP Techonologies*. CENER
- [19] *Kavalierglass*. <http://www.kavalier.cz/en/index.html> [Consulta: 4 de Abril de 20015]
- [20] MetEd (Meteorology Education & Training). *¿Dónde están los trópicos?*
http://wegc203116.uni-graz.at/meted/hurricane/strike_es/text/htc_desc.htm#worldmap.jpg . [Consulta: 25 de Mayo de 2015]
- [21] GARCÍA BARRERA, M. (2011). "Principio de la Arquitectura Solar" en el blog de Proyectos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Granada, 11 de diciembre.
<http://proyectos23g.blogspot.com.es/2011/12/principios-de-la-arquitectura-solar.html> . [Consulta: 25 de Mayo de 2015]
- [22] JIJÓN IBARRA, L. (2010). "Diseño arquitectónico de un Mercado Municipal en Tlaxiaco" en el blog de Facultad de arquitectura "5 de mayo", 7 de mayo.
<http://fa5mtaller.blogspot.com.es/2010/05/fase-3-elaboracion-y-seleccion-de.html> . [Consulta: 25 de Mayo de 2015]
- [23] R.A.FURLER, Ph.D. (1991). "Angular Dependence of Optical Properties of Homogeneous Glasses" en *ASHRAE Transactions* 1991, V.97, Pt.2.
- [24] J.P.HOLMAN. (1998). "CAPÍTULO 8. TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN". *TRANSFERENCIA DE CALOR*. Madrid: Concepción Fernández Madrid. Octava edición.





17. ANEXOS

17.1 Anexo 1: Programa R– Energía absorbida en cada intervalo del tubo

#En el programa vamos a calcular la distribución de energía que se encuentra en cada fracción de tubo de vidrio

#Directorio de trabajo:

```
setwd("U:\\Javier Martinez\\PROYECTO (receptores volumétricos)\\Realizado\\ProgramaR\\Calculo_fabricante")
```

#Primero, se obtiene del block de notas la relación entre la reflectividad (r) y el ángulo de incidencia(theta)

```
Tabla_de_datos<-  
as.matrix(read.table("AngIncidencia_Reflectividad.txt",header=TRUE))  
ang_incidencia<-Tabla_de_datos[,1]  
coe_reflexion<-Tabla_de_datos[,2]
```

#Se decide crear una nueva tabla de datos con el rango de valores que interesan

```
Datos <-Tabla_de_datos[3:1800,]  
dimnames(Datos)<-list(NULL,c("Ángulo de incidencia(theta)","Reflectividad (r)"))  
angulo_incidencia<-Datos[,1]  
reflectividad<- Datos[,2]  
sintheta<-sin((Datos[,1]*2*pi)/360)
```

#Se define el límite de energía en % en él que la radiación llega a su fin

E_limite<-0.001
#Es decir cuando la energía de los rayos sea menor que un 0.1% se considerará que el rayo no puede realizar más reflexiones dentro del vidrio

#Ahora, se calcula el número de reflexiones que sufrirá el rayo en función de la reflectividad y el ángulo de incidencia

```
numeroreflexion<-matrix(NA,nrow=nrow(Datos),ncol=1)  
dimnames(numeroreflexion)<-list(paste(angulo_incidencia,"°"),"Nreflexion")  
for(iin1:nrow(Datos)){  
numeroreflexion[i]<-log(E_limite/sintheta[i], reflectividad[i])  
}  
numeroreflexion<-ceiling(numeroreflexion)
```

#A partir del diámetro de los tubos(d) y del ángulo de incidencia, se puede determinar la longitud recorrida por el rayo (L)

```
d <-10#mm  
L <-matrix(NA,nrow=nrow(Datos),ncol=1)  
dimnames(L)<-list(paste(angulo_incidencia,"°"),"Longitud")  
for(iin1:nrow(Datos)){  
L[i]<-d *tan((angulo_incidencia[i]*2*pi)/360)  
}  
round(L,0)
```

#Posteriormente se calcula en que lugar se queda la energía de la radiación solar a través de la longitud de tubo recorrida (X) y la energía cedida por el rayo (E)

```
X <-matrix(NA,nrow=nrow(Datos),ncol=max(numeroreflexion))  
E <-matrix(0,nrow=nrow(Datos),ncol=max(numeroreflexion))  
for(iin1:nrow(Datos)){
```





```

for(j in 1:numeroreflexion[i]){
X[i,j]<- j * L[i]
E[i,j]<-(sintheta[i])*(1-reflectividad[i])*(reflectividad[i])^(j-1)}}

#Como complemento, se divide la longitud del tubo en intervalos(x) para
calcular la energía absorbida (e) dentro de cada intervalo
x <-seq(from=1, to=4000,by=1)
e <-matrix(0,nrow=1,ncol=length(x)-1)
dimnames(e)<-list("Energía absorbida por el intervalo",NULL)
for(z in 1:ncol(e)){
posicionz<-which(X > x[z]& X < x[z+1],arr.ind=TRUE)
e[z]<-sum(E[posicionz])
}
t <-sum(e)
pe<-(100*e[1,])/t

#Por último, se representan dos gráficas: Reflectividad en función del
ángulo y Energía acumulada sobre los intervalos del tubo
plot(angulo_incidencia, reflectividad,main=" Curva de reflectividad en
función del ángulo de incidencia ",type="l",xlab="Ángulo de
incidencia(°)",ylab="Reflectividad (r)",ylim=c(0,1))

plot(pe,main=" % de Energía absorbida en cada intervalo del tubo \n
para un diametro de 20 mm y un rango angular de 0° a 90°",type="l",xlab="longitud
(mm)",ylab=" % Energía absorbida ",xlim=c(0,100))

```

17.2 Anexo 2: Programa R – Cálculo de pérdidas térmicas

```

#Cálculo de las pérdidas térmicas por radiación

#Directorio de trabajo:
setwd("U:\\Javier Martinez\\PROYECTO (receptores
volumétricos)\\Realizado\\ProgramaR")

#Receptor volumétrico de vidrio
#Datos
Texterior<-293#k
Tvidrio<-473#k
Tcnegro<-1273#k
emisividad_vidrio<-0.9
dint<-0.0368#m
dext<-0.04#m
dT<-2.534#m
lvidrio<-0.05#m
lcnegro_exterior<-0.06#m
cte_boltzmann<-5.67*10^-8
N <-3535# tubos

#Primero, se calcula las áreas de cada cuerpo
#Como se calculan los resultados en función del área exterior, le daremos
un valor unitario
Aexterior<-1#m^2
Acnegro<-Aexterior#m^2
Avidrio<-((4*lvidrio/dint)*Aexterior)#m^2
At <-((pi* dT^2)/4)#m^2
A_esp_uni<-((pi*( dext^2- dint^2))/4)
Aefectiva<- At -A_esp_uni* N # m^2

```





```

#A través del libro Holman de transferencia de calor, se calculan los
factores de forma de la interacción de los tres cuerpos
F13 <-0.06666666
F12 <-1- F13
F21 <-(Acnegro/Avidrio)* F12
F23 <- F21
F22 <-1-(2*F21)

#Segundo, se calculan las resistencias
R2 <-(1-emisividad_vidrio)/(emisividad_vidrio*Avidrio)
R12 <-1/(Acnegro* F12)
R13 <-1/(Acnegro* F13)
R23 <-1/(Avidrio* F23)

#Calculamos la radiación emitida por cada cuerpo
Eb1 <-cte_boltzmann*(Tcnegro)^4#W/m^2
Eb2 <-cte_boltzmann*(Tvidrio)^4#W/m^2
Eb3 <-cte_boltzmann*(Texterior)^4#W/m^2

#Se consideran tanto el cuerpo negro como el exterior con emisividad 1
J1 <- Eb1 #W/m^2
J3 <- Eb3 #W/m^2

#Cálculo de J2
J2 <-((J1*R2*R23 + Eb2*R12*R23 + J3*R12*R2)/(R2*R23 + R12*R23 + R12*R2))

#Cálculo de los diferentes flujos de calor entre los cuerpos
Q13 <-Aefectiva*((J1-J3)/ R13)#W
Q12 <-Aefectiva*((J1-J2)/ R12)#W
Q1 <-(Q12 + Q13)#W
Q2 <-Aefectiva*((J2-Eb2)/ R2)#W
Q23 <-Aefectiva*((J2-J3)/ R23)#W
Q3 <-(Q1 - Q2)#W

#Receptores volumétricos convencionales
Q4 <-1* At*cte_boltzmann*( Tcnegro^4- Texterior^4)

```

17.3 Anexo 3: Tonatiuh y R – Instalación de Torre con receptor central

17.3.1 Generación del conjunto de tubos (Tonatiuh)

```

//Crear una variable
varrootnode="//SunNode/RootNode";

//Seleccionar RootNode y crear un nuevo TSeparatorKitnode.
tonatiuh.SelectNode(rootnode);
tonatiuh.CreateGroupNode();

//Seleccionarlo y renombrarlo como TuboField_Frame
tonatiuh.SelectNode(rootnode.concat("/TSeparatorKit1"));
tonatiuh.SetNodeName("TuboField_Frame");
vartuboFramePath=rootnode.concat("/TuboField_Frame");

//Transladamos el receptor a 80 m de altura
tonatiuh.SetValue(tuboFramePath,"translation","0 60 0");

```





```
//Se van a realizar filas diferentes

//trans representa la posición y de los tubos
//El primero se encuentra en y=-1.247076581 y están separados 0.0692820323 metros

vartrans=-1.247076581;
//Vamos a crear 37 filas
for(i=1;i<=37;++i){
    //Crear un nuevo TSeparatorKitNode
    tonatiuh.SelectNode(tuboFramePath);
    tonatiuh.CreateGroupNode();
    tonatiuh.SelectNode(tuboFramePath.concat("/TSeparatorKit1"));

    //Establecer el valor de traslation del tubo
    tonatiuh.SetValue(tuboFramePath.concat("/TSeparatorKit1"),"translation","0"
    ".concat("",trans).concat(" 0"));

    //Cambiar el nombre del nodo por Row0i_Frame. i va de 0 hasta 37
    //El primer nodo se llamará Row01_Frame y el último Row037_Frame
    tonatiuh.SetNodeName("Row0".concat("",i).concat("_Frame"));

    //Seleccionar el nodo creado y crear a groupnode como hijo y renombrarlo
    como Row
    var row=tuboFramePath.concat("/Row0".concat("",i).concat("_Frame"));
    tonatiuh.SelectNode(row);
    tonatiuh.CreateGroupNode();
    tonatiuh.SelectNode(row.concat("/TSeparatorKit1"));
    tonatiuh.SetNodeName("Row");

    //Para cada fila, se tiene que poner un árbol para colocar los 63
    tubos
    varNewRow=row.concat("/Row");

    //translation representa la posición x de los tubos
    //El primero se encuentra en x=-1.24 y están separados 0.04 metros
    vartranslationRow=-1.24;
    for(j=1;j<=63;++j){
        if (trans*trans+translationRow*translationRow> 1.556) {
            tonatiuh.SelectNode(NewRow);
        }
        else{
            //Crear un nuevo GroupNode y cambiar el valor de translation
            tonatiuh.SelectNode(NewRow);
            tonatiuh.CreateGroupNode();
            tonatiuh.SelectNode(NewRow.concat("/TSeparatorKit1"));
            tonatiuh.SetNodeName("Tubo".concat("",j).concat("_Frame"));
            vartuboRow=NewRow.concat("/Tubo".concat("",j).concat("_Frame"));
            tonatiuh.SetValue(tuboRow,"translation","".concat("",translation
            Row).concat(" 0 0"));

            //Crear un nuevo groupNode y renombralo como Tubo
            tonatiuh.SelectNode(tuboRow);
            tonatiuh.CreateGroupNode();
            tonatiuh.SelectNode(tuboRow.concat("/TSeparatorKit1"));
            tonatiuh.SetNodeName("Tubo");tonatiuh.SelectNode(tuboRow.concat(
            "/Tubo"));
        }
    }
}
```





```
//Crear un tShapeKitNode que pueda contener la forma y el material del tubo
tonatiuh.CreateSurfaceNode();
tonatiuh.SelectNode(tuboRow.concat("/Tubo/TShapeKit1"));

//Crear la forma. Va a ser a "Cylinder"
tonatiuh.CreateShape("Cylinder");

//Crear el material. Va a ser "Specular_Standard_Material"
tonatiuh.CreateMaterial("Specular_Standard_Material");

//Establecer las propiedades del tubo
tonatiuh.SetValue(tuboRow.concat("/Tubo/TShapeKit1/Cylinder"),"radius","0.0
2");
tonatiuh.SetValue(tuboRow.concat("/Tubo/TShapeKit1/Cylinder"),"length","0.0
5");
tonatiuh.SetValue(tuboRow.concat("/Tubo/TShapeKit1/Cylinder"),"activeSide",
"INSIDE");

//Establecer las propiedades del material
tonatiuh.SetValue(tuboRow.concat("/Tubo/TShapeKit1/Specular_Standard_Materi
al"),"mreflectivity","0.8");
tonatiuh.SelectNode(tuboRow.concat("/Tubo"));
}

//Cambiar el parámetro translation para la
siguiente iteración
translationRow=translationRow+0.04;
}

//Cambiar el parámetro de translación para la siguiente
iteración
trans=trans+ 0.0692820323;
}

//trans2 representa la posición y de los tubos
//El primero se encuentra en y=-1.212435565 y están separados 0.0692820323
metros
var trans2=-1.212435565;
//Vamos a crear 36 filas
for(k=1;k<=36;++k){
//Crear un nuevo TSeparatorKitNode
tonatiuh.SelectNode(tuboFramePath);
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode(tuboFramePath.concat("/TSeparatorKit1"));

//Establecer el valor de traslation del tubo
tonatiuh.SetValue(tuboFramePath.concat("/TSeparatorKit1"),"translation","0
.concat("",trans2).concat(" 0"));

//Cambiar el nombre del nodo por Row0k_Frame. k va de 37 hasta 73
//El primer nodo se llamará Row037_Frame y el último Row074_Frame
tonatiuh.SetNodeName("Row0".concat("",k+37).concat("_Frame"));

//Seleccionar el nodo creado y crear a groupnode como hijo y renombrarlo
como Row
var row=tuboFramePath.concat("/Row0".concat("",k+37).concat("_Frame"));
tonatiuh.SelectNode(row);
tonatiuh.CreateGroupNode();
```





```
tonatiuh.SelectNode(row.concat("/TSeparatorKit1"));
tonatiuh.SetNodeName("Row");

//Para cada fila, se tiene que poner un árbol para colocar los 63
tubos
varNewRow=row.concat("/Row");

//translation representa la posición x de los tubos
//El primero se encuentra en x=-1.22 y están separados 0.04 metros
var translationRow2=-1.22;
for(l=1;l<=63;++l){
if (trans2*trans2+translationRow2*translationRow2 > 1.56) {
tonatiuh.SelectNode(NewRow);
}
else{
//Crear un nuevo GroupNode y cambiar el valor de translation
tonatiuh.SelectNode(NewRow);
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode(NewRow.concat("/TSeparatorKit1"));
tonatiuh.SetNodeName("Tubo".concat("",l).concat("_Frame"));
vartuboRow=NewRow.concat("/Tubo".concat("",l).concat("_Frame"));
tonatiuh.SetValue(tuboRow,"translation","",translationRow2).conca
t(" 0 0"));

//Crear un nuevo groupNode y renombralo como Tubo
tonatiuh.SelectNode(tuboRow);
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode(tuboRow.concat("/TSeparatorKit1"));
tonatiuh.SetNodeName("Tubo");
tonatiuh.SelectNode(tuboRow.concat("/Tubo"));

//Crear un tShapeKitNode que pueda contener la forma y el material del tubo
tonatiuh.CreateSurfaceNode();
tonatiuh.SelectNode(tuboRow.concat("/Tubo/TShapeKit1"));

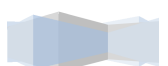
//Crear la forma. Va a ser a "Cylinder"
tonatiuh.CreateShape("Cylinder");

//Crear el material. Va a ser "Specular_Standard_Material"
tonatiuh.CreateMaterial("Specular_Standard_Material");

//Establecer las propiedades del tubo
tonatiuh.SetValue(tuboRow.concat("/Tubo/TShapeKit1/Cylinder"),"radius","0.0
2");
tonatiuh.SetValue(tuboRow.concat("/Tubo/TShapeKit1/Cylinder"),"length","0.0
5");
tonatiuh.SetValue(tuboRow.concat("/Tubo/TShapeKit1/Cylinder"),"activeSide",
"INSIDE");

//Establecer las propiedades del material
tonatiuh.SetValue(tuboRow.concat("/Tubo/TShapeKit1/Specular_Standard_Materi
al"),"m_reflectivity","0.8");
tonatiuh.SelectNode(tuboRow.concat("/Tubo"));
}

//Cambiar el parámetro translation para la
siguiente iteración
translationRow2=translationRow2+0.04;
}
```





```
        //Cambiar el parámetro de translación para la siguiente
iteración
        trans2=trans2+ 0.0692820323;
    }
```

17.3.2 Generación del campo de heliostatos (Tonatiuh)

```
//Crear una variable
varrootnode="//SunNode/RootNode";

//Seleccionar RootNode y crear un nuevo TSeparatorKitnode.
tonatiuh.SelectNode(rootnode);
tonatiuh.CreateGroupNode();

//Seleccionarlo y renombrarlo como HeliostatoField_Frame
tonatiuh.SelectNode(rootnode.concat("/TSeparatorKit1"));
tonatiuh.SetNodeName("HeliostatoField_Frame");
varhelFramePath=rootnode.concat("/HeliostatoField_Frame");

//trans representa la posicion z de los heliostatos
//El primero se encuentra en z=-182.5 y están separados 10 metros
vartrans=-182.5;
//Vamos a crear 15 filas
for(i=1;i<=15;++i){
    //CrearunnuevoTSeparatorKitNode
    tonatiuh.SelectNode(helFramePath);
    tonatiuh.CreateGroupNode();
    tonatiuh.SelectNode(helFramePath.concat("/TSeparatorKit1"));

    //Establecer el valor de traslation del heliostato
    tonatiuh.SetValue(helFramePath.concat("/TSeparatorKit1"),"translation","0
0".concat(" ",trans));

    //Cambiar el nombre del nodo por Row0i_Frame. i va de 0 hasta 15
    //El primer nodo se llamará Row01_Frame y el último Row015_Frame
    tonatiuh.SetNodeName("Row0".concat(" ",i).concat("_Frame"));

    //Seleccionar el nodo creado y crear a groupnode como hijo y renombrarlo
como Row
    var row=helFramePath.concat("/Row0".concat(" ",i).concat("_Frame"));
    tonatiuh.SelectNode(row);
    tonatiuh.CreateGroupNode();
    tonatiuh.SelectNode(row.concat("/TSeparatorKit1"));
    tonatiuh.SetNodeName("Row");

    //Para cada fila, se tiene que poner un árbol para colocar los 20
heliostatos
    varNewRow=row.concat("/Row");

    //translation representa la posición x de los heliostatos
    //El primero se encuentra en x=-145 y están separados 10 metros
    vartranslationRow=-145;
    for(j=1;j<=30;++j){
        //Crear un nuevo GroupNode y cambiar el valor de translation
        tonatiuh.SelectNode(NewRow);
        tonatiuh.CreateGroupNode();
        tonatiuh.SelectNode(NewRow.concat("/TSeparatorKit1"));
    }
}
```





```
tonatiuh.SetValue(NewRow.concat("/TSeparatorKit1"),"translation","".concat(
"",translationRow).concat(" 0 0"));

//Cambiar el parámetro translation para la siguiente iteración
translationRow=translationRow+10;
tonatiuh.SetNodeName("Heliostato".concat("",j).concat("_Frame"));
var helRow=NewRow.concat("/Heliostato".concat("",j).concat("_Frame"));

//Crear un nuevo groupNode y renombralo como heliostato
tonatiuh.SelectNode(helRow);
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode(helRow.concat("/TSeparatorKit1"));
tonatiuh.SetNodeName("Heliostato");
tonatiuh.SelectNode(helRow.concat("/Heliostato"));

//Crear un tShapeKitNode que contenga la forma y material del heliostato
tonatiuh.CreateSurfaceNode();
tonatiuh.SelectNode(helRow.concat("/Heliostato").concat("/TShapeKit1"));

//Crear la forma. Va a ser "Spherical_rectangle"
tonatiuh.CreateShape("Spherical_rectangle");

//Crear el material. Va a ser "Specular_Standard_Material"
tonatiuh.CreateMaterial("Specular_Standard_Material");

//Determinar "Spherical_rectangleproperties"
tonatiuh.SetValue(helRow.concat("/Heliostato").concat("/TShapeKit1/Spherica
l_rectangle"),"radius","300");
tonatiuh.SetValue(helRow.concat("/Heliostato").concat("/TShapeKit1/Spherica
l_rectangle"),"widthX","6");
tonatiuh.SetValue(helRow.concat("/Heliostato").concat("/TShapeKit1/Spherica
l_rectangle"),"widthZ","5");
tonatiuh.SetValue(helRow.concat("/Heliostato").concat("/TShapeKit1/Spherica
l_rectangle"),"activeSide","INSIDE");

//Determinar las propiedades del material.
tonatiuh.SetValue(helRow.concat("/Heliostato").concat("/TShapeKit1/Specular
_Standard_Material"),"m_reflectivity","1");
tonatiuh.SelectNode(helRow.concat("/Heliostato").concat("/TShapeKit1"));

//Crear un tracker como un hijo de heliostato y determinar aimingPoint to
"0 60 0"
tonatiuh.SelectNode(helRow.concat("/Heliostato"));
tonatiuh.CreateTracker("Heliostat_tracker");
tonatiuh.SetValue(helRow.concat("/Heliostato/Heliostat_tracker"),"aimingPoi
nt","0 60 0");
}

//Cambiar la translation para la siguiente iteración
trans=trans+10;
}
```

17.3.3 Representación del Cuerpo Negro (R)

```
#Directorio de trabajo:
setwd("U:/Javier Martinez/PROYECTO (receptores
volumétricos)/Realizado/Tonatiuh/Instalacion_sencilla/8,00")
library("ash")
```





```
#Calcular el número de parámetros y la potencia por fotón que recibe el
cuerpo negro
filename<-"Cuerpo_Negro_parameters.txt"
#Leer el documento
lines<-readLines(filename,n=-1)
nLines<-length(lines)
startParameters<-0
endParameters<-0
endSurfaces<-0
nLine<-0
for(lineinlines)
{
nLine<-nLine+1
if(line=="START PARAMETERS")
{
startParameters<-nLine
}
elseif(line=="END PARAMETERS")
{
endParameters<-nLine
}
elseif(line=="END SURFACES")
{
endSurfaces<-nLine
}
}
nParameters<-(endParameters-startParameters-1)
powerPerPhoton<-lines[endSurfaces+1]
tonatiuhDataFile<-"Cuerpo_Negro_1.dat"

#Abrir el documento
fileName<-file(tonatiuhDataFile,"rb")

#Obtener la dimensión del documento
fileSize<-file.info(tonatiuhDataFile)$size

#Leer el documento
photonData<-readBin(fileName,what="numeric",n=(fileSize)/8, endian="big")
#Cerrar el documento
close(fileName)

#Calcular el número de fotones
nPhotons<-length(photonData)/nParameters

#Crear una matriz con el número de parámetros y de fotones
photonMap<-photonData
dim(photonMap)<-c(nParameters,nPhotons)
photonMap<-t(photonMap)

#Determinar el perímetro y el área del cuerpo escogido y sus divisiones
ReceiverRadius<-1.2675#m
ReceiverLength<-2*ReceiverRadius
ReceiverPerimeter<-ReceiverLength*4
ReceiverArea<- ReceiverLength^2#square meters
widthDivisions<-200
lengthDivisions<-200
nbin<-c(widthDivisions,lengthDivisions)

#Delimitación del cuerpo
```





```
ab<-matrix(c(-0.5*ReceiverLength,-
0.5*ReceiverLength,0.5*ReceiverLength),2,2)

#Determinar las coordenadas de los fotones y el valor de cada division
xCoord<-photonMap[,2]
yCoord<-photonMap[,4]
photonCounts<- bin2(as.matrix(cbind(xCoord,yCoord)), ab ,nbin)$nc
widthElementLength<-ReceiverLength/widthDivisions
lengthElementLength<-ReceiverLength/lengthDivisions
elementArea<-widthElementLength*lengthElementLength

#Calcular el flujo de cada intervalo
fluxConversionFactor<-as.numeric(powerPerPhoton)/elementArea#
W/(m^2*photon)
incidentFluxMatrix<-photonCounts*fluxConversionFactor# W/m^2

#Relacionar colores con valores
jet.colors<-
colorRampPalette(c("#00007F", "blue", "#007FFF", "cyan", "#7FFF7F", "yellow", "#F
F7F00", "red", "#7F0000"))

#Determinar ejes
x <-seq(-0.5*ReceiverLength+widthElementLength/2,0.5*ReceiverLength-
widthElementLength/2,by=widthElementLength)
y <-seq(-0.5*ReceiverLength+lengthElementLength/2,0.5*ReceiverLength-
lengthElementLength/2,by=lengthElementLength)

#Hacer una gráfica de los resultados
filled.contour(x,y,incidentFluxMatrix,color=jet.colors,main="Distribución
de la densidad de potencia \n en el cuerpo negro para las 08:00
h",xlab="x(m)",ylab="y(m)",zlim=c(0,1000000),key.title=title(main=expressio
n(paste('W/m'^2,sep=''))))
```

17.3.4 Representación del Tubo Central (R)

```
#Directorio de trabajo:
setwd("U:/Javier Martinez/PROYECTO (receptores
volumétricos)/Realizado/Tonatiuh/Instalacion_sencilla/13,30")
library("ash")

#Calcular el número de parámetros y la potencia por fotón que recibe el
tubo central
filename<-"Tubo_Central_F19C32_parameters.txt"
#Leer el documento
lines<-readLines(filename,n=-1)
nLines<-length(lines)
startParameters<-0
endParameters<-0
endSurfaces<-0
nLine<-0
for(lineinlines)
{
nLine<-nLine+1
if(line=="START PARAMETERS")
{
startParameters<-nLine
}
elseif(line=="END PARAMETERS")
{
```





```
endParameters<-nLine
}
elseif(line=="END SURFACES")
{
endSurfaces<-nLine
}
}
nParameters<-(endParameters-startParameters-1)
powerPerPhoton<-lines[endSurfaces+1]
tonatiuhDataFile<-"Tubo_Central_F19C32_1.dat"

#Abrir el documento
fileName<-file(tonatiuhDataFile,"rb")

#Obtener la dimensión del documento
fileSize<-file.info(tonatiuhDataFile)$size
#Leer el documento
photonData<-readBin(fileName,what="numeric",n=(fileSize)/8, endian="big")
#Cerrar el documento
close(fileName)

#Calcular el número de fotones
nPhotons<-length(photonData)/nParameters

#Crear una matriz con el número de parámetros y de fotones
photonMap<-photonData
dim(photonMap)<-c(nParameters,nPhotons)
photonMap<-t(photonMap)

#Determinar el perímetro y el área del cuerpo escogido y sus divisiones
CylinderRadius<-0.02#m
CylinderLength<-0.05#m
CylinderPerimeter<-2*pi*CylinderRadius
CylinderArea<-CylinderPerimeter*CylinderLength#square meters
widthDivisions<-60
lengthDivisions<-126
nbin<-c(widthDivisions,lengthDivisions)

#Delimitación del cuerpo
ab<-matrix(c(0,-
0.5*CylinderPerimeter,CylinderLength,0.5*CylinderPerimeter),2,2)

#Determinar las coordenadas de los fotones en 2D y el valor de cada
division
Covertir<-function( coord3D,CylinderRadius)
{
return(c( coord3D[3],atan2( coord3D[1],-coord3D[2])*CylinderRadius))
}
coord2D<-t(apply(photonMap[,2:4],CylinderRadius=CylinderRadius,1,Covertir))
zCoord<-coord2D[,1]
lCoord<-coord2D[,2]
photonCounts<- bin2(as.matrix(cbind(zCoord,lCoord)), ab ,nbin)$nc
widthElementLength<-CylinderLength/widthDivisions
lengthElementLength<-CylinderPerimeter/lengthDivisions
elementArea<-widthElementLength*lengthElementLength

#Calcular el flujo de cada intervalo
fluxConversionFactor<-as.numeric(powerPerPhoton)/elementArea#
W/(m^2*photon)
```





```
incidentFluxMatrix<-photonCounts*fluxConversionFactor# W/m^2

#Relacionar colores con valores
jet.colors<-
colorRampPalette(c("#00007F", "blue", "#007FFF", "cyan", "#7FFF7F", "yellow", "#F
F7F00", "red", "#7F0000"))

#Determinar ejes
x <-seq(widthElementLength/2,CylinderLength-
widthElementLength/2,by=widthElementLength)
y <-seq(-CylinderPerimeter/2+lengthElementLength/2,CylinderPerimeter/2-
lengthElementLength/2,by=lengthElementLength)

#Hacer una gráfica de los resultados
filled.contour(x,y,incidentFluxMatrix,color=jet.colors,main="Distribución
de la densidad de potencia \n en el tubo central para las 13:30
h",xlab="z(m)",ylab="l(m)",zlim=c(0,20000000),key.title=title(main=expressi
on(paste('W/m'^2,sep=''))))
```

