

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Comparación de modelos físicos de un captador solar
Fresnel

Autor: Antonio Jiménez Flores

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

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

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Comparación de modelos físicos de un captador solar Fresnel

Autor:

Antonio Jiménez Flores

Tutor:

Francisco Javier Pino Lucena

Dep. Ingeniería Energética. Grupo Termotecnia

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Grado: Comparación de modelos físicos de un captador solar Fresnel

Autor: Antonio Jiménez Flores

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Después del periodo de aprendizaje realizado en la universidad, que ha culminado en la realización de este trabajo, me gustaría agradecer a todas las personas que me han apoyado en esta etapa de mi vida. Ante todo, me gustaría agradecer al personal docente de la ETSI su labor día a día en las clases, y en especial a mi tutor, Francisco Javier Pino, por brindarme todas las herramientas, documentos y ayuda posible durante la realización de este trabajo.

También agradezco a mis compañeros y amigos el buen ambiente de trabajo y clase durante estos años. En especial me gustaría agradecerle a Carmen e Irene todo el apoyo mostrado, ayudándome si era necesario y haciéndome más llevaderas las infinitas horas en la sala de estudio. En definitiva, darme la oportunidad de realizar esta carrera en verdadera compañía.

Finalmente darle las gracias a mi familia. A mi madre y mi abuela por estar siempre a mi lado. A mi tío por no dudar nunca de mi y a mis hermanos y Raimundo por visitarme cuando no podía ir a verles. Muchas gracias a todos, también a las personas que no he nombrado en este breve texto pero que habéis sido indispensables en mi desarrollo personal. Gracias.

Antonio Jiménez Flores

Sevilla, 2017

Resumen

En este trabajo de fin de grado se analizan los diferentes tipos de colectores solares que hay en la industria, desde los modelos estacionarios sin concentración solar hasta los modelos más avanzados en concentración solar con seguimiento.

Se describen las características técnicas y de operación del concentrador Fresnel situado en la Escuela de Ingenieros de Sevilla, además del planteamiento tanto del modelo detallado térmico y óptico, como su posterior modelo simplificado a partir de los datos recogidos usando el programa *Matlab*.

Finalmente, se implementan los factores correctores por ángulo de incidencia y variación del caudal en el modelo simplificado y su posterior comparación con el modelo detallado en diferentes condiciones de operación.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
Notación	xxi
1 Introducción	1
2 Energía solar	3
2.1 <i>Radiación incidente</i>	3
2.2 <i>Usos de la energía solar</i>	4
3 Clasificación de los colectores solares	7
3.1 <i>Colectores estacionarios</i>	7
3.1.1 Colector de placa plana	7
3.1.2 Colector parabólico compuesto	10
3.1.3 Colector de tubos de vacío	11
3.2 <i>Colectores solares de concentración con seguimiento solar</i>	12
3.2.1 Colector cilindro-parabólico	13
3.2.2 Colector Fresnel	15
3.2.3 Disco parabólico	17
3.2.4 Receptor central o de torre	17
4 Colector Fresnel	21
4.1 <i>Sistema focal lineal Fresnel</i>	21
4.2 <i>Descripción general de la instalación de la Escuela superior de ingenieros de Sevilla</i>	22
4.3 <i>Estructura de acero</i>	24
4.4 <i>Espejos reflectores</i>	25
4.5 <i>Mecanismo de arrastre</i>	26
4.6 <i>Reflector secundario</i>	26
4.7 <i>Tubo receptor</i>	27
4.8 <i>Sensores</i>	28
5 Modelo óptico del colector Fresnel	31
5.1 <i>Descripción general del modelo</i>	31
5.2 <i>Modelo 2D</i>	36
5.2.1 <i>Inclinación de la fila de espejos</i>	36

5.2.2	Sombras propias entre espejos	41
5.2.3	Perdidas ópticas	44
5.3	<i>Modelo 3D</i>	46
5.4	<i>Cálculo de la radiación real</i>	48
6	Modelo térmico del colector Fresnel	49
6.1	<i>Descripción general del modelo</i>	49
6.2	<i>Resolución del modelo térmico</i>	56
7	Análisis comparativo del modelo detallado y el modelo simplificado	59
7.1	<i>Cálculo de la recta de rendimiento del modelo simplificado</i>	59
7.2	<i>Corrección por ángulo de incidencia</i>	60
7.3	<i>Corrección por caudal</i>	61
7.4	<i>Comparación del modelo detallado y simplificado</i>	63
7.4.1	Variación de la temperatura ambiente	64
7.4.2	Variación de la temperatura de entrada de agua	67
7.4.3	Variación del caudal de entrada	69
7.4.4	Variación con la radiación directa	70
7.4.5	Variación de la temperatura de salida del agua respecto a las diferentes horas solares	71
7.5	<i>Variación de parámetros del captador Fresnel</i>	74
7.5.1	Variación del número de filas y ancho de los espejos	74
7.5.2	Variación de la emisividad del tubo receptor	76
8	Conclusiones	81
	Referencias	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Propiedades del Sol	4
Tabla 4-1 Características principales del colector solar Fresnel	23
Tabla 4-2 Propiedades y dimensiones del reflector secundario	27
Tabla 4-3 Propiedades y dimensiones del tubo receptor	27
Tabla 5-1 Posiciones de los centros de las filas de espejos en el eje X	38
Tabla 7-1 Variación del calor útil y temperatura entre el modelo detallado y simplificado para una temperatura ambiente dada	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Radiación global incidente sobre un captador plano inclinado	3
Figura 3-1 Colector de placa plana	8
Figura 3-2 Fotografía de un colector en panel.	10
Figura 3-3 Paneles de colectores parabólicos compuestos	10
Figura 3-4 Colector de tubos de vacío	11
Figura 3-5 Tipos de colectores solares de concentración con seguimiento solar	13
Figura 3-6 Colector cilindro parabólico	14
Figura 3-7 Colector Fresnel construido por Giorgio Francia, 1968	16
Figura 3-8 Colector solar lineal Fresnel instalado en Almería (PSA)	16
Figura 3-9 Disco parabólico, Eurodish	17
Figura 3-10 Torre y campo de heliostatos PS10 Sólucar, Sevilla	18
Figura 3-11 Heliostatos de la planta PS10 Solúcar, Sevilla	19
Figura 4-1 Vista aérea de la cubierta	22
Figura 4-2 Imagen de la instalación situada en la azotea	23
Figura 4-3 Estructura de acero del colector solar	24
Figura 4-4 Espejos reflectores en modo funcionamiento	25
Figura 4-5 Espejos reflectores en modo stand-by	25
Figura 4-6 Mecanismo de arrastre de los espejos	26
Figura 4-7 Reflector secundario	27
Figura 4-8 Tubo absorbedor, estructura y cubierta de vidrio	28
Figura 4-9 Sensor de temperatura	29
Figura 4-10 Sensor solar	29
Figura 5-1 Plano en planta de la instalación Fresnel	32
Figura 5-2 Ejes de referencia, orientación y nomenclatura de las filas de espejos del campo solar	33
Figura 5-3 Parámetros solares usados en los cálculos	34
Figura 5-4 Ejes del modelo 2D	36
Figura 5-5 Proyección del sistema de captación en los ejes X e Y	37
Figura 5-6 Esquema en 2D de un captador Fresnel y sus magnitudes ópticas asociadas	38
Figura 5-7 Inclinación: caso $X_E < 0$ y $\gamma > \beta$	39
Figura 5-8 Inclinación: caso $X_E < 0$ y $\gamma < \beta$	40

Figura 5-9 Inclinación: caso $X_E = 0$	40
Figura 5-10 Inclinación: caso $X_E > 0$	41
Figura 5-11 Sentido positivo de la inclinación de las filas de espejos	41
Figura 5-12 Sombras propias entre ambas filas con inclinación positiva	42
Figura 5-13 Sombras propias, una fila con inclinación positiva y la siguiente con inclinación negativa	43
Figura 5-14 Sombras propias, ambas filas con inclinación negativa	44
Figura 5-15 Ángulo δ necesario para cuantificar las pérdidas ópticas en espejos con inclinación positiva	45
Figura 5-16 Ángulo δ necesario para cuantificar las pérdidas ópticas en espejos con inclinación negativa	45
Figura 5-17 Tramo de tubo no iluminado debido al azimut solar	46
Figura 6-1 Flujos de calor doble tubo, necesarios para el cálculo del calor neto que llega al agua	50
Figura 6-2 Calor por conducción y calor por convección en el tubo absorbedor	51
Figura 6-3 Flujos de calor del tubo receptor con el exterior	53
Figura 6-4 Flujos de calor en el reflector secundario	55
Figura 7-1 Recta de rendimiento 1 de Mayo al mediodía solar	59
Figura 7-2 Curva del factor corrector del ángulo de incidencia de un espejo	60
Figura 7-3 Factor ángulo de incidencia a lo largo de un día	61
Figura 7-4 Factor corrector del caudal	62
Figura 7-5 Factor corrector del caudal para valores mas alejados	63
Figura 7-6 Variación de la temperatura ambiente para el modelo detallado y simplificado	65
Figura 7-7 Ampliación del detallado variando la temperatura ambiente	66
Figura 7-8 Ampliación del simplificado variando la temperatura ambiente	67
Figura 7-9 Variación de la temperatura del agua para el modelo detallado y simplificado	68
Figura 7-10 Variación del caudal de agua del modelo detallado y simplificado	69
Figura 7-11 Variación de la radiación directa del modelo detallado y simplificado	70
Figura 7-12 Ampliación de la variación de radiación directa en 170 °C	71
Figura 7-13 Variación horaria comparación modelo detallado y simplificado	72
Figura 7-14 Ampliación de la variación horaria a 160 °C	73
Figura 7-15 Variación de la temperatura de salida del agua respecto al tiempo	73
Figura 7-16 Recta de rendimiento al modificar filas y ancho de espejos	75
Figura 7-17 Representación de la recta de rendimiento original con la variación del número de filas y ancho	76
Figura 7-18 Recta de rendimiento al modificar la emisividad del tubo	77
Figura 7-19 Recta de rendimiento al modificar emisividad del tubo	78
Figura 7-20 Comparación de las rectas de rendimiento	78

Notación

Azi	Azimut solar
Ele	Elevación solar
\vec{i}	Vector incidencia solar
\vec{r}	Vector reflejo desde los espejos primarios hacia el tubo receptor
\vec{n}	Vector normal a los espejos primarios
γ	Ángulo que forma la proyección del vector incidencia en dos dimensiones con la horizontal
β	Ángulo que forma el vector reflejo en dos dimensiones con la horizontal
θ	Ángulo que forma el vector incidencia en dos dimensiones con la normal en dos dimensiones, que es igual al ángulo formado por la normal en dos dimensiones y el vector reflejo en dos dimensiones
α (sin subíndice)	Ángulo que forma el vector incidencia en dos dimensiones con el vector reflejo en dos dimensiones, que es igual al doble del ángulo θ
incl	Inclinación de la fila de espejos
ω	Ángulo utilizado en el cálculo de sombras propias entre espejos para dos espejos con inclinación positiva
ν	Ángulo utilizado en el cálculo de sombras propias entre espejos para un espejo con inclinación positiva y el siguiente con inclinación negativa
fsombra	Factor de sombras propias entre espejos
δ	Ángulo utilizado para cuantificar las pérdidas ópticas
$\cos(\delta)$	Factor de perdidas ópticas
f_{tni}	Proporción de tubo receptor no iluminado
IA_{real}	Radiación real que llega al tubo receptor desde los espejos, en W
I	Radiación directa procedente del Sol, en W/m^2
A	Superficie o área
ρ	Reflectividad
f_{ens}	Factor de ensuciamiento
Q	Flujo de calor, en W
T	Temperatura
D	Diámetro
K	Conductividad
L	Longitud
h	Coefficiente de película para intercambios de calor convectivos

m_w	Caudal másico de agua
C_p	Calor específico
σ	Constante de Boltzmann
ε	Emisividad
α (con subíndice)	Absortividad
τ	Transmisividad
F	Factor de forma
η	Rendimiento
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Re	Número de Reynolds
G	Caudal específico en $kg/s\ m^2$
\dot{m}	Caudal másico en kg/s
F'	Factor de eficiencia
U_L	Coefficiente global de pérdidas
F_R	Factor de eliminación de calor
c	Constante de la recta de ajuste
k_θ	Factor corrector del ángulo de incidencia
k_m	Factor corrector del caudal
R^2	Coefficiente de determinación
RECM	Raíz del error cuadrático medio
MAPE	Error porcentual absoluto medio
3D	Tres dimensiones
2D	Dos dimensiones
E	Espejo primario
t	Tubo absorbedor
v	Cubierta de vidrio
r	Reflector secundario
fila	Fila de espejos primarios
neto	Total que recibe el agua
abs	Absorbido por el tubo absorbedor
tv	Del tubo absorbedor a la cubierta de vidrio
te	Superficie exterior del tubo absorbedor
ti	Superficie interior del tubo absorbedor
i	Interior del tubo absorbedor
me	Media a la entrada del tubo absorbedor
ms	Media a la salida del tubo absorbedor
mm	Media de masa (media entre la entrada y la salida del absorbedor)
w	Agua
a	Aire
vi	Superficie interior de la cubierta de vidrio
ve	Superficie exterior de la cubierta de vidrio
e	Exterior del sistema
amb	Ambiente
pel	Película
sr	Superficie superior del reflector secundario

ir
cielo

Superficie inferior del reflector secundario
Ambiente para los intercambios radiantes con el exterior

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo de fin de grado es, a partir del modelo detallado Fresnel del captador situado en la ETSI de Sevilla, realizado por *Rafael Villar Fernández*, realizar la comparación con un modelo simplificado. Para ello se hará uso del programa *Matlab*, ya que es el más apropiado para unificar modelos. Con el modelo detallado se logrará calcular la recta de rendimiento a partir de una simulación masiva de los rendimientos en diferentes condiciones que nos dará los parámetros del modelo simplificado a usar. Nuestros parámetros a observar serán la temperatura de salida del fluido caloportador y el calor útil absorbido por el colector.

Los estudios llevados a cabo una vez planteados los modelos han sido los siguientes:

- Variación de la temperatura ambiente
- Variación de la temperatura del fluido caloportador (agua)
- Variación del caudal de entrada
- Variación de la radiación directa
- Variación a distintas horas solares

Para la realización del trabajo se han reescrito los programas realizados en *Matlab*, se han aplicado los diferentes factores correctores y se han analizado los resultados conseguidos.

A continuación se realiza una breve descripción de cada uno de los capítulos de este trabajo de fin de grado.

En el Capítulo 2 se describen las características del Sol como fuente de energía y el potencial de aprovechamiento de este y los diferentes usos en el hogar y la industria de este tipo de energía.

En el Capítulo 3 se clasifican los tipos de colectores solares tanto estacionarios o no estacionarios con seguimiento solar, haciendo un resumen de la actual tecnología usada en estos, materiales y orientación adecuada según el uso.

El Capítulo 4 contiene el análisis de los colectores Fresnel más detallado, así como las ventajas de su utilización respecto a otras tecnologías. A continuación se realiza la descripción del colector solar Fresnel situado en la cubierta de la Escuela superior de ingenieros de Sevilla

El Capítulo 5 describe el modelo detallado óptico del colector Fresnel, calculando el ángulo de inclinación de los espejos a cada instante, la radiación real que llega al colector y otros parámetros.

En el Capítulo 6 se realiza la descripción del modelo detallado térmico del tubo receptor de la instalación, describiendo los flujos de calor, temperaturas de salida del fluido, pérdidas térmicas, temperatura del tubo, etc.

El Capítulo 7 se divide en dos partes: una primera en la cual se realiza la descripción del modelo simplificado del colector solar Fresnel y las debidas correcciones por ángulo de incidencia y caudal, y la segunda en la cual se realizan diversas comparaciones de ambos modelos mediante el uso del programa *Matlab*.

El Capítulo 8 reúne las conclusiones del trabajo de fin de grado resaltando los resultados obtenidos y las posibles mejoras a realizar.

2 ENERGÍA SOLAR

Se va a realizar un breve resumen del potencial de la energía solar en la industria energética y de la capacidad de aprovechamiento de esta a partir de los datos solares.

2.1 Radiación incidente

El Sol, como fuente de radiación electromagnética, es una de las formas de energía más aprovechable, abundante y limpia de las que tenemos a disposición. Siendo la constante solar la cantidad de energía recibida en forma de radiación solar por unidad de tiempo y unidad de superficie, medida en la parte externa de la atmósfera terrestre en un plano perpendicular a los rayos del Sol. Los resultados de su medición por satélites arrojan un valor promedio de 1366 W/m^2 . La luz del Sol en la superficie de la Tierra es atenuada por la atmósfera terrestre, de modo que, llega menos energía a la superficie (cerca de 1000 W/m^2) en condiciones claras cuando el Sol está cerca de su cenit. Además de esto, la radiación que no es reflejada por la atmósfera puede ser atenuada por las condiciones climáticas, polvo en suspensión y gases. La intensidad con la que llega también depende de la inclinación del plano que recibe la radiación, siendo su máximo de forma normal a ella. Se puede esquematizar la radiación procedente del Sol y sus fenómenos, Figura 2-1.

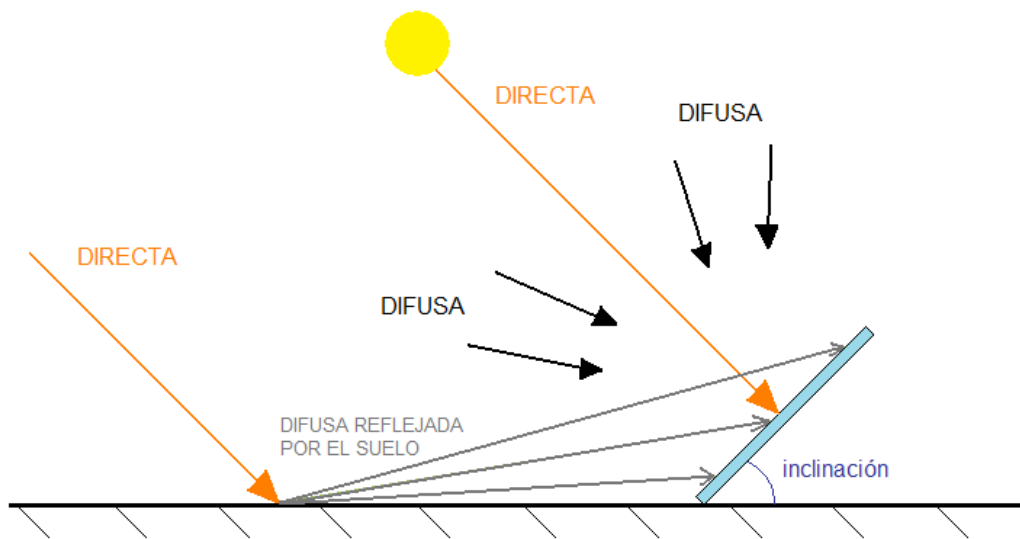


Figura 2-1 Radiación global incidente sobre un captador plano inclinado

Una de las grandes ventajas de la energía solar es su distribución equitativa en todo el planeta, siendo una opción viable al ser una fuente energética mucho más uniforme que otras. Uno de sus inconvenientes es su discontinuidad temporal, por lo que es necesario alternativas o almacenamiento si se hace uso de un consumo intensivo.

Se puede considerar el Sol como una esfera no homogénea con las propiedades reflejadas en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1 Propiedades del Sol

Masa	$1,99 \cdot 10^{30}$ kg
Diámetro	$1,392 \cdot 10^9$ m
Superficie	$6,087 \cdot 10^{18}$ m ²
Volumen	$1,412 \cdot 10^{27}$ m ³
Densidad media	$1,41 \cdot 10^3$ kg/m ³
Diámetro angular (desde la Tierra)	31 m 59,3 s
Distancia media Tierra - Sol	$1,496 \cdot 10^{11}$ m
Temperatura efectiva	5777 K
Potencia	$3,86 \cdot 10^{26}$ W
Irradiancia	$6,35 \cdot 10^7$ W/m ²

2.2 Usos de la energía solar

Entre los posibles usos que pueden hacerse de la energía solar destacan los siguientes:

- Calefacción doméstica: Mediante energía solar térmica se consigue el agua caliente necesaria para alimentar un sistema de calefacción.
- Calentamiento de agua: Obtención de agua caliente sanitaria (A.C.S) mediante energía solar de baja temperatura.
- Destilación: La purificación de fluidos, específicamente la desalación o destilación de agua. Utilizar como fuente energética la radiación solar es una técnica ya desarrollada con grandes ventajas económicas, sobre todo por el ahorro de electricidad o petróleo, así como la calidad del agua obtenida. Las experiencias acumuladas son contundentes en demostrar que la destilación solar del agua de mar o salobre es una opción tecnológica y económicamente factible [1].
- Generación de energía: Calentamiento de agua mediante energía solar de media o alta temperatura, para producir vapor bien directamente o bien mediante un intercambiador. El vapor es introducido en una turbina de vapor para generar energía eléctrica.
- Fotosíntesis: Los paneles fotovoltaicos tienen un coste elevado por utilizar como material principal el silicio. Por este motivo, surgen unos paneles solares que actúan como fotosintetizadores, los cuales contienen un tinte sensibilizado que realiza la fotosíntesis como las plantas. Estos paneles solares tienen un 7,6% de eficiencia al transformar la luz solar en electricidad y son altamente estables durante miles de horas incluso en condiciones de muy alta temperatura [2].
- Cocinas solares: Son artefactos que permiten cocinar alimentos usando el Sol como fuente de energía. Se dividen en dos familias:
 - De concentración. Se basan en concentración de la radiación solar en un punto, típicamente a través de un reflector parabólico. En dicho punto se coloca la olla que cocinará los alimentos. Generan altas temperaturas y permiten freír alimentos o hervir agua.
 - Hornos solares. El horno o caja solar es una caja térmicamente aislada, diseñada para capturar la energía solar y mantener caliente su interior, en el que se cuecen los alimentos. Los materiales generalmente son de

baja conducción de calor, lo que reduce el riesgo de quemaduras y evita la posibilidad de incendio.

- Evaporación: La evaporación flash por energía solar puede realizarse de dos formas, directamente mediante colectores solares o a partir energía solar termodinámica, es decir, en un circuito cerrado en el que se comprime un refrigerante alcanzando altas temperaturas.

- Secado: El empleo de la energía solar en el calentamiento del aire tiene una creciente demanda en aplicaciones agrícolas, suponiendo un gran ahorro de combustibles en el secado y deshidratación de vegetales.

- Obtención de hidrógeno: El hidrógeno se puede obtener con la electrólisis del agua. Esta técnica consume una cantidad de energía que debe ser suministrada por alguna fuente energética. La energía solar resulta una de las opciones más adecuadas para la obtención de hidrógeno en zonas aisladas.

- Refrigeración de recintos o acondicionamiento de aire: El uso de energía solar para enfriamiento de recintos o acondicionamiento de aire resulta atractivo porque hay una buena relación entre el suministro de energía y la demanda de enfriamiento y por la posibilidad de usar una parte de todo el sistema de calentamiento solar para el acondicionamiento del aire. Los sistemas básicos para el acondicionamiento de aire por energía solar son los sistemas de deshumectación y de enfriamiento por absorción calentados por el Sol. Éste último sistema es el que se está utilizando en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla y cuyo sistema de captación solar es la instalación de captadores Fresnel que se va a estudiar en este proyecto.

3 CLASIFICACIÓN DE LOS COLECTORES SOLARES

Los colectores de energía solar son un tipo especial de intercambiadores de calor que transforman la energía de la radiación solar en energía interna de un fluido caloportador. El principal componente de un sistema solar es el colector solar, el cual se encarga de absorber la radiación solar incidente y convertirla en calor, que será transportado mediante un fluido caloportador que circula a través del colector. La energía transportada por el fluido caloportador, normalmente aire, agua o un aceite térmico; puede ser usada directamente o almacenada en un tanque de almacenamiento para un uso posterior en un momento de demanda energética con poca radiación solar o ninguna.

Hay básicamente dos tipos de colectores solares: los solares sin concentración o con concentración. Respecto a los primeros, el área de recepción y absorción de la radiación solar es la misma, mientras que los colectores solares de concentración normalmente tienen una superficie cóncava que concentra los rayos solares en un área mucho más pequeña, incrementando el flujo radiante entrante. Los colectores de concentración son más apropiados para aplicaciones de alta temperatura. También pueden ser clasificados por el fluido caloportador que usan, ya sea agua, un líquido, aire o un aceite térmico.

3.1 Colectores estacionarios

De este tipo vamos a estudiar primero los colectores que están fijos en una posición y no hacen un seguimiento del Sol en ningún eje. Podemos clasificarlos en tres tipos:

- Colectores de placa plana
- Colectores parabólicos estacionarios
- Colectores de tubo de vacío

3.1.1 Colector de placa plana

Un colector de placa plana, Figura 3-1, consta de un vidrio transparente que deja pasar la radiación solar hasta un absorbedor con una superficie negra de alta absorptividad aislando el resto de la superficie para evitar pérdidas térmicas. Su misión será la de captar la máxima cantidad de energía, la cual será transportada mediante un fluido intermedio para ser usado o almacenado en un tanque de almacenamiento. El líquido que va por los tubos está conectado a un colector principal tanto al inicio como al final de estos con un tubo de mayor diámetro.

Alternativamente se puede usar un diseño en serpentín que no presenta problemas de desigualdad de flujo por cada uno de los tubos paralelos, pero añade la necesidad de usar una bomba para impulsar el fluido ya que la circulación natural por efecto termosifón no es posible.

La cubierta transparente se usa para evitar las pérdidas por convección de la placa absorbidora mediante una fina capa de aire entre el absorbedor y el cristal que hace de aislante térmico. Además de esto, la cubierta transparente reduce las pérdidas radiantes del colector ya que este es transparente para la radiación de longitud de onda corta como la solar, pero prácticamente opaca para la radiación de larga longitud de onda, que es la que emite la placa absorbidora.

Las ventajas principales de este tipo de placas son: su bajo coste de fabricación, el aprovechamiento tanto de la radiación directa como de la difusa y que están fijas permanentemente en una posición, no siendo necesario ningún tipo de sistema de seguimiento que necesitaría de un sistema de mantenimiento más complejo. Para aprovechar la máxima energía que pueden captar se deben posicionar orientados al ecuador, esto significa que para nuestro hemisferio deben posicionarse mirando hacia el sur. En cuanto al ángulo de inclinación, debe ser igual a la latitud donde se haga la instalación con un ángulo de variación de entre unos 10 o 15 grados

dependiendo de la aplicación o la época del año donde es requerida una mayor demanda de la placa. Si es en invierno cuando más alta es la demanda se optará por aumentar 10° la inclinación, y -10° en caso de una demanda más alta en verano.

Los principales componentes de los colectores de placa plana son:

- Cubierta: una o más capas de un material transparente con buenas propiedades de transmisión de radiación solar
- Áreas de paso del fluido absorbedor de calor: tubos, aletas o cualquier conducto por el que pase el fluido caloportador desde la entrada a la salida del colector solar
- Placa absorbidora: placa plana, corrugada o ranurada unida a los tubos y aletas. La placa está normalmente cubierta por una capa con alta absorptividad y baja emitancia
- Colectores: tubos de unión de descarga del fluido
- Aislamiento: minimizar perdidas en la parte trasera y lados del colector solar
- Contenedor: protege todas las partes de la placa plana expuestas al ambiente exterior

Los fluidos caloportadores más usados son el agua, agua con algún tipo de aditivo anticongelante o aire. Su propósito es recolectar la mayor cantidad de energía solar posible al menor coste total. Además de esto es muy importante el tiempo de vida efectivo del equipo el cual se ve afectado por diferentes condiciones adversas como pueden ser la radiación ultravioleta, la corrosión, la alcalinidad o dureza del fluido caloportador, deposición de polvo y otras muchas causas.

En la siguiente sección se va a entrar en detalle en los materiales elegidos para el absorbedor, el acristalamiento de la placa y la fabricación de estos, siendo estos factores aplicables a otro tipo de colectores.

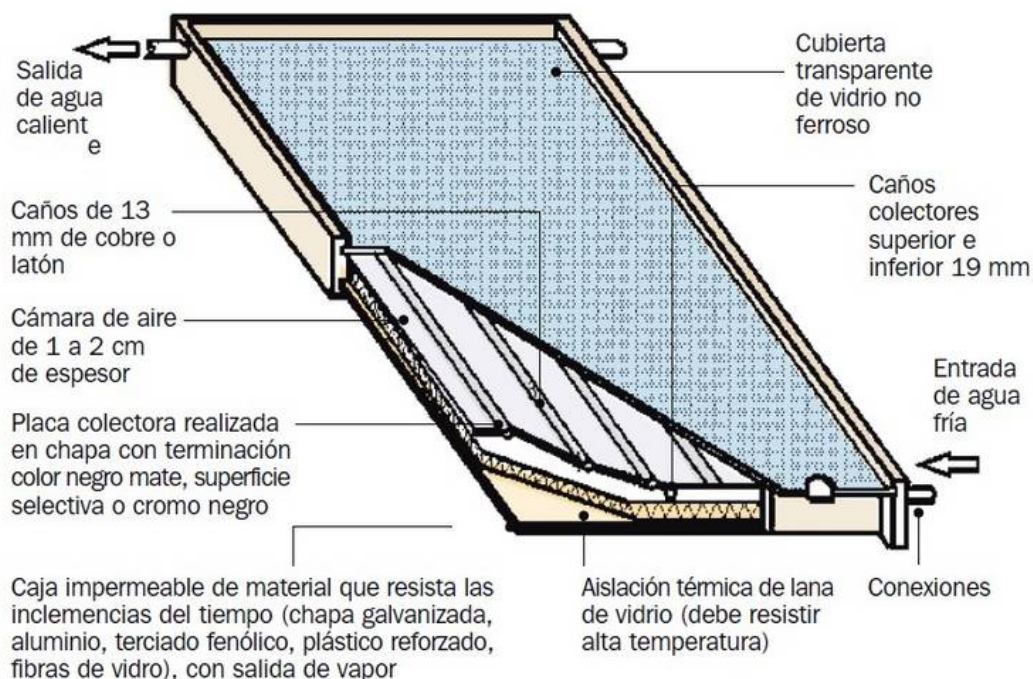


Figura 3-1 Colector de placa plana

3.1.1.1 Materiales de acristalamiento y absorbedor

El vidrio ha sido ampliamente usado en los colectores solares gracias a sus buenas propiedades transmitiendo el 90% de la radiación solar de longitud de onda corta a la vez que es prácticamente opaco para la radiación de onda larga que emite la placa absorbidora. El vidrio usado en estos colectores debe ser de bajo contenido en hierro para aumentar la transmitancia de la radiación solar.

También se han llegado a usar películas de plástico, mucho más baratas, pero con el inconveniente de tener transmitancia para ondas de larga longitud de onda. Algunos tipos de materiales plásticos son capaces de soportar la radiación ultravioleta por largos periodos de tiempo. Otras ventajas, a parte del precio, es su gran flexibilidad y bajo peso permitiendo ahorrar dinero en la estructura que los soporta.

Los vidrios actualmente comercializados tienen una transmitancia que varía entre 0,87 y 0,85, siempre teniendo en cuenta que esta varía considerablemente con el ángulo de incidencia de la componente directa de la radiación.

La superficie del vidrio lleva un revestimiento antirreflectivo que mejora la transmitancia. Para este tipo de colectores, la limpieza del vidrio no es relativamente importante, por lo que la lluvia ocasional es suficiente y en verano, dada la alta radiación solar, el polvo actúa como un buen protector contra el sobrecalentamiento del colector solar.

Hay que tener en cuenta que el vidrio se considera opaco para las ondas de longitud de onda larga emitidas por el colector y, por lo tanto, absorberá parte de este calor y lo emitirá a la atmósfera por radiación y convección.

En cuanto a los colectores solares, absorben la radiación que les llega a través del acristalamiento y la mantienen intentando evitar las pérdidas mediante un correcto aislamiento en la parte inferior y laterales. Para maximizar la energía absorbida el colector debe tener una alta absorptividad para las ondas de longitud corta y una baja emitancia. Esta superficie se la denomina normalmente como superficie selectiva por sus propiedades. La absorptancia de esta superficie depende del color del revestimiento, por lo que se suele usar el negro, y del ángulo de incidencia especialmente. Estas superficies selectivas son más importantes cuanto mayor es su temperatura respecto a la temperatura ambiente y se puede tener como punto de inflexión cualquier temperatura de operación por encima de los 40 °C respecto al ambiente, a partir de este valor se debe invertir en superficies selectivas de mayor calidad.

Un colector solar de alta eficiencia energética debería poder absorber la radiación solar incidente, convertir esta en energía térmica y llevar esta energía a un intercambiador intermedio del proceso con las menores pérdidas posibles en cada uno de los pasos.

Para la construcción de este tipo de colectores es muy necesario que tanto la placa como los conductos que atraviesan el fluido estén muy integrados el uno en el otro. El mayor problema proviene al intentar conseguir una buena unión térmica entre estos tubos y la placa absorbidora sin incurrir en un gasto excesivo de mano de obra o materiales. Los materiales más usados son:

- Cobre
- Aluminio
- Acero inoxidable
- Extrusiones plásticas con protección a radiación ultravioleta

Siendo estos últimos usados sólo en aplicaciones térmicas de baja temperatura. En cuanto al aislante, se usa normalmente fibra de vidrio o fibra mineral de algún material que no tenga problemas de desgasificación al elevar su temperatura.

En el caso de aire como fluido caloportador, su bajo coeficiente de transferencia de calor entre el absorbedor y el aire hace que la fabricación de la placa colectora se complique, teniendo que aumentar el área de esta y hacer uso de una matriz metálica o una hoja metálica corrugada para aumentar la transferencia de calor. Además de esto, se debe hacer uso de mayores gastos volumétricos que, en el caso del agua, resultan en un mayor gasto de compresor.

Otro tipo de colectores, usados en aplicaciones de solar de baja temperatura con una temperatura del fluido caloportador cercana a la del ambiente, son los colectores en panel, Figura 3-2. Consisten en una hoja absorbidora hecha de plástico con tuberías de fluido de paso muy cercanas entre sí. Este tipo de colectores no hacen uso de un vidrio que los cubra y los materiales empleados para el panel son más baratos, como el polipropileno, polietileno, acrílico o el policarbonato.

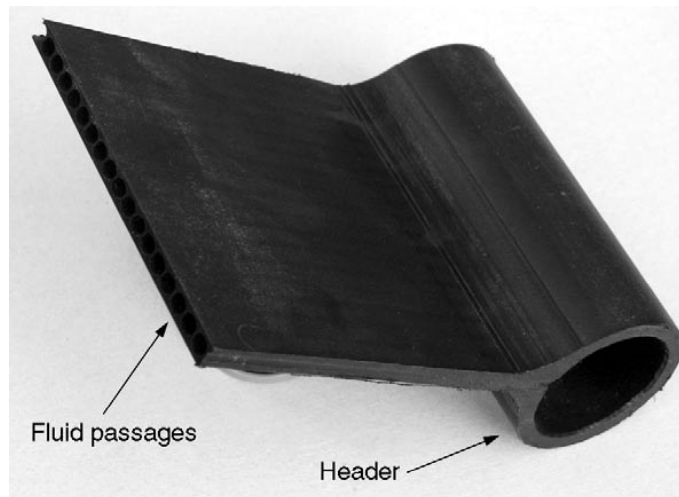


Figura 3-2 Fotografía de un colector en panel.

En la actualidad los colectores planos son los más usados, aunque restringidos a aplicaciones que estén por debajo de los 80°C. Sin embargo, gracias a los últimos avances, como el aislamiento de vacío, se han logrado alcanzar temperaturas de hasta 100°C.

3.1.2 Colector parabólico compuesto

Los colectores parabólicos compuestos, Figura 3-3, son concentradores no formadores de imagen, u óptica anidólica, el cual se basa en reflejar toda la radiación incidente a una superficie absorbadora. Este tipo de colectores no necesita hacer seguimiento solar ya que se pueden hacer uso de una geometría de dos secciones de parábola para minimizar las pérdidas.



Figura 3-3 Paneles de colectores parabólicos compuestos

El concentrador puede aceptar un gran rango de ángulos en los que refleja adecuadamente la radiación solar y gracias a su geometría, hace múltiples reflexiones de la radiación entrante hasta llegar al absorbedor situado en el fondo del colector. El absorbedor puede tomar una gran variedad de configuraciones: plano, bifaciales, en

forma de cuña o cilíndrico.

Los colectores parabólicos compuestos se pueden dividir en simétricos y asimétricos. Normalmente se emplean dos tipos de absorbedores: los de aletas con tubería y los tubulares. Los primeros pueden ser planos, bifaciales y en cuña. En cuanto los asimétricos pueden ser de un solo canal o multicanal.

Hay que tener en cuenta una cierta separación entre el absorbedor y el reflector ya que la unión de estos actuaría como disipador del calor. Como esta pequeña separación produce una pequeña pérdida en el área capaz de reflejar implica una disminución de rendimiento del colector, esta separación debe ser lo menor posible para evitar una gran disminución de rendimiento.

En caso de necesidad de operación a altas temperaturas se puede hacer uso de un sistema de seguimiento intermitente ya que la ratio de concentración de estos colectores es pequeño y el rango de entrada para radiación solar es muy amplio.

El proceso de instalación de este tipo de colectores es modular, pudiendo tener desde un simple receptor con su absorbedor asociado a paneles completos que tienen el aspecto de colectores planos.

3.1.3 Colector de tubos de vacío

Estos colectores son usados principalmente en zonas en las que hay poco sol y el clima es adverso. El colector, figura 3-4, consiste en un tubo por el que circula un fluido a evaporar estando este al vacío en un tubo sellado. Una placa absorbidora está unida al tubo interior y proporciona el calor al fluido que queremos calentar. Este fluido una vez evaporado pasa a condensarse en un colector principal en el cual cederá el calor al fluido de proceso. Una instalación real constaría de muchos de estos colectores solares unidos al mismo colector de salida.

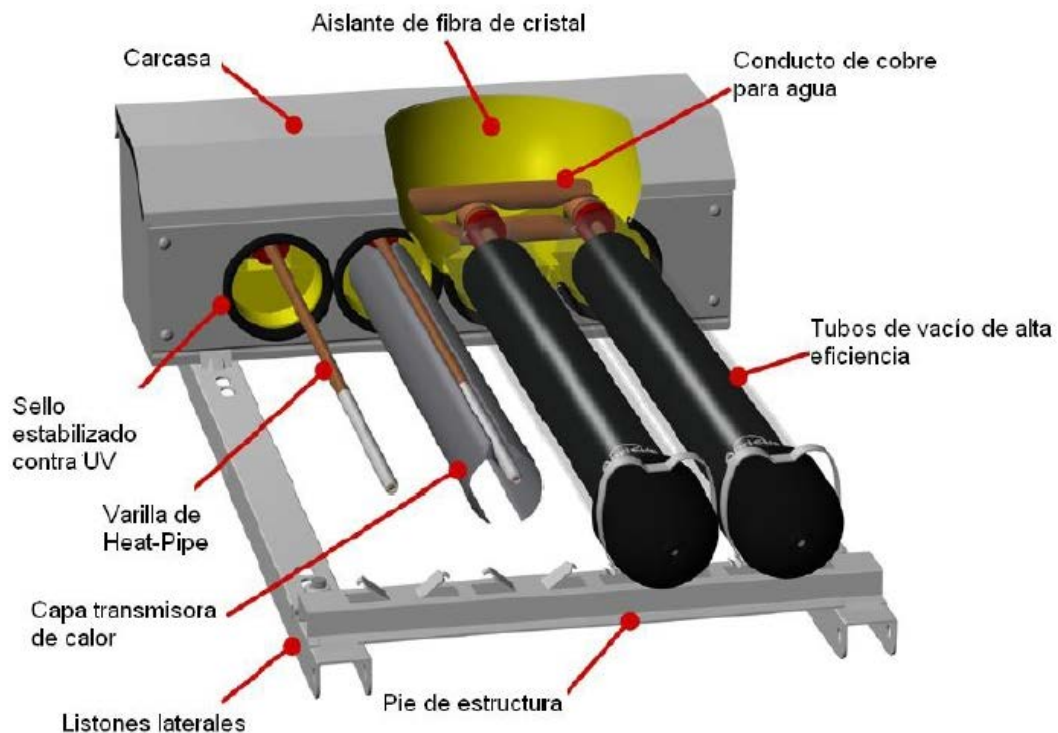


Figura 3-4 Colector de tubos de vacío

Gracias al vacío que envuelve a la placa absorbidora, las cuales evitan las pérdidas convectivas y conductivas, se pueden alcanzar temperaturas de operación mucho más altas que en los colectores solares planos manteniendo la capacidad de recibir tanto la radiación directa como la difusa. La gran ventaja de estos colectores es su mayor eficiencia para bajos ángulos de incidencia consiguiendo una mayor estabilidad en la

producción de calor durante todo el día.

Los colectores de tubo de vacío usan el calor latente de cambio de fase para transferir el calor con gran eficiencia. Estos colectores constan de una tubería con una baja resistencia térmica que captura todo el calor posible mediante unas aletas de cobre revestidas, dándoles el color negro característico de los absorbedores. El calor pasa a un condensador en forma de punta metálica donde se producirá el cambio de fase del fluido anteriormente evaporado. Este fluido condensado volverá al colector solar y se repetirá el ciclo.

Se puede mejorar la efectividad del colector colocando un reflector plano detrás de los tubos aumentando en un 25% la incidencia y mejorando en un 10% el total de energía conseguida durante todo un día. La tecnología de los reflectores parabólicos compuestos también puede ser usada en los colectores de vacío, para ello se concentra la radiación solar al absorbedor con el uso de reflectores parabólicos consiguiendo temperaturas de remanso que superan los 300°C.

Sistemas de seguimiento para alcanzar altas temperaturas se han usado en estos tipos de colectores, además de concentradores compuestos parabólicos que aumentan la capacidad de absorción de estos colectores solares.

En cuanto a la fabricación, se producen en variados tamaños con diámetros de tubo que van desde los 30 mm hasta los 100 mm y una longitud normal de 2 metros.

3.2 Colectores solares de concentración con seguimiento solar

La temperatura puede ser incrementada disminuyendo el área donde se producen las pérdidas. Para ello se hace uso de la concentración de la radiación solar mediante el uso de un dispositivo óptico entre la fuente de radiación y un absorbedor con la menor área posible. Las principales características son las siguientes:

- El fluido de trabajo puede alcanzar mayores temperaturas en un sistema de concentración que en una placa plana con la misma superficie. Esto significa que la eficiencia termodinámica es más alta.
- Esta eficiencia aumenta aún más debido a la pequeña área del receptor, disminuyendo las pérdidas térmicas.
- Las superficies reflectoras necesitan menos material y estructuralmente son más simples, consiguiendo abaratar costes.
- Teniendo en cuenta la disminución de área del receptor solar, es mucho más viable económicamente hacer un tratamiento superficial de este y plantear el uso de aislamiento por vacío.
- La radiación difusa no es aprovechada por estos sistemas cuando se alcanzan altos niveles de concentración.
- Es necesario algún tipo de sistema de seguimiento solar lo cual incrementa el coste del colector y puede conllevar problemas mecánicos.
- El mantenimiento de las superficies reflectantes debe ser periódico ya que se pierde reflectancia con el tiempo.

Hay muchos tipos de concentradores los cuales pueden ser tanto reflectores o refractores, cilíndricos o parabólicos, y estar segmentados o ser de forma continua. En cuanto a los receptores pueden ser cóncavos o convexos, planos, cilíndricos y pueden tener una cubierta de vidrio o no. Los ratios de concentración son muy variados, desde ratios cercanos a 1 hasta ratios que concentran la radiación solar en 10000 veces. A mayor ratio de concentración que se quiera alcanzar mayor debe ser la precisión óptica y de posicionamiento del sistema.

El movimiento del sol puede ser seguido por dos métodos: el método azimutal, el cual requiere un dispositivo que siga el sol tanto en altitud como en azimut, y el método de seguimiento en un solo eje ya sea Este-Oeste o Norte-Sur. Los primeros son usados en los colectores de disco parabólicos y los segundos en los cilindros parabólicos.

Los colectores planos se pueden equipar con reflectores planos los cuales aumentan la incidencia de la radiación difusa en el absorbedor. Hay que tener en cuenta que al hablar de reflexión difusa se refiere a que el material no es un espejo que refleje la imagen del sol al absorbedor.

Los colectores parabólicos compuestos con un sistema de seguimiento también se pueden clasificar como concentradores. Como se ha dicho anteriormente en caso de usarse el seguimiento suele ser intermitente y con poca precisión. Estos concentradores pertenecen a la categoría de la óptica no reflectora de imágenes.

Una de las desventajas de la concentración en colectores solares es que, a excepción de la solar de baja concentración, no se puede aprovechar la luz difusa y solo la componente directa es aprovechable.

En cuanto a los colectores, Figura 3-5, que usan la óptica creadora de imágenes son:

- Colectores cilindro-parabólicos
- Reflectores lineales Fresnel
- Disco parabólico
- Receptor central o de torre

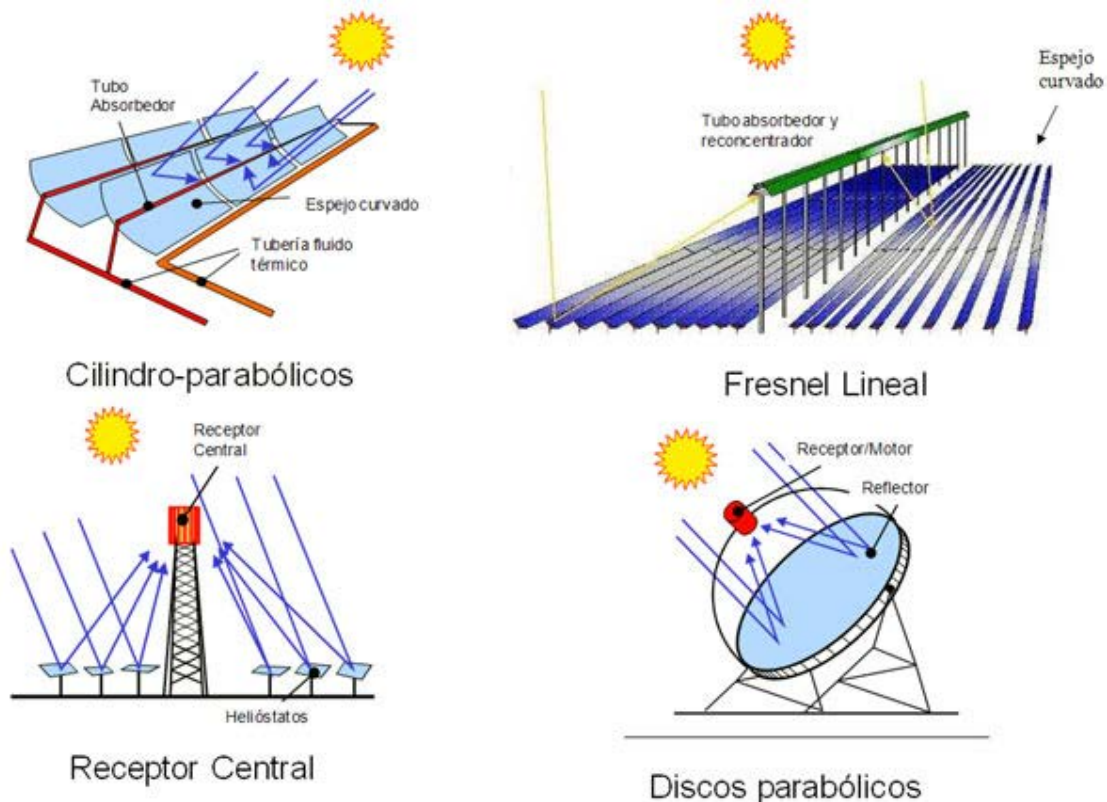


Figura 3-5 Tipos de colectores solares de concentración con seguimiento solar

3.2.1 Colector cilindro-parabólico

Estos sistemas, con estructuras ligeras y una tecnología de bajo coste, es capaz de entregar altas temperaturas de hasta 400°C y con una buena eficiencia. El rango de operación de esta tecnología es entre 50°C y 400°C.

La construcción de estos colectores se hace doblando una hoja de un material reflectante hasta darle una forma parabólica. Un tubo de metal negro cubierto con un vidrio selectivo, para reducir las pérdidas térmicas, es colocado en el centro focal del receptor. El sistema de seguimiento se debe encargar de dirigir la parábola hacia el sol, logrando así que los rayos incidentes paralelos se reflejen al tubo absorbedor. La radiación concentrada que lo alcanza calienta el fluido caloportador que circula dentro del tubo, transformando la radiación solar en calor útil. Es suficiente usar un seguimiento en eje único para seguir al sol, se puede hacer el seguimiento norte-sur, o este-oeste pero siempre teniendo en cuenta que, en el periodo de un año, los colectores con disposición norte-sur consiguen más energía que los este-oeste. Dependiendo de la necesidad energética del proceso y de las horas a las que es más intensivo ese uso se deberá escoger una orientación acorde. La disposición norte-sur del campo aprovecha más la energía en verano, pero menos en invierno y la disposición este-oeste aprovechará más la energía durante invierno y tendrá una curva anual más constante.

La tecnología de los colectores cilindro-parabólicos es la más avanzada dentro de las tecnologías solares debido a la experiencia en ellas en las últimas décadas en diferentes centrales y una industria comercial de estos gracias a su modularidad.

El receptor de los cilindro-parabólicos es lineal. Un tubo dispuesto en la línea focal, Figura 3-6, de la parábola que va desde el primer módulo hasta el último. El tamaño de este tubo debe ser determinado a partir del ratio de concentración que es capaz de alcanzar el reflector a partir de sus tolerancias. La superficie del tubo es selectiva teniendo una alta absorptividad y baja emitancia para evitar las pérdidas radiantes.

A este tubo se le pone una cubierta de vidrio para evitar las pérdidas convectivas con el ambiente, siendo una de las desventajas de este tubo el hecho de provocar unas pérdidas por reflectividad siendo su transmitancia de 0.9 cuando el vidrio está limpio. Para conseguir disminuir las pérdidas debidas a la reflectividad del vidrio se le pone una capa antirreflejo la cual aumenta la transmisividad. Además de esto se hace vacío al espacio que hay entre el absorbedor y la cubierta de vidrio para evitar las pérdidas convectivas. El rango de longitudes normales en las que se mueven los tubos receptores de los cilindros parabólicos es entre 25 y 150 metros y la temperatura de operación normal de estos va desde los 50°C hasta los 300°C. A altas temperaturas se hace muy importante el aumento de la eficiencia de estos, se están desarrollando tecnologías que automaticen la limpieza de los colectores, disminuyendo así las pérdidas.



Figura 3-6 Colector cilindro parabólico

Para la construcción del cilindro parabólico siempre se ha de tener en cuenta al factor más importante, que es el coste-efectividad de estos. Teniendo en cuenta que la rigidez y el peso son ratios a medir muy interesantes a la hora de analizar los procesos de fabricación. Se han propuesto numerosos conceptos estructurales como las estructuras de marco de acero con un tubo de torsión central o en doble V, gracias a estos se consigue reducir las deformaciones en la estructura debido al viento. En cuanto a los materiales reflectantes el vidrio es el material más usado, pero también existen adhesivos reflectantes con una vida de hasta 7 años. Otro método para la producción es usando fibra de vidrio colocando dos capas de estas perpendicularmente para aumentar la resistencia y conductos de plástico que hagan de soporte los cuales están cubiertos por la segunda capa de fibra de vidrio, de esta forma se consigue rigidez tanto transversal como longitudinalmente.

El mecanismo de seguimiento debe ser muy fiable y capaz de seguir el movimiento solar con una buena precisión y al terminar el día retornar a el colector a su posición original. También debe ser capaz de hacer el seguimiento durante días de claros y nubes, asegurarse de proteger los captadores en caso de fuerte viento, sobrecalentamiento o cualquier tipo de fallo en el sistema. La clasificación de estos mecanismos se puede dividir en principio en mecánicos y electro-electrónicos siendo estos últimos los que tienen más fiabilidad y precisión. Los electro-electrónicos se pueden dividir en:

- Motores controlados por sensores electrónicos que detectan la magnitud de la incidencia solar.
- Mecanismos que usan motores controlados por un ordenador los cuales monitorizan el flujo que llega al receptor a través de sensores.

Un ejemplo de estos mecanismos usa tres resistencias dependientes de la luz y que dan instrucciones a un motor de continua el cual posicionara los colectores en la dirección solar, aproximando la dirección cuando esta nublado y volviendo a su posición durante la noche. La primera de las resistencias se colocaría en el lado este del marco del colector y quedaría en sombra cada vez que el sol se moviese, activando el motor hasta volver a recibir luz. Los otros dos sensores estarán colocados en el marco, uno de ellos registrará si hay nubes si la iluminación baja a partir de un cierto nivel y si es así activara el motor cada 2 minutos durante 7 segundos aproximadamente para posicionar el colector aproximadamente en una buena posición para que cuando este segundo receptor detecte que ya no hay nubes el primero de ellos afine la posición. El último de ellos activará el retorno a la posición original cuando haya luz. La gran desventaja de estos sensores que no diferencian entre la luz directa o la difusa por lo que será necesario otro sensor que lo mida. Además de todo esto será necesario controlar que el motor no vaya más allá de los límites rotacionales de la estructura, parando cuando se alcance estos. Todo este sistema solo puede ser usado para pequeños colectores, ya que para largos colectores es necesario unidades hidráulicas y no motores eléctricos.

Otros sistemas de seguimiento son virtuales, a partir de un cálculo matemático de la posición solar y de la posición y ángulo exacto en la que se encuentra el colector manda una señal al sistema de seguimiento activando la parte mecánica de este.

3.2.2 Colector Fresnel

Entre los colectores Fresnel hay dos tipos:

- Colectores de lente Fresnel
- Reflector Fresnel lineal

El primero de ellos consta de un material plástico con la forma adecuada para concentrar los rayos en un punto. El segundo se basa en la reflexión de los rayos incidentes solares mediante un sistema de espejos hacia un receptor lineal, este último es el que se usa en la central térmica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla. El colector Fresnel lineal, Figura 3-8, se puede imaginar como un cilindro parabólico dividido en partes más pequeñas. Este hecho hace más sencillo la construcción de los espejos, ya que al colocar el punto focal a más distancia y dividir el espejo en trozos se consigue que estos no necesiten tener una forma parabólica para reflejar los rayos incidentes. Estos espejos también pueden ser colocados a nivel del suelo y usar una torre por el que vaya el túnel lineal con el receptor. Otro aspecto favorable es el mecánico, al tener un colector de mayor tamaño e inmóvil. Los gastos de este tipo de instalación se abaratan debido a la facilidad de montaje a nivel del suelo y de sus reflectores planos o curvados ligeramente de forma elástica, minimizando los problemas estructurales.

El primer investigador en usar los reflectores Fresnel fue Giorgio Francia en 1968, Figura 3-7, el cual desarrollo un reflector Fresnel lineal con seguimiento en dos ejes en Génova, Italia en los años 60. Con este sistema alcanzó temperaturas altas gracias al sistema en dos ejes, ya que por aquel entonces no estaban a su alcance las capas selectivas que hay hoy en día en el mercado para los absorbedores solares.



Figura 3-7 Colector Fresnel construido por Giorgio Francia, 1968

La empresa FMC, en 1979, diseñó un proyecto detallado de plantas lineales Fresnel de hasta 100 MW para el Departamento de la Energía de los Estados Unidos que nunca se llevó a cabo debido a la falta de financiación.

Una de las grandes dificultades que tiene esta tecnología es lograr evitar las sombras y el bloqueo entre los reflectores adyacentes, para ello se puede aumentar la altura de la torre absorbedora o incrementar el espacio entre los reflectores, encareciendo el coste de la instalación.



Figura 3-8 Colector solar lineal Fresnel instalado en Almería (PSA)

3.2.3 Disco parabólico

El disco parabólico, Figura 3-9, es un concentrador puntual que hace seguimiento solar en dos ejes, concentrando la energía solar en el receptor situado en el punto focal del disco.

La estructura del disco debe proveer de un seguimiento completo del sol para reflejar los rayos directamente en el receptor. Con este propósito, el sistema de seguimiento será parecido al descrito en anteriores apartados, pero en lugar de hacer el seguimiento en un único eje lo hará en dos.

El receptor absorbe la energía radiante solar convirtiéndola en energía térmica gracias al fluido que circula. Esta energía puede ser directamente transformada en electricidad usando un generador colocado directamente en el disco o transportar esta energía mediante el fluido caloportador hasta una planta de potencia donde se realizará la conversión.

La gran ventaja de este tipo de colectores es la capacidad de alcanzar temperaturas por encima de 1500 °C. El rango de concentración por tanto es de entre 600 y 2000, teniendo además un alto rendimiento y la ventaja de poder transformar la energía directamente allí en electricidad.



Figura 3-9 Disco parabólico, Eurodish

Otra de sus ventajas es su capacidad de funcionar de forma independiente o ser capaces de agruparse para formar sistemas de discos más grandes.

3.2.4 Receptor central o de torre

Los campos de heliostatos con receptores de torre, Figura 3-10, son usados en zonas con una gran radiación solar diaria. Usando esta energía y una gran cantidad de espejos planos, llamados heliostatos, que relejan esta radiación incidente a un punto común se consiguen alcanzar grandes cantidades de energía térmica.



Figura 3-10 Torre y campo de heliostatos PS10 Sólucar, Sevilla

La energía concentrada en el receptor será absorbida por el fluido caloportador y esta a su vez será transportada hasta un sistema de almacenamiento o a la planta de potencia.

Las ventajas de este tipo de plantas son las siguientes:

- Recogen la energía y la transfieren a un único receptor, minimizando los gastos en transporte del fluido
- Se pueden alcanzar ratios de concentración de 300 a 1500 por lo que será altamente eficiente tanto recibiendo la energía mediante la transferencia de calor como generando electricidad a partir del fluido calentado a más temperatura.
- Tienen la capacidad de almacenar energía para ser usada en momentos de poca radiación o mayor demanda energética.
- Se benefician de la economía de escala al ser plantas de potencia grandes, generalmente mayores de 10 MW.

Cada heliostato, Figura 3-10, de la planta puede tener entre 50 y 150 metros cuadrados de superficie reflector con 4 o más espejos, instalados en un pilar común para disminuir costes.



Figura 3-11 Heliostatos de la planta PS10 Solúcar, Sevilla

Cada heliostato refleja los rayos incidentes mediante un sistema de seguimiento hasta un receptor central situado en altura gracias a una torre, Figura 3-11. En el receptor se transfiere la energía solar en energía térmica y será transportada hasta la planta de potencia o a el almacenamiento [3].

4 COLECTOR FRESNEL

En este capítulo se va a realizar la descripción más detallada del captador solar Fresnel y a continuación se verá el colector situado en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla [4]. Este captador está conectado a una maquina de absorción de doble efecto que con el calor aportado a el agua mediante la energía solar se consigue la producción de frío con el objetivo de refrigerar la Escuela de Ingenieros.

4.1 Sistema focal lineal Fresnel

Los sistemas de concentración solar Fresnel es una de las tecnologías que pretende abrirse camino en competencia directa con los captadores de tipo cilindro-parabólicos. Son sistemas de foco lineal, es decir, concentran la radiación solar a lo largo de una línea, que corresponde a un tubo de absorción por el que circula un fluido térmico.

Los beneficios, consideraciones de diseño y objetivos de la construcción de sistemas de tipo lineal a gran escala, en comparación con otro de sus competidores directos, los captadores cilindro parabólicos son las siguientes:

- Disminución del coste de instalación
- Espejos y sistema de seguimiento de bajo coste
- Tubo absorbedor fijo, no se necesitan juntas de alta presión flexibles lo cual previene las posibles roturas y el coste de mantenimiento.
- No es necesario el uso de tubos de vacío
- Reflectores casi planos doblados en frío y situados cerca del suelo, se reducen cargas de viento que puedan dañar la estructura.
- Uso eficiente del suelo, las filas de colectores pueden situarse cerca una de la otra más facilmente evitando perdidas por sombras propias.
- Fácil acceso a areas de reparación y mantenimiento de piezas superficiales y de las partes moviles
- No es necesario el uso de codos de expansión, el absorbedor puede dilatarse libremente.

El sistema concentrador, el cual consta de espejos reflectores con un gran radio de curvatura que reflejan y concentran la radiación solar hacia un tubo receptor situado en una torre en altura. Al concentrar los rayos solares sobre el receptor estos calientan el fluido que será usado en la instalación. Debe de constar de un mecanismo de control con seguimiento solar capaz de seguir con un bajo grado de error la trayectoria solar. Una vez esta radiación concentrada llega al receptor es transformada en energía termica transferida a un fluido caloportador que transportara el calor útil a donde sea necesario. Los elementos que conforman el captador solar Fresnel son los siguientes:

- Concentradores reflectores de la radiación solar con gran ángulo de curvatura (ligeramente curvados elásticamente en frío)
- Receptor, formado por un tubo o varios tubos con cubierta de vidrio. El receptor se encuentra en un plano paralelo y en altura a los concentradores. Por el interior de los tubos absorbedores circula el fluido caloportador
- Estructura que sustente a los espejos y el tubo receptor.
- Mecanismo de seguimiento del conjunto, teniendo en cuenta que cada fila de objetos tendrá una inclinación diferente.

4.2 Descripción general de la instalación de la Escuela superior de ingenieros de Sevilla

El captador solar Fresnel esta situado en las coordenadas $37,41^\circ$ de latitud y de 6° de longitud Oeste en la azotea del edificio paralela a la fachada Sur, teniendo en cuenta que no está orientada directamente al sur, sino con una desviación de $12^\circ 3' 1''$ hacia el Oeste, Figura 4-1.



Figura 4-1 Vista aérea de la cubierta

El sistema consta de una única línea por la que circula agua como fluido caloportador, Figura 4-2. Los espejos concentran la radiación en el tubo lineal central, el cual consta además de un reflector secundario que consigue mejorar rendimiento de la instalación. En total la instalación consta de 11 filas de espejos con orientación en un solo eje.



Figura 4-2 Imagen de la instalación situada en la azotea

La siguiente tabla muestra las principales características de la instalación:

Tabla 4-1 Características principales del colector solar Fresnel

Extensión de terreno ocupada	480 m ²
Superficie reflectora total	352 m ²
Orientación planta	Este - Oeste
Número de líneas receptoras	1
Longitud línea receptor	64 m
Tipo de receptor	De cavidad con reflector secundario y cubierta de vidrio
Altura línea receptor	4 metros sobre los espejos
Anchura receptor	0,3 metros
Tipo absorbedor	Tubo de acero DIN 1.4541 (AISI 321): Acero inoxidable austenítico estabilizado
Fluido de trabajo	Agua

Generación de vapor	No
Presión de diseño	13 bar
Número de filas de reflectores por línea de absorbedor	11 filas
Longitud de cada módulo reflector	4 metros
Anchura reflector	0,5 metros
Número total de reflectores	176
Reflectividad	0,92
Relación de concentración	25

4.3 Estructura de acero

La estructura sostiene los espejos y sus cojinetes además del tubo de absorción y el reflector secundario. Está recubierta con una pintura en polvo y la propia estructura marca los límites del área de los espejos, Figura 4-3.



Figura 4-3 Estructura de acero del colector solar

4.4 Espejos reflectores

Los espejos primarios están contruidos de vidrios de seguridad los cuales están ligeramente curvados elásticamente (radio de curvatura entre 8.6 – 10.6 m) y pegados a la estructura soporto. Los espejos son movidos por un mecanismo de arrastre el cual forma parte del sistema de seguimiento solar y funciona de forma autónoma. Los espejos tienen dos modos de funcionamiento, en posición de seguimiento, Figura 4-4, y en stand-by, Figura 4-5.



Figura 4-4 Espejos reflectores en modo funcionamiento



Figura 4-5 Espejos reflectores en modo stand-by

4.5 Mecanismo de arrastre

La transmisión de energía del motor impulsor es liberada por una correa poly V con una reducción de velocidad de aproximadamente 1:2.8 en la polea de salida. Cada uno de los mecanismos de arrastre mueven ocho espejos de una fila, cuatro en cada lado, Figura 4-6.



Figura 4-6 Mecanismo de arrastre de los espejos

4.6 Reflector secundario

El reflector secundario, Figura 4-7, consta de una envolvente delgada de metal y un espejo cuya reflectividad nominal es 0,77, montado dentro de dicha cubierta. Esta cubierta reflejará la radiación solar que no incide directamente sobre el receptor desde los espejos primarios, optimizando de este modo el rendimiento óptico del sistema. Además de lo anterior, se encarga de proteger al tubo receptor de condiciones adversas ambientales.



Figura 4-7 Reflector secundario

Las propiedades principales y dimensiones de este reflector están descritas en la siguiente tabla, Tabla 4-2.

Tabla 4-2 Propiedades y dimensiones del reflector secundario

Absortividad	0,1
Emisividad	0,1
Conductividad	20 W/m·K
Longitud	64 metros
Diámetro exterior	165 mm
Espesor	5 mm

4.7 Tubo receptor

Las propiedades y dimensiones del tubo receptor se recogen en la siguiente tabla, Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Propiedades y dimensiones del tubo receptor

PROPIEDADES	TUBO ABSORBEDOR	CUBIERTA DE VIDRIO
Emisividad	0,14	0,10
Absortividad	0,94	0,06
Transmisividad	-	0,96

Conductividad	16,3 W/m·K	0,8 W/m·K
Diámetro exterior	70 mm	125 mm
Espesor	2,1 mm	3 mm
Longitud	64 m	64 m

El tubo receptor, Figura 4-7, es un tubo soldado que consta de un receptor SCHOTT PTR® 70, cuya absorptividad nominal de 0,94. En los extremos del sistema del tubo hay bridas DN 50 (DIN 2633, PN16) para conectar el captador solar con el resto del circuito hidráulico. La temperatura en el circuito hidráulico está limitada a un máximo de 200 °C y la presión a un máximo de 16 bar. La presión estándar de operación está limitada a 13 bar, y la válvula de liberación de presión está ajustada a 16 bar. El caudal nominal de agua será de $13 \text{ m}^3/\text{h}$.

El tubo absorbedor se encuentra rodeado por una cubierta de vidrio para asegurar el vacío entre ambos. El conjunto tubo absorbedor y vidrio conforman el tubo receptor.

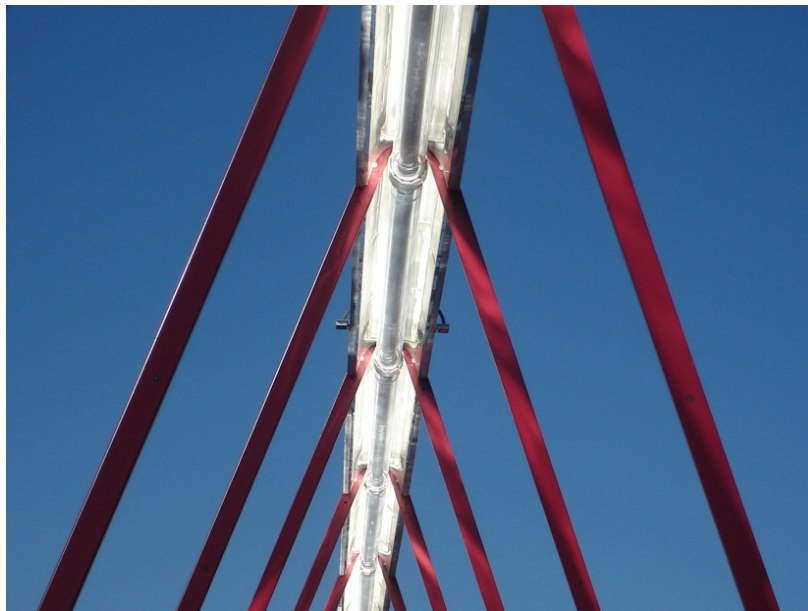


Figura 4-8 Tubo absorbedor, estructura y cubierta de vidrio

4.8 Sensores

Potenciómetro: Cada fila de espejos está equipada con un potenciómetro para determinar la posición actual de las filas de espejos (los sensores se colocan junto a los mecanismos de arrastre). Las lecturas del sensor son transmitidas por medio de un CAN bus (CANOpen) al controlador. Se instala una interfaz analog/CAN para cada potenciómetro.

Sensor de temperatura: Para monitorizar las temperaturas, se ha instalado un sensor PT100 a la entrada y a la salida del tubo de absorción. Si la temperatura se eleva por encima de la temperatura máxima definida, el controlador comenzará a desenfocar las filas de espejos. El sensor está conectado al sistema de control por medio de un bus CAN, Figura 4-9.



Figura 4-9 Sensor de temperatura

Sensor solar: Para la calibración automática opcional de las filas de los espejos, se han montado sensores solares a cada lado del receptor, los cuales detectan líneas focales no centradas de los espejos primarios. Cada sensor solar consiste en un módulo PV que es sellado en un estuche de aluminio. Una interfaz CAN de cuatro canales transfiere el valor medido (V) al controlador en el armario de interruptores. Los sensores están montados fuera del concentrador para evitar su sobrecalentamiento, Figura 4-10.



Figura 4-10 Sensor solar

5 MODELO ÓPTICO DEL COLECTOR FRESNEL

Se muestra a continuación el modelo óptico del captador solar tipo Fresnel [4] [5], que se aplicará al colector solar situado en la Escuela Superior de ingenieros de Sevilla pero podría aplicarse a cualquier sistema de captación de tipo Fresnel lineal.

5.1 Descripción general del modelo

Para la descripción del modelo se hace uso de un código de programación con el programa Matlab, en el que se introducirán como datos de entrada los siguientes parámetros:

- Día del año, desde 1 a 365, siendo el 1 el primer día de Enero.
- Hora local (en horas).
- Radiación solar directa, en W/m².
- Orientación del eje del captador con respecto al Sur.

Para la realización del modelo los espejos primarios se van a suponer planos por tener un radio de curvatura elevado, y el diseño se va a realizar a partir del punto central, como se explicará más adelante.

Este modelo óptico es el resultado de la combinación de dos modelos: uno en dos dimensiones y otro en tres dimensiones. El modelo completo proporcionará como salida, para un día y a una hora determinados, todas las magnitudes que se enumeran a continuación:

- Posición solar
- Hora solar
- Inclinación de los espejos
- Sombras propias entre espejos
- Tramo y porcentaje de tubo no iluminado
- Factor de pérdidas ópticas
- Radiación real que llega al tubo absorbedor desde los espejos
- Radiación teórica si no hubiera pérdidas de ningún tipo

La obtención de todas estas magnitudes se desarrollan a continuación.

En primer lugar se va a definir el sistema de referencia adoptado y su posición respecto a los ejes geográficos. Como se comentó en el capítulo 4, el campo solar está situado paralelo a la fachada Sur de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, pero esta fachada no está orientada puramente al Sur sino que tiene una desviación de 12° 3' 1'' hacia el Oeste como podía observarse en la Figura 5. A continuación se muestra el plano en planta de la instalación en la cubierta del edificio, Figura 5-1, con su desviación respecto a los ejes geográficos.

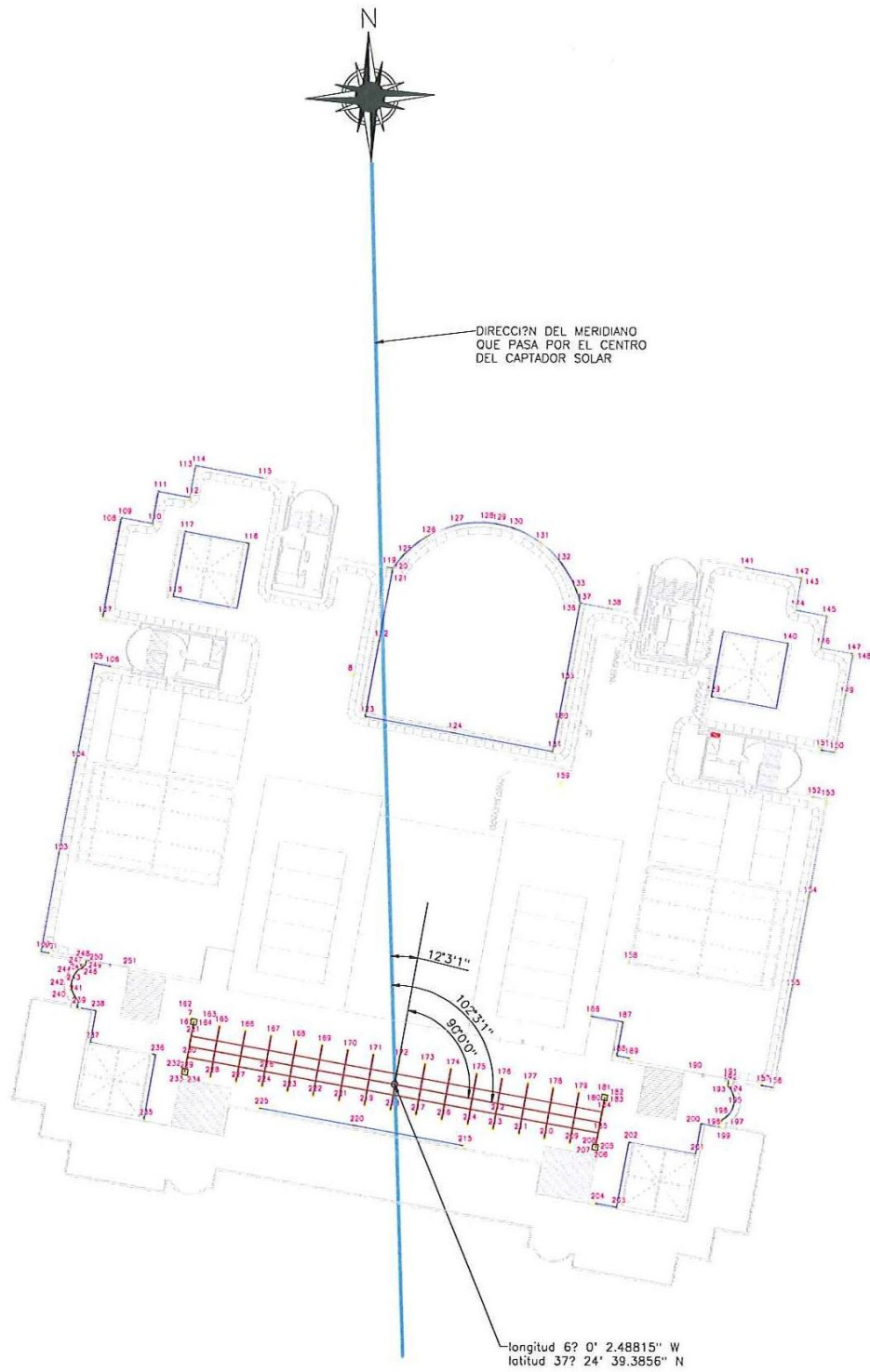


Figura 5-1 Plano en planta de la instalación Fresnel

Los ejes de referencia adoptados para resolver el modelo óptico así como su origen se muestran en la Figura 5-2. En ella se tiene también la nomenclatura de cada fila y la orientación del campo solar respecto al Sur.

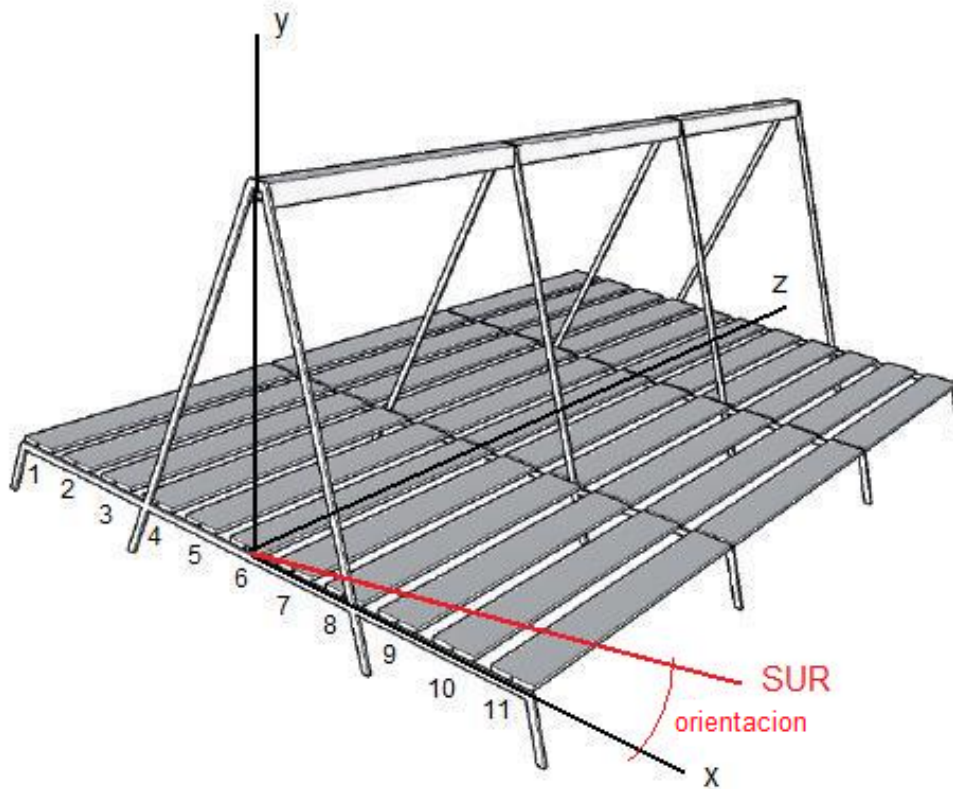


Figura 5-2 Ejes de referencia, orientación y nomenclatura de las filas de espejos del campo solar

El ángulo “orientación” tiene un valor de $12^{\circ} 3' 1''$ con respecto al Sur en dirección Oeste, como puede observarse en la figura.

Cada fila mide 0,5 metros de ancho y están separadas unas de otras por una distancia de 0,2 metros. El eje X es paralelo a la dirección del lado corto de los espejos por lo que el largo de los espejos corresponde con la dirección del eje Z. La altura se cuantificará con el eje Y. El tubo absorbedor está situado 4 metros por encima de los espejos. El origen de coordenadas se ha situado en el centro de la fila número 6 (fila central), por lo que el tubo es paralelo al eje Z, y en el extremo Oeste del sistema de captación. Es decir, el origen de coordenadas está situado en el extremo Oeste de la fila 6, en el punto medio del ancho del espejo.

A continuación, Figura 5-3, se representa de forma esquemática uno de los espejos con los parámetros solares necesarios para los cálculos que se van a realizar, así como los ejes de referencia, los ejes geográficos y la inclinación del espejo. El ángulo “O” se corresponde con la orientación del eje X respecto al Sur.

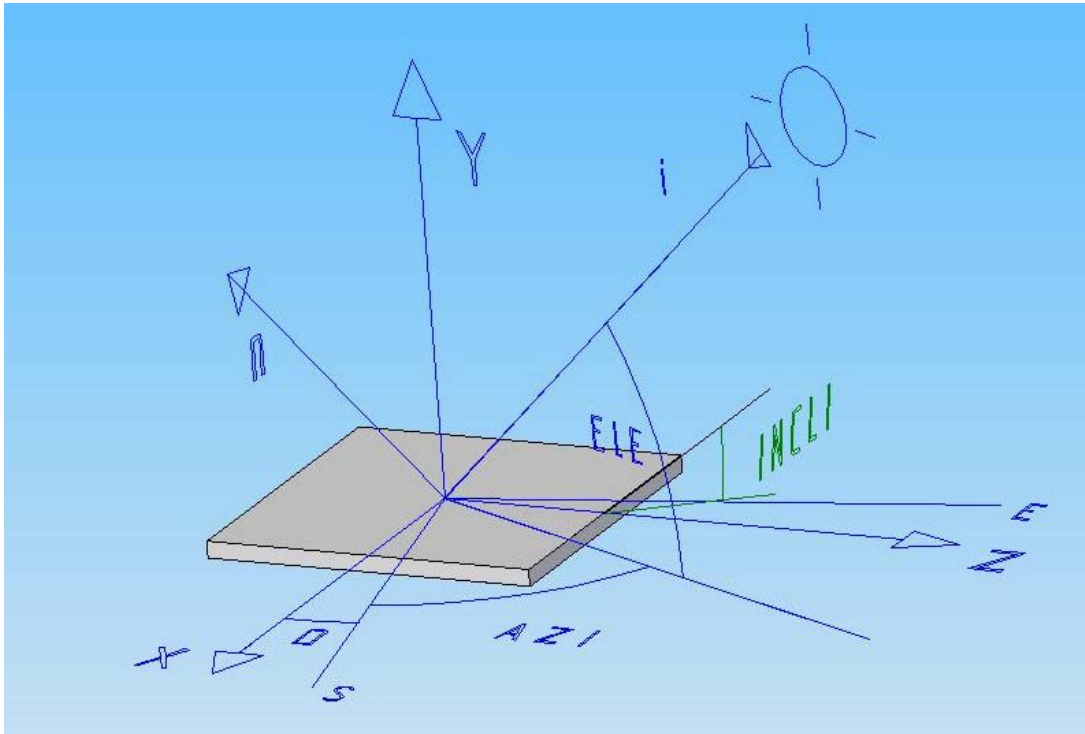


Figura 5-3 Parámetros solares usados en los cálculos

A partir de este sistema de referencia se va a definir el vector incidencia solar \vec{i} en función de los parámetros solares distinguiendo varios casos según el valor que tenga el Azimut solar. Este ángulo toma valores entre -180 y 180 grados, siendo positivo en dirección S-E-N, negativo en dirección S-O-N y nulo al coincidir la proyección con el Sur. Según esto, el vector incidencia solar \vec{i} , y por lo tanto la posición solar, se determinan de la siguiente forma:

1) $Azi \leq 0$

$$\vec{i} = \begin{bmatrix} \cos(Ele) \cdot \cos(-Azi + Orientacion) \\ \text{sen}(Ele) \\ \cos(Ele) \cdot \text{sen}(-Azi + Orientacion) \end{bmatrix}$$

2) $0 < Azi < Orientación$

$$\vec{i} = \begin{bmatrix} \cos(Ele) \cdot \cos(Orientacion - Azi) \\ \text{sen}(Ele) \\ \cos(Ele) \cdot \text{sen}(Orientacion - Azi) \end{bmatrix}$$

3) $Azi > Orientación$

$$\vec{i} = \begin{bmatrix} \cos(Ele) \cdot \cos(-Azi + Orientacion) \\ \text{sen}(Ele) \\ \cos(Ele) \cdot \text{sen}(-Azi + Orientacion) \end{bmatrix}$$

A continuación se van a definir todos parámetros solares necesarios a partir de las ecuaciones astronómicas siguientes:

- Ángulo diario (radianes): arco del ecuador celeste comprendido entre el meridiano superior del lugar y el círculo horario que pasa por el astro.

$$Adia = \frac{2 \cdot \pi \cdot (Dia - 1)}{365}$$

- Declinación solar (radianes): ángulo formado por el vector Tierra – Sol y el plano ecuatorial celeste, variando desde –23 grados 27 minutos en el Solsticio de invierno (Sol situado al Sur) a 23 grados 27 minutos en el Solsticio de verano (Sol situado al Norte), pasando por un valor nulo en los Equinoccios.

$$Dec = 57.2958 \left[(0.006918 - 0.399912 \cdot \cos(Adia) + 0.070257 \cdot \sen(Adia) - 0.006758 \cdot \cos(2 \cdot Adia) + 0.000907 \cdot \sen(2 \cdot Adia) - 0.002697 \cdot \cos(3 \cdot Adia) + 0.00148 \cdot \sen(3 \cdot Adia)) \right]$$

- Ecuación del tiempo: diferencia existente entre la longitud del día terrestre, constante, y la longitud del día solar, variable, a lo largo del año.

$$Et = 229.18 \left[0.000075 + 0.001868 \cdot \cos(Adia) - 0.032077 \cdot \sen(Adia) - 0.014615 \cdot \cos(2 \cdot Adia) - 0.04089 \cdot \sen(2 \cdot Adia) \right]$$

- Hora solar: También denominada hora aparente local u hora solar verdadera.

$$Hsol = Hloc - Hluz + 4 \cdot (Lest - Lloc) + Et$$

Donde:

- Hloc: Hora local, también llamada hora media local.
- Hluz: Corrección de la hora solar debida tanto al ahorro de luz de día mediante desfase horario, como el cambio de hora local respecto al meridiano estándar. Tiene el valor de 2 desde abril hasta octubre y el valor 1 desde noviembre hasta marzo.
- Lest: Longitud del meridiano estándar, Este (+) u Oeste (-) respecto a Greenwich. En Sevilla su valor es de 0 grados.
- Lloc: Longitud local, en Sevilla 6 grados.
- Et: ecuación del tiempo, definida anteriormente.

- Ángulo horario (grados sexagesimales): Expresión en grados de la hora solar. Cada hora equivale a 15 grados, con el origen en el mediodía y tomando valores positivos antes del mediodía y negativos después.

$$Ahor = (12 - Hsol) \cdot 15$$

- Elevación solar (grados sexagesimales): Es la distancia angular entre el horizonte y la posición del Sol. Este ángulo toma valores entre 0 y 90 grados.

$$Ele = \arcsen [\sen(Dec) \cdot \sen(Lat) + \cos(Dec) \cdot \cos(Lat) \cdot \cos(Ahor)]$$

El término Lat corresponde a la latitud local en grados, que para Sevilla tiene un valor de 37,41 grados.

• **Azimuth solar** (radianes): Es la distancia angular entre el Sur y la proyección del Sol sobre el horizonte. Este ángulo toma valores entre -180 y 180 grados, siendo positivo en dirección S-E-N, negativo en dirección S-O-N y nulo al coincidir la proyección con el Sur. El Azimuth solar se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Azi = \arccos \left(\frac{\sin(Ele) \cdot \sin(Lat) - \sin(Dec)}{\cos(Ele) \cdot \cos(Lat)} \right)$$

Hay que efectuar una corrección en función del ángulo horario:

$$Si\ Ahor > 0 \rightarrow Azi = -Azi$$

NOTA: En el programa Matlab los argumentos de las funciones trigonométricas deben ser introducidos en **radianes**.

5.2 Modelo 2D

5.2.1 Inclinación de la fila de espejos

En primer lugar debe calcularse la posición en la que se encuentran las 11 filas de espejos a una hora y en un día determinados. Como los espejos tienen un sistema de seguimiento según el eje Z con el objetivo de variar su inclinación según la Elevación solar, se proyecta el vector de incidencia solar en los ejes X e Y, Figura 5-4 y Figura 5-5.

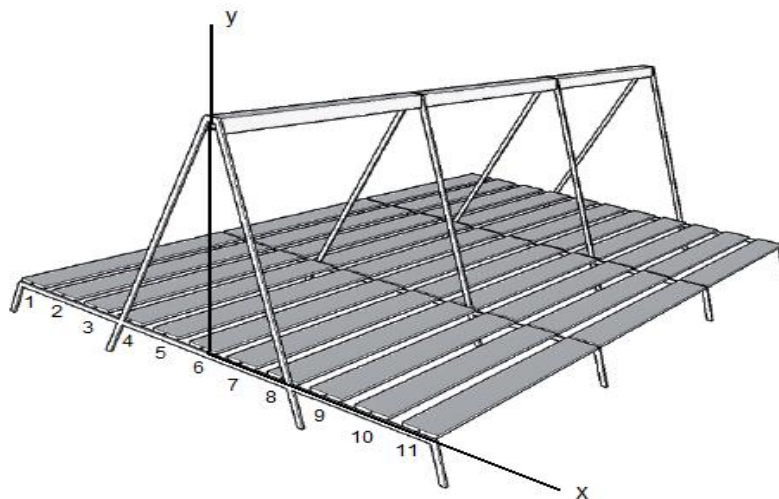


Figura 5-4 Ejes del modelo 2D

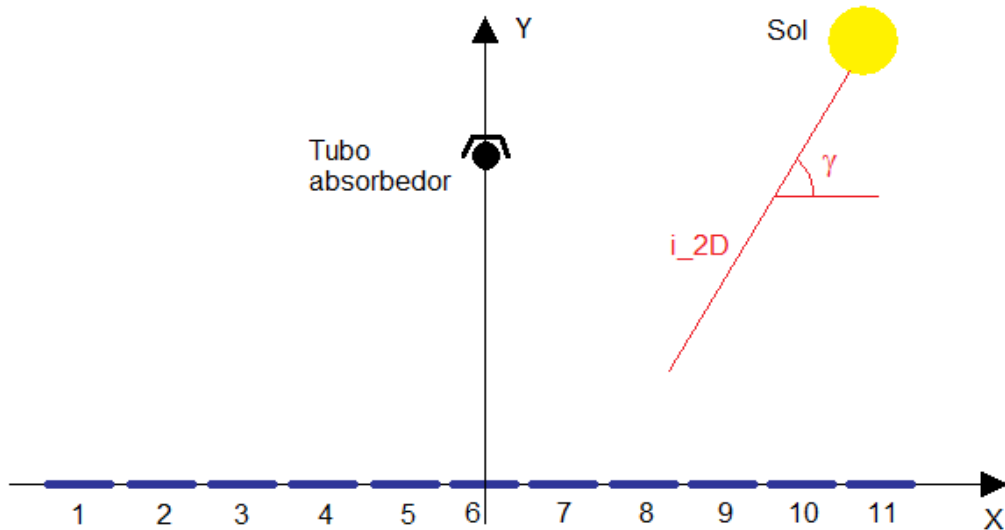


Figura 5-5 Proyección del sistema de captación en los ejes X e Y

De este modo se tiene un vector incidencia en dos dimensiones con las siguientes expresiones, dependiendo de nuevo del Azimut solar:

1) $Azi \leq 0$

$$\vec{i}_{2D} = \begin{bmatrix} \cos(Ele) \cdot \cos(-Azi + Orientacion) \\ \text{sen}(Ele) \end{bmatrix}$$

2) $0 < Azi < Orientación$

$$\vec{i}_{2D} = \begin{bmatrix} \cos(Ele) \cdot \cos(Orientacion - Azi) \\ \text{sen}(Ele) \end{bmatrix}$$

3) $Azi > Orientación$

$$\vec{i}_{2D} = \begin{bmatrix} \cos(Ele) \cdot \cos(-Azi + Orientacion) \\ \text{sen}(Ele) \end{bmatrix}$$

A continuación se muestra un esquema de las magnitudes asociadas a un captador Fresnel necesarias para el cálculo del ángulo de inclinación, Figura 5-6.

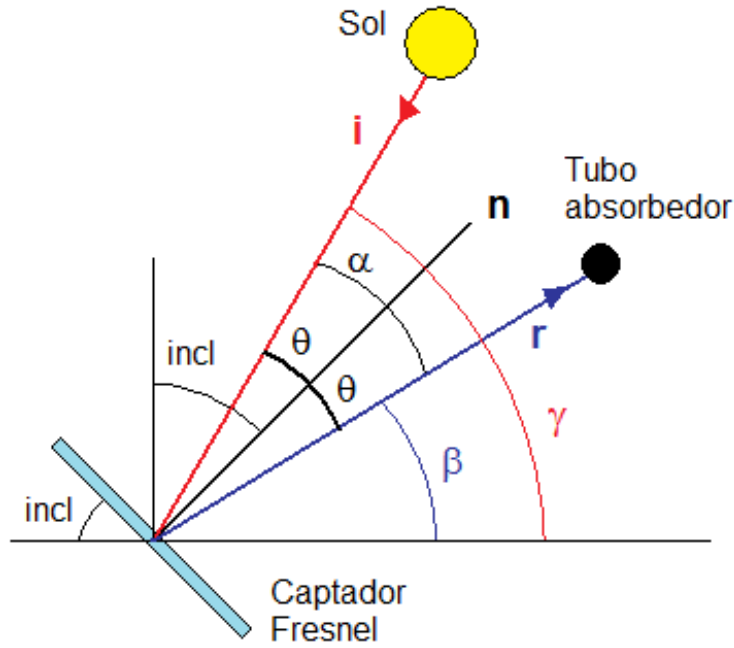


Figura 5-6 Esquema en 2D de un captador Fresnel y sus magnitudes ópticas asociadas

El ángulo γ es el ángulo que forma el vector \vec{r}_{2D} con respecto a la horizontal (Eje X).

Una vez calculado el vector incidencia, se impone que el vector con el que se refleja la radiación solar en los espejos lleve la dirección desde el espejo al tubo absorbedor. Según el origen de coordenadas, en el modelo 2D el tubo absorbedor se encuentra en el punto $(X_t, Y_t) = (0, 4)$, ya que está situado 4 metros por encima de los espejos y tiene coordenada $X=0$ por estar situado en el origen del eje X. Haciendo el cálculo para el punto medio de los espejos, cada fila tendrá la posición $(X_E, Y_E) = (X_E, 0)$. El valor de X_E para cada fila se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.-1**.

Tabla 5-1 Posiciones de los centros de las filas de espejos en el eje X

FILA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X_E (metros)	-3.5	-2.8	-2.1	-1.4	-0.7	0.0	0.7	1.4	2.1	2.8	3.5

Así, el vector del reflejo de la radiación solar se calcula de la siguiente forma:

$$\vec{r}_{2D} = \begin{bmatrix} r_{2Dx} \\ r_{2Dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_t - X_E}{\sqrt{(X_t - X_E)^2 + (Y_t - Y_E)^2}} \\ \frac{Y_t - Y_E}{\sqrt{(X_t - X_E)^2 + (Y_t - Y_E)^2}} \end{bmatrix}$$

Se ha definido como un vector unitario y se calcula como destino menos origen dividido por el módulo de la distancia.

El ángulo que forma el vector reflejo con la horizontal es el ángulo β y se calcula como sigue:

$$\beta = \arctan\left(\frac{r_{2Dy}}{\text{abs}(r_{2Dx})}\right)$$

El producto escalar de dos vectores es igual al módulo del primero por el módulo del segundo por el coseno del ángulo que forman ambos vectores. Como el vector reflejo es un vector unitario su módulo valdrá 1. El vector incidencia es unitario en 3 dimensiones pero no en el modelo 2D, por lo tanto el ángulo que forman se puede calcular de la siguiente forma:

$$\vec{i}_{2D} \cdot \vec{r}_{2D} = |\vec{i}_{2D}| \cdot |\vec{r}_{2D}| \cdot \cos(\alpha) \rightarrow \alpha = \arccos\left(\frac{\vec{i}_{2D} \cdot \vec{r}_{2D}}{|\vec{i}_{2D}| \cdot |\vec{r}_{2D}|}\right)$$

Por la ley de la reflexión en un espejo, el ángulo con el que incide es el mismo con el que refleja. Por lo tanto el ángulo de reflexión será la mitad del calculado anteriormente (mirar **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

$$\theta = \frac{\alpha}{2}$$

A continuación se va a calcular la inclinación de cada espejo por trigonometría. Se deben distinguir varios casos:

1) $X_E < 0$ (Filas 1-5)

A) $\gamma \geq \beta \rightarrow \text{incl} = \frac{\pi}{2} - \beta - \theta$ (Figura 5-7)

B) $\gamma < \beta \rightarrow \text{incl} = \frac{\pi}{2} - \beta + \theta$ (Figura 5-8)

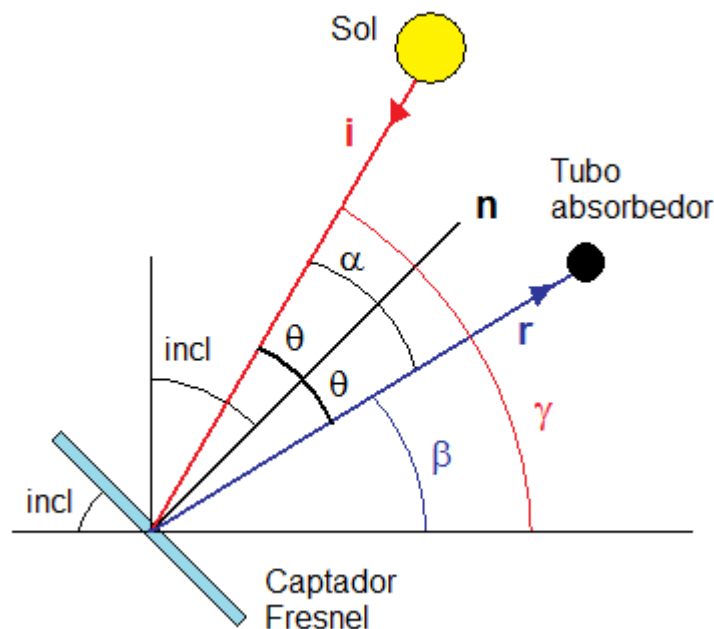


Figura 5-7 Inclinación: caso $X_E < 0$ y $\gamma > \beta$

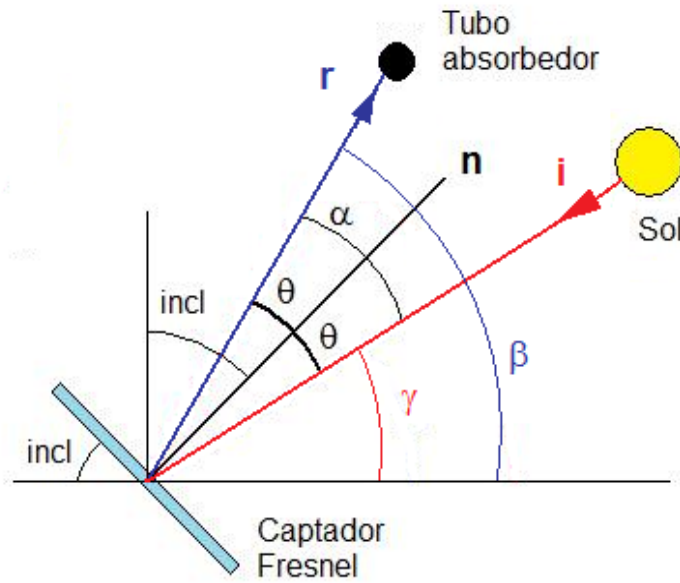


Figura 5-8 Inclinación: caso $X_E < 0$ y $\gamma < \beta$

2) $X_E = 0$ (Fila 6) $\rightarrow incl = \theta$

En este caso el vector reflejo es perpendicular a la horizontal porque el tubo absorbedor está justo encima del centro del espejo, Figura 5-9:

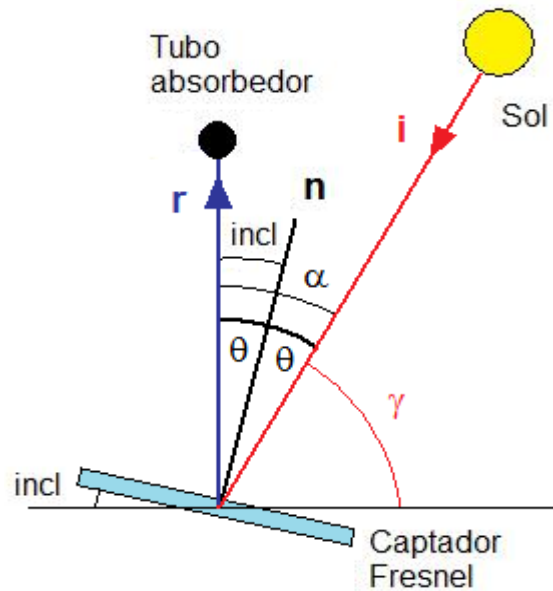


Figura 5-9 Inclinación: caso $X_E = 0$

3) $X_E > 0$ (Filas 7-11) $\rightarrow incl = \beta + \theta - \frac{\pi}{2}$ (Figura 5-10)

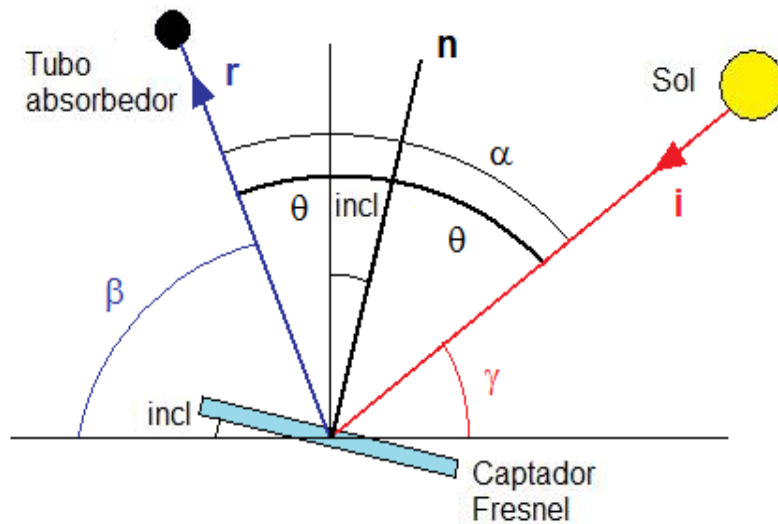


Figura 5-10 Inclinación: caso $X_E > 0$

La inclinación se ha definido positiva según el sentido indicado en la Figura 5-11:

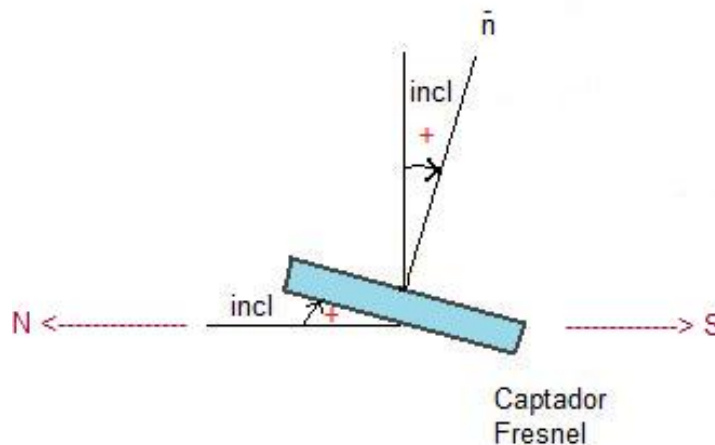


Figura 5-11 Sentido positivo de la inclinación de las filas de espejos

Tras estos cálculos se conoce el ángulo de inclinación para cada fila de espejos, para cualquier día y a cualquier hora.

5.2.2 Sombras propias entre espejos

Con este modelo en dos dimensiones se van a calcular también las sombras propias entre las filas de espejos, es decir, las sombras que pueden producir unos espejos sobre otros. Una vez conocida el área sombreada se dividirá entre la superficie reflectora total obteniéndose así un factor al que se denominará *factor de sombras propias* (f_{sombra}). Este cálculo se realiza en dos dimensiones porque la componente azimutal del Sol sólo afectará a los espejos situados en los extremos, es decir, si el azimut es menor que cero sólo afectará a los espejos situados en el extremo Este (cada módulo reflector mide 4 metros de largo). Teniendo en cuenta que hay 16 módulos por cada fila (64 metros), se van a despreciar los efectos de borde en el primer espejo de los extremos. Así mismo se va a suponer en estos cálculos que los espejos son prácticamente planos, ya que tienen

un radio de curvatura muy elevado. Se calculará para cada fila la posible sombra que le produce la fila inmediatamente siguiente en número, es decir, la siguiente fila hacia el Sur, debido a la posición solar. Para estos cálculos debemos distinguir varios casos según si los espejos tienen inclinación positiva o si tienen inclinación negativa.

CASO 1: Fila con inclinación positiva y fila siguiente con inclinación positiva, Figura 5-12.

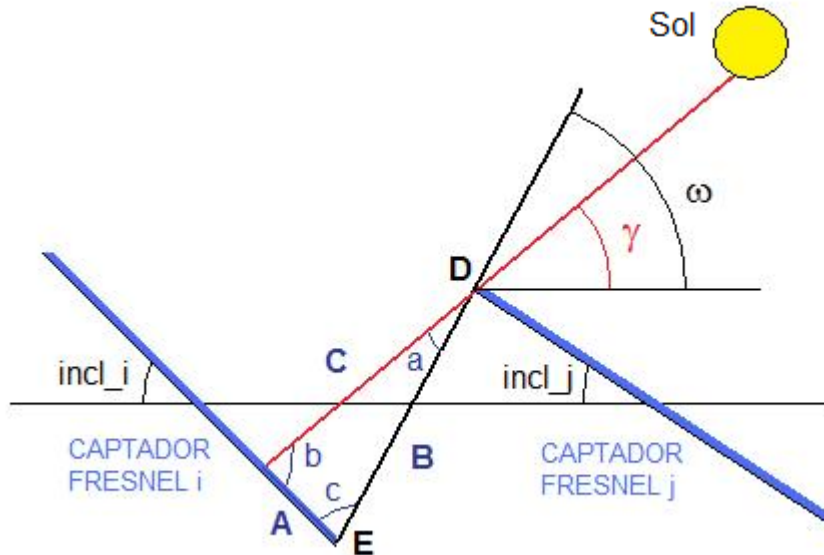


Figura 5-12 Sombras propias entre ambas filas con inclinación positiva

Como puede observarse en la figura, se definen los puntos de los extremos de los espejos que son conocidos, en este caso los puntos D y E:

$$E = \begin{pmatrix} X_E(i) + \frac{\text{ancho}}{2} \cdot \text{sen}(\text{incl}_i) \\ -\frac{\text{ancho}}{2} \cdot \text{cos}(\text{incl}_i) \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} X_E(j) - \frac{\text{ancho}}{2} \cdot \text{sen}(\text{incl}_j) \\ \frac{\text{ancho}}{2} \cdot \text{cos}(\text{incl}_j) \end{pmatrix}$$

Donde *ancho* es el ancho del espejo con un valor de 0,5 metros.

A continuación se construye el vector \overrightarrow{ED} restando al punto final (D) el punto inicial (E):

$$\overrightarrow{ED} = D - E$$

Calculando el módulo de dicho vector $|\overrightarrow{ED}|$ se conoce la distancia del punto E al punto D, y por tanto se conoce el lado B del triángulo formado por dicho lado, A y C (mirar **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) en el que el lado A corresponde al área sombreada sobre la fila i debido a la fila j.

El vector \overrightarrow{ED} forma un ángulo ω con la horizontal (que se calcula como la arco tangente del cociente entre la componente 'y' y la componente 'x' del vector \overrightarrow{ED}). Si el ángulo γ que forma el vector incidencia solar en 2D es menor que el ángulo ω habrá sombra. En caso contrario, no se producirá sombra de la fila j sobre la fila i. En el caso en que se produzca sombra, se aplicará el Teorema del seno para calcularla. En la figura se han

nombrado los ángulos \hat{a} y \hat{b} , ambos conocidos ya que:

$$\hat{a} = \omega - \gamma$$

$$\hat{b} = incl_i + \gamma$$

El Teorema del Seno para el triángulo ABC es el siguiente:

$$\frac{A}{\text{sen } \hat{a}} = \frac{B}{\text{sen } \hat{b}} = \frac{C}{\text{sen } \hat{c}}$$

Por lo tanto, el área sombreada se calcula despejando:

$$A = \frac{\text{sen } \hat{a}}{\text{sen } \hat{b}} \cdot B$$

Este área realmente es una longitud que si la multiplicamos por el largo del módulo reflector (4 metros) y por el número de módulos reflectores para cada fila (16) nos da el área sombreada total para la fila i.

- CASO 2: Fila con inclinación positiva y fila siguiente con inclinación negativa, Figura 5-13.

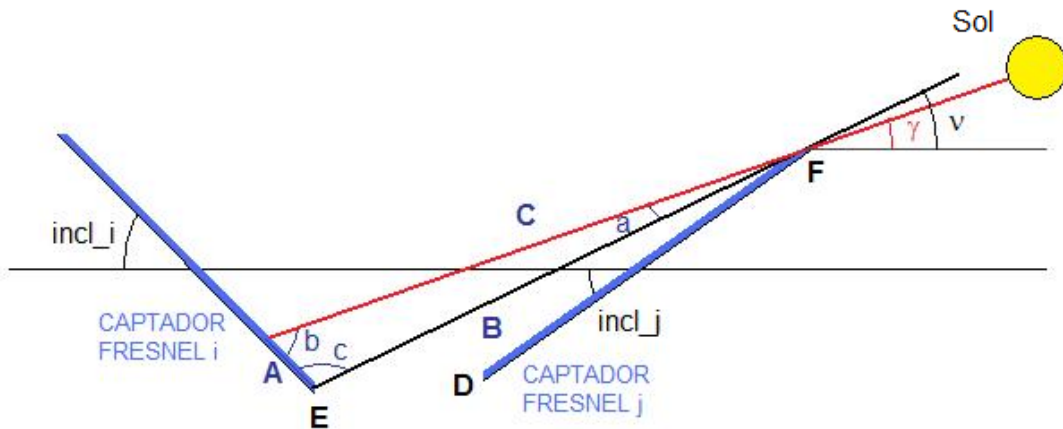


Figura 5-13 Sombras propias, una fila con inclinación positiva y la siguiente con inclinación negativa

En este caso se van a definir los puntos E (igual que anteriormente) y F:

$$E = \begin{pmatrix} X_E(i) + \frac{\text{ancho}}{2} \cdot \text{sen}(incl_i) \\ -\frac{\text{ancho}}{2} \cdot \text{cos}(incl_i) \end{pmatrix}$$

$$F = \begin{pmatrix} X_E(j) + \frac{\text{ancho}}{2} \cdot \text{sen}(incl_j) \\ \frac{\text{ancho}}{2} \cdot \text{cos}(incl_j) \end{pmatrix}$$

Ahora se calcula el vector \overline{EF} , su módulo (lado B del triángulo) y el ángulo que forma con la horizontal, denominado ν , de forma similar a como se hizo en el caso anterior con el vector \overline{ED} . Según la nueva nomenclatura, se producirá sombra si γ es menor que ν . Ahora el ángulo \hat{a} se calcula de la siguiente forma:

$$\hat{a} = \nu - \gamma$$

El resto de los cálculos son iguales que los que se hicieron en el caso anterior.

- CASO 3: Fila con inclinación negativa y fila siguiente con inclinación negativa, Figura 5-14.

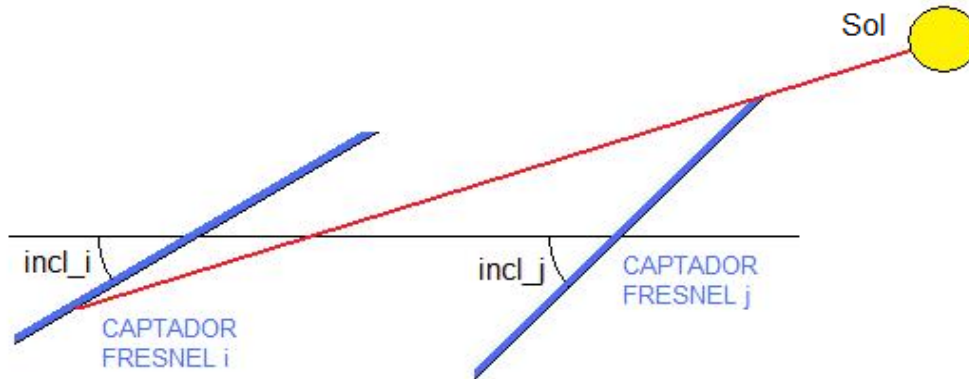


Figura 5-14 Sombras propias, ambas filas con inclinación negativa

Como puede observarse en la figura, en este caso no se produce sombra de una fila a otra, luego $A=0$.

Llevando a cabo este procedimiento para las filas de la 1 a la 10 se obtiene el área sombreada total, y dividiéndola por el área reflectora total (352 m^2) se obtiene la proporción de sombra en tanto por 1. Como esta proporción de sombra influirá directamente sobre la radiación total que llegue al tubo absorbedor, una vez calculada la radiación teórica habrá que multiplicarla por varios factores, entre ellos un factor de sombras propias:

$$\text{proporcion de sombra} = \frac{\text{area sombreada}}{\text{area total}} \rightarrow f_{\text{sombra}} = 1 - \text{proporcion de sombra}$$

5.2.3 Pérdidas ópticas

Para calcular la radiación real que llega al tubo absorbedor desde los espejos hay que tener en cuenta las pérdidas ópticas. La radiación solar incidente podría ser totalmente aprovechada si ésta llegara a los espejos en dirección perpendicular a los mismos, sin embargo esto realmente no va a ser así porque los espejos se colocan de manera que la radiación reflejada vaya al tubo absorbedor. Por lo tanto se produce una pérdida de radiación directa que será cuantificada mediante el ángulo δ , que es el ángulo que forma el espejo con la normal al vector incidencia solar. Habrá que distinguir dos casos, según el espejo tenga inclinación positiva o negativa.

- CASO 1: Inclinación positiva, Figura 5-15:

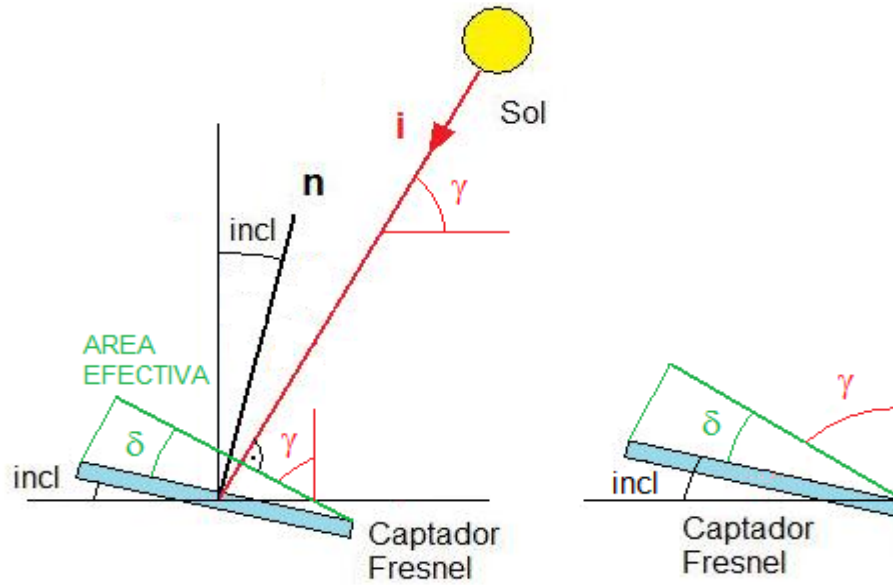


Figura 5-15 Ángulo δ necesario para cuantificar las pérdidas ópticas en espejos con inclinación positiva

Como puede observarse en la esta figura, el ángulo δ puede calcularse según la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \gamma - incl$$

• CASO 2: Inclinación negativa, Figura 5-16:

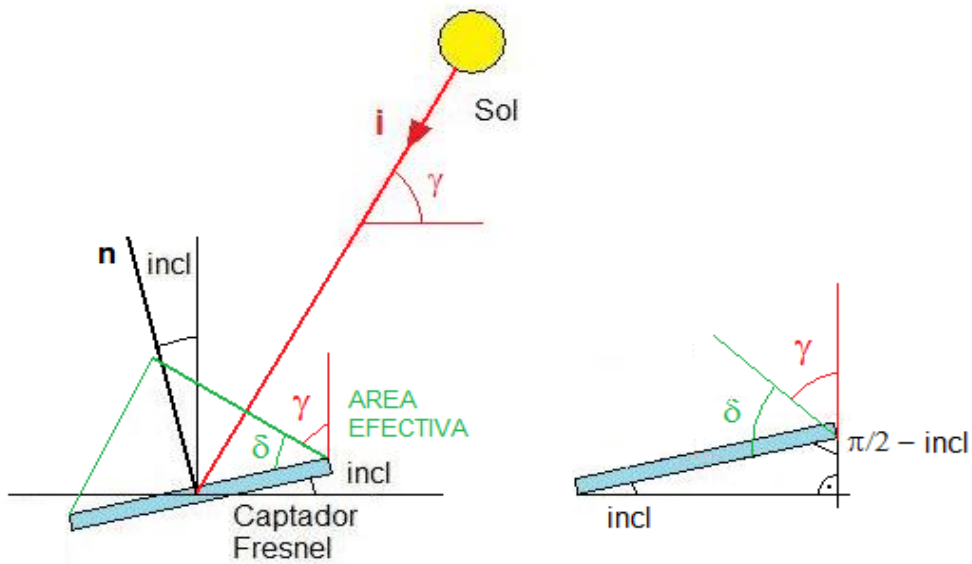


Figura 5-16 Ángulo δ necesario para cuantificar las pérdidas ópticas en espejos con inclinación negativa

En este caso, el ángulo δ se calcula como sigue:

$$\delta = \pi - \left(\frac{\pi}{2} - incl\right) - \gamma = \frac{\pi}{2} + incl - \gamma$$

El factor de pérdidas ópticas será el coseno del ángulo δ , como se podrá ver más adelante en el cálculo de la radiación real que llega al tubo absorbedor.

5.3 Modelo 3D

Una vez conocida la inclinación de cada espejo se debe calcular la longitud de tubo absorbedor que no está iluminado debido a la componente azimutal solar en cada instante de tiempo, ya que esto afectará a la radiación incidente sobre el tubo. Para ello hay que realizar un modelo en tres dimensiones, ya que ahora hay que tener en cuenta también la componente azimutal del Sol. En la Figura 5-17 puede verse una fotografía en la que se aprecia dicha longitud de tubo no iluminado en el extremo Este (antes del mediodía solar):



Figura 5-17 Tramo de tubo no iluminado debido al azimut solar

Los ejes de coordenadas para este modelo 3D se mostraban en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Ahora se considerarán las 3 componentes del vector incidencia solar, que fue definido al principio de este capítulo. El eje Z varía de 0 a 64 metros que es la longitud total del tubo absorbedor y por tanto del campo solar.

Según el sistema de coordenadas definido el vector normal a cada espejo es:

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} \text{sen}(incl) \\ \text{cos}(incl) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Por la ley de reflexión en los espejos, el ángulo con el que incide el rayo solar es el mismo con el que debe reflejarse. Por lo tanto debe cumplirse la siguiente igualdad de productos vectoriales:

$$\vec{i}_{3D} \times \vec{n} = \vec{n} \times \vec{r}_{3D}$$

El vector \vec{r}_{3D} es el reflejo del rayo solar y se dirige hacia el tubo absorbedor. Se expresa de la siguiente forma:

$$\vec{r}_{3D} = \begin{bmatrix} \frac{X_t - X_E}{\sqrt{(X_t - X_E)^2 + (Y_t - Y_E)^2 + (Z_t - Z_E)^2}} \\ \frac{Y_t - Y_E}{\sqrt{(X_t - X_E)^2 + (Y_t - Y_E)^2 + (Z_t - Z_E)^2}} \\ \frac{Z_t - Z_E}{\sqrt{(X_t - X_E)^2 + (Y_t - Y_E)^2 + (Z_t - Z_E)^2}} \end{bmatrix}$$

Es un vector con dirección desde el espejo hasta el tubo absorbedor, y se calcula como la diferencia entre el destino y el origen dividido todo por el módulo de la distancia, siendo así un vector unitario. X_E , Y_E y Z_E son las coordenadas X, Y y Z del espejo (la coordenada Y de todos los espejos es nula). X_E tiene los valores mostrados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y para Z_E se van a tomar sólo dos valores correspondientes al extremo Este ($Z_E=64$) y al Oeste ($Z_E=0$), que son los que van a definir la sombra existente en el tubo absorbedor antes y después del mediodía solar respectivamente. X_t , Y_t y Z_t son las coordenadas del punto del tubo absorbedor donde llega el vector reflejo, las coordenadas en X e Y son conocidas ($X_t=0$, $Y_t=4$) pero no se conoce la coordenada en Z, que es la coordenada que va a definir la sombra sobre el tubo absorbedor. Imponiendo la igualdad de productos vectoriales se obtiene un valor de Z_t , a partir del cual se calcula la sombra, a la que llamaremos *tramo no iluminado*, de la siguiente forma para cada fila:

- Cuando la sombra se produce por el lado Este ($Z_E=64$):

$$\text{Tramo no iluminado}_{fila} = \text{Longitud total} - Z_t$$

- Cuando la sombra se produce por el lado Oeste ($Z_E=0$):

$$\text{Tramo no iluminado}_{fila} = Z_t$$

La longitud total corresponde a la longitud total del tubo absorbedor, y tiene un valor de 64 metros.

En ambos casos se están calculando 11 valores de la sombra (uno para cada fila de espejos) que variarán muy poco entre ellos. Para poder proporcionar un valor aproximado del tramo de tubo no iluminado y el porcentaje de tubo iluminado de utilizará el *valor mínimo* de los 11 calculados:

$$\% \text{ tubo iluminado} = \frac{\text{Longitud total} - \text{Tramo no iluminado}}{\text{Longitud total}} \cdot 100$$

Una vez conocida la longitud de tubo no iluminado que provoca cada fila se calcula un factor de corrección por tubo no iluminado, f_{mi} , restándole a la longitud total del tubo absorbedor el tramo de tubo no iluminado correspondiente a la fila en cuestión, y se divide todo por la longitud total del tubo absorbedor, como puede verse en la siguiente expresión:

$$f_{tni_fila} = \frac{\text{Longitud total} - \text{Tramo no iluminado}}{\text{Longitud total}}$$

Debe señalarse que los cálculos anteriores se realizan considerando que todos los rayos que salen desde un espejo inciden sobre el tubo receptor o sobre el reflector secundario. Esto es debido a que los espejos tienen cierta curvatura, en concreto un radio de 8,6 metros para las filas de la 4 a la 8, y de 10,6 metros para el resto de filas. Esta gran curvatura es suficiente para que no se produzcan pérdidas de radiación debido a los rayos que puedan no incidir sobre los elementos antes mencionados. Posteriormente se incluirá un estudio de sensibilidad (capítulo 7) en el que se demostrará que si los espejos fueran totalmente planos habría un gran número de rayos que no incidirían sobre el tubo receptor o sobre el reflector secundario.

5.4 Cálculo de la radiación real

La radiación real en wátios (W) que llegará al tubo absorbedor procedente de cada fila de espejos se calcula mediante la siguiente ecuación, donde se ha supuesto que toda la radiación procedente de los espejos primarios va al reflector secundario y se refleja al tubo receptor:

$$IA_{fila} = RD \cdot A_{fila} \cdot \cos(\delta_{fila}) \cdot f_{tni_fila} \cdot (\rho_{rp} \cdot f_{ens-rp}) \cdot (\rho_{rs} \cdot f_{ens-rs})$$

Donde:

RD: Radiación directa (W/m²)

A_{fila}: Área de la fila (hilera), igual a 32 m²

cos(δ_{fila}): Factor de pérdidas ópticas

f_{tni-fila}: Factor de corrección por tubo no iluminado

ρ_{rp}: Reflectividad de los espejos primarios, de valor nominal 0,92

f_{ens-rp}: Factor de ensuciamiento de los espejos primarios

ρ_{rs}: Reflectividad del reflector secundario, de valor nominal 0,77

f_{ens-rs}: Factor de ensuciamiento del reflector secundario

La radiación total que llegará al tubo absorbedor será la suma de la radiación de todas las filas multiplicada por el factor de sombras propias:

$$IA_{total} = \sum_{j=1}^{11} IA_{fila\ j} \cdot f_{sombra}$$

Señalar que en cálculo de la radiación real no se han tenido en cuenta las sombras que proyectan los obstáculos situados en torno al campo solar ni la sombra que el propio tubo receptor proyecta sobre los espejos primarios, por lo tanto el valor de la radiación real obtenido será algo mayor que el que existirá realmente.

6 MODELO TÉRMICO DEL COLECTOR FRESNEL

En este capítulo se va a realizar la descripción del modelo térmico del captador solar Fresnel [4] [5] situado en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla conociendo todos los datos geométricos tanto del tubo absorbedor y de la cubierta de vidrio, además de los parámetros necesarios para calcular los flujos de calor (absortividad, emisividad...). También son conocidos los datos geométricos y térmicos del reflector secundario.

6.1 Descripción general del modelo

El tubo receptor correspondiente al sistema de captadores Fresnel está formado por un tubo absorbedor DIN 1.4541 (AISI 321) de acero inoxidable austenítico estabilizado y una cubierta de vidrio de borosilicato concéntrica.

Para realizar el modelo térmico del tubo receptor se han considerado como datos de entrada los siguientes parámetros:

- Caudal de agua
- Temperatura de entrada del agua
- Temperatura ambiente
- Presión interior del tubo
- Radiación real procedente de los espejos (obtenida con el modelo óptico)

El calor absorbido por el tubo receptor se calcula multiplicando la radiación que llega a la cubierta de vidrio por la transmisividad de éste, por el factor de ensuciamiento de la cubierta de vidrio, por la absortividad del tubo absorbedor y por el complemento a 1 de la absortividad del reflector secundario, ya que toda la radiación llega a la cubierta de vidrio reflejada desde el reflector secundario, y éste habrá absorbido parte del calor aunque en una pequeña proporción; la ecuación es la siguiente:

$$Q_{abs} = IA \cdot \tau_v \cdot f_{ens-v} \cdot \alpha_t \cdot (1 - \alpha_r)$$

Donde IA es la radiación que llega al vidrio absorbedor desde los espejos en W .

El calor neto, Figura 6-1, que llega al agua es el calor absorbido menos las pérdidas por radiación desde el tubo absorbedor a la cubierta de vidrio:

$$Q_{neto} = Q_{abs} - Q_{RD,tv}$$

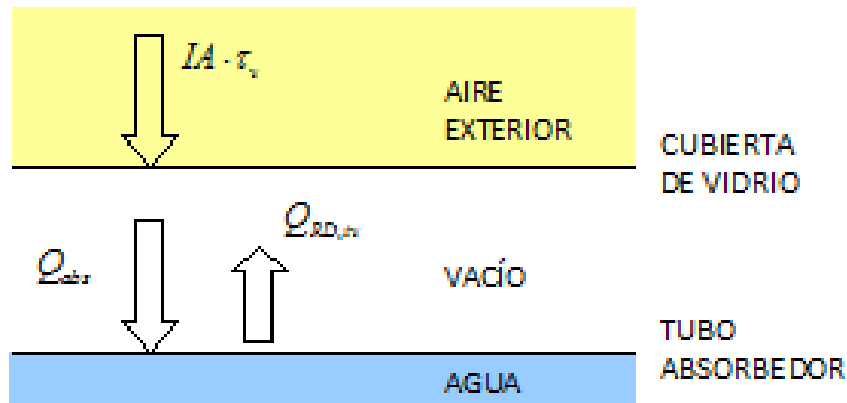


Figura 6-1 Flujos de calor doble tubo, necesarios para el cálculo del calor neto que llega al agua

El calor neto pasa por conducción a través del tubo absorbedor según la ecuación:

$$Q_{neto} = Q_{CD,t}$$

$$Q_{CD,t} = \frac{(T_{te} - T_{ti})}{\frac{\ln\left(\frac{D_{te}}{D_{ti}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_t \cdot L_t}}$$

Donde:

T_{te}: Temperatura de la superficie exterior del tubo absorbedor

T_{ti}: Temperatura de la superficie interior del tubo absorbedor

D_{te}: Diámetro exterior del tubo absorbedor

D_{ti}: Diámetro interior del tubo absorbedor

k_t: Conductividad del acero del tubo absorbedor

L_t: Longitud del tubo absorbedor

El calor por conducción que atraviesa el tubo absorbedor, Figura 6-2, pasa al agua por convección:

$$Q_{CD,t} = Q_{CVi}$$

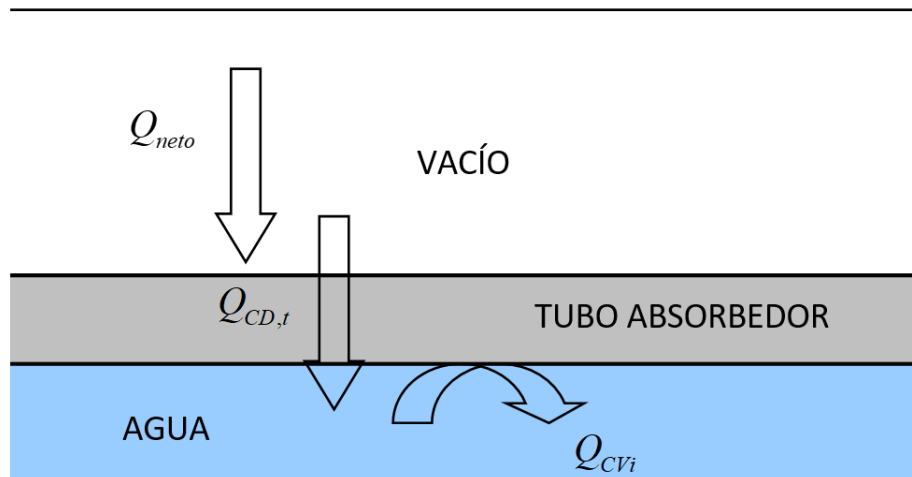


Figura 6-2 Calor por conducción y calor por convección en el tubo absorbedor

La transferencia de calor por convección con el agua tiene la siguiente expresión:

$$Q_{CVi} = h_i \cdot A_{ii} \cdot (T_{ii} - T_{mm})$$

A su vez, el calor que gana el agua se expresa mediante la siguiente ecuación de transferencia:

$$Q_{CVi} = \dot{m} \cdot C_{p_w} \cdot (T_{ms} - T_{me})$$

Donde:

- h_i** : Coeficiente de película interior
- A_{ii}** : Superficie interior del tubo absorbedor
- \dot{m}** : Caudal másico de agua
- C_{p_w}** : Calor específico del agua a presión constante
- T_{me}** : Temperatura media de entrada del agua
- T_{ms}** : Temperatura media de salida del agua
- T_{mm}** : Temperatura media de masa

$$T_{mm} = \frac{T_{me} + T_{ms}}{2}$$

El coeficiente de película interior h_i se calcula a partir de las correlaciones de “convección forzada, flujo interno, conducto circular” incluidas en las tablas de Transmisión de Calor [6], mediante las expresiones:

$$Nu_{Di} = \frac{h_i \cdot D_{ii}}{k_w}$$

$$Nu_{Di} = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^n$$

Donde:

Nu_D: Número de Nusselt para conductos circulares

k_w: Conductividad del agua

Re: Número de Reynolds

Pr: Número de Prandtl

n: constante que para el caso en que la temperatura de la superficie del tubo es mayor que la T_{mm} del agua vale 0,4

La expresión utilizada para calcular el número de Nusselt es válida bajo las siguientes condiciones:

- Régimen turbulento, completamente desarrollado
- Re > 10000
- 0,6 < Pr < 160
- $\frac{L}{D} > 10$

Las propiedades necesarias para el cálculo de hi se evalúan a la temperatura media de masa (T_{mm}).

El calor por radiación que se transfiere desde el tubo absorbedor al tubo de vidrio se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{RD,iv} = \sigma \cdot \frac{(T_{te}^4 - T_{vi}^4)}{\left(\frac{1 - \varepsilon_t}{A_{te} \cdot \varepsilon_t} + \frac{1}{F_{iv} \cdot A_{te}} + \frac{1 - \varepsilon_v}{A_{vi} \cdot \varepsilon_v} \right)}$$

Donde:

σ: Constante de Stefan-Boltzmann

T_{vi}: Temperatura de la superficie interior de la cubierta de vidrio

A_{te}: Superficie exterior del tubo

ε_t: Emisividad del tubo absorbedor

F_{iv}: Factor de forma entre el tubo absorbedor y la cubierta de vidrio, que por ser tubos concéntricos es igual a 1

A_{vi}: Superficie interior de la cubierta de vidrio

ε_v: Emisividad de la cubierta de vidrio

El calor por radiación recibido por el vidrio desde el tubo absorbedor pasa a través del vidrio por conducción:

$$Q_{RD,iv} = Q_{CD,v}$$

$$Q_{CD,v} = \frac{(T_{vi} - T_{ve})}{\frac{\ln\left(\frac{D_{ve}}{D_{vi}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_v \cdot L_t}}$$

El calor que pasa por conducción a través del vidrio, Figura 6-3, se descompone en tres términos: calor por

convección hacia el exterior, calor por radiación hacia el exterior y un flujo de calor entrante correspondiente a lo que absorbe el vidrio de la radiación que le llega del reflector secundario, reflejada desde los espejos:

$$Q_{CD,v} = Q_{CVe} + Q_{RDe} - IA \cdot \alpha_v \cdot (1 - \alpha_r)$$

Donde α_v es la absorptividad de la cubierta de vidrio y α_r es la absorptividad del reflector secundario.

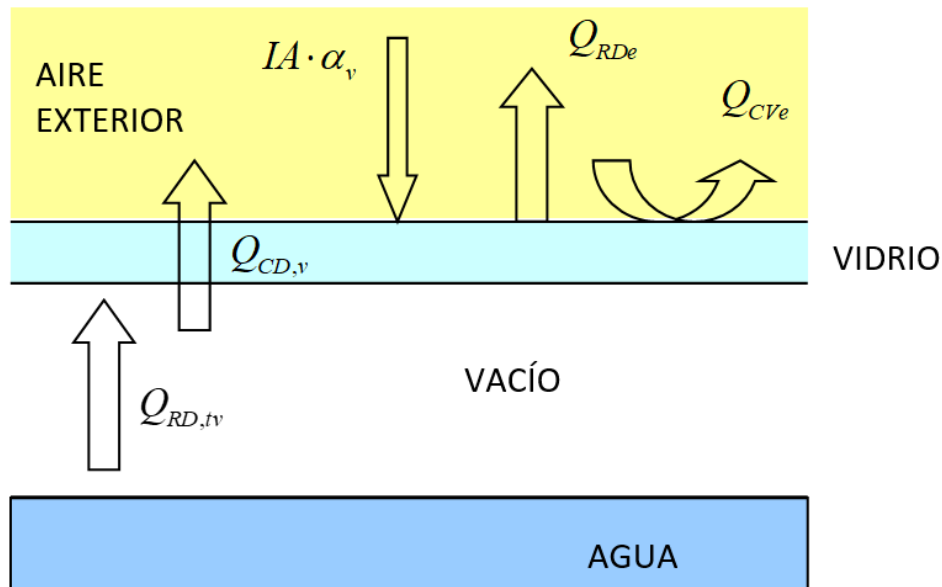


Figura 6-3 Flujos de calor del tubo receptor con el exterior

A continuación se van a desarrollar cada uno de los términos.

El calor por convección hacia el exterior tiene la siguiente expresión:

$$Q_{CVe} = h_e \cdot A_{ve} \cdot (T_{ve} - T_{amb})$$

Donde:

h_e : Coeficiente de película exterior

A_{ve} : Superficie exterior de la cubierta de vidrio

T_{ve} : Temperatura de la superficie exterior de la cubierta de vidrio

T_{amb} : Temperatura ambiente

El coeficiente de película exterior h_e se calcula a partir de las correlaciones de “convección libre, flujo externo, cilindro largo horizontal” incluidas en las tablas de Transmisión de Calor [6], mediante las expresiones:

$$Nu_{De} = \frac{h_e \cdot D_{ve}}{k_a}$$

$$Nu_{De} = C \cdot Ra_D^n$$

Donde:

Nu_D: Número de Nusselt para cilindro largo horizontal

D_{ve}: Diámetro exterior de la cubierta de vidrio

k_a: Conductividad del aire

Ra_D: Número de Rayleigh para cilindro largo horizontal

C, n: Constantes que adoptan su valor según el orden de magnitud del número de Rayleigh.

Para las condiciones en las que se encuentra el aire en el cálculo de este flujo de calor, el Rayleigh tiene un orden de magnitud de 106, por lo que las constantes tienen valores de: C=0,48; n=1/4.

La expresión utilizada para calcular el número de Nusselt es válida bajo las siguientes condiciones:

- Temperatura de la superficie supuesta constante
- $10^{-5} < Ra_D < 10^{12}$

Las propiedades necesarias para el cálculo de he se evalúan a la temperatura media de película:

$$T_{pel} = \frac{T_{ve} + T_{amb}}{2}$$

El calor por radiación hacia el exterior se descompone en dos términos, uno debido a la radiación con el suelo y otro debido a la radiación con el reflector secundario:

$$Q_{RDe} = Q_{RDes} + Q_{RDer}$$

A continuación se desarrollan estos términos:

$$Q_{RDes} = \sigma \cdot \varepsilon_v \cdot (T_{ve}^4 - T_{amb}^4) \cdot A_{ve} \cdot 0,5$$

$$Q_{RDer} = \sigma \cdot \varepsilon_v \cdot (T_{ve}^4 - T_{ir}^4) \cdot A_{ve} \cdot 0,5$$

Donde:

T_{amb}: Temperatura del suelo, supuesta igual a la del ambiente

T_{ir}: Temperatura de la superficie inferior del reflector secundario

Ambas expresiones se multiplican por un valor igual a 0,5 correspondiente a la fracción de radiación que va a cada lugar.

Para conocer la temperatura a la que se encuentra la superficie inferior del reflector secundario hay que hacer un balance de calor en el mismo. El calor que llega al reflector por la parte inferior será la procedente de los espejos multiplicada por la absorptividad del reflector:

$$Q_r = IA \cdot \alpha_r$$

Este calor pasa por conducción a través del reflector:

$$Q_r = Q_{CDr}$$

$$Q_{CDr} = \frac{(T_{ir} - T_{sr})}{\frac{\ln\left(\frac{D_{er}}{D_{ir}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_r \cdot L_r}}$$

Donde:

T_{sr}: Temperatura de la superficie superior del reflector secundario

D_{er}: Diámetro exterior del reflector secundario

D_{ir}: Diámetro inferior del reflector secundario

k_r: Conductividad del reflector secundario

L_r: Longitud del reflector secundario, igual a la longitud del tubo absorbedor

El calor pasa por conducción hacia la superficie superior del reflector secundario y se descompone, Figura 6-4, en calor por convección y calor por radiación con el ambiente:

$$Q_{CDr} = Q_{CVr} + Q_{RDr}$$

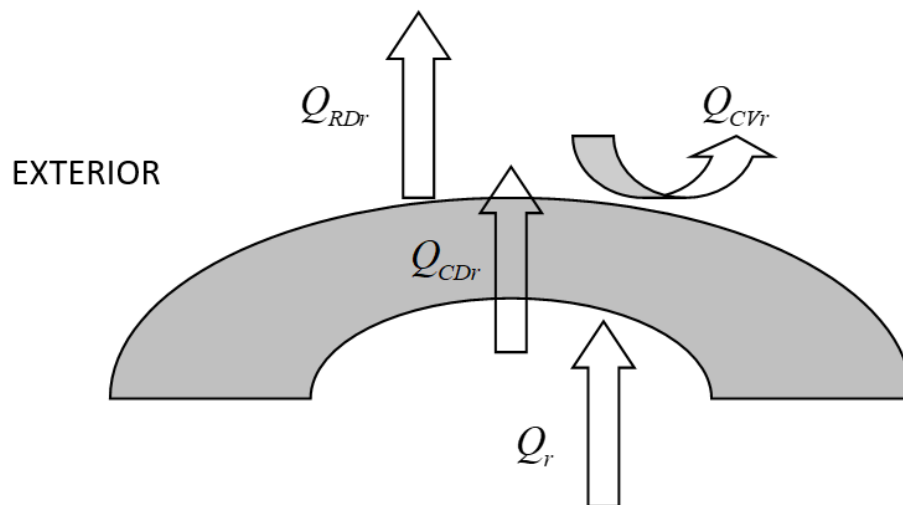


Figura 6-4 Flujos de calor en el reflector secundario

A continuación se desarrollan cada uno de los términos:

$$Q_{CVr} = h_{er} \cdot A_{er} \cdot (T_{sr} - T_{amb})$$

Donde:

h_{er}: Coeficiente de película exterior

A_{er}: Superficie exterior del reflector secundario

El coeficiente de película exterior her se calcula a partir de las correlaciones de “convección libre, flujo externo, cilindro largo horizontal” incluidas en las tablas de Transmisión de Calor [6], mediante las expresiones:

$$Nu_{De} = \frac{h_{er} \cdot D_{er}}{k_a}$$

$$Nu_{De} = C \cdot Ra_D^n$$

Para las condiciones en las que se encuentra el aire en el cálculo de de este flujo de calor, el Rayleigh tiene un orden de magnitud de 107, por lo que las constantes tienen valores de: C=0,125; n=1/3.

La expresión utilizada para calcular el número de Nusselt es válida bajo las siguientes condiciones:

- Temperatura de la superficie supuesta constante
- $10^{-5} < Ra_D < 10^{12}$

Las propiedades necesarias para el cálculo de her se evalúan a la temperatura media de película:

$$T_{pel} = \frac{T_{sr} + T_{amb}}{2}$$

El calor por radiación con el exterior corresponde a un intercambio de calor con el cielo, cuya temperatura se ha supuesto 7 grados menor a la temperatura del ambiente:

$$Q_{RDr} = \sigma \cdot \varepsilon_r \cdot (T_{sr}^4 - T_{cielo}^4)$$

Donde:

ε_r : Emisividad del reflector secundario

T_{cielo} : Temperatura de cielo

La temperatura de cielo se ha estimado como la temperatura ambiente menos 7 grados.

6.2 Resolución del modelo térmico

Resolviendo el modelo descrito con anterioridad e implementandolo en el programa de cálculo Matlab se obtienen los datos termicos necesarios. Entre estos datos los de mayor importancia para nuestro estudio serán la temperatura de salida del agua y el calor absorbido por el agua. Conociendo los datos de entrada de nuestro modelo podemos calcular el calor absorbido por el agua mediante la siguiente expresión:

$$Q_{abs-fluido} = \dot{m} \cdot Cp_w \cdot (T_{ms} - T_{me})$$

Además de esto, el rendimiento térmico está definida con la siguiente ecuación:

$$rend = \frac{\dot{m} \cdot Cp_w \cdot (T_{ms} - T_{me})}{IA}$$

En caso de ser necesario calcular las pérdidas térmicas se puede calcular como los flujos de calor por convección y radiación desde el tubo hacia el exterior y desde el reflector secundario hacia el exterior:

$$P\acute{e}rdid\acute{a}s = Q_{RDe} + Q_{Cve} + Q_{RDr} + Q_{Cvr}$$

7 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MODELO DETALLADO Y EL MODELO SIMPLIFICADO

En este capítulo se realizan los cálculos para el modelo simplificado [3] [7], sus factores correctores y su posterior comparación gráfica con los resultados del modelo detallado. Todo esto se hará usando el programa *Matlab* con el que se logrará simular las condiciones de operación del colector solar Fresnel de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.

7.1 Cálculo de la recta de rendimiento del modelo simplificado

Para realizar el cálculo de esta recta de rendimiento que usaremos en el modelo simplificado se hará uso del modelo detallado haciendo un barrido de datos (puntos de rendimiento) para diferentes temperaturas ambientales (T_{amb}), temperaturas del agua de entrada (T_{me}) y radiación directa solar (I). Se debe tener en cuenta que se anularán todos los valores negativos y que el caudal de agua durante el análisis se mantiene constante a $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

$$T_{me}=[100, 110, 115, \dots, 200]^{\circ}\text{C}$$

$$T_{amb}=[0, 2, 4, 6, \dots, 50]^{\circ}\text{C}$$

$$I=[10, 20, 30, \dots, 100, 200, 300, \dots, 1000] \text{W}/\text{m}^2$$

El día escogido para calcular la recta de ajuste será el 1 de Mayo (día 121), Figura 7-1, al mediodía solar, 14:11 [8].

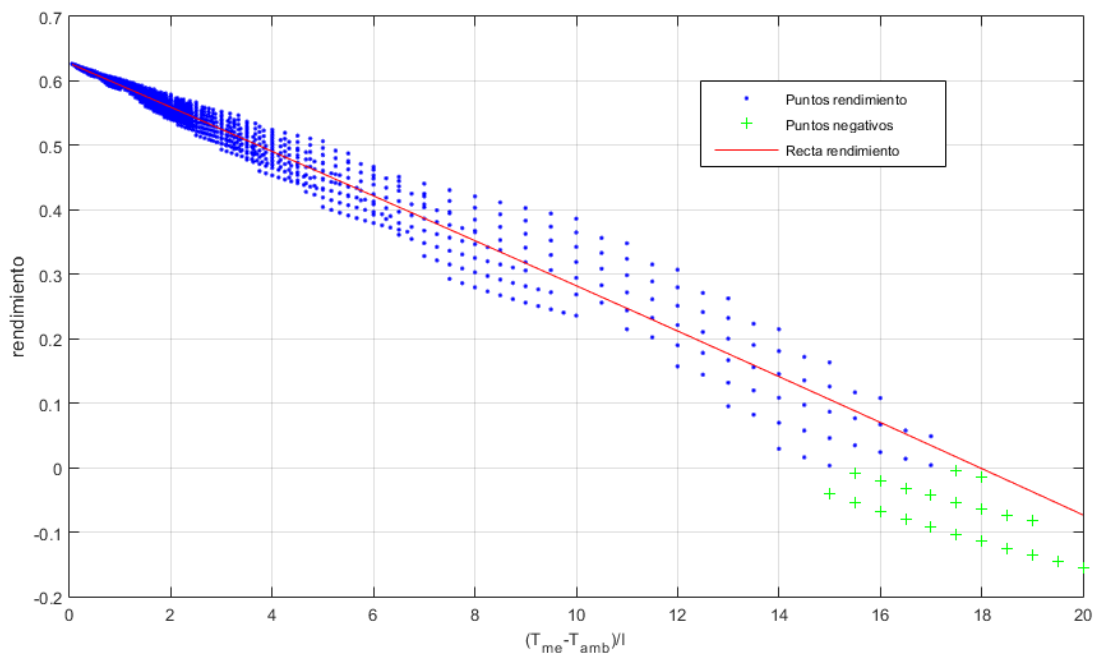


Figura 7-1 Recta de rendimiento 1 de Mayo al mediodía solar

La recta de ajuste será la siguiente:

$$\eta = 0,6273536 - 0,03399 * \left(\frac{T_{me} - T_{amb}}{I} \right) - 5,256 * 10^{-5} * I * \left(\frac{T_{me} - T_{amb}}{I} \right)^2$$

Siendo:

$$c_1 = 0,6273536$$

$$c_2 = 0,03399 \frac{W}{m^2 K}$$

$$c_3 = 5,256 * 10^{-5} \frac{W}{m^2 K^2}$$

$$F_R \eta_0 = c_1 = 0,6273536$$

$$F_R U_L = c_2 + c_3 * (T_{me} - T_{amb}) \frac{W}{m^2 K}$$

La $F_R U_L$ será calculada para cada valor de T_{me} y T_{amb} en el modelo simplificado.

El coeficiente de determinación R^2 y la raíz del error cuadrático medio $RECM$ son:

$$R^2 = 0,97$$

$$RECM = 0,01778$$

7.2 Corrección por ángulo de incidencia

Para la corrección por ángulo de incidencia del modelo simplificado en un principio se usó la correlación siguiente [9], Figura 7-2:

$$K_{\theta_i} = \cos(\theta_i) + 0.0003178(\theta_i) - 0.00003985(\theta_i)^2$$

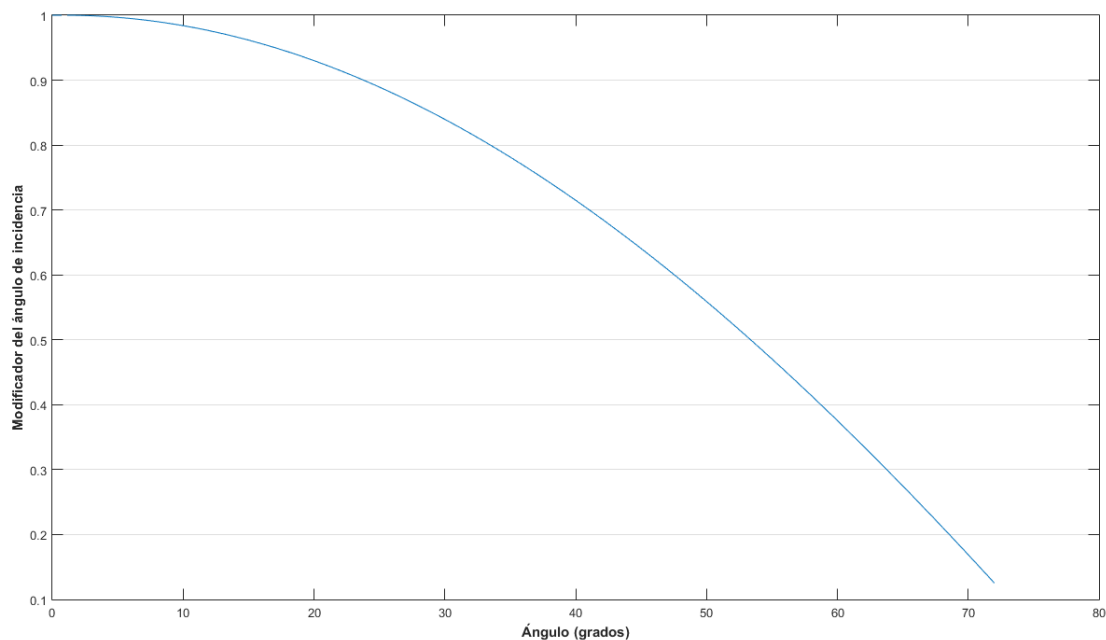


Figura 7-2 Curva del factor corrector del ángulo de incidencia de un espejo

Siendo θ_i el ángulo de incidencia de cada una de las filas.

Calculando cada factor para cada una de las 11 filas de las que se compone la instalación y realizando la media de éstas se obtiene el factor corrector final para cada momento horario del día.

$$K_{\theta_{final}} = \frac{K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6 + K_7 + K_8 + K_9 + K_{10} + K_{11}}{11}$$

Se puede ver la curva que mostraría este factor corrector a lo largo de un día en la Figura 7-3.

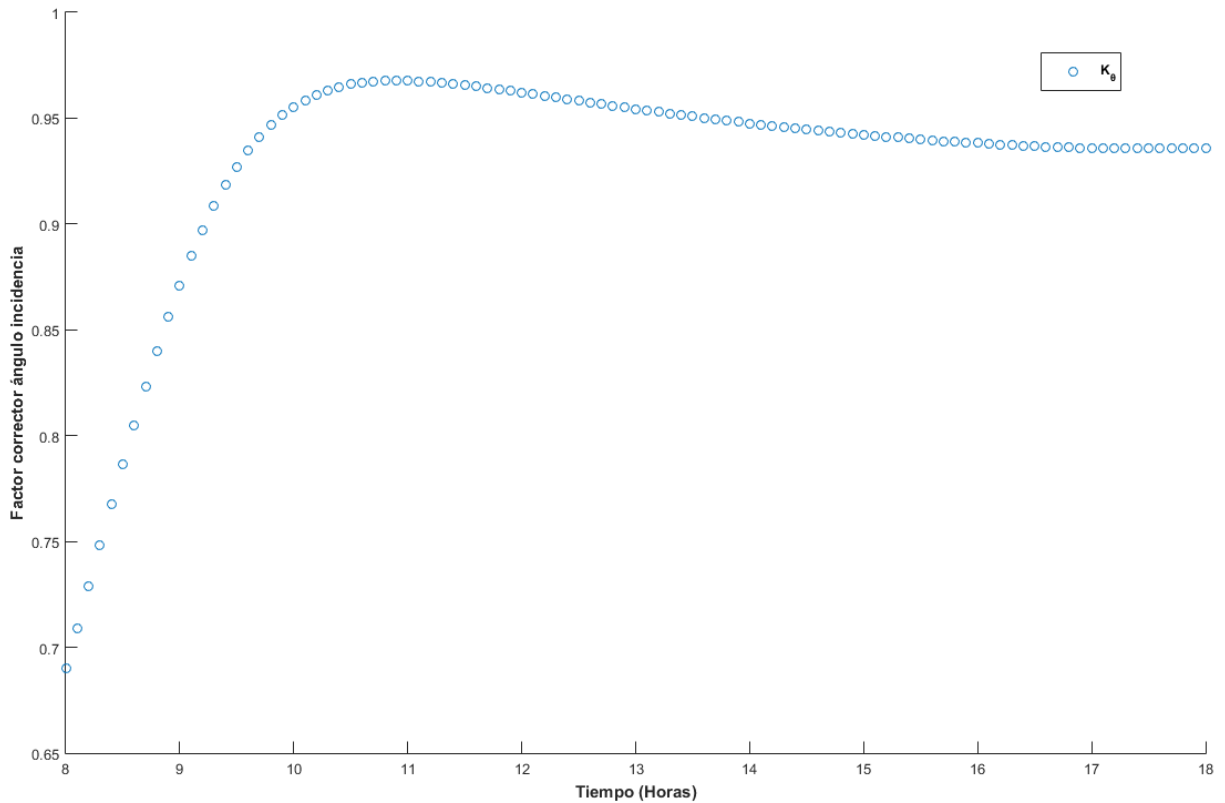


Figura 7-3 Factor ángulo de incidencia a lo largo de un día

Al ver las gráficas se puede apreciar que la correlación mostrada no es la más adecuada para el proceso actual por lo que se ha decidido calcular una correlación más efectiva a partir del detallado, siendo la siguiente:

$$K_{\theta_i} = 0.3453 + 0.04591(\theta_i) - 0.0007912(\theta_i)^2$$

Esta correlación polinómica de segundo grado se ha calculado a partir de los datos de rendimiento del modelo detallado para los diferentes ángulos de incidencia, y mejora los resultados expuestos en el trabajo de fin de grado.

7.3 Corrección por caudal

Si el caudal que circula por el tubo es diferente de los $10 \text{ m}^3/\text{h}$ estipulados a la hora de calcular la recta de rendimiento, se debe calcular el factor corrector de este nuevo caudal.

Para ello, vamos a hacer uso del producto del factor de eficiencia por su coeficiente global de pérdidas, ya que este no depende del caudal. Este valor se calcula en las condiciones de ensayo originales ya que se considera constante.

$$F'U_L = -GC_{p_{ensayo}} \ln \left(1 - \frac{F_R U_{L_{ensayo}}}{GC_{p_{ensayo}}} \right)$$

Una vez hemos calculado la $F'U_L$ pasamos a calcular el factor corrector por caudal, Figura 7-4.

$$K_m = \frac{GC_{p_{instalación}} \left(1 - \exp \left(\frac{-F'U_L}{GC_{p_{instalación}}} \right) \right)}{GC_{p_{ensayo}} \left(1 - \exp \left(\frac{-F'U_L}{GC_{p_{ensayo}}} \right) \right)}$$

Donde:

C_p : Capacidad calorífica (J/°C)

G : Caudal específico (kg/s m²)

$F'U_L$: Factor de eficiencia por su coeficiente global de pérdidas

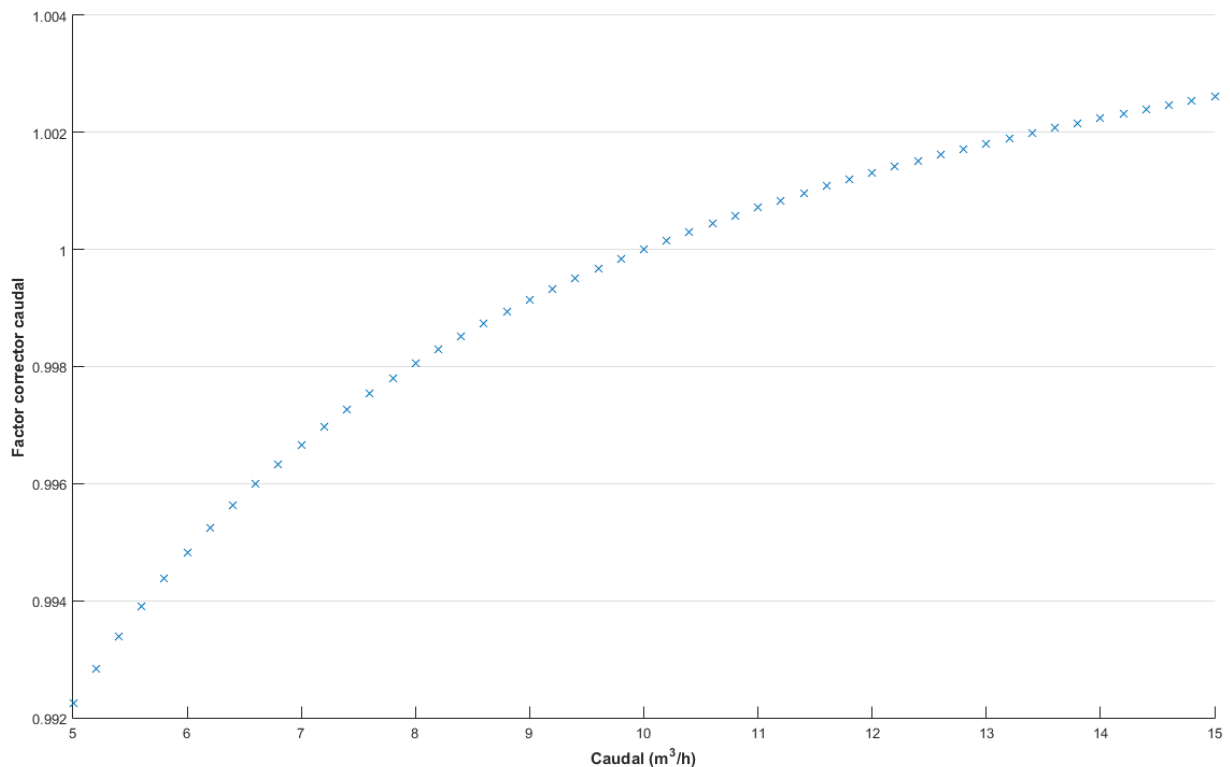


Figura 7-4 Factor corrector del caudal

Cómo puede verse el factor corrector del caudal afecta más a una disminución del caudal que a un aumento de

este respecto a la base de cálculo fijada de $10 \text{ m}^3/\text{h}$, esto puede apreciarse mejor en la Figura 7-5.

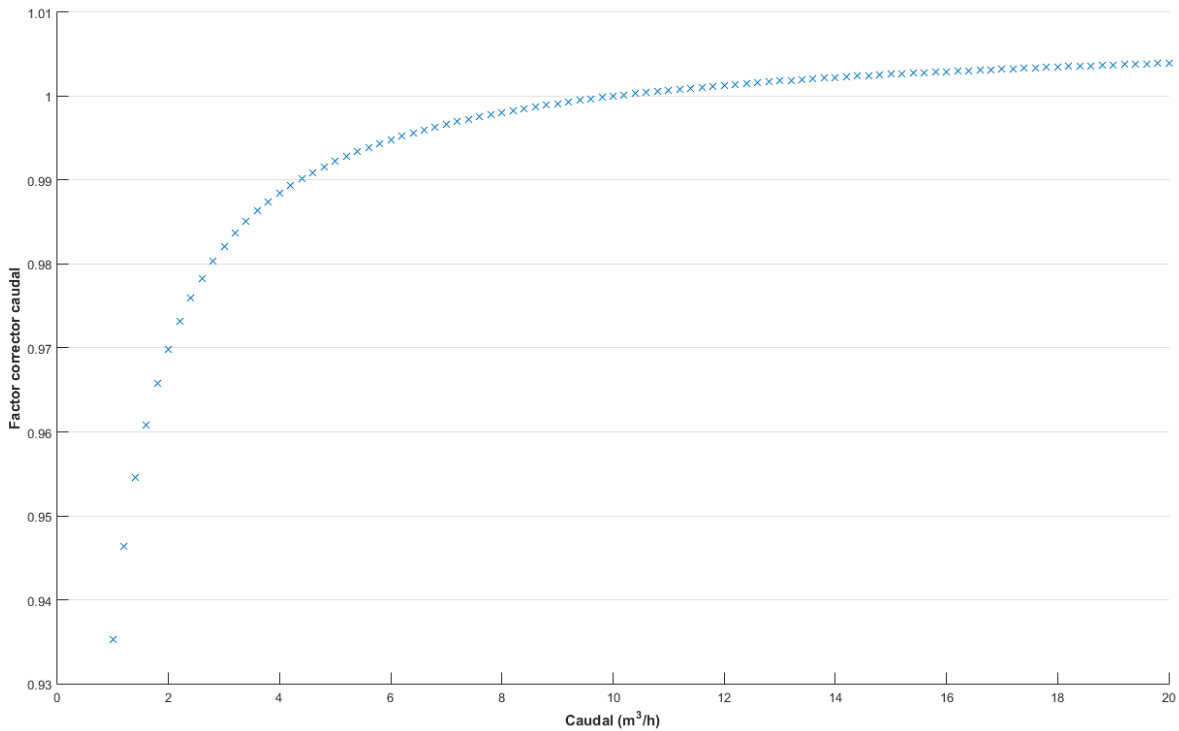


Figura 7-5 Factor corrector del caudal para valores mas alejados

7.4 Comparación del modelo detallado y simplificado

Para la realización de esta comparación primero deben aplicarse todos los factores correctores al modelo simplificado calculado anteriormente. Se va a analizar la variación del calor útil y la temperatura de salida del agua en función de las siguientes variables de entrada:

- Variación de la temperatura ambiente
- Variación de la temperatura del fluido caloportador (agua)
- Variación del caudal de entrada
- Variación de la radiación directa
- Variación a distintas horas solares

Primero vamos a definir las ecuaciones usadas en el simplificado:

$$Q_{\text{útil}_{\text{sincorregir}}} = F_R \eta_0 * I * A_a - F_R U_L * A_r * (T_{me} - T_{amb})$$

Los factores correctores son aplicados a esta ecuación:

$$Q_{\text{útil}} = F_R \eta_0 * I * A_a * K_{\theta_{\text{final}}} * K_m - F_R U_L * A_r * (T_{me} - T_{amb}) * K_m$$

Donde:

A_a : Superficie de los espejos (m^2)

A_r : Superficie exterior del tubo absorbedor (m^2)

K_m : Factor corrector del caudal

T_{me} : Temperatura media de entrada del agua

T_{amb} : Temperatura ambiente

$K_{\theta_{final}}$: Factor corrector del ángulo de incidencia

Una vez calculado el $Q_{\acute{u}til}$ se calcula la temperatura de salida del agua T_{ms} :

$$Q_{\acute{u}til} = \dot{m}_{agua} * C_p * (T_{ms} - T_{me})$$

Donde:

C_p : Capacidad calorífica ($J/^\circ C$)

\dot{m}_{agua} : Caudal másico de agua (kg/s)

T_{me} : Temperatura media de entrada del agua

T_{ms} : Temperatura media de salida del agua

7.4.1 Variación de la temperatura ambiente

Los cálculos realizados a continuación se han hecho para el día 1 de Mayo a las 14:15 hora local con el caudal normal de operación.

En la Figura 7-6 se ha representado el calor útil $Q_{\acute{u}til}$ frente a la variación de la temperatura de salida del agua T_{ms} tanto del modelo simplificado como del detallado.

La temperatura ambiente se ha variado entre 0 y $50^\circ C$, dejando fija tanto la temperatura media de entrada como la radiación directa.

$$T_{me} = 150 \text{ } ^\circ C$$

$$I = 500 \text{ } W/m^2$$

$$T_{amb} = [0, 2, 4, \dots, 50] \text{ } ^\circ C$$

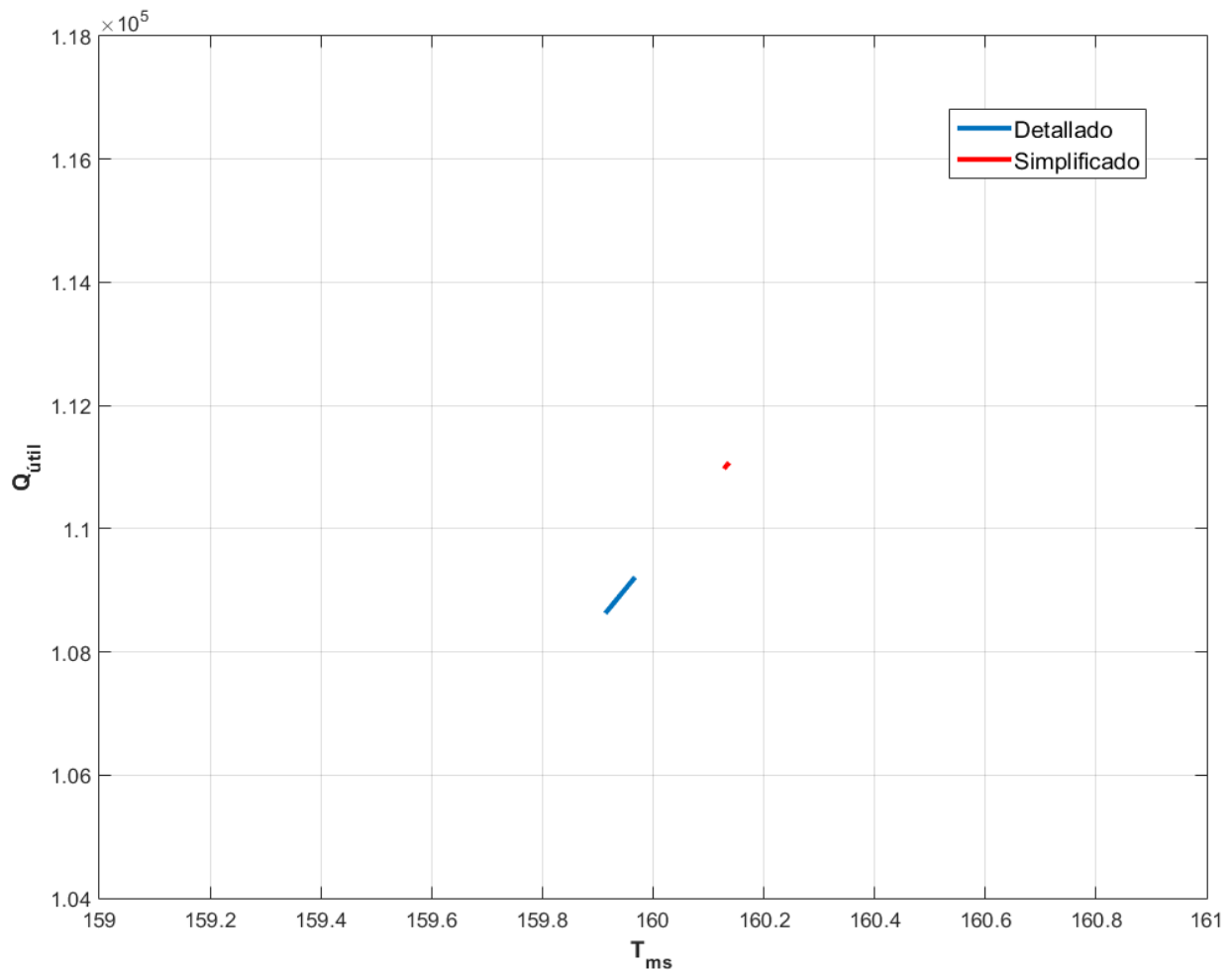


Figura 7-6 Variación de la temperatura ambiente para el modelo detallado y simplificado

La Figura 7-7 y Figura 7-8 muestran una ampliación por separado de esta gráfica con la que poder apreciar con más detalle la pendiente y variación de la temperatura de salida del fluido. Además de esto, se va a ser uso de una tabla, Tabla 7-1, con once iteraciones en este caso ya que los valores son muy cercanos y permitirá visualizar mejor la variación.

Tabla 7-1 Variación del calor útil y temperatura entre el modelo detallado y simplificado para una temperatura ambiente dada

T_{amb} (°C)	Q_{detall} (W)	Q_{simp} (W)	$Tsalida_{detall}$ (°C)	$Tsalida_{simp}$ (°C)
0	108655	104356	159,916	159,524
5	108699	104360	159,920	159,524
10	108745	104364	159,925	159,525
15	108792	104368	159,929	159,525
20	108842	104372	159,934	159,526
25	108893	104376	159,938	159,526
30	108947	104380	159,943	159,526
35	109002	104384	159,948	159,527
40	109060	104387	159,953	159,527
45	109119	104391	159,959	159,527
50	109181	104395	159,964	159,528

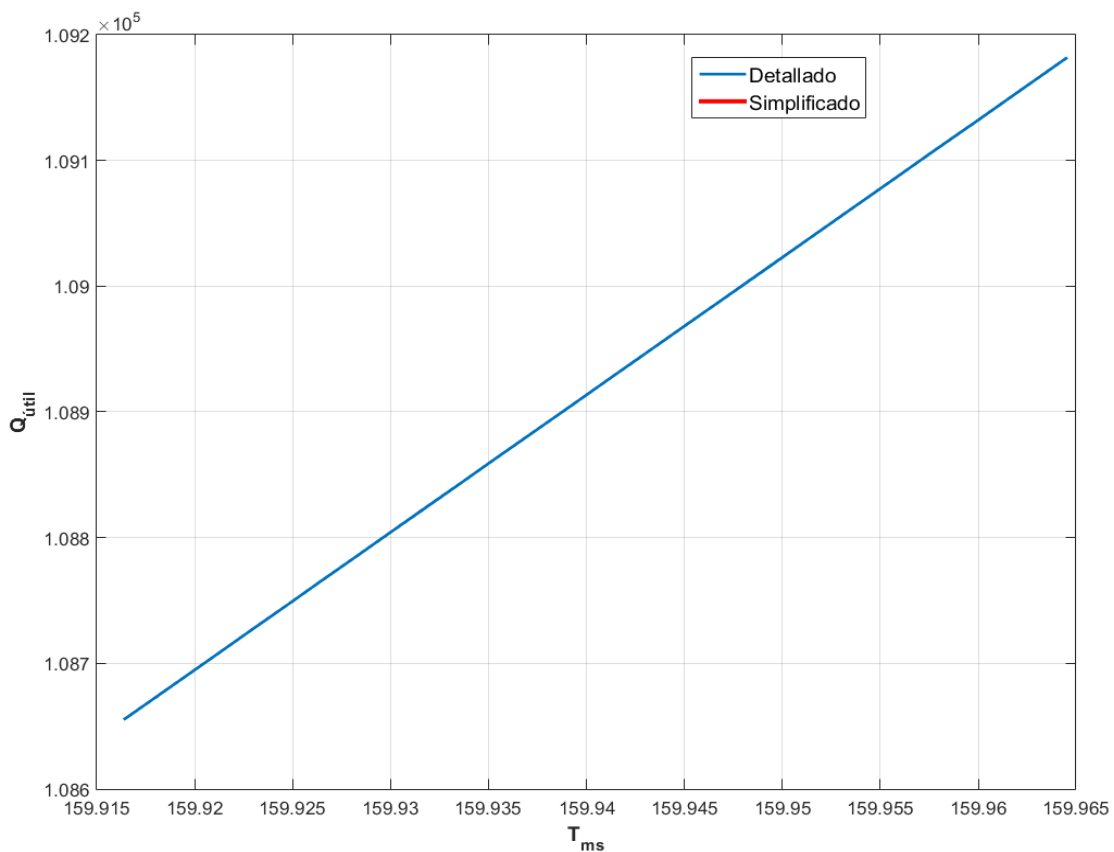


Figura 7-7 Ampliación del detallado variando la temperatura ambiente

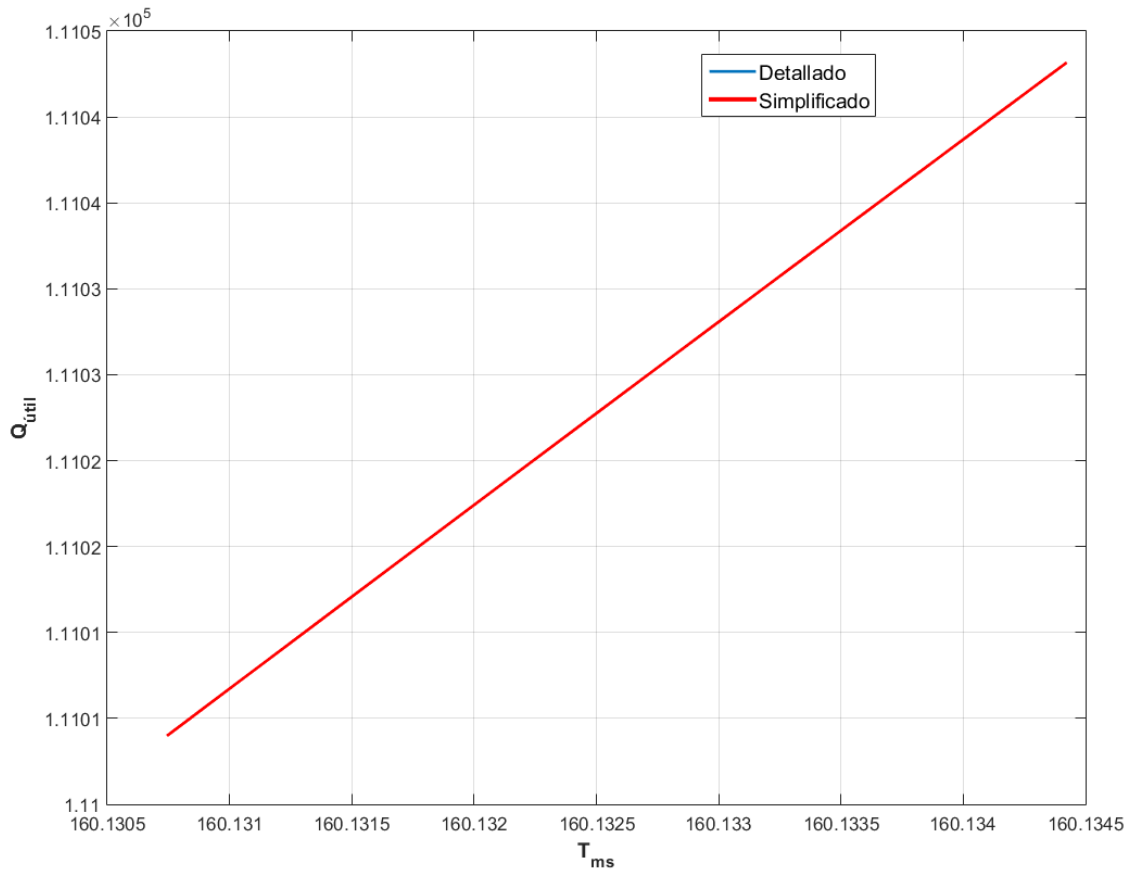


Figura 7-8 Ampliación del simplificado variando la temperatura ambiente

Como puede observarse, ambos modelos no varían prácticamente nada con la T_{amb} . Ambas pendientes son iguales y si que se puede ver un mayor rango de temperaturas en el detallado.

Aún así, el comportamiento de ambas rectas es el mismo, al aumentar la T_{amb} aumenta el calor transferido ($Q_{\text{útil}}$) y la temperatura de salida del agua (T_{ms}) y la diferencia real de temperatura es de menos de dos decimas de grado centigrado.

El error porcentual absoluto medio, MAPE en sus siglas en inglés, es:

$$MAPE = \frac{100}{n} * \sum_{x=1}^n \left| \frac{Detallado - Simplificado}{Detallado} \right|$$

$$\%error Q_{\text{útil}} = 1,9479 \%$$

$$\%error T_{ms} = 0,121 \%$$

7.4.2 Variación de la temperatura de entrada de agua

Los cálculos realizados en esta ocasión también se han hecho para el día 1 de Mayo a las 14:15 hora local, con el caudal normal de operación.

En la Figura 7-9 se ha representado el calor útil $Q_{\text{útil}}$ frente a la variación de la temperatura de salida del agua, T_{ms} , tanto del modelo simplificado como del detallado pero esta vez con una variación de la temperatura del agua de entrada que va desde los 100°C hasta los 200°C.

La temperatura ambiente se ha dejado constante a 50°C y la radiación directa a 500 W/m².

$$I = 500 \text{ W/m}^2$$

$$T_{amb} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{me} = [100,102,104, \dots, 200] \text{ } ^\circ\text{C}$$

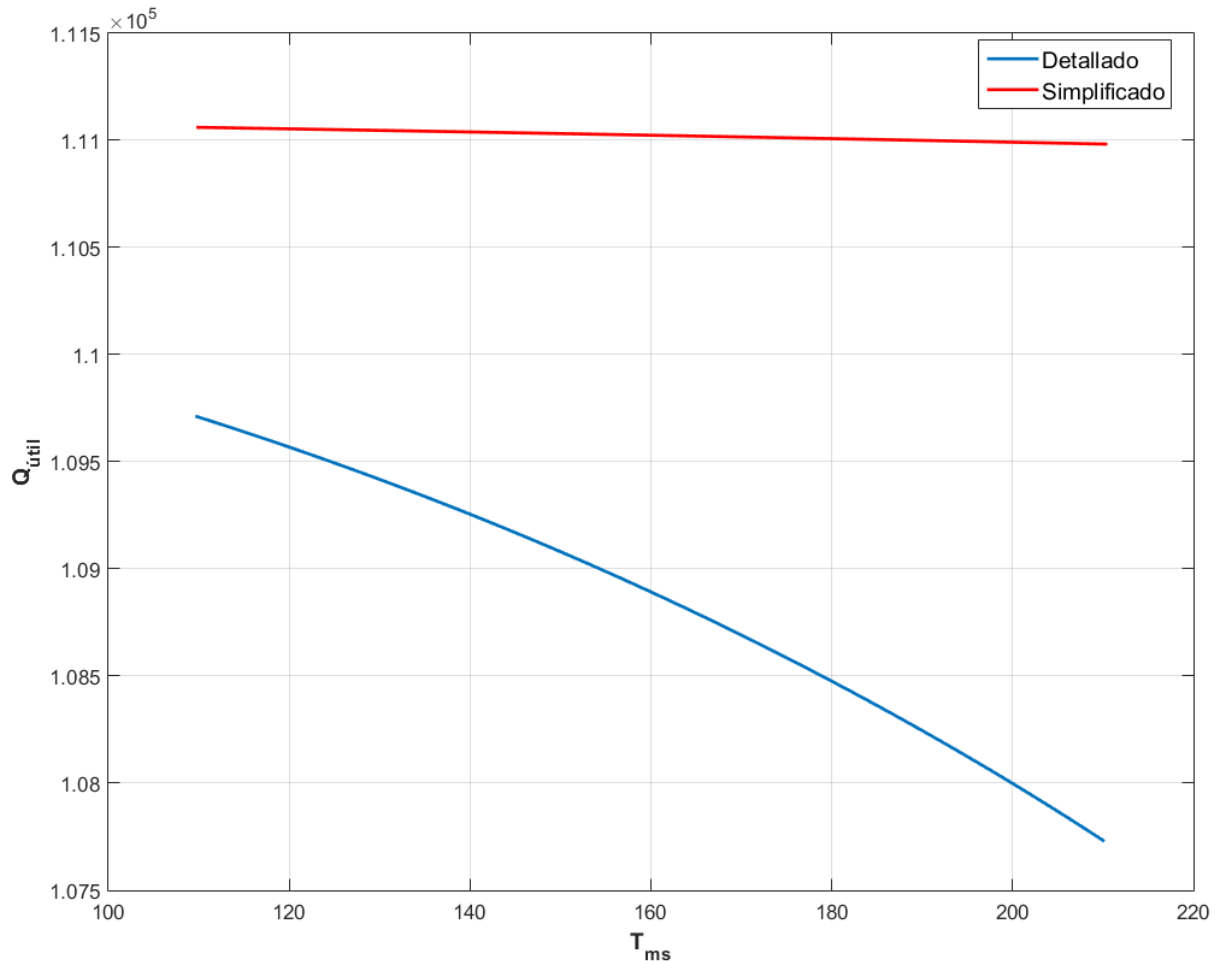


Figura 7-9 Variación de la temperatura del agua para el modelo detallado y simplificado

El modelo detallado es una curva decreciente conforme aumenta la temperatura de entrada del agua, esto es debido al aumento de las pérdidas en el tubo absorbedor y su correspondiente disminución del rendimiento.

En el modelo simplificado podemos ver también una ligera pendiente negativa por lo que cualitativamente el modelo cumple, pero tanto el valor inicial del calor útil transferido como la poca pendiente de la recta hace que el modelo simplificado sea capaz de interpretar la temperatura de salida del agua pero no el calor real transferido para cada uno de estos puntos.

El error porcentual absoluto medio (MAPE) es:

$$\%error Q_{\text{útil}} = 2,0136 \%$$

$$\%error T_{ms} = 0,1233 \%$$

Estos errores indican que a pesar de la poca pendiente del modelo simplificado sigue siendo válido con un bajo error.

7.4.3 Variación del caudal de entrada

En este apartado se va a comprobar la eficacia del factor corrector del caudal de entrada respecto al caudal original de $10 \text{ m}^3/\text{h}$, Figura 7-10, con respecto a los cálculos del modelo detallado. Para ello se van a tomar todas las variables de entrada constantes excepto el caudal de entrada el cual va a variar desde $2 \text{ m}^3/\text{h}$ hasta $18 \text{ m}^3/\text{h}$ ya que es un rango representativo bastante amplio.

$$I = 500 \text{ W}/\text{m}^2$$

$$T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{me} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$G_{agua} = [2, 2.1, 2.2, \dots, 18] \text{ m}^3/\text{h}$$

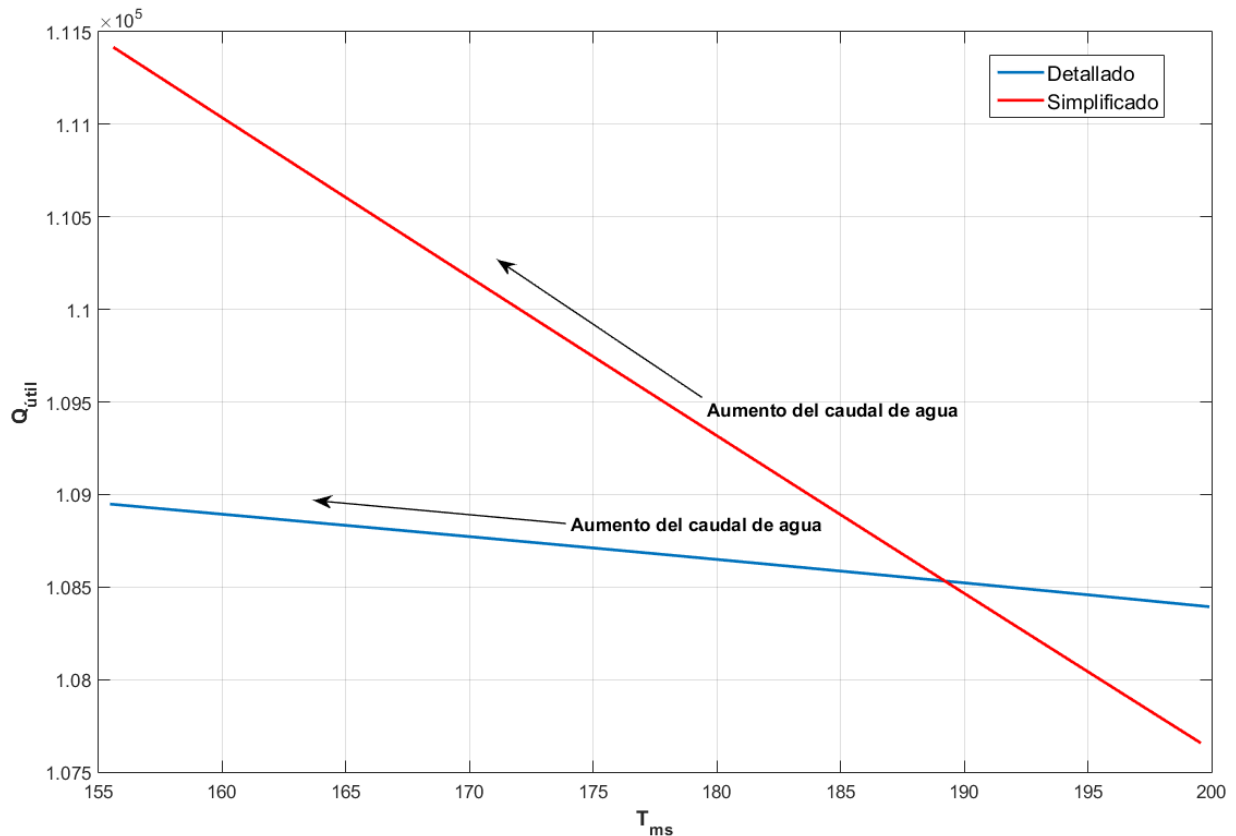


Figura 7-10 Variación del caudal de agua del modelo detallado y simplificado

En ambos modelos la pendiente es positiva al aumentar el caudal de agua. Además de esto, ambos modelos se asemejan a la hora de calcular la temperatura de salida del fluido, siendo más alta cuanto menor caudal de agua hay y más baja cuanto más caudal. Se puede apreciar un cruzamiento de ambos modelos indicando que para valores cercanos al de diseño los modelos se asemejan más y cuando se aumenta el caudal el simplificado sobredimensiona el calor útil conseguido con respecto al simplificado y a la inversa cuando se reduce el caudal de entrada.

La pendiente positiva del simplificado tiene sentido al ser el valor del factor corrector del caudal menor que 1

para valores por debajo de $10 \text{ m}^3/h$ y mayor que 1 para valores por encima de $10 \text{ m}^3/h$ por lo que, conforme vamos aumentando el caudal, este factor va aumentando y a la vez se aumenta el $Q_{\text{útil}}$ absorbido.

El error porcentual absoluto medio (MAPE) es:

$$\%error Q_{\text{útil}} = 1,7266 \%$$

$$\%error T_{ms} = 0,1122 \%$$

7.4.4 Variación con la radiación directa

Se va a ver el análisis de los diferentes rangos de radiación directa en el mediodía solar para el día 1 de Mayo, Figura 7-11, dejando constantes el resto de parámetros ambientales y de operación, Figura 7-11.

$$T_{amb} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{me} = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I = [100,150,200, \dots, 1000] \text{ W/m}^2$$

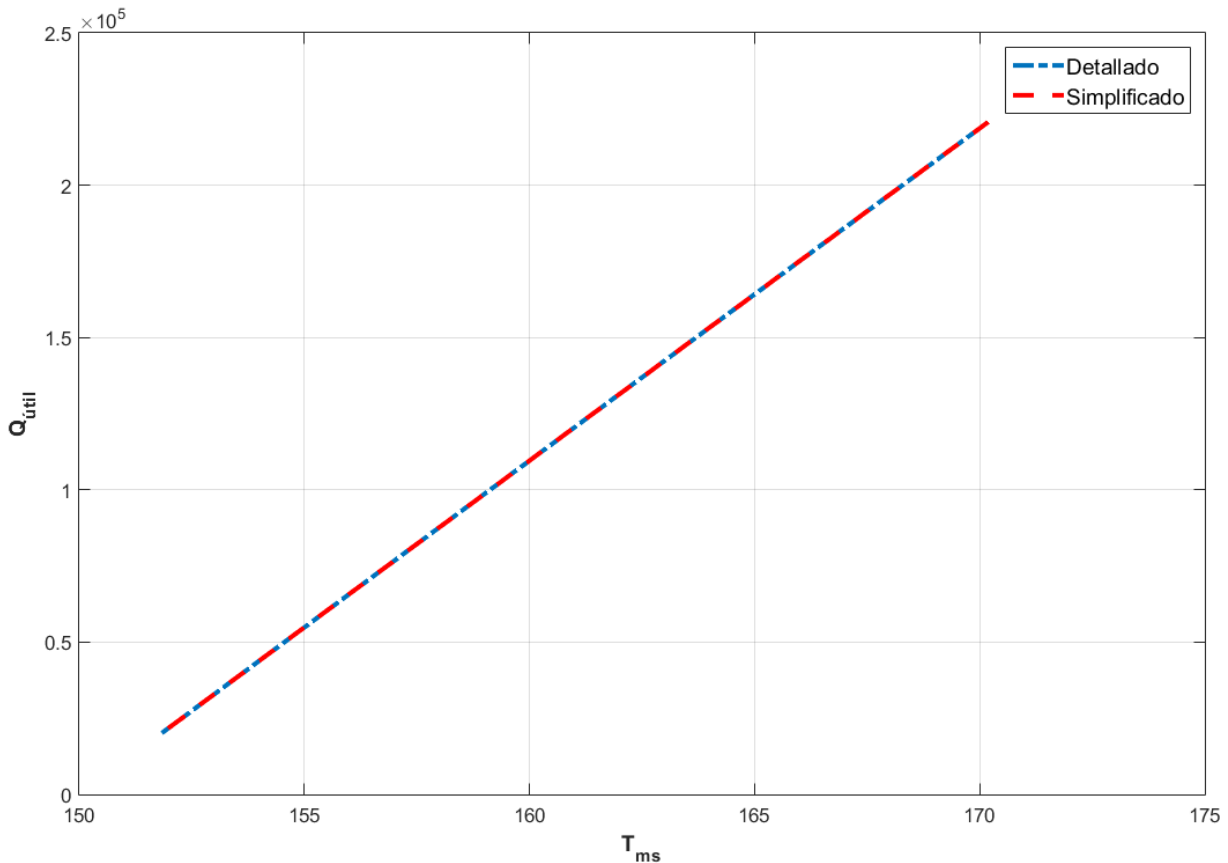


Figura 7-11 Variación de la radiación directa del modelo detallado y simplificado

Se puede comprobar que el modelo detallado y el simplificado para una variación de radiación directa dada son prácticamente idénticas, teniendo que realizar un aumento, Figura 7-12, para poder distinguir que son rectas paralelas.

La única diferencia notable en el simplificado es el punto máximo que alcanza, ya que es algo mayor, absorbiendo mas calor útil.

El error porcentual absoluto medio (MAPE) es:

$$\%error Q_{\text{útil}} = 2,4529 \%$$

$$\%error T_{ms} = 0,1239 \%$$

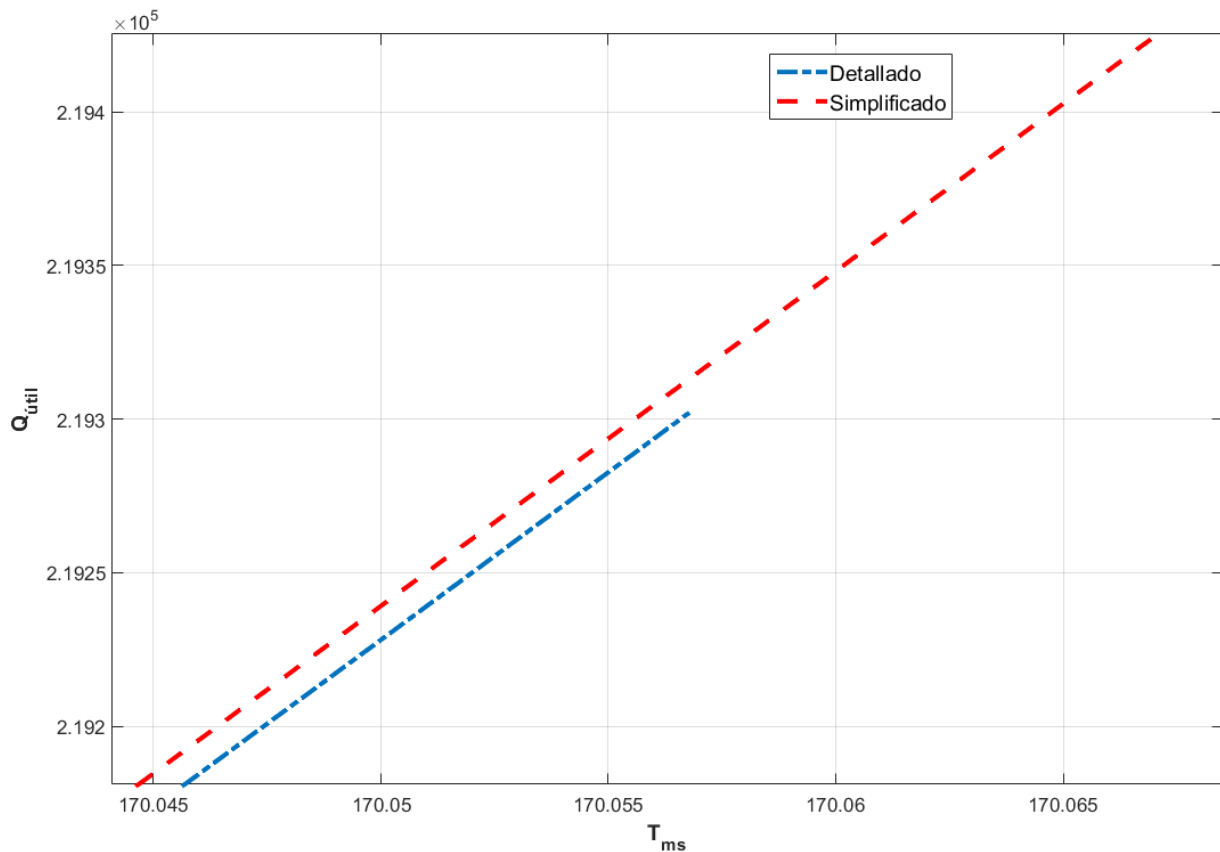


Figura 7-12 Ampliación de la variación de radiación directa en 170 °C

7.4.5 Variación de la temperatura de salida del agua respecto a las diferentes horas solares

En este último apartado se van a dejar todas las variables de operación y ambientales constantes con la salvedad de la hora solar, la cual variaremos, para observar las diferencias entre ambos modelos con una comparación entre el calor útil y la temperatura de salida del agua. Hay que aclarar que el modelo simplificado se ve afectado por estas variaciones horarias debido al factor corrector del ángulo de incidencia calculado anteriormente.

El día solar elegido es el 1 de Mayo.

$$T_{amb} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{me} = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I = 500 \text{ W/m}^2$$

$$tiempo = [9,9.1,9.2, \dots, 18] \text{ h}$$

En la Figura 7-13 se puede ver con dificultad que es lo que ocurre, pero a primera vista es claro que el modelo simplificado no es capaz de dar todo el rango de temperaturas de salida para los diferentes horarios. Observamos con los datos recogidos que desde las 9 de la mañana que empiezan los cálculos hasta las 15 horas los valores van aumentando, a partir de esa hora los valores comienzan a decrecer por lo que la recta en realidad avanza para luego retroceder por ella misma.

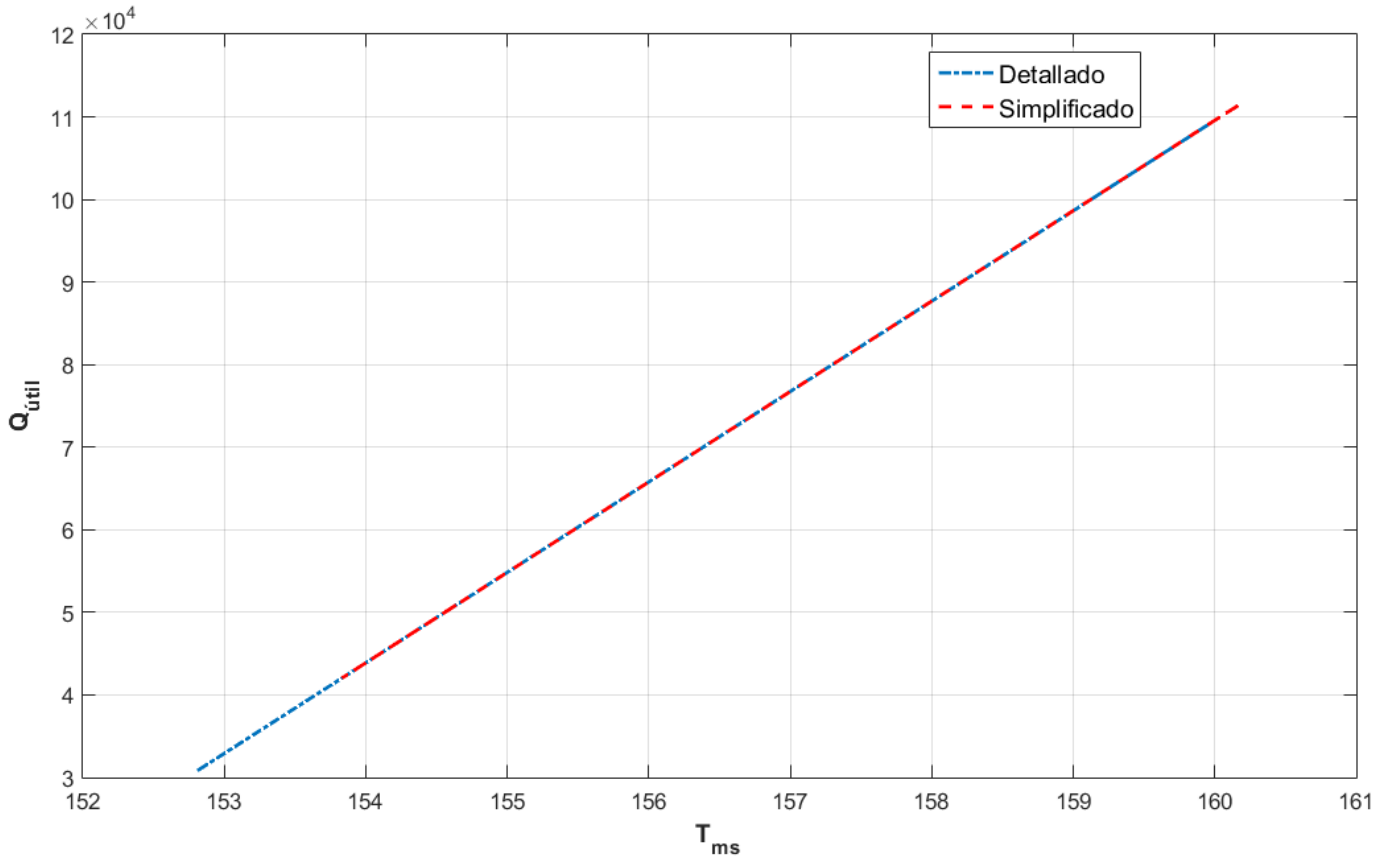


Figura 7-13 Variación horaria comparación modelo detallado y simplificado

En el modelo simplificado ocurre exactamente lo mismo, este hecho puede observarse mejor en la Figura 7-14.

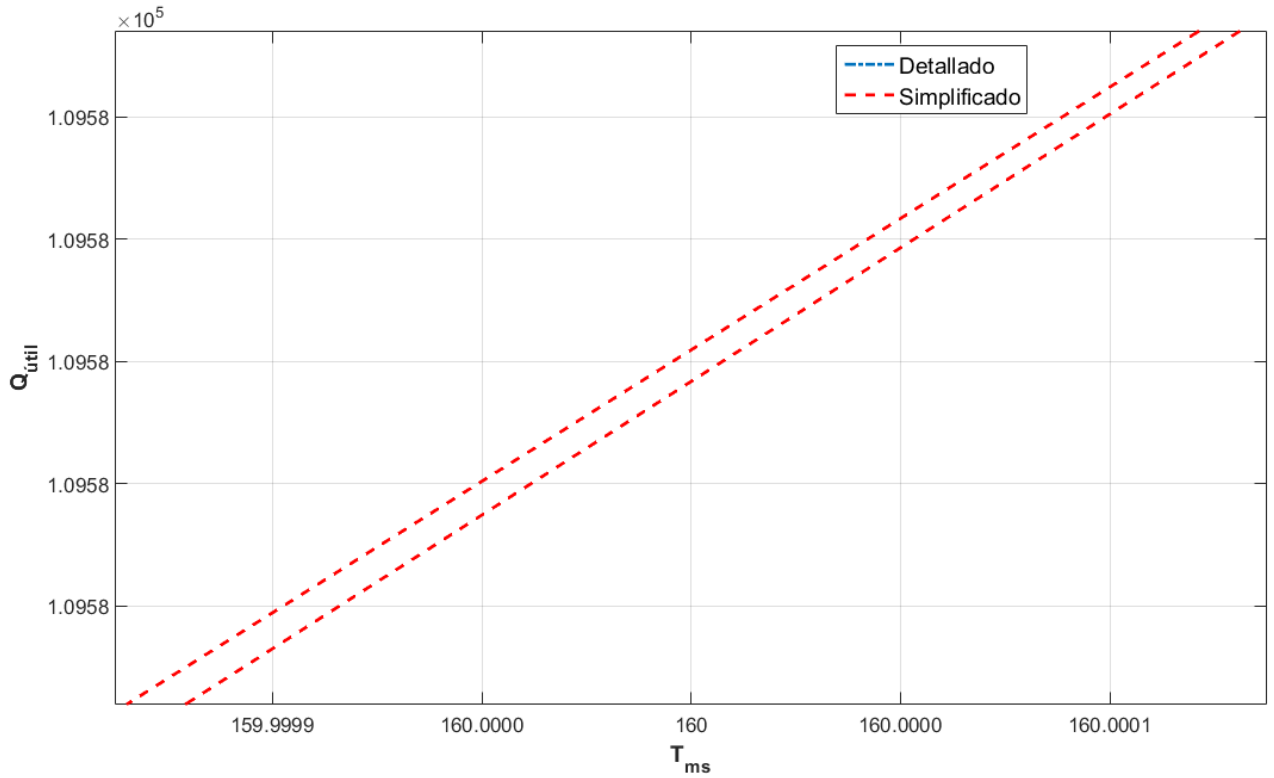


Figura 7-14 Ampliación de la variación horaria a $160\text{ }^{\circ}\text{C}$

Para poder analizar mejor estos datos vamos a recurrir a otro tipo de gráfica, Figura 7-15.

$$tiempo = [9, 9.1, 9.2 \dots, 18] h$$

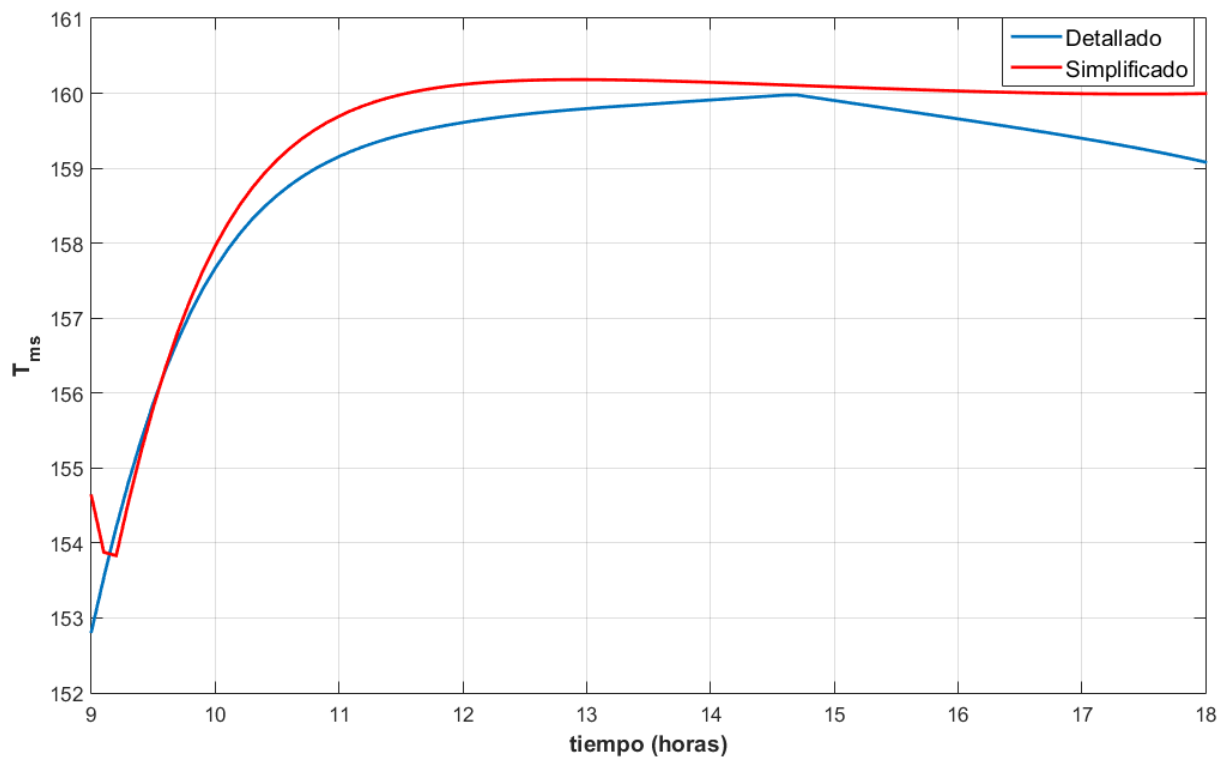


Figura 7-15 Variación de la temperatura de salida del agua respecto al tiempo

El modelo simplificado no funciona adecuadamente para horas tempranas del día debido al error causado por el factor corrector del ángulo de incidencia.

En el modelo detallado podemos observar la disminución del rendimiento del captador solar debido a la posición del sol en horas tempranas o tardías del día y por lo tanto una disminución del calor útil y de la temperatura de salida del agua.

El error porcentual absoluto medio (MAPE) es:

$$\%error Q_{\text{útil}} = 5,1710 \%$$

$$\%error T_{ms} = 0,2654 \%$$

7.5 Variación de parámetros del captador Fresnel

En este apartado se va a variar las propiedades físicas del captador Fresnel y se verá en como afecta a la recta de rendimiento y a los coeficientes usados en el simplificado.

Para ello se va a ser uso de dos cambios:

- Aumento del número de filas y reducción del ancho de los espejos en un 20%
- Aumento en la emisividad del tubo receptor en un 20%

7.5.1 Variación del número de filas y ancho de los espejos

Se va a realizar un aumento del número de filas de 11 a 15 y una reducción del ancho de los espejos de 0,5 a 0,4 y calcular la nueva recta de rendimiento y coeficientes mediante el modelo detallado Fresnel.

Se debe tener en cuenta que se anularán todos los valores negativos y que el caudal de agua durante el análisis se mantiene constante a $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

$$T_{me}=[100, 110, 115, \dots, 200]^{\circ}\text{C}$$

$$T_{amb}=[0, 2, 4, 6, \dots, 50]^{\circ}\text{C}$$

$$I=[10, 20, 30, \dots, 100, 200, 300, \dots, 1000] \text{W}/\text{m}^2$$

El día escogido para calcular la recta de ajuste permanece constante, siendo el 1 de Mayo (día 121) al mediodía solar, 14:11, Figura 7-16.

Los resultados obtenidos nos dan la recta de rendimiento, los coeficientes de ajuste, coeficiente de determinación R^2 y la raíz del error cuadrático medio, $RECM$:

$$\eta = c_1 - c_2 * \left(\frac{T_{me} - T_{amb}}{I} \right) - c_3 * I * \left(\frac{T_{me} - T_{amb}}{I} \right)^2$$

$$c_1 = 0,6267923$$

$$c_2 = 0,0301877 \frac{W}{m^2K}$$

$$c_3 = 1,704762 * 10^{-4} \frac{W}{m^2K^2}$$

$$R^2 = 0,9711$$

$$RECM = 0,01717$$

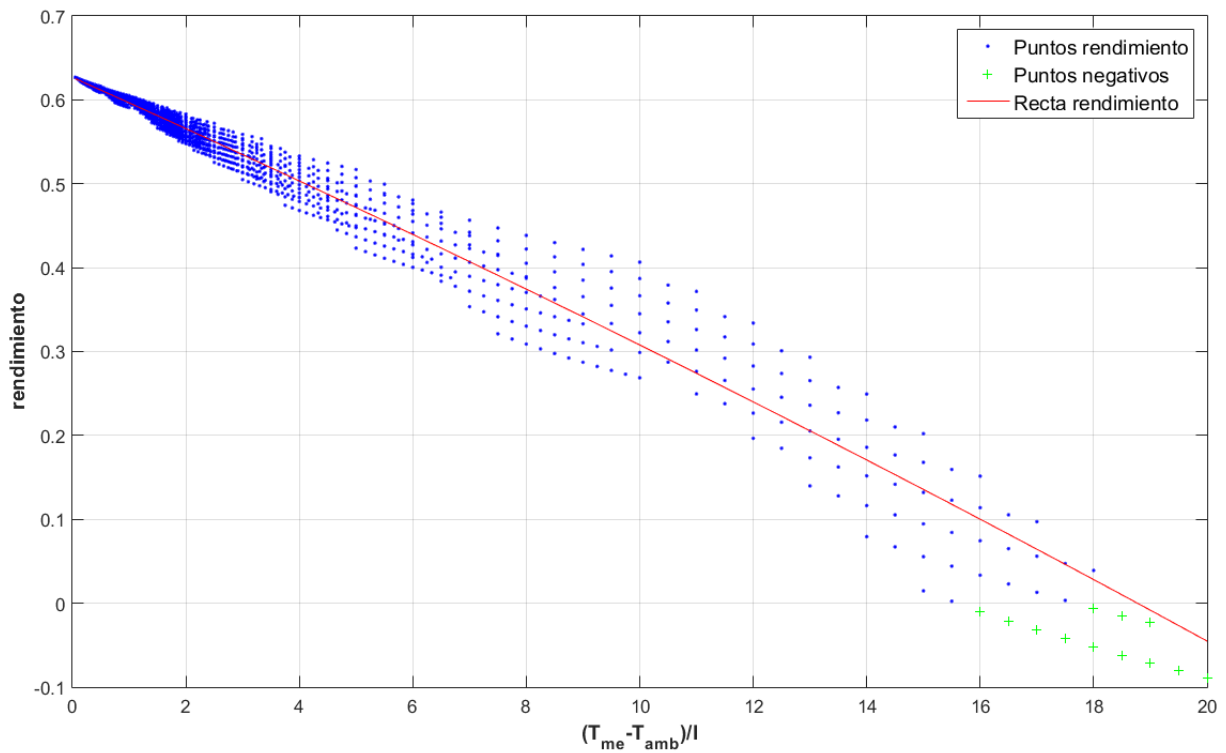


Figura 7-16 Recta de rendimiento al modificar filas y ancho de espejos

Se observa una variación muy pequeña de estos coeficientes por lo que la recta de rendimiento se ve poco afectada por el cambio en el número de filas y el ancho de espejos. Para observar mejor esta variación se ha recurrido a la Figura 7-17, en la cual se observa prácticamente el mismo rendimiento máximo y una disminución en las pérdidas, que se ve representado en una menor pendiente de la recta de rendimiento lo cual conlleva un aumento del rendimiento general.

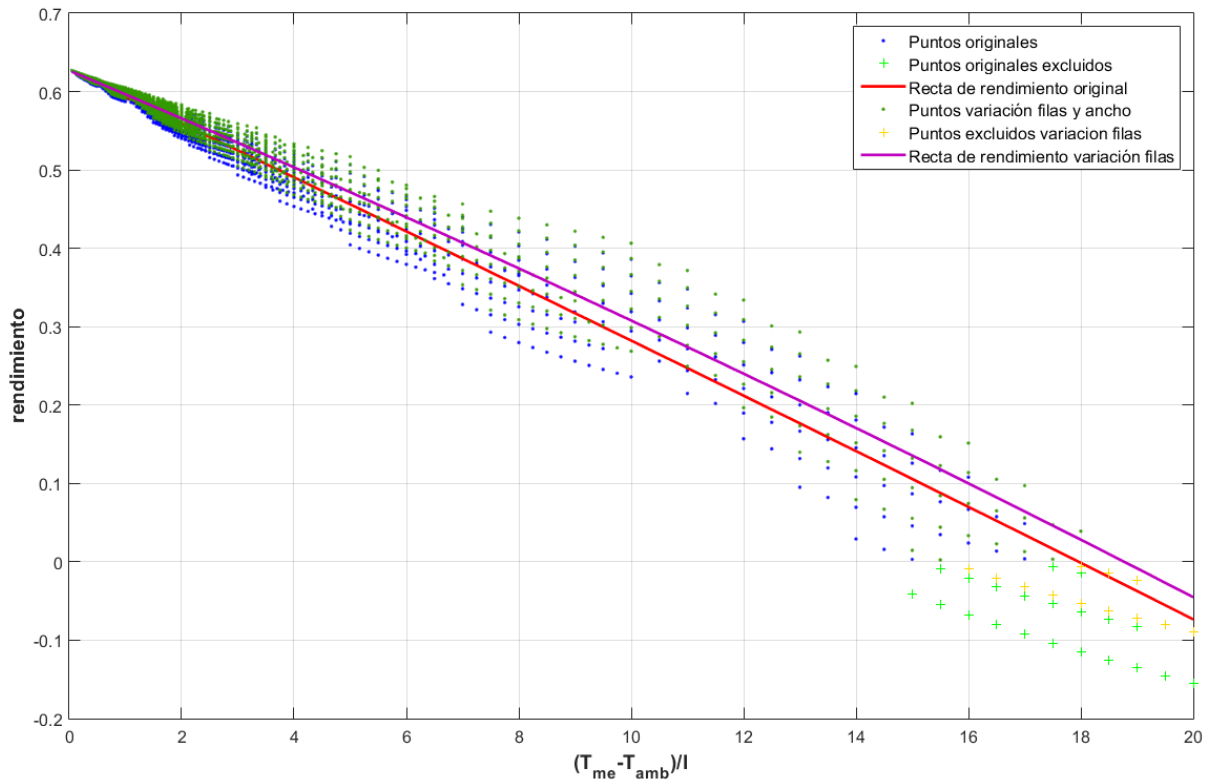


Figura 7-17 Representación de la recta de rendimiento original con la variación del número de filas y ancho

7.5.2 Variación de la emisividad del tubo receptor

Se aumenta un 20% la emisividad del tubo pasando a valer 0,168 de los 0,14 de los cálculos anteriores. Una vez hecho, se calcula la recta de rendimiento, Figura 7-18.

Se debe tener en cuenta que se anularán todos los valores negativos y que el caudal de agua durante el análisis se mantiene constante a $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

$$T_{me}=[100, 110, 115, \dots, 200]^{\circ}\text{C}$$

$$T_{amb}=[0, 2, 4, 6, \dots, 50]^{\circ}\text{C}$$

$$I=[10, 20, 30, \dots, 100, 200, 300, \dots, 1000]\text{W}/\text{m}^2$$

El día escogido para calcular la recta de ajuste permanece constante, siendo el 1 de Mayo (día 121) al mediodía solar, 14:11.

A continuación, se adjuntan la recta de rendimiento, los coeficientes de ajuste de la recta, el coeficiente de determinación R^2 y la raíz del error cuadrático medio. *RECM*:

$$\eta = c_1 - c_2 * \left(\frac{T_{me} - T_{amb}}{I} \right) + c_3 * I * \left(\frac{T_{me} - T_{amb}}{I} \right)^2$$

$$c_1 = 0,628534$$

$$c_2 = 0,0386375 \frac{W}{m^2K}$$

$$c_3 = 1,062343 * 10^{-4} \frac{W}{m^2K^2}$$

$$R^2 = 0,9685$$

$$RECM = 0,01861$$

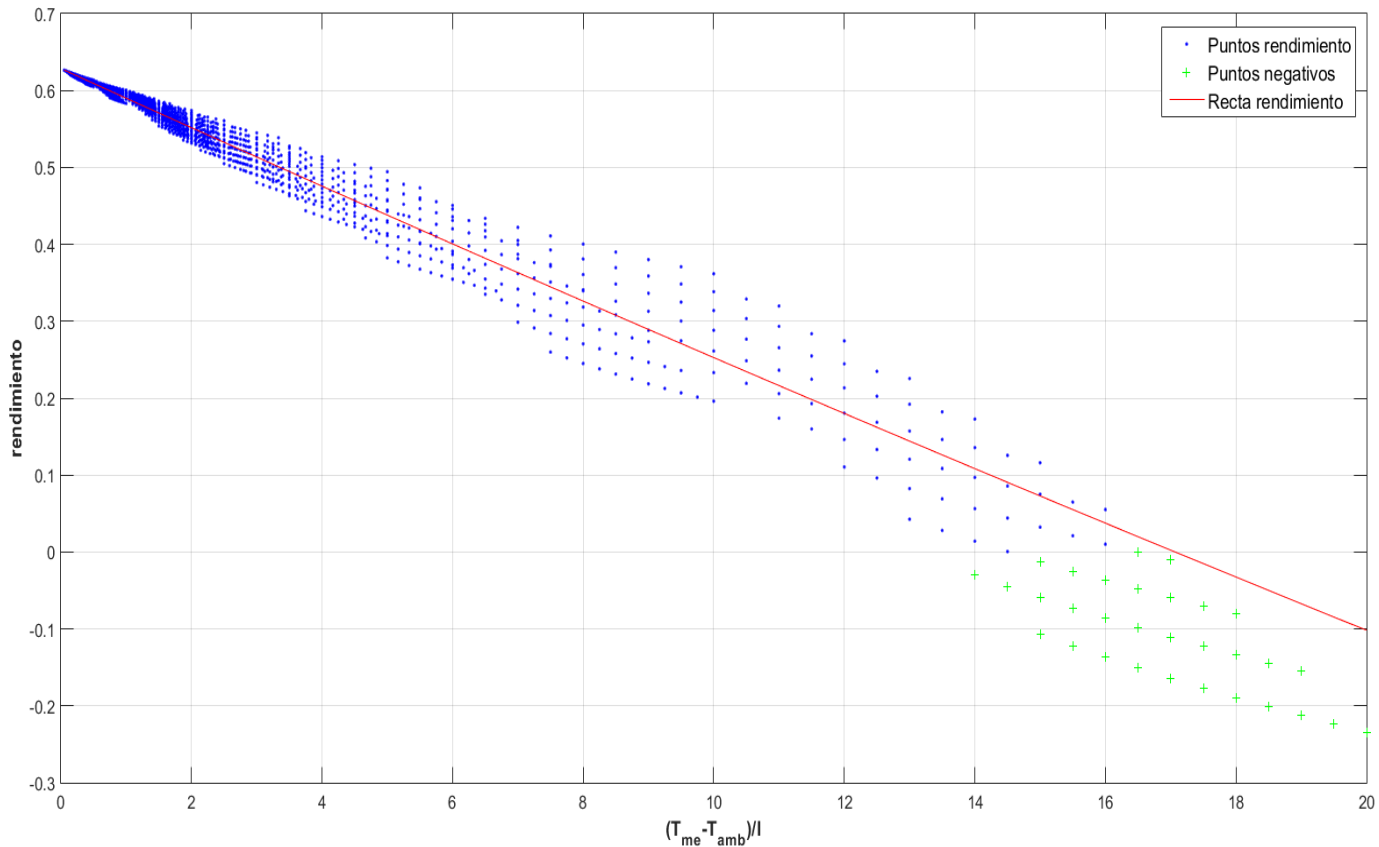


Figura 7-18 Recta de rendimiento al modificar la emisividad del tubo

Para observar mejor la diferencia entre la recta de rendimiento se ha representado en la Figura 7-19 la recta original con la nueva recta al aumentar la emisividad del tubo.

Como se puede observar un aumento de la emisividad del tubo aumenta drásticamente las pérdidas, disminuyendo el rendimiento y aumentando la pendiente de la recta de rendimiento. Por último se van a representar las tres rectas de rendimiento para su visualización, Figura 7-20.

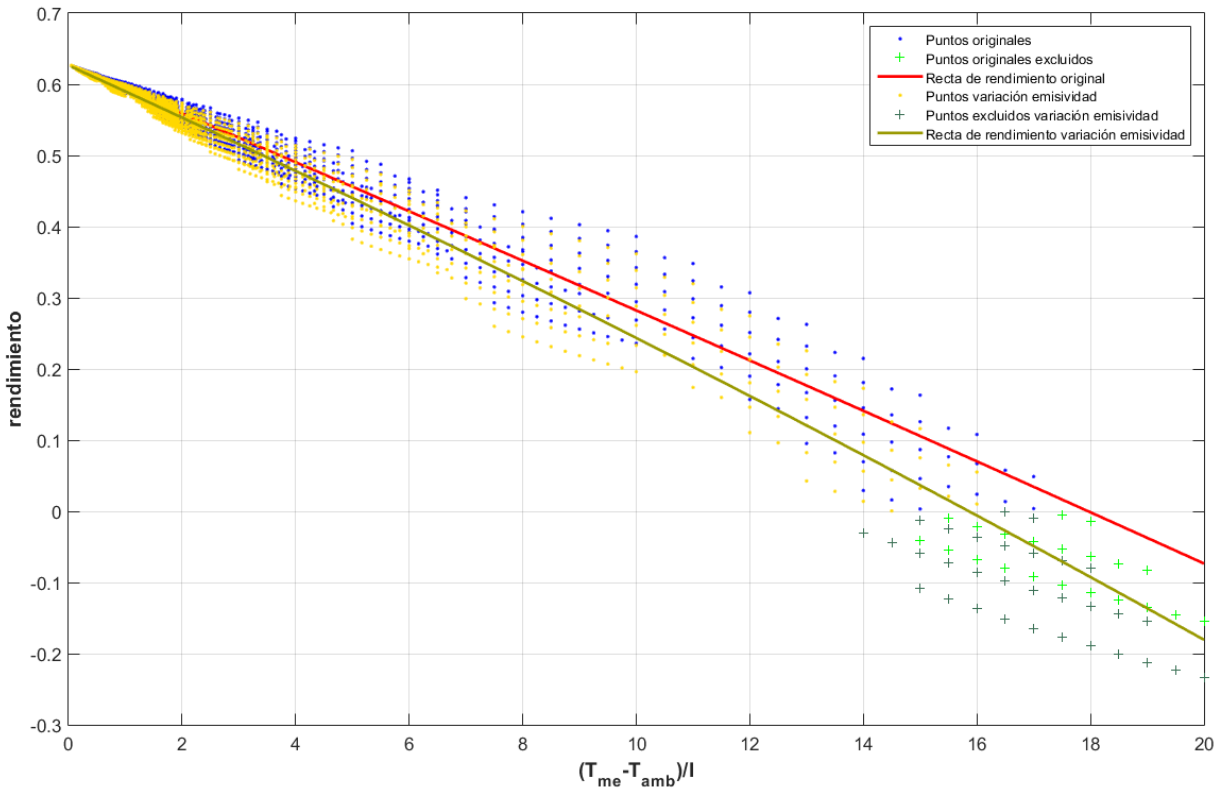


Figura 7-19 Recta de rendimiento al modificar emisividad del tubo

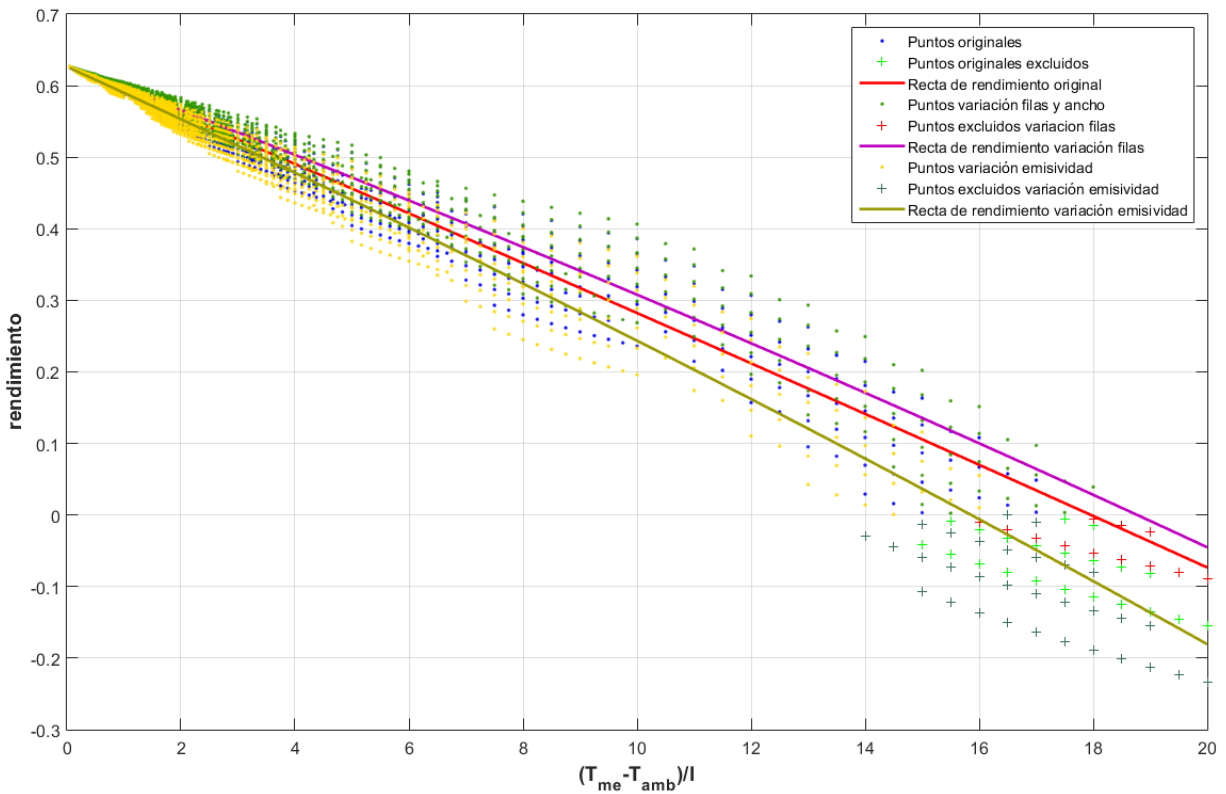


Figura 7-20 Comparación de las rectas de rendimiento

En esta última gráfica se puede apreciar que un aumento de la emisividad del tubo cambia mucho más los

coeficientes de la recta de rendimiento, por lo que para cambios importantes de esta es necesario actualizar estos coeficientes antes de proceder al cálculo con el modelo simplificado.

El rendimiento máximo prácticamente no se ve afectado en ninguno de los casos.

8 CONCLUSIONES

En este trabajo de fin de grado se ha resuelto el modelo detallado y el modelo simplificado del colector Fresnel situado en la cubierta de la Escuela de Ingenieros de Sevilla. Para ello, se ha hecho uso del programa *Matlab* y el trabajo previo de *Rosario Caro* y *Rafael Villar*. Una vez construido el modelo óptico y térmico del detallado, se ha implementado el modelo simplificado a partir de los datos de la recta de rendimiento del día 1 de Mayo al mediodía solar.

El análisis se va a focalizar especialmente en el calor útil transferido al receptor solar y a la temperatura de salida del fluido caloportador, en este caso agua. Para ello, se han agrupado las diferentes variables de operación y ambientales, variando en un rango las que han interesado analizar mientras el resto de condiciones se mantenían constantes.

Las variables analizadas han sido las siguientes:

- Variación de la temperatura ambiente.
- Variación de la temperatura del fluido caloportador.
- Variación del caudal de entrada.
- Variación de la radiación directa.
- Variación a distintas horas solares de la temperatura de salida del agua.

Para el cálculo del modelo simplificado se han tenido en cuenta dos factores correctores: el factor corrector por ángulo de incidencia y el factor corrector por caudal.

Tras el estudio comparativo de ambos modelos en las diferentes condiciones se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Para una variación de la temperatura ambiente se puede apreciar un leve incremento del calor útil del modelo simplificado respecto al detallado, siendo la diferencia en grados centígrados a la temperatura de salida menor de dos décimas de grado. Podemos decir que el modelo se comporta de forma adecuada para este tipo de análisis tras calcular que el error es menor del 0,2 %.
- Con una variación de la temperatura de entrada de la masa de agua se observa que en ambos modelos la temperatura de salida del agua es prácticamente idéntica aunque seguimos teniendo un pequeño aumento calor útil transferido para el modelo simplificado respecto al detallado. El error sigue siendo inferior al 0,2 % por lo que el modelo sigue cumpliendo las expectativas.
- En la variación del caudal de agua, después de haber aplicado los factores correctores del caudal, se puede apreciar un comportamiento parecido al anterior y un cruzamiento en las curvas de ambos modelos. Teniendo en cuenta las diferencias anteriores, un caudal aproximado al de diseño hace que el calor útil se asemeje más entre el modelo detallado y el simplificado, favoreciendo su uso. El error cometido al calcular la temperatura de salida del agua es cercano al 0,1 %.
- La variación de la radiación directa incidente en los reflectores es el estudio que más se asemeja, consiguiendo resultados casi idénticos en ambos modelos con un leve aumento de la temperatura de salida del agua para el modelo simplificado y un error igual de pequeño que en los anteriores apartados.
- La variación horaria resaltan los problemas de adaptación del modelo simplificado en condiciones alejadas del mediodía solar, que tras la aplicación del factor corrector apropiado se minimizan, logrando así un error absoluto en la temperatura inferior al 0,3% aunque el modelo sigue sobredimensionando la temperatura a horas tempranas del día.
- Por último, los cambios en las propiedades físicas del captador Fresnel como el aumento de número de filas o la emisividad, han conllevado un cambio en los coeficientes de la recta de rendimiento, especialmente en la emisividad, dejando prácticamente constante el rendimiento máximo que puede alcanzar el captador.

Tras analizar estas gráficas, se aprecia que el mayor problema está en la ecuación usada para el factor corrector del ángulo de incidencia. Este factor corrector, al estar influido por 11 filas de espejos, no se adapta correctamente a las condiciones de operación de la planta y deberá hacerse un estudio experimental para lograr una ecuación que rijas el comportamiento de forma adecuada. Una vez obtenido experimentalmente este factor se podría mejorar la curva horaria del modelo simplificado.

En general, el modelo simplificado para el captador Fresnel cumple su función. Es capaz de dar valores cercanos a otros modelos más detallados con menor necesidad de potencia de cálculo.

REFERENCIAS

- [1] Wikipedia, «Destilación Solar,» 7 Julio 2017. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Destilaci3n_solar. [Último acceso: 15 Julio 2017].
- [2] T. McGee, «Treehugger,» 10 Enero 2008. [En línea]. Available: <https://www.treehugger.com/renewable-energy/good-news-solar-cell-diversity-continues-to-increase.html>. [Último acceso: Julio 2017].
- [3] S. A. Kalogirou, Solar Energy Engineering, 2009.
- [4] M. d. R. Caro Hidalgo, Estudio Teórico y Experimental de un Captador Solar, 2009.
- [5] R. Villar Fernández, Estudio del rendimiento óptico de un captador Fresnel, 2012.
- [6] Grupo Termotecnia ETSI, Tablas Transmisión de Calor.
- [7] Grupo Termotecnia ETSI, Apuntes Captador Solar Plano.
- [8] «Vercalegario,» [En línea]. Available: <https://www.vercalegario.info/es/sol/espana-mes-mayo-2017.html>. [Último acceso: Junio 2017].
- [9] S. A. Kalogirou, The potential of solar industrial process heat applications, 2003.