

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería en Tecnologías Industriales

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

Autor: Javier Ostos Reina

Tutores: José Julio Guerra Macho y Christian Suárez Soria

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



Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería en Tecnologías Industriales

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

Autor:

Javier Ostos Reina

Tutor:

José Julio Guerra Macho

Catedrático de universidad

Christian Suárez Soria

Profesor Sustituto Interino

Dpto. de Termotecnia
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2020

Trabajo de Fin de Grado: Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

Autor: Javier Ostos Reina

Tutores: José Julio Guerra Macho y Christian Suárez Soria

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Índice	i
Índice de Tablas	iii
Índice de Gráficos	iv
Índice de Figuras	v
Notación	viii
1. Introducción	1
1.1 <i>Objetivo</i>	1
1.2 <i>Radiación solar</i>	1
1.2.1 <i>Radiación solar en España y Andalucía</i>	3
1.2.2 <i>Energía solar térmica en España y Andalucía</i>	4
1.3 <i>Instalaciones de energía solar térmica</i>	5
1.3.1 <i>Clasificación de los sistemas de energía solar</i>	9
1.4 <i>Mercado de energía solar en España</i>	12
2. Comportamiento del captador solar plano	15
2.1 <i>Introducción</i>	15
2.2 <i>Descripción y funcionamiento del captador solar plano</i>	15
2.3 <i>Componentes del captador solar plano</i>	16
2.4 <i>Tipología de captador solar plano</i>	17
2.5 <i>Modelo en regimen permanente</i>	18
2.5.1 <i>Balance global</i>	18
2.5.2 <i>Rendimiento</i>	19
2.6 <i>Producto transmitancia-absortancia</i>	21
2.6.1 <i>Reflexión de la Radiación</i>	21
2.6.2 <i>Transmitancia de la cubierta</i>	23
2.7 <i>Coefficiente global de pérdidas</i>	24
2.7.1 <i>Coefficiente global de pérdidas inferior</i>	24
2.7.2 <i>Coefficiente global de pérdidas lateral</i>	24
2.7.3 <i>Coefficiente global de pérdidas superior</i>	25
2.8 <i>Coefficiente de transferencia de calor por convección</i>	25
2.9 <i>Irradiancia solar global</i>	26
2.10 <i>Modelo de aleta unidimensional</i>	28
2.10.1 <i>Campo de temperaturas del fluido y temperatura media de la placa</i>	32
3. Software	34
3.1 <i>Introducción</i>	34
3.2 <i>Concepción general del programa</i>	34
3.3 <i>Estructura del programa</i>	35
3.3.1 <i>Condiciones de operación</i>	37
3.3.2 <i>Captador</i>	37
3.3.4 <i>Resultados</i>	38
3.4 <i>Estudio paramétrico</i>	40

3.4.1 Recta rendimiento	41
3.4.2 Condiciones de operación	41
3.4.3 Aislamiento	43
3.4.4 Caudal específico	45
4. Resumen y Conclusiones	49
Referencias bibliográficas	51
Anexo 1: Código EES	52
Anexo 2: Manual del usuario	58

Índice de Tablas

Tabla 1: Sistema según la potencia eléctrica de la bomba	7
Tabla 2: Distribución superficie acumulada 2015	14
Tabla 3: Características de la placa absorbente	35
Tabla 4: Resultados simulaciones	41
Tabla 5: Tipología de aislante térmico del captador solar	44

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Energía solar térmica a baja temperatura en Andalucía	4
Gráfico 2: Desarrollo del mercado 2006-2016	13
Gráfico 3: Metros cuadrados instalados al año 2005-2016	13
Gráfico 4: Porcentaje de captadores instalados	14
Gráfico 5: Recta rendimiento	41
Gráfico 6: Rendimiento del captador en función del ángulo de incidencia	42
Gráfico 7: Rendimiento del captador en función de la temperatura ambiente	42
Gráfico 8: Rendimiento en función de la velocidad del viento	42
Gráfico 9: Rendimiento y diferencia de temperaturas en función de la temperatura de entrada del fluido	43
Gráfico 10: Espesor de aislamiento	44
Gráfico 11: Pérdidas térmicas en función del espesor y tipo de aislamiento	44
Gráfico 12: Rendimiento en función del espesor y tipo de aislamiento	45
Gráfico 13: Factor de evacuación del calor en función del caudal específico	46
Gráfico 14: Factor de evacuación del calor en función del caudal específico según la disposición de los tubos	46
Gráfico 15: Pérdida de carga en función del caudal específico	47
Gráfico 16: Factor de flujo del captador en función del caudal	47
Gráfico 17: Rendimiento y calor útil en función del caudal específico	48

Índice de Figuras

Figura 1: Longitud de onda en función de Irradiancia espectral	2
Figura 2: Tipos de radiación solar	2
Figura 3: Radiación solar en Europa	3
Figura 4: Irradiancia global, directa y difusa de Madrid	3
Figura 5: Irradiancia global media en España	4
Figura 6: Esquema instalación solar térmica	5
Figura 7: Esquema de circuitos de instalación solar térmica	6
Figura 8: Intercambiador de calor	6
Figura 9: Tipos de acumuladores	7
Figura 10: Bomba de circulación	7
Figura 11: Vaso de expansión	8
Figura 12: Centralita de regulación de la instalación solar térmica	8
Figura 13: Esquema básico de la instalación para producción de ACS	9
Figura 14: Esquema básico de la instalación solar térmica para ACS uso industrial	10
Figura 15: Esquema básico instalación solar térmica para calefacción/refrigeración	10
Figura 16: Esquema básico de una instalación solar térmica para climatización de piscinas y ACS	10
Figura 17: Sistemas de energía solar para ACS por la forma de acoplamiento	11
Figura 18: Instalación solar térmica con intercambiador de calor	11
Figura 19: Instalación de energía solar térmica sin intercambiador	12
Figura 20: Componentes del captador solar plano	16
Figura 21: Aislante térmico del captador solar	16
Figura 22: Absorbedor con disposición en serpentín	18
Figura 23: Absorbedor con disposición en parrilla	18
Figura 24: Balance de energía en el captador	19
Figura 25: Recta rendimiento del captador solar	19
Figura 26: Ley de Snell	21
Figura 27: Método de Ray-Tracing	22
Figura 28: Intercambio radiante en superficie semitransparente	23
Figura 29: Radiación directa en superficie horizontal e inclinada del captador	27
Figura 30: Aleta unidimensional del captador	28
Figura 31: Sistema tubo-aleta	29
Figura 32: Balance de energía en la aleta	29

Figura 33: Factor de eficiencia de la aleta	31
Figura 34: Energía útil transferida al tubo	31
Figura 35: Disposición de los tubos sobre la placa	32
Figura 36: Disposición de los tubos bajo la placa	32
Figura 37: Disposición de los tubos en la placa	32
Figura 38: Balance de energía en uno de los tubos	33
Figura 39: Condiciones de operación en EES	37
Figura 40: Captador en EES	38
Figura 41: Resultados en EES	39
Figura 42: Menú principal en MATLAB	39
Figura 43: Condiciones de operación en MATLAB	39
Figura 44: Captador en MATLAB	40
Figura 45: Resultados en MATLAB	40
Figura 46: Diagram Windows en EES	59
Figura 47: Cuadro adicional manual	59
Figura 48: Primera pantalla del manual	60
Figura 49: Primera pantalla manual (1)	60
Figura 50: Cuadro adicional manual (2)	61
Figura 51: Menú principal según manual	61
Figura 52: Ventana Captador según manual	62
Figura 53: Ventana Condiciones de operación según manual	62
Figura 54: Ventana Resultados según manual	63

A	Área del captador [m^2]
b_0	Parámetro del modificador del ángulo de incidencia [-]
C_B	Conductancia de la unión tubo-placa [$\frac{W}{m \cdot K}$]
cp_f	Calor específico del fluido [$\frac{kJ}{kg \cdot K}$]
D_{ext}	Diámetro exterior de los tubos del captador [m]
D_{int}	Diámetro interior de los tubos del captador [m]
E	Espesor del captador [m]
e_{al}	Espesor del aislamiento térmico lateral del captador [m]
e_{ap}	Espesor del aislamiento térmico posterior del captador [m]
e_t	Espesor de los tubos del captador [m]
F	Factor de eficiencia de la aleta [-]
F'	Factor de eficiencia del captador [-]
FR	Factor de evacuación del calor [-]
$FR(\tau\alpha)$	Factor óptico [-]
$FR(\tau\alpha)_n$	Factor óptico para una incidencia normal [-]
G	Caudal específico del fluido [$\frac{kg}{s \cdot m^2}$]
g	Gravedad [$\frac{m}{s^2}$]
h_f	Coefficiente de película por convección entre el fluido y el tubo [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]
h_v	Coefficiente de película exterior [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]
I	Irradiancia global [$\frac{W}{m^2}$]
I_D	Radiación solar directa [$\frac{W}{m^2}$]
I_d	Radiación solar difusa [$\frac{W}{m^2}$]
K_{50}	Modificador del ángulo de incidencia de 50° [-]
K_{60}	Modificador del ángulo de incidencia de 60° [-]
K_θ	Modificador del ángulo de incidencia [-]
k_{ais}	Conductividad del aislante [$\frac{W}{m \cdot K}$]
k_f	Conductividad del fluido [$\frac{W}{m \cdot K}$]

k_p	Conductividad térmica de la placa [$\frac{W}{m \cdot K}$]
L	Longitud del captador [m]
L_t	Longitud del tubo [m]
\dot{m}	Caudal másico del fluido [$\frac{kg}{s}$]
\dot{m}_t	Caudal másico del fluido por tubo [$\frac{kg}{s}$]
N_c	Número de cubiertas del captador [-]
N_t	Números de tubos del captador [-]
n_1	Índice de refracción del aire [-]
n_2	Índice de refracción de la cubierta [-]
P_D	Porcentaje de radiación directa incidente [%]
Q_u	Calor útil absorbido [kW]
R	Reflectancia [-]
R_d	Reflectancia difusa [-]
T	Transmitancia [-]
T_{amb}	Temperatura ambiente [$^{\circ}C$]
T_c	Temperatura media de la cubierta [$^{\circ}C$]
T_f	Temperatura media del fluido [$^{\circ}C$]
T_{fe}	Temperatura de entrada del fluido [$^{\circ}C$]
T_{fs}	Temperatura de salida del fluido [$^{\circ}C$]
T_n	Transmitancia normal [-]
\bar{T}_p	Temperatura media de la placa [$^{\circ}C$]
U_b	Coficiente global de pérdidas inferior [$\frac{W}{m \cdot K}$]
U_e	Coficiente global de pérdidas lateral [$\frac{W}{m \cdot K}$]
U_L	Coficiente global de pérdidas [$\frac{W}{m \cdot K}$]
U_t	Coficiente global de pérdidas superior [$\frac{W}{m \cdot K}$]
u_v	Velocidad del viento [$\frac{m}{s}$]
W	Distancia entre los tubos del captador [m]
w	Ancho del captador [$\frac{W}{m \cdot K}$]

Notación griega:

α	Absortancia [-]
β	Inclinación del captador solar plano [°]
δ_{cam}	Espesor de la cámara de aire (placa-cubierta) [m]
δ_c	Espesor de la cubierta [m]
δ_p	Espesor de la placa [m]
Δ_P	Pérdida de carga del fluido sobre el tubo [kPa]
ε_p	Emisividad de la placa absorbente [-]
ε_v	Emisividad del vidrio [-]
μ	Viscosidad del fluido [$N \cdot \frac{s}{m^2}$]
η	Rendimiento del captador solar [-]
ρ_D	Reflectividad directa [-]
ρ_d	Reflectividad difusa [-]
ρ_n	Reflectividad normal [-]
$\rho_{\parallel D}$	Reflectividad paralela directa [-]
$\rho_{\perp D}$	Reflectividad perpendicular directa [-]
$\rho_{\parallel d}$	Reflectividad paralela difusa [-]
$\rho_{\perp d}$	Reflectividad perpendicular difusa [-]
τ_D	Transmisividad directa [-]
τ_d	Transmisividad difusa [-]
$\tau\alpha$	Producto transmitancia-absortancia [-]
$(\tau\alpha)_n$	Producto transmitancia-absortancia normal [-]
θ	Ángulo de incidencia de la radiación [°]
θ_1	Ángulo de incidencia [°]
θ_2	Ángulo de refracción [°]

1. Introducción

En el primer capítulo del presente proyecto se van a fijar los objetivos, con el fin de observar la relevancia que tiene la energía solar térmica de baja temperatura en España y, en concreto, Andalucía. También se van a describir los tipos de instalaciones de energía solar térmica y la clasificación de los sistemas de energía solar. Por último, se ha analizado el mercado de energía solar a baja temperatura en España.

1.1 Objetivo

El Captador Solar Plano (CSP) será el elemento principal de las instalaciones térmicas de baja temperatura. Por ello, se van a describir las partes constituyentes y el funcionamiento principal de éste.

El objetivo principal es el desarrollo de un programa que permita la simulación, por parte de un usuario, del comportamiento en régimen permanente de un captador solar plano. Este programa será capaz de mostrar resultados de interés, como el rendimiento del captador y el calor útil que puede llegar a aportar. Se realizará un estudio paramétrico de algunas variables de interés para conocer la influencia que tienen éstas sobre el comportamiento del captador.

1.2 Radiación solar

La energía solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol, a consecuencia de una serie de reacciones de fusión nuclear que tiene lugar en su interior, las cuales producen una pérdida de masa que se transforma en energía. La radiación es transferida por ondas electromagnéticas y se produce directamente desde la fuente hacia fuera en todas las direcciones. Estas ondas no necesitan de un medio material para su propagación, pueden atravesar el espacio interplanetario y llegar a la Tierra desde el Sol. La energía que proviene del sol, siendo una energía primaria, es transferido mediante el mecanismo de radiación. Existiendo una relación directa entre la longitud de onda y la temperatura del cuerpo. La temperatura superficial del Sol es de 6.000 K con lo que, según la ley de Planck, la mayor parte de la energía se centra en el espectro visible (longitudes de onda entre 350 y 750 nm), ver Figura 1[1]. En una primera instancia hay una radiación extraterrestre proveniente del sol que una vez atravesada la atmósfera sería la parte aprovechable “Radiación terrestre”. La Tierra recibe del Sol, sobre su superficie, unas 4.000 veces el total de energía que se consume a nivel mundial. No toda la radiación que llega hasta la superficie terrestre sobrepasa las capas altas de la atmósfera. Un tercio de la energía solar interceptada por la Tierra vuelve al espacio exterior, mientras que los dos tercios restantes penetran en la superficie. Esto se debe a que las proporciones de metano, dióxido de carbono, ozono y vapor de agua actúan como barrera protectora.

La magnitud que mide la energía por unidad de tiempo y área que llega a la superficie terrestre es la Irradiancia. Ésta es la suma de las de las radiaciones directa, difusa y la reflejada (Figura 2 [2]):

- Radiación directa: es la procedente directamente del sol sin encontrar ningún obstáculo en su trayectoria. Hay que tener en cuenta que el propio recorrido genera pérdidas de esta radiación por atravesar la atmósfera y los átomos contenidas en ella.

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

- **Radiación difusa:** recibida de la atmósfera como consecuencia de la dispersión de parte de la radiación del sol en la misma. Esta energía puede suponer aproximadamente un 15% de la radiación global en los días soleados, pero en los días nublados, en los cuales la radiación directa es muy baja, la radiación difusa supone un porcentaje mucho mayor. Por otra parte, las superficies horizontales son las que más radiación difusa reciben, ya que “ven” la mitad de la semiesfera celeste. Se distinguen tres tipos:
 - Difusa isotrópica: recibida uniformemente de toda la esfera del cielo.
 - Difusa circumsolar: resultante de la difusión progresiva de la radiación solar y está concentrada en la parte del cielo alrededor del Sol.
 - Difusa del horizonte: concentrada cerca del horizonte y más pronunciada en días claros.
- **Radiación reflejada:** es aquella que se puede recibir del suelo y superficies próximas por reflexión. La cantidad de radiación depende de la reflectividad de la superficie, propio de cada tipo de suelo.

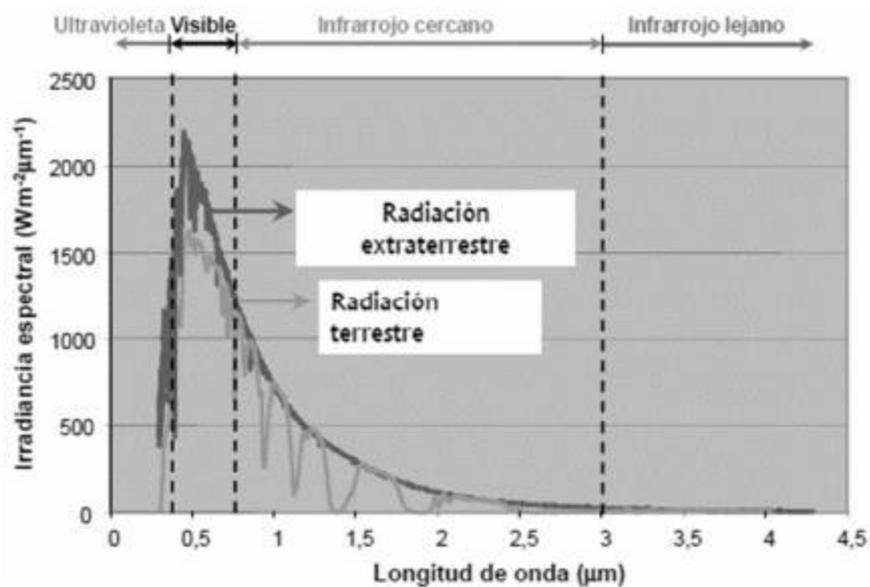


Figura 1: Longitud de onda en función de Irradiancia espectral

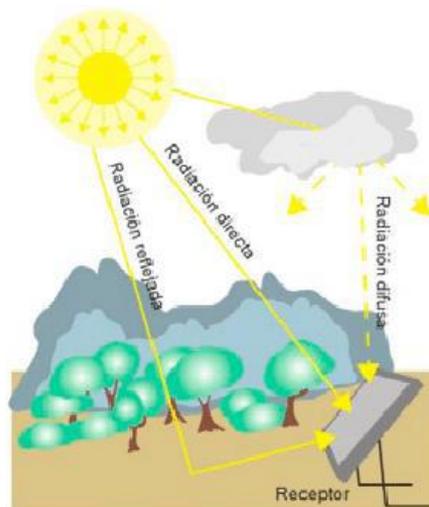


Figura 2: Tipos de radiación solar

Además, la radiación recibida varía según la zona geográfica y la latitud, como puede observarse en la Figura 3:

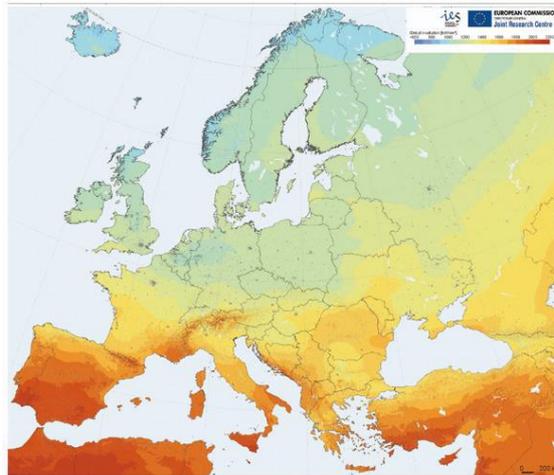


Figura 3: Radiación solar en Europa

1.2.1 Radiación solar en España y Andalucía

España es el país europeo que recibe en promedio, con una diferencia sustancial, la mayor cantidad de radiación sobre una superficie horizontal, por lo que es el que ofrece un mayor potencial de aprovechamiento de la Fuente de energía solar. Respecto a la irradiancia media de las distintas capitales europeas, Madrid es la ciudad que recibe la mayor cantidad de radiación directa (4,9 kWh/m²).

En cuanto a la irradiancia global y directa incidente en España, se destacan las siguientes características:

- Los valores de radiación máximos se alcanzan en Andalucía, Murcia y Extremadura.
- Los valores mínimos de radiación se registran durante gran parte del año, en la zona que comprende al norte de Galicia, Cantabria, Asturias y el País Vasco (especialmente durante los meses desde diciembre hasta febrero).
- La meseta Sur recibe una mayor cantidad de radiación que la meseta Norte con un destacado gradiente en el Sistema Central.

En la Figura 4 [3] se puede observar la irradiancia global, directa y difusa de Madrid, y en la Figura 5 [4], la irradiancia solar global en España. En concreto, Andalucía cuenta con una radiación solar un 13 % superior a la media.

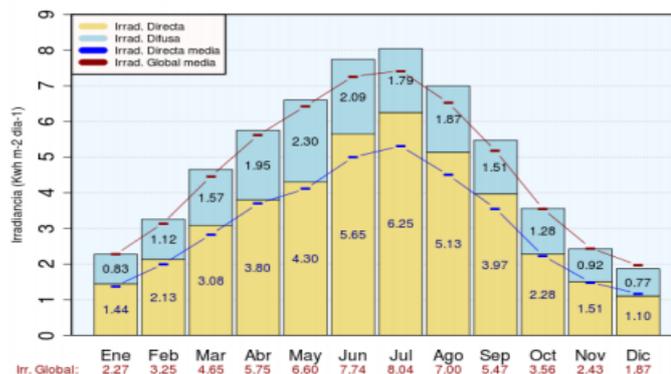


Figura 4: Irradiancia global, directa y difusa de Madrid

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

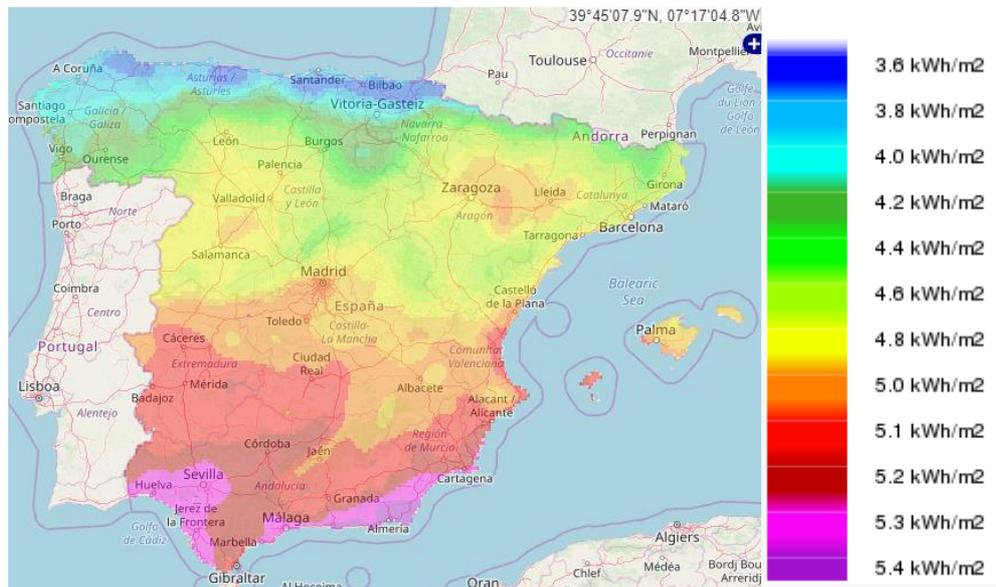


Figura 5: Irradiancia global media en España

1.2.2 Energía solar térmica en España y Andalucía

La localización geográfica de España es clave para la implementación de energías renovables y la provisión de la energía suficiente para el consumo propio y la exportación de proyectos a otros países.

A partir de los datos proporcionados por *Solar Heat Worldwide 2012*, se puede comprobar como España es uno de los países europeos con mayor potencia instalada (2,07 GW- 2,96 millones de metros cuadrados).

Los países de Alemania, Austria, Grecia e Italia son los que ocupan los primeros puestos. Situándose en el número 19, España se encuentra dentro del ranking mundial, con 42 kW por cada 1000 habitantes.

En concreto, Andalucía cuenta con el mayor número de captadores solares con un total de 130.552 m² respecto a la energía solar a baja temperatura. Según el *Plan Energético de Andalucía* (PLEAN) y el *Programa Andaluz de Promoción de Energías Renovables* (PROSOL), hay planes para incrementar la cantidad de 14 MW a 142 por cada 1000 m² por habitante [5], mediante la participación del 25% para el mercado potencial y un 22% en objetivos nacionales. Uno de los objetivos marcados por PROSOL hasta 2002 fue la instalación de 21.382 m² de captadores solares destinados al consumo de agua caliente sanitaria (ACS).

En el Gráfico 1, se puede observar como la provincia de Sevilla es la que cuenta con un mayor porcentaje de energía solar térmica a baja temperatura; siguiéndole Málaga y Córdoba.

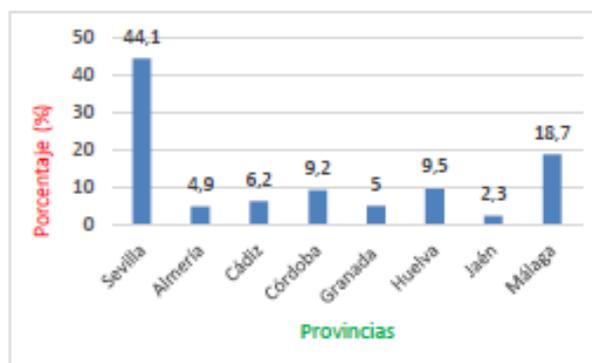


Gráfico 1: Energía solar térmica a baja temperatura en Andalucía

1.3 Instalaciones de energía solar térmica

La instalación solar térmica puede ser de circuito abierto o circuito cerrado. Se considera circuito abierto cuando el agua de consumo pasa directamente por el sistema, o bien, se considera de circuito cerrado cuando un fluido anticongelante pasa por el sistema, y luego se calienta de forma indirecta mediante un intercambiador, normalmente de placas, o un serpentín.

La instalación solar térmica está compuesta por distintos subsistemas (Figura 6):

Subsistema de captación: se encarga de la transformación de la radiación solar incidente en energía térmica aumentando la temperatura de un fluido caloportador que circula por el interior de los tubos.

Subsistema de acumulación: se encarga de almacenar el agua caliente en un depósito de acumulación hasta que se requiera el uso de ésta.

Subsistema de intercambio: realiza la transferencia de calor entre el fluido caloportador, que circula a través del circuito primario, y el agua de consumo localizado en el circuito secundario.

Subsistema de apoyo (auxiliar): se comporta como complemento del aporte solar suministrando la energía térmica necesaria para conseguir el consumo previsto.

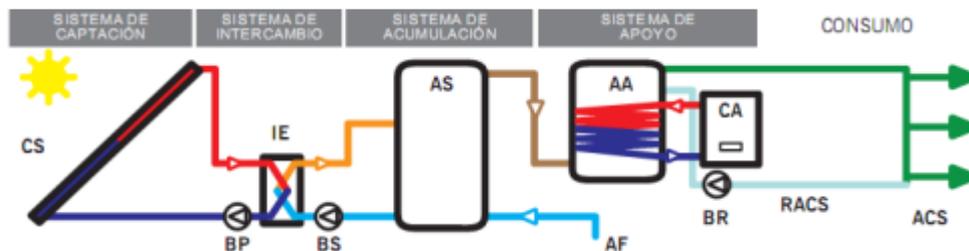


Figura 6: Esquema instalación solar térmica

En la Figura 7 [6], se pueden distinguir tres tipos de circuitos hidráulicos:

Circuito primario: permite la circulación y el transporte del fluido caloportador a través de los colectores que absorben la energía térmica.

Circuito secundario: admite en el intercambiador la energía captada por el circuito primario y la transfiere al depósito de acumulación.

Circuito de consumo: transporta al agua de consumo. Este circuito se engloba desde la acometida de agua fría hasta la red de distribución que alimenta a los puntos de consumo, pasando anteriormente por los sistemas de acumulación y de apoyo nombrados anteriormente.

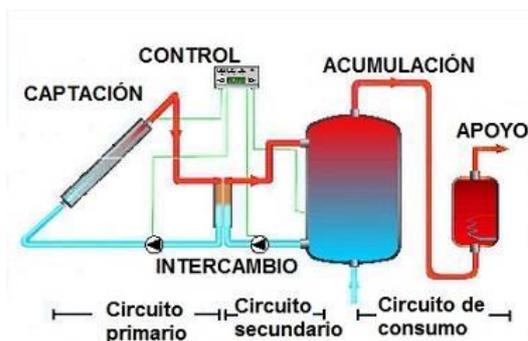


Figura 7: Esquema de circuitos de instalación solar térmica

Una instalación solar térmica está formada por un captador solar, intercambiador de calor, acumulador, bombas, vaso de expansión, tuberías y panel de control. Éstos han de cumplir todas las normativas y reglamentos vigentes.

Captador solar: es un dispositivo que sirve para aprovechar la energía de la radiación solar, transformándola en energía térmica de baja temperatura para usos domésticos o comerciales. Es el elemento principal de la instalación térmica solar.

Intercambiador de calor: se encarga de la transferencia de energía del circuito primario al secundario. Pueden ser de placas o de tubos. Tienen un buen rendimiento, pero presentan una mayor pérdida de carga en el circuito y un mayor coste que los acumuladores (Figura 8).

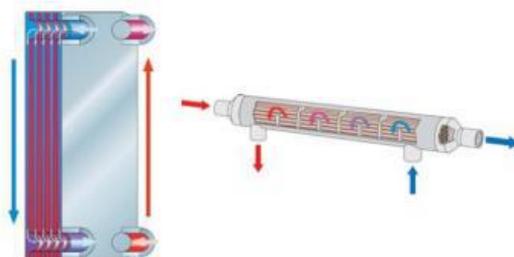


Figura 8: Intercambiador de calor

El apartado 3.4.3 del HE4 del CTE establece en lo referente al uso de intercambiadores de calor:

- *Cualquier intercambiador de calor existente entre el circuito de captadores y el sistema de suministro al consumo no debería reducir la eficiencia del captador debido a un incremento en la temperatura de funcionamiento de captadores.*
- *Si en una instalación a medida sólo se usa un intercambiador entre el circuito de captadores y el acumulador, la transferencia de calor del intercambiador de calor por unidad de área de captador no debería ser menor que 40 w/m²K.*

Acumulador/Interacumulador: es un depósito donde se acumula el agua calentada útil para el consumo. El acumulador tiene dos entradas para el agua fría y dos para la caliente. Los depósitos de agua caliente pueden incorporar un serpentín. A este tipo de depósito se le denomina interacumulador. El serpentín es un intercambiador de calor que se encarga de transferir el calor del circuito primario al secundario. Los interacumuladores también pueden ser de doble envolvente. Los acumuladores se denominan de forma diferente en función de sus características. Éstos pueden ser: de inercia (independiente del circuito de ACS), de precalentamiento solar y acumulador del sistema convencional (trabaja en circuito abierto) y acumulador solar de ACS.



Figura 9: Tipos de acumuladores

Bombas: es el dispositivo fundamental de las instalaciones solares térmicas de circulación forzada. El objetivo de la bomba es vencer la pérdida de presión hidrostática mediante un impulso, y producir la circulación del fluido. Las bombas, en caso de que la instalación sea de circulación forzada, son de tipo recirculación (suele haber dos por circuito), trabajando una la mitad del día, y la pareja, la mitad del tiempo restante. En total suele haber cuatro bombas, dos en cada uno de los circuitos. En el circuito primario, dos de ellas, bombean el agua hacia los colectores, y en el circuito secundario, las otras dos bombean el agua de los acumuladores.

En el apartado 3.4.4. de la sección HE4, del DB HE del CTE se recoge la normativa respecto a las bombas de circulación de una instalación solar térmica:

- Los materiales de la bomba del circuito primario serán compatibles con las mezclas anticongelantes y en general con el fluido de trabajo utilizado.
- Cuando las conexiones de los captadores son en paralelo, el caudal nominal será el igual caudal unitario de diseño multiplicado por la superficie total de captadores en paralelo.
- La potencia eléctrica parásita para la bomba no debería exceder los valores dados en tabla 1.
- La potencia máxima de la bomba especificada anteriormente excluye la potencia de las bombas de los sistemas de drenaje con recuperación, que sólo es necesaria para rellenar el sistema después de un drenaje.
- La bomba permitirá efectuar de forma simple la operación de desaireación o purga.



Figura 10: Bomba de circulación

Sistema	Potencia eléctrica de la bomba
Sistema pequeño	50 W o 2% de la mayor potencia calorífica que pueda suministrar el grupo de captadores
Sistema grande	1% de la mayor potencia que pueda suministrar el grupo de captadores

Tabla 1: Sistema según la potencia eléctrica de la bomba

Vaso de expansión: se trata de un instrumento que absorbe las variaciones de volumen del fluido caloportador, el cual circula por los conductos del captador, manteniendo la presión y la pérdida de carga adecuadas. Es un recipiente con una cámara de gas separada de la de líquidos y con una presión inicial en función de la altura de la

instalación.



Figura 11: Vaso de expansión

En el apartado 3.4.7. de la sección HE4, del DB HE del CTE acerca de los vasos de expansión en una instalación térmica solar:

- Los vasos de expansión abiertos, cuando se utilicen como sistemas de llenado o de rellenado, dispondrán de una línea de alimentación, mediante sistemas tipo flotador o similar.
- El dispositivo de expansión cerrada del circuito de captadores deberá estar dimensionado de tal forma que, incluso después de una interrupción del suministro de potencia a la bomba de circulación del circuito de captadores, justo cuando la radiación solar sea máxima, se pueda restablecer la operación automáticamente cuando la potencia esté disponible de nuevo.
- Cuando el medio de transferencia de calor puede evaporarse bajo condiciones de estancamiento, hay que realizar un dimensionado especial del volumen de expansión: Además de dimensionarlo como es usual en sistemas de calefacción cerrados (la expansión del medio de transferencia de calor completo), el depósito de expansión deberá ser capaz de compensar el volumen del medio de transferencia de calor en todo el grupo de captadores completo incluyendo todas las tuberías de conexión entre captadores más un 10 %.

Tuberías: las tuberías de la instalación se encuentran recubiertas de un aislante térmico para evitar pérdidas de calor con el ambiente. Pueden tener distintos requerimientos según sea en el circuito primario y secundario. Las tuberías de tipo aluminio y aquellos que tengan algún contenido en plomo, están extremadamente prohibidas por tener estas instalaciones uso de consumo humano.

Según el HE del CTE en la sección HE4 para las tuberías de la instalación térmica solar:

'En las tuberías del circuito primario podrán utilizarse como materiales de cobre y el acero inoxidable, con uniones roscadas, soldadas o embreadas y protección exterior con pintura anticorrosiva. En el circuito secundario o de servicio de agua caliente sanitaria, podrá utilizarse cobre y acero inoxidable. Podrán utilizarse materiales plásticos que soporten la temperatura máxima del circuito y que le sean de aplicación y esté autorizada su utilización por las compañías de suministro de agua potable'.

Centralita de regulación: se dispone de un panel principal en la instalación, donde se muestran las temperaturas en cada instante (un regulador térmico), de forma que pueda controlarse el funcionamiento del sistema en todo instante.



Figura 12: Centralita de regulación de la instalación solar térmica

1.3.1 Clasificación de los sistemas de energía solar

Las instalaciones solares térmicas se pueden clasificar atendiendo a distintos aspectos:

- Por su aplicación:

- Instalaciones para calentamiento de agua sanitaria: es la instalación de energía solar térmica más habitual en la actualidad. Las bajas temperaturas de preparación y homogeneidad en su consume a lo largo del año, hacen que las instalaciones solares térmicas presenten un buen rendimiento para la producción de agua caliente sanitaria y que se consiga la disminución de los costes energéticos de una instalación (Figura 13 [7]).

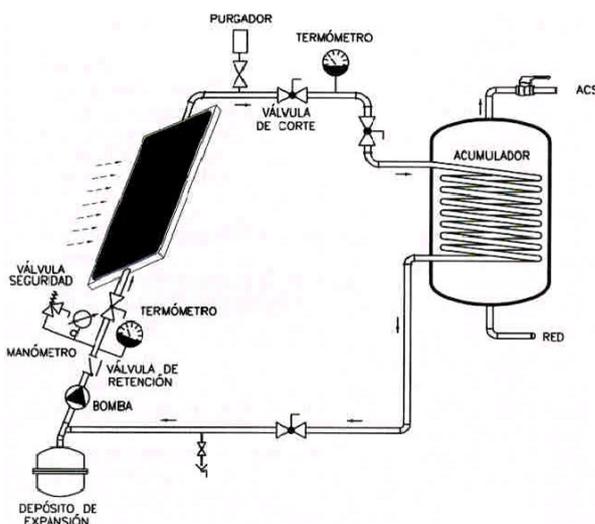


Figura 13: Esquema básico de la instalación para producción de ACS

- Instalaciones para uso industrial: en especial, se tiene su uso mayoritario en la industria de procesos químicos, textil, limpieza y desinfección de envases, limpieza y desengrasado de automóviles, industrias alimenticias y para suelos radiantes en invernaderos o granjas. En este tipo de instalaciones se permite un gran ahorro de energía ya sea para agua a temperatura de consumo o agua precalentada. El esquema básico (Figura 14) es prácticamente igual al esquema de producción de ACS, con los sistemas de captación, intercambio y acumulación, y el equipo convencional de apoyo, todo ello coordinador por los elementos de regulación y control.
- Instalación de calefacción y refrigeración: este tipo de instalaciones tienen un inconveniente que produce de su demanda durante un período concreto del año. En el caso de la calefacción, el principal problema que puede presentarse son los excedentes en verano, por lo que se tendrían que derivar hacia otras aplicaciones. Para la refrigeración, la climatización de edificios mediante energía solar térmica es ideal ya que su período de demanda coincide con los meses del año de mayor radiación solar. Las tecnologías de refrigeración se pueden llegar a acoplar a un sistema solar y éstos son las máquinas enfriadoras térmicas (adsorción y absorción), y los procesos de enfriamiento evaporativo (Figura 15 [8]).
- Instalaciones para climatización de piscinas: la climatización del agua de las piscinas está reglamentadas mediante el CTE. En el caso de una piscina cubierta se puede contar con una fuente energética de apoyo al contrario de las piscinas descubiertas, que solo puede calentar el agua con una fuente de energía renovable. Las instalaciones de las piscinas cubiertas están compuestas por el sistema de captación, el sistema de intercambio y el que proporciona la energía complementaria ante caso de necesidad. En cambio, las instalaciones de las piscinas descubiertas se consiguen los máximos rendimientos ya que el período de demanda y el de máxima radiación coinciden (Figura 16[9]).

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

- Por el sistema de circulación:
- Instalaciones por termosifón o circulación natural: este tipo de instalaciones no tienen que estar provistos de una bomba de impulsión. Son normalmente utilizados en climas cálidos con instalaciones pequeñas.
- Instalaciones por circulación forzada: la bomba de impulsión impulse el fluido caloportador de forma rápida.

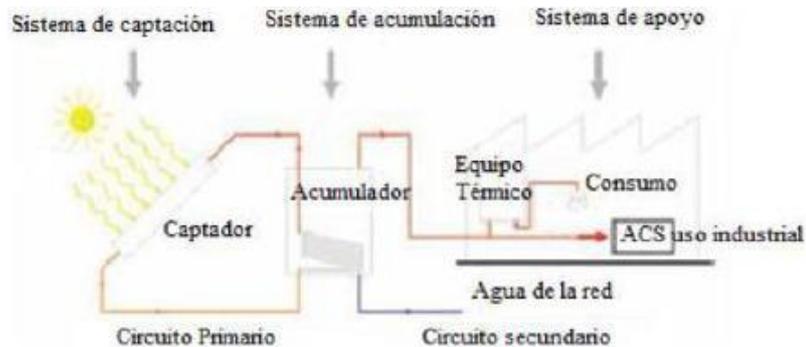


Figura 14: Esquema básico de la instalación solar térmica para ACS uso industrial

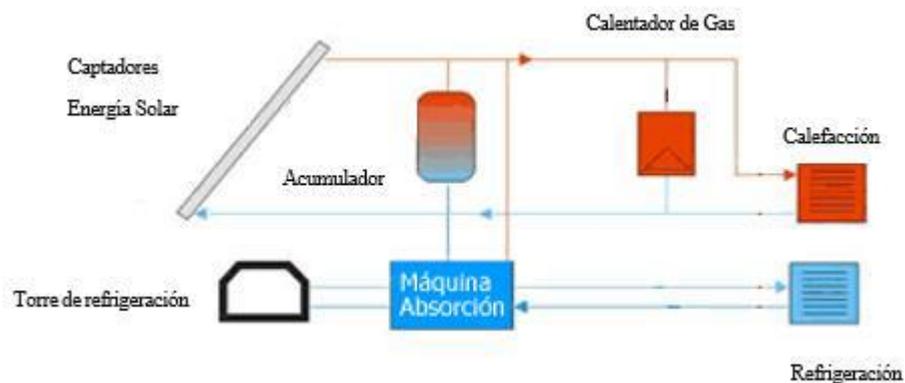


Figura 15: Esquema básico instalación solar térmica para calefacción/refrigeración

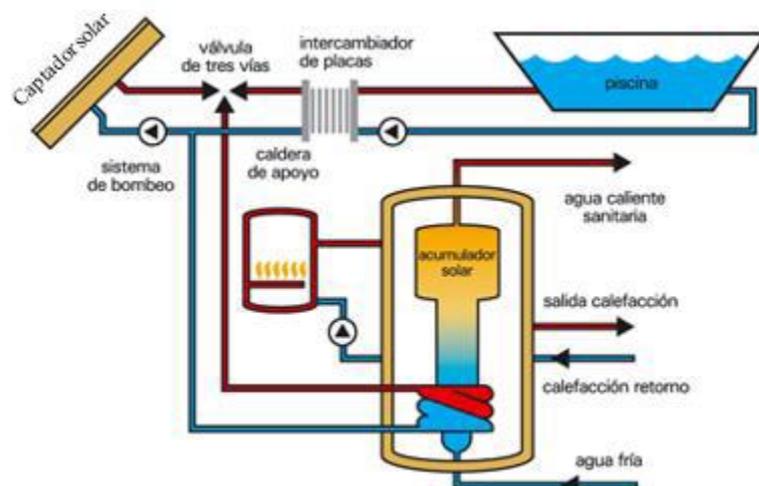


Figura 16: Esquema básico de una instalación solar térmica para climatización de piscinas y ACS

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

- Por la forma de acoplamiento:

- Sistema integrado: no se puede diferenciar el captador y el acumulador ya que están acoplados como un solo componente.
- Sistema compacto: los elementos están instalados en una sola unidad, pudiendo llegar a diferenciarse.
- Sistema partido: el sistema de captación y el depósito de acumulación están divididos a una cierta distancia.

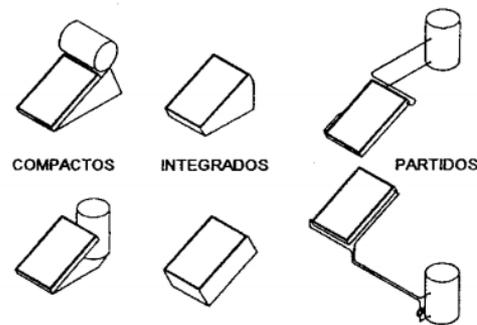


Figura 17: Sistemas de energía solar para ACS por la forma de acoplamiento

- Por el sistema de intercambio:

- Instalación con intercambiador de calor: este tipo de instalaciones funcionan mediante dos circuitos interconexiónados mediante un intercambiador localizado dentro del acumulador o fuera como elemento independiente (Figura 18 [10]).
- Instalación sin intercambiador de calor: el agua es el fluido caloportador (Figura 19).

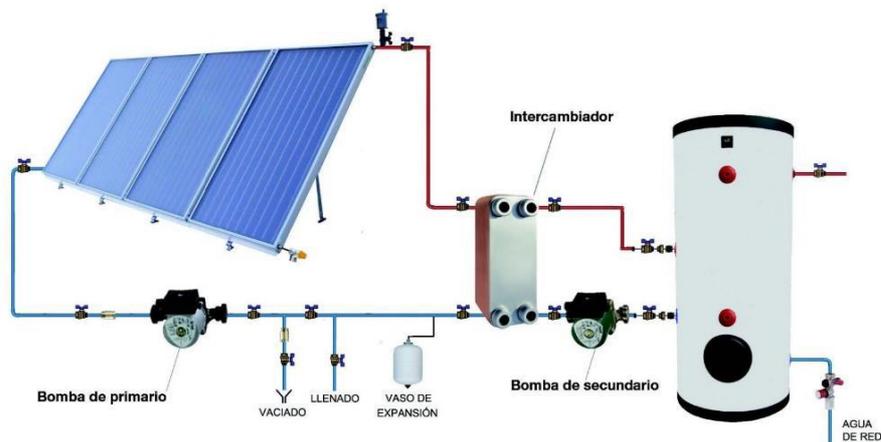


Figura 18: Instalación solar térmica con intercambiador de calor

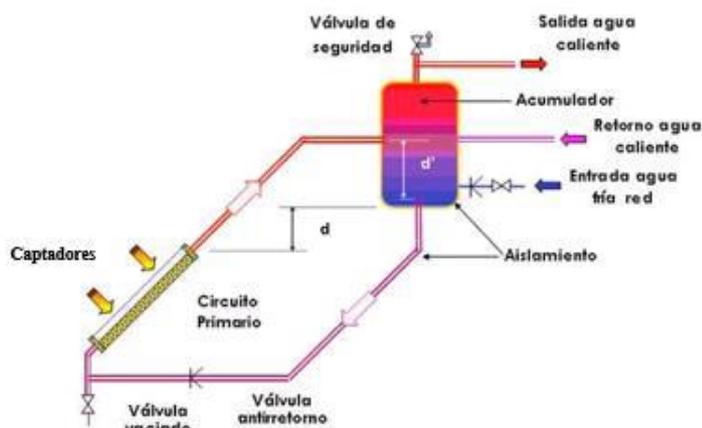


Figura 19: Instalación de energía solar térmica sin intercambiador

- Por el sistema de energía auxiliar:
 - Instantáneo: este tipo de sistema puede ser:
 - ❖ Individual: se trata de un sistema de acumulación externo como una caldera o sistemas de gas para demandas de viviendas unifamiliares.
 - ❖ Distribuido: actúa como apoyo de energía instantáneo en línea para cada una de las viviendas.
 - ❖ Centralizado: no se usan acumuladores, se trata de un sistema que aporta la energía auxiliar en caso de necesidad por el sistema.
 - En acumulador secundario: se puede clasificar de la misma forma que el sistema de energía instantáneo.
 - En acumulador solar: este tipo de sistema no está permitido por el CTE, ya que no se permite la incorporación de un sistema auxiliar en el acumulador.

1.4 Mercado de energía solar en España

La energía solar térmica de baja temperatura dispone de una tecnología madura, eficiente y fiable cuya utilización para la obtención de ACS y/o calefacción dispone de un mercado bastante asentado. En la actualidad la fracción solar característica de sistemas solares para obtención de ACS es del 50-80%. [11]

Se analiza a continuación el mercado de las instalaciones solares térmicas en España, especialmente de las instalaciones de ACS. Los datos que se presentan pertenecen a la presentación que ASIT (Asociación Solar de la Industria Térmica) realizó en 2016.

En España, la superficie de implantación del parque solar hasta 2016 es de 3.905.445 m² acumulados y en operación, lo que es equivalente a 2,74 GWth, tal y como se puede observar en el Gráfico 2. Sin embargo, en el año anterior la superficie fue de 3.693.255 m², lo que supone un aumento del 5,43% respecto al año anterior. Si se visualiza dicho gráfico, se puede observar que el Mercado de energía solar en España es un mercado al alza en la última década a pesar de la reducción de los metros cuadrados instalados (12% de reducción respecto a 2015, Gráfico 3). Esto se debió a regulaciones legislativas que frenaron la implantación de esta tecnología, concretamente, el descenso de actividad registrada en los dos principales segmentos de nuestro Mercado, como son la vivienda construida y regulada a través del CTE (Código Técnico de la Edificación) y el de los Programas de Apoyo de las Comunidades Autónomas.

Este gráfico muestra claramente como la crisis ha golpeado a este sector. Hasta 2008, el crecimiento medio anual era del 63%, y a partir de dicho año ese porcentaje comienza a decrecer.

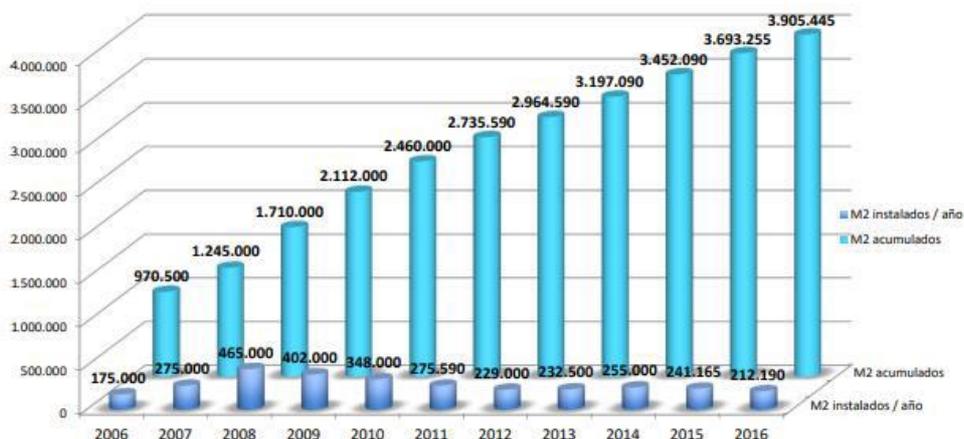


Gráfico 2: Desarrollo del mercado 2006-2016



Gráfico 3: Metros cuadrados instalados al año 2005-2016

El hecho de que las instalaciones solares térmicas estén centradas casi exclusivamente en edificios que se rigen por el CTE (según el CTE, en los edificios de nueva construcción, las instalaciones solares de ACS son obligatorias) y lo poco que se usan en aplicaciones industriales constituye otro problema para el sector. En el año 2016 se implementaron 212.190 m², lo cual generó 149 MWth. La facturación total aproximada de este sector fue de 170 millones de €, los cuales generaron en torno a 4250 empleos directos. Sin embargo, en 2015, se obtuvieron un total de 165 MWth para 241.165 m². La facturación de dicho año, fue de 193 millones de € y se produjeron unos 4800 empleos. Esto conllevó a una disminución del 12% respecto a 2016.

Según el PER (Plan de Energías Renovables) 2011-2020, se compromete a alcanzar una cifra máxima de 10 millones de metros cuadrados instalados y en operación a finales de 2020. Sin embargo, si se analizan los resultados globales alcanzados por el sector, acumulados a cierre de 2016, llevaría a alcanzar 5 millones de metros cuadrados (Tabla 2) [12].

ACUMULADO 2015	Suma de Superficie total (m ²)
ANDALUCÍA	1.125.682
ARAGÓN	83.670
CANARIAS	241.709
CANTABRIA	13.255
CASTILLA Y LEÓN	176.840
CASTILLA-LA MANCHA	214.492
CATALUÑA	559.938
CIUDAD DE CEUTA	2.410
CIUDAD DE MELILLA	3.975
COMUNIDAD DE MADRID	358.385
COMUNIDAD FORAL DE NAVARRA	45.913
COMUNIDAD VALENCIANA	253.518
EXTREMADURA	29.136
GALICIA	138.575
ISLAS BALEARES	130.952
LA RIOJA	10.665
PAÍS VASCO	87.742
PRINCIPADO DE ASTURIAS	50.403
REGIÓN DE MURCIA	56.711
Total general	3.583.970

Tabla 2: Distribución superficie acumulada 2015

Respecto a la tipología de captadores instalados, la mayoría son captadores solares planos, al que le siguen los sistemas prefabricados, como se puede visualizar en el Gráfico 4:



Gráfico 4: Porcentaje de captadores instalados

2. Comportamiento del captador solar plano

2.1 Introducción

Este es el capítulo principal del trabajo y en el cual se va a profundizar sobre el elemento principal de la instalación solar térmica: el captador solar plano. Por un lado, se va a definir el captador solar plano: funcionamiento, componentes, tipologías, etc.; para posteriormente describir el análisis del comportamiento del captador en régimen permanente.

2.2 Descripción y funcionamiento del captador solar plano

El captador solar plano es el elemento más característico de la instalación solar térmica. Éste absorbe la radiación solar y transfiere el calor hasta los tubos por donde circula el fluido. A continuación, se indican los principales mecanismos de transferencia de calor que tienen lugar en el captador:

- Convección entre la cubierta y el ambiente.
- Radiación entre la cubierta y el ambiente.
- Convección entre la placa absorbente y la cubierta.
- Radiación entre la placa y la cubierta.
- Convección entre el tubo y el fluido.

Un captador solar plano es un captador sin concentración, sin sistema de seguimiento y que capta tanto la radiación directa como difusa.

Dentro de los captadores solares de baja temperatura se pueden distinguir los captadores solares planos, con o sin cubierta. Estos tipos de captadores son los más empleados en el ámbito doméstico de nuestro país, pero existen otro tipo de captadores que se suelen usar en climas más fríos, los captadores de tubos de vacío. El objeto de estudio de este trabajo se basa en el primer tipo de captador y en el que se profundizará más adelante.

El funcionamiento del captador solar plano se basa por una serie de principios básicos:

- El aporte de energía solar no es “controlable”.
- La demanda y el aporte de energía solar están desfasados.
- La orientación e inclinación del captador influyen fuertemente en el rendimiento.
- El rendimiento de captación aumenta al disminuir la temperatura del fluido a la entrada.
- Interesa captar la energía solar a la mayor temperatura posible.
- Hay que dar preferencia al consumo de la energía solar frente a la convencional.

- Para disminuir las pérdidas por conducción por la parte de atrás y por los laterales, se coloca un aislamiento térmico.
- Las pérdidas radiantes emitidas por el absorbedor, se ven reducidas por la baja transmisividad de las cubiertas para radiaciones de longitudes de onda superiores a los 3 μm , ya que proceden de la radiación incidente que ha aumentado su longitud de onda tras el choque.

2.3 Componentes del captador solar plano

Los principales elementos del captador solar plano son (Figura 20):

- Tubos
- Cámara de aire
- Aislamiento
- Placa absorbente
- Cubierta
- Caja o carcasa

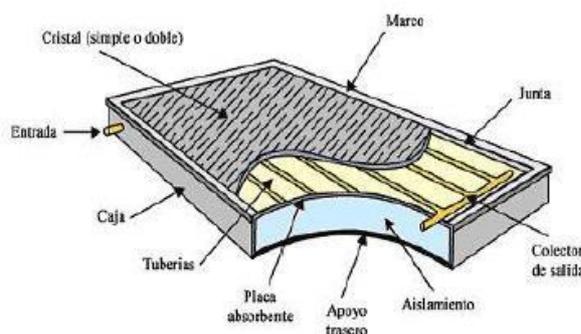


Figura 20: Componentes del captador solar plano

- Por el interior de los tubos circula el fluido caloportador. Estos tubos pueden disponerse según distintas configuraciones que se comentarán en el apartado de tipologías de captadores solares planos.

- La cámara de aire se encarga de disminuir las pérdidas térmicas debidas a la convección de la superficie absorbente.

- Respecto al aislamiento del captador [13], se encarga de reducir las pérdidas térmicas por conducción y con esto, poder aumentar el rendimiento del captador. Normalmente, el material más utilizado para el aislamiento en el captador es de lana de vidrio, o de roca, o espumas de poliuretano o poliestireno.

El aislamiento térmico ha de poder soportar una temperatura superior a 155 °C en una situación de estancamiento; no deben emitir gases a altas temperaturas ya que podrían condensarse en la cubierta; no deben envejecerse por la temperatura de operación; no deben humedecerse por la condensación producida en la parte interna del colector por la degradación de las juntas de estanqueidad o por algún la incorporación de agua de lluvia o nieve.



Figura 21: Aislante térmico del captador solar

- La placa absorbente se encarga de la absorción de la radiación solar para transmitirla en forma de energía térmica al fluido que circula por el interior de los tubos. En la mayoría de captadores solares, el absorbedor es una placa metálica sobre la cual se encuentran soldados dichos tubos, en un recorrido más o menos sinuoso con el fin de conseguir la mayor transmisión de calor entre la placa y el fluido posible. El material de soldadura y los que forman el circuito de agua y del absorbedor deben tener un coeficiente de conductividad alto para preservar una buena transmisión de calor.

- La cubierta transparente del captador es la encargada de retener el calor. Tiene varias funciones:

- Proteger el absorbedor y el aislamiento térmico dentro de la carcasa contra todo efecto nocivo del medio ambiente.
- Es parte constituyente del aislamiento térmico ya que permite la entrada de radiación solar de onda corta, y no deja salir la de onda larga, evitando así, las pérdidas térmicas. Se consigue con esto generar el efecto invernadero.
- La cubierta debe reflejar la menor radiación posible en su superficie y absorber la mínima posible en su interior, de manera tal que casi toda la radiación solar incida en el absorbedor.
- También deberá tener una cierta resistencia de los efectos causados por el medio ambiente (lluvia, granizo, viento, radiación ultravioleta...).

A parte del vidrio, también hay materiales plásticos con coeficientes de transmisión similares al vidrio, sin embargo, presentan inconvenientes como la baja resistencia a elevadas temperaturas, la baja dureza o la inestabilidad química y el deterioro físico bajo la acción de los agentes ultravioletas y otros agentes externos.

- La carcasa es el elemento que envuelve a todos los componentes que constituyen el captador, protegiéndolos de los agentes atmosféricos y los posibles daños mecánicos. También sirve de estructura principal para la adaptación al edificio (inclinación y orientación necesaria) o al soporte que sostenga la instalación. Las carcasas se suelen fabricar principalmente de aluminio anodizado o de acero galvanizado.

La carcasa ha de proporcionar:

- Resistencia en toda la estructura para aguantar las cargas de viento.
- Resistencia a la posible corrosión, al estar sometido el captador a la intemperie.
- Aireación para que no se produzca condensación del agua en el interior del colector.
- Una geometría tal, que no se produzca la acumulación de agua o nieve.
- Fácil desmontaje para poder acceder a la placa para posibles mantenimientos.

2.4 Tipología de captador solar plano

Existen numerosas variantes del captador solar plano, que se diferencian en un elemento o un tratamiento determinado, y que pueden modificar considerablemente la curva de rendimiento del captador.

Los captadores solares planos se pueden clasificar según los siguientes aspectos:

- Según el material de la cubierta: los captadores solares planos normalmente son de vidrio o de plásticos.
- Según el tipo de superficie absorbente: negra o selectiva.
- Según el material de la superficie absorbente: cobre, aluminio, acero o caucho.
- Según el fluido caloportador: agua, agua glicolada o aire.
- Según el número de cubiertas: sin cubierta, una cubierta o varias cubiertas.
- Según la configuración de la superficie absorbente: placa o placas y tubos.

Para una configuración de placas y tubos se pueden distinguir entre:

- Absorbedor tipo *serpentín*: el flujo pasa por un tubo en forma de serpentín cuya configuración se considera de las más sencillas y por tener la posibilidad de conexión en paralelo con muchos captadores (Figura 22).

- Absorbedor tipo parrilla: Se producen menores pérdidas de presión, gradiente de temperaturas pequeña y el rendimiento es mayor (Figura 23).



Figura 22: Absorbedor con disposición en serpentin

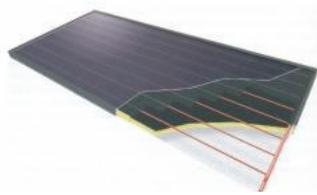


Figura 23: Absorbedor con disposición en parrilla

2.5 Modelo en regimen permanente

Los modelos en régimen permanente tienen diferente complejidad en función de la dependencia funcional del campo de temperaturas en la placa absorbente y de los flujos de calor dominantes. El modelo que se desarrolla es el modelo de aleta unidimensional, válido en las condiciones de operación más usuales de los captadores solares.

2.5.1 Balance global

Si se realiza un balance global en el captador solar plano, la energía captada será la diferencia entre la energía incidente en la placa absorbente menos las posibles pérdidas térmicas por los diferentes mecanismos de transferencia de calor [14]:

$$Q_u = \text{Energía incidente} - \text{Pérdidas}$$

$$\text{Energía incidente} = I(\tau\alpha) \cdot A$$

$$\text{Pérdidas} = U_L \cdot A \cdot (\bar{T}_p - T_{amb})$$

Para poder evaluar el rendimiento del colector, hay que conocer el coeficiente global de transferencia de calor a través de las cubiertas, entre la placa y el aire ambiente. Este coeficiente es función de la temperatura de la placa. Ésta será siempre superior a la temperatura media del fluido.

El problema radica de la dificultad del cálculo de la temperatura media de la placa (\bar{T}_p). Por ello se reformula la ecuación anterior con la introducción de la temperatura de entrada del fluido caloportador (T_{fe}):

$$FR = \frac{Q_u}{I(\tau\alpha) \cdot A - U_L \cdot A \cdot (T_{fe} - T_{amb})}$$

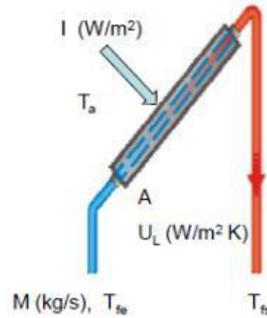


Figura 24: Balance de energía en el captador

Realizando un balance en el fluido, la ecuación de la energía captada será tal que:

$$Q_u = \dot{m} \cdot c_{p_f} \cdot (T_{fs} - T_{fe}) = G \cdot A \cdot c_{p_f} \cdot (T_{fs} - T_{fe})$$

Se define el caudal específico (G) del fluido como: $G = \frac{\dot{m}}{A}$

Suponiendo conocidos los datos de caudal, área y condiciones del fluido a la entrada, para el cálculo de la energía útil del captador sólo hace falta conocer la temperatura del fluido a la salida, cuya expresión se detallará más adelante.

2.5.2 Rendimiento

Una vez establecido el factor de evacuación de calor, el rendimiento en un captador plano es definido como la relación entre la energía captada (Q_u) y la energía solar directa (I_D) que incide en el área de apertura del captador (A) [15]:

$$\eta = \frac{\text{Energía captada}}{\text{Energía incidente}} = \frac{Q_u}{I \cdot A} = \frac{(I \cdot A \cdot FR(\tau\alpha) - FRU_L \cdot A \cdot (T_{fe} - T_{amb}))}{I \cdot A}$$

$$\eta = FR(\tau\alpha) - FRU_L \cdot \frac{T_{fe} - T_{amb}}{I}$$

Al corte con el eje de coordenadas se le denomina Factor Óptico o Factor de ganancias ($FR(\tau\alpha)$), mientras que a la pendiente (FRU_L) se le denomina Factor de Pérdidas (Figura 25).

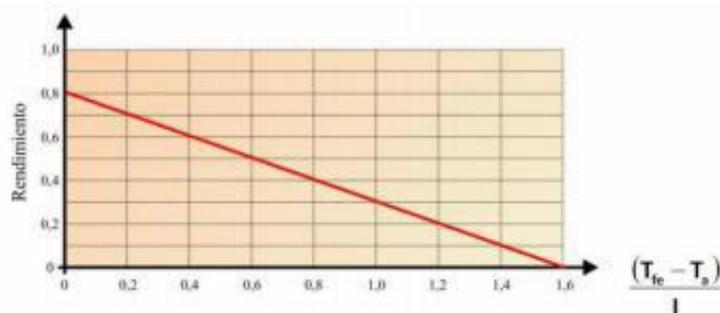


Figura 25: Recta rendimiento del captador solar

Sin embargo, aunque se denomine recta de rendimiento, no es una recta como tal, ya que el coeficiente global de pérdidas (U_L) depende de la temperatura:

$$U_L = U_0 + U_1 \cdot (T_{fe} - T_{amb})$$

$$\eta = FR(\tau\alpha) - FR \cdot (U_0 + U_1 \cdot (T_{fe} - T_{amb})) \cdot \frac{(T_{fe} - T_{amb})}{I}$$

$$\eta = FR(\tau\alpha) - FR \cdot U_0 \cdot \frac{(T_{fe} - T_{amb})}{I} - FR \cdot U_1 \cdot \frac{(T_{fe} - T_{amb})^2}{I}$$

En los captadores solares el producto de transmitancia-absortancia depende del ángulo de incidencia (θ) de la radiación solar. El modificador del ángulo de incidencia (K_θ) se define como el cociente entre ($\tau\alpha$) para el ángulo θ y ($\tau\alpha$) en condiciones de incidencia normal a la superficie horizontal del captador solar.

$$K_\theta = \frac{\tau\alpha}{(\tau\alpha)_n}$$

Permite el cálculo del rendimiento de captación de la energía útil para cualquier tipo de ángulo de incidencia a partir del ensayo realizado en condiciones de incidencia normal:

$$\eta = FR(\tau\alpha) - FRU_L \cdot \frac{T_{fe} - T_{amb}}{I} = FR(\tau\alpha)_n \cdot K_\theta - FRU_L \cdot \frac{T_{fe} - T_{amb}}{I}$$

El modificador del ángulo de incidencia se aplica a la componente directa y a la componente difusa de la radiación global.

$$FR(\tau\alpha) = FR(\tau\alpha)_n \cdot \left[K_\theta \cdot \left(\frac{I_D}{I} \right) + K_{60} \cdot \left(\frac{I_d}{I} \right) \right]$$

Este modificador se obtiene de forma experimental para ángulos de incidencia de 0°, 30°, 45° y 60° en el ensayo en régimen permanente con una temperatura de entrada del fluido caloportador igual a la temperatura ambiente:

$$K_\theta = \frac{FR(\tau\alpha)}{FR(\tau\alpha)_n} = \frac{\tau\alpha}{(\tau\alpha)_n}$$

K_θ depende linealmente de la inversa del cos (θ):

$$K_\theta = 1 - b_0 \cdot \left[\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right]$$

Para tener definido el rendimiento basta conocer el factor de evacuación de calor, definido anteriormente, y el producto transmitancia-absortancia y el coeficiente global de pérdidas, que se definirán a continuación.

2.6 Producto transmitancia-absortancia

2.6.1 Reflexión de la Radiación

A partir de la Ley de Snell se relacionan los índices de refracción con los ángulos de incidencia θ_1 y de refracción θ_2 :

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_2)$$

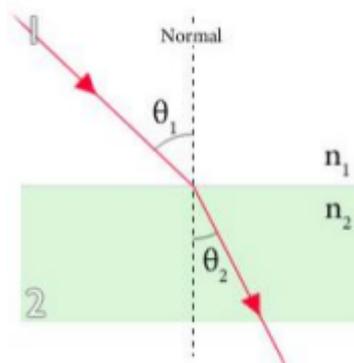


Figura 26: Ley de Snell

Mediante la Ley de Fresnel se calcula la reflectividad para cada una de las componentes de la polarización:

- Componente perpendicular: la polarización se dirige de forma perpendicular al plano fuera del plano de incidencia:

$$\rho_{\perp} = \frac{(\text{sen}(\theta_2 - \theta_1))^2}{\text{sen}(\theta_2 + \theta_1)^2}$$

- Componente paralela: la polarización sigue de forma paralela respecto al plano de incidencia:

$$\rho_{\parallel} = \frac{\tan(\theta_2 - \theta_1)^2}{\tan(\theta_2 + \theta_1)^2}$$

La expresión de la reflectividad sin polarizar será:

$$\rho = \frac{(\rho_{\perp} + \rho_{\parallel})}{2}$$

Para una incidencia normal, los ángulos θ_1 y θ_2 tienen un valor nulo, y la expresión de la reflectividad se simplificaría:

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

$$\rho_n = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

De toda la radiación solar incidente en la cubierta del captador, sólo una fracción de ésta alcanza la superficie absorbedora. Este fenómeno se debe a la reflexión y la absorción de la radiación de la cubierta transparente.

Se propone un método para estimar el producto transmitancia-absortancia del captador, es decir la proporción de la radiación solar total que llega a la cubierta es absorbida por la placa.

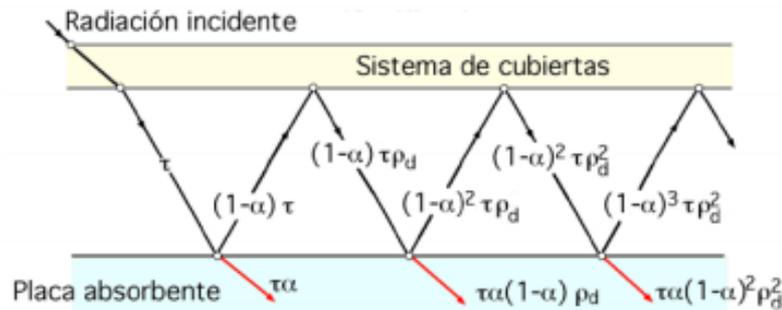


Figura 27: Método de Ray-Tracing

La radiación solar incidente que absorbe la placa es el producto *transmitancia-absortancia* ($\tau\alpha$) y la radiación reflejada en la cubierta del captador es $(1-\alpha)\cdot\tau$; donde α es la absorptancia de la placa y τ es la transmitancia de la cubierta.

La fracción que llega a la cubierta es radiación difusa, mientras que la que llega de nuevo a la placa después es $(1-\alpha)\cdot\tau\cdot\rho_d$, donde ρ_d es la reflectividad de la cubierta para la radiación incidente difusa, y se puede determinar utilizando la reflexión especular para un sistema de varias cubiertas con ángulo de incidencia de 60° :

$$\rho_d = 1 - \tau_r(60^\circ)$$

De toda la radiación incidente que pasa por el sistema de cubiertas y llega a la placa absorbente, una parte es reflejada por la placa hacia el sistema de cubiertas, y de esa parte que llega al sistema de cubiertas otra parte es reflejada de nuevo hacia la placa. Esto se repite de forma sucesiva y es lo que se conoce como reflexiones múltiples.

Debido al fenómeno de reflexiones múltiples en medio semitransparente (Figura 28), una cierta fracción T de la radiación incidente que se conoce como transmitancia, es transmitida al otro lado de la placa, mientras que otra parte es absorbida en la misma.

Para el primer trayecto del flujo, la cantidad de radiación que se transmite será:

$$T^0 = \tau \cdot (1 - \rho)^2$$

Para el segundo trayecto, y todos los sucesivos, se agrega el término $\tau\rho^2$, de forma que la fracción transmitida después de n etapas:

$$T^n = \tau \cdot (1 - \rho)^2 \cdot (\tau^2 \cdot \rho^2)^n$$

Procediendo de una forma similar se puede llegar a la expresión de la reflectancia total R, resultante de las reflexiones múltiples en el material:

$$R = \rho \cdot \left[1 + \tau^2 \cdot \frac{(1 - \rho)^2}{1 - \tau^2 \cdot \rho^2} \right] = \rho \cdot (1 + \tau \cdot T)$$

$$\tau \alpha = T \cdot \alpha \cdot \sum_{n=0}^{\infty} ((1 - \alpha) \cdot R_d)^n = \frac{T \cdot \alpha}{1 - (1 - \alpha) \cdot R_d}$$

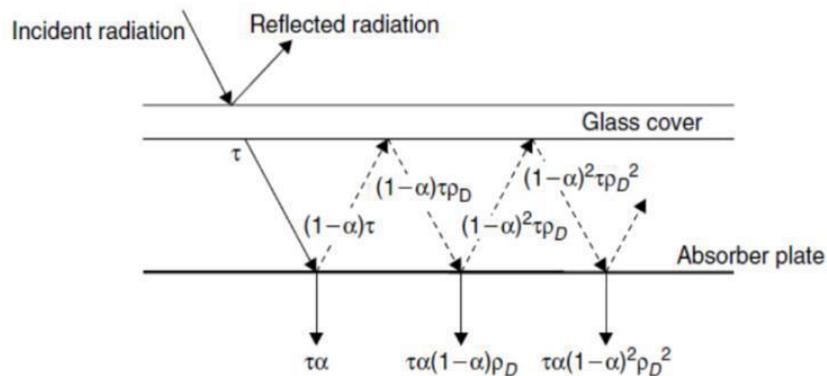


Figura 28: Intercambio radiante en superficie semitransparente

2.6.2 Transmitancia de la cubierta

La transmitancia de la cubierta se puede expresar como el producto de la transmitancia debida a la reflexión y la debida a la absorción:

$$\tau = \tau_a \cdot \tau_r$$

Donde:

τ_a : transmitancia debido a la absorción

τ_r : transmitancia debido a la pérdidas por reflexión

- La transmitancia debida a las pérdidas por reflexión se formula como:

$$\tau_r = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1 - \rho_{||}}{1 + (2 \cdot N_C - 1) \cdot \rho_{||}} + \frac{1 - \rho_{\perp}}{1 + (2 \cdot N_C - 1) \cdot \rho_{\perp}} \right)$$

- La transmitancia debida a la absorción se obtiene a partir de la *Ley de Bouguer*:

$$\tau_a = \exp\left(\frac{-k_{ext} \cdot \delta_c}{\cos(\theta_2)}\right)$$

El coeficiente de extinción del vidrio tomará valores próximos a 4 m^{-1} para vidrio tipo Walter White con bajo contenido de Fe_2O_3 , y 32 m^{-1} para vidrios pobres con alto contenido de Fe_2O_3 .

2.7 Coeficiente global de pérdidas

Se supondrá que la placa se mantiene a la misma temperatura (T_p), y que todas las pérdidas suceden a la misma temperatura (T_{amb}). Se puede establecer, por tanto, que el coeficiente global de pérdidas es la suma de los coeficientes de pérdidas inferior (U_b), lateral (U_e) y superior (U_t):

$$U_L = U_b + U_e + U_t$$

2.7.1 Coeficiente global de pérdidas inferior

Vendrá determinado por la relación entre la conductividad térmica aislante y el espesor del aislamiento posterior de la placa:

$$U_b = \frac{k_{aisp}}{e_{ap}}$$

Se ha supuesto que la resistencia dominante es la de conducción por el aislamiento, despreciando la resistencia por convección y radiación al ambiente.

2.7.2 Coeficiente global de pérdidas lateral

Las pérdidas laterales del captador tienen la misma forma que las de la parte posterior. Para estimar el coeficiente de pérdidas en la misma base que el resto, hay que referirlo a la superficie de apertura del captador.

Con lo cual el coeficiente de pérdidas térmicas lateral es el siguiente:

$$U_e = \frac{k_{aisp}}{e_{al}} \cdot \left(\frac{A_{lat}}{A}\right)$$

Donde el área lateral se expresa como:

$$A_{lat} = (2 \cdot L + 2 \cdot W) \cdot E$$

2.7.3 Coeficiente global de pérdidas superior

Son pérdidas generales del captador, ya que la cámara de aire existente entre la placa absorbidora y el ambiente, y la cubierta transparente, son las únicas barreras a la pérdida de calor entre la placa y el ambiente. Mientras que, por la parte posterior y lateral, el captador dispone de aislamiento térmico

Klein desarrolló una ecuación manejable tanto para cálculo manual como computacional. Se utilizará su ecuación, para el cálculo del coeficiente global de pérdidas superior:

$$U_t = \left[\frac{N_c}{\frac{C}{\bar{T}_p} \cdot \left[\frac{\bar{T}_p - T_{amb}}{N_c + f} \right]^d + \left(\frac{1}{h_v} \right)} \right]^{-1} + \left(\frac{(\sigma \cdot (\bar{T}_p + T_{amb}) \cdot (\bar{T}_p^2 + T_{amb}^2))}{(\varepsilon_p + 0,00591 \cdot N_c \cdot h_v)^{-1} + \left(\frac{2 \cdot N_c + f - 1 + 0,133 \cdot \varepsilon_p}{\varepsilon_v} \right) - N_c} \right)$$

Donde:

$$f = (1 + 0,089 \cdot h_v - 0,1166 \cdot h_v \cdot \varepsilon_p) + (1 + 0,07866 \cdot N_c)$$

$$C = 520 \cdot (1 - 0,000051 \cdot \beta^2) \quad (\text{Tomándose el valor de } \beta=70^\circ)$$

$$d = 0,43 \cdot \left(1 - \left(\frac{100}{\bar{T}_p} \right) \right)$$

2.8 Coeficiente de transferencia de calor por convección

El coeficiente de película exterior va a ser estimado mediante una expresión que lo relacione con la velocidad del viento. Esta expresión se basa en la ecuación desarrollada por Watmuff:

$$h_v = 2,8 + 3 \cdot u_v$$

A continuación, se va a diferenciar el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección entre el tubo y el fluido según el tipo de régimen: laminar o turbulento. Para ello, se calculará el número de Reynolds para verificar el régimen:

$$Re_D = \frac{4 \cdot \dot{m}_t}{\pi \cdot D_{int} \cdot \mu}$$

El caudal másico que circula por cada uno de los tubos, se halla mediante la siguiente expresión:

$$\dot{m}_t = G \cdot \left(\frac{A}{N_t} \right)$$

El coeficiente de película entre el tubo y el fluido queda tal que:

$$h_f = \frac{(k_f \cdot Nu_D)}{D_{int}}$$

El número de Nusselt variará su valor según el régimen en el que se encuentre el fluido:

- Régimen laminar:

- Si la temperatura superficial es constante: $Nu_D = 3,36$
- Si el flujo de calor superficial es uniforme: $Nu_D = 4,36$

Se supone una temperatura superficial constante, hecho que no sucede en la realidad por tener un gradiente de temperaturas a lo largo del tubo.

- Régimen turbulento: se hace uso de la correlación de Gnielinski. Esta expresión es válida para números de Reynolds (Re_D) comprendidos entre 3000 y $5 \cdot 10^6$; y para valores del número de Prandtl (Pr) comprendidos entre 0,5 y 2000:

$$Nu_D = \frac{\left(\left(\frac{f}{8} \right) \cdot (Re_D - 1000) \cdot Pr \right)}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{2}{3} Pr - 1 \right)}$$

Mediante el Diagrama de Moody o bien, desde la siguiente expresión se podrá calcular el factor de fricción (f):

$$f = (0,79 \cdot \ln(Re_D) - 1,64)^2$$

2.9 Irradiancia solar global

La mayoría de los captadores solares no están instalados de forma horizontal, sino que tienen una cierta inclinación para aumentar la cantidad de radiación y así, reducir las pérdidas de reflexión y coseno. Se necesitarán, por tanto, datos de la radiación solar sobre estas superficies inclinadas o para las instaladas horizontalmente.

La cantidad de radiación solar en una superficie en un lugar dado durante un tiempo, depende de la orientación y la pendiente de ésta.

La irradiación solar global se puede expresar como la suma de las radiaciones directa, difusa y reflejada de los alrededores:

$$I = I_D + I_d + I_G$$

Donde:

I_G : irradiación de los alrededores $\left[\frac{W}{m^2} \right]$

La radiación solar directa en una superficie inclinada y horizontal se expresa como:

$$I_D = I_{Dn} \cdot \cos(\theta_z)$$

Donde:

I_{Dn} : irradiación directa normal a la dirección de propagación de la radiación [$\frac{W}{m^2}$]

θ_z : ángulo solar cénit [°]

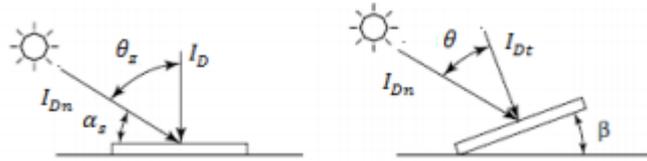


Figura 29: Radiación directa en superficie horizontal e inclinada del captador

Se define el *factor de inclinación* de la radiación directa (R_D) como la relación entre cosenos de los ángulos θ y θ_z :

$$R_D = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)}$$

Por tanto, la componente de radiación directa para una superficie inclinada se expresará como:

$$I_{Dt} = I_D \cdot R_D$$

Las dos componentes, difusa y reflejada, se calculan según el modelo de cielo isotrópico definido por Liu y Jordan:

$$I = I_D \cdot R_D + I_d \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + (I_D + I_d) \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right)$$

Donde:

ρ_g : reflectividad del suelo

Se considera despreciable la radiación reflejada. Por tanto, la expresión de la irradiación solar global se simplifica a:

$$I = I_D \cdot R_D + I_d \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right)$$

El ángulo de incidencia se calcula como:

$$\cos(\theta) = \sin(\delta) \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\beta) - \sin(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) + \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\omega) + \cos(\delta) \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\omega) + \cos(\delta) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin(\omega)$$

Donde:

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

δ : ángulo de declinación solar	[°]
ϕ : latitud	
ω : ángulo solar horario	[°]
γ : ángulo acimut	[°]

La declinación, δ , para cualquier día del año (N) oscila entre 1 y 365 puede ser calculada en primera aproximación con la expresión de Cooper:

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left(360 \cdot \frac{284 + N}{365} \right)$$

El ángulo horario ω se define como cero para el mediodía solar local. El ángulo horario decrece 15° por cada hora antes del mediodía solar local, y aumenta 15° por cada hora después del mediodía solar local.

Se puede obtener, por tanto, la radiación absorbida por la placa absorbente (S) como:

$$S = I \cdot (\tau\alpha) = (\tau\alpha)_D \cdot \left(\frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \right) \cdot I_D + (\tau\alpha)_d \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \cdot I_d$$

Donde:

$(\tau\alpha)_D$: producto transmitancia - absorptancia de la radiación solar directa

$(\tau\alpha)_d$: producto transmitancia - absorptancia de la radiación solar difusa

$$\theta_d = 59,7 - 0,1388 \cdot \beta + 0,001497 \cdot \beta^2$$

2.10 Modelo de aleta unidimensional

La distribución de temperatura entre tubos puede determinarse si se supone temporalmente que el gradiente de temperatura en la dirección del flujo se puede despreciar. La distancia entre tubos es W, El diámetro exterior de los tubos es D_{ext} y el espesor de la placa es δ_p .

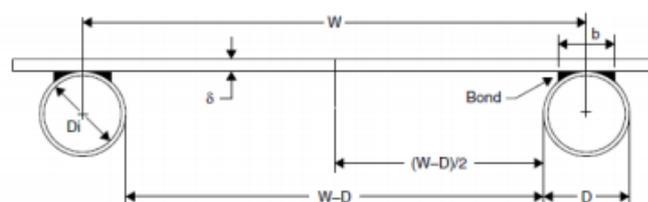


Figura 30: Aleta unidimensional del captador

El modelo de aleta unidimensional puede realizarse únicamente considerando las siguientes hipótesis:

- Propiedades físicas invariables.
- Régimen permanente.
- Transferencia de calor unidimensional.
- Captador solar de placa y tubos de parrilla.
- Temperatura uniforme en la base del tubo (T_b).

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

- Absorción nula en la cubierta.
- Caudal uniforme por los tubos.
- Conducción axial despreciable en superficie absorbente.
- Gradientes de temperatura nulos en la cubierta.
- Efectos de sombra y polvo en la cubierta despreciables.

Por tanto, la región entre la línea central que separa los tubos y la base de éstos, se podría considerar como un problema de aletas de longitud $\left(\frac{W-D_{ext}}{2}\right)$.

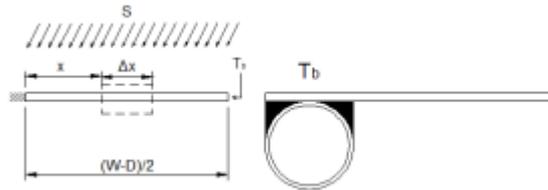


Figura 31: Sistema tubo-aleta

Si se realiza un balance en el elemento diferencial de la aleta de ancho Δx y la longitud unidad en la dirección del flujo:

$$S \cdot \Delta x - U_L \cdot \Delta x \cdot (T - T_{amb}) + \left(-k_p \cdot \delta_p \cdot \left(\frac{dT}{dx}\right)_x\right) - \left(-k_p \cdot \delta_p \cdot \left(\frac{dT}{dx}\right)_{x+\Delta x}\right) = 0$$

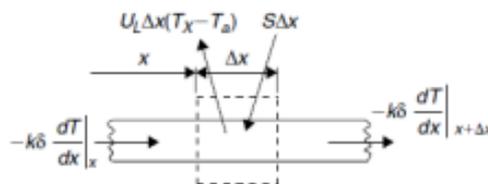


Figura 32: Balance de energía en la aleta

Donde:

$S = I(\tau\alpha)$: energía solar absorbida

Si se divide entre Δx y se halla el límite cuando Δx tiende a cero:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \left(\frac{U_L}{k_p \cdot \delta_p} \cdot \left(T - T_{amb} - \left(\frac{S}{U_L}\right)\right)\right)$$

Como condiciones de contorno se imponen:

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_x = 0 \quad ; \quad T_{\frac{W-D_{ext}}{2}} = T_b$$

Se definen los siguientes parámetros:

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

- Constante m: $m = \sqrt{\frac{U_L}{k_p \cdot \delta_p}}$
- Temperatura equivalente: $\theta = T - T_{amb} - \left(\frac{S}{U_L}\right)$

Por tanto, se llega a que:

$$\left(\frac{d^2\theta_p}{dx^2}\right) - m^2 \cdot \theta_p = 0$$

Se establecen las siguientes condiciones de contorno:

$$\left(\frac{d\theta_p}{dx}\right)_{x=0} = 0 \quad ; \quad \theta_{p\frac{W-D_{ext}}{2}} = T_b - T_{amb} - \left(\frac{S}{U_L}\right) = \theta_b$$

Finalmente se obtiene:

$$\theta_p(x) = \theta_b \cdot \left(\frac{\cosh(mx)}{\cosh\left(m \cdot \frac{W-D_{ext}}{2}\right)}\right) \quad ; \quad 0 \leq x \leq \frac{W-D_{ext}}{2}$$

Al conocer el campo de temperatura, se podría conocer el flujo de calor desde la chapa a la base del tubo, teniendo en cuenta que la energía se transmite desde los dos lados del tubo:

$$q_{pb} = -2 \cdot k_p \cdot \delta_p \cdot \frac{dT}{dx} = -2 \cdot k_p \cdot \delta_p \cdot \frac{d\theta_p}{dx}$$

Para el punto medio: $x = \frac{W-D_{ext}}{2}$:

$$q_{pb} = -(W - D_{ext}) \cdot F \cdot U_L \cdot \theta_b$$

$$F = \frac{\tanh\left(m \cdot \frac{W - D_{ext}}{2}\right)}{m \cdot \frac{W - D_{ext}}{2}}$$

El parámetro F disminuirá al crecer $m \cdot \frac{W-D_{ext}}{2}$. Esto significa que aumenta para espesores y conductividades térmicas de la placa absorbente mayores, y disminuye al aumentar la distancia entre los tubos y U_L .

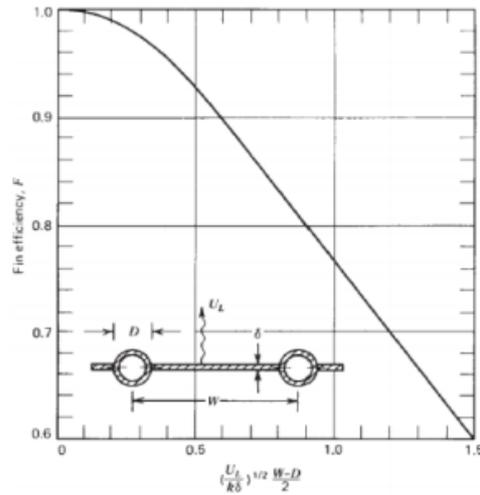


Figura 33: Factor de eficiencia de la aleta

A continuación, se podrá calcular el calor útil transferido hacia el fluido:

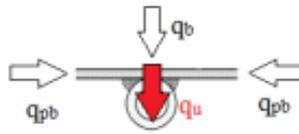


Figura 34: Energía útil transferida al tubo

Donde:

q_b : energía captada en la parte superior del tubo

q_{pb} : energía dirigida a los tubos

$$q_b = -U_L \cdot ((W - D_{ext}) \cdot F + D_{ext}) \cdot \theta_b$$

La ganancia útil del fluido se puede expresar también de la forma siguiente:

$$q_u = \frac{T_b - T_f}{R} = \frac{\theta_b - \theta_f}{2}$$

$$R = \left(\frac{1}{C_B} \right) + \left(\frac{1}{\pi \cdot D_{int} \cdot h_f} \right)$$

Se puede expresar la temperatura de la base del tubo como:

$$\theta_b = \theta_f + R \cdot q_u = (1 - R \cdot W \cdot U_L \cdot F') \cdot \theta_f$$

- Para una disposición de los tubos sobre la placa, el facto de eficiencia del captador se puede expresar como:

$$F' = \frac{1}{\frac{W \cdot U_L}{\pi \cdot D_{int} \cdot h_f} + \left(\frac{1}{\frac{D_{ext}}{W} + \frac{1}{\frac{W \cdot U_L}{C_B} + \frac{W}{D_{ext} + (W - D_{ext}) \cdot F}}} \right)}$$



Figura 35: Disposición de los tubos sobre la placa

- Para una disposición de los tubos bajo la placa:

$$F' = \frac{1}{\frac{W \cdot U_L}{\pi \cdot D_{int} \cdot h_f} + \frac{W \cdot U_L}{C_B} + \frac{W}{D_{ext} + (W - D_{ext}) \cdot F}}$$



Figura 36: Disposición de los tubos bajo la placa

- Para una disposición de los tubos en la placa:

$$F' = \frac{1}{\frac{W \cdot U_L}{\pi \cdot D_{int} \cdot h_f} + \frac{W}{D_{ext} + (W - D_{ext}) \cdot F}}$$



Figura 37: Disposición de los tubos en la placa

2.10.1 Campo de temperaturas del fluido y temperatura media de la placa

Si se realiza un balance de energía en uno de los tubos:

$$\dot{m}_t \cdot c_p \cdot \frac{dT_f}{dy} + q_u = 0$$

Para: $y = 0$: $T_f = T_{fe}$

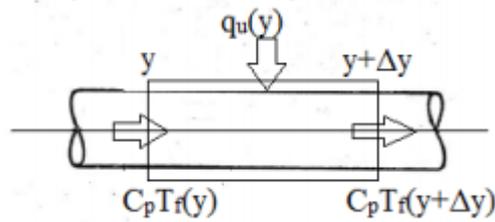


Figura 38: Balance de energía en uno de los tubos

Si se introducen las temperaturas equivalentes, la expresión queda como:

$$\dot{m}_t \cdot cp_f \cdot \frac{d\theta_f}{dy} + W \cdot U_L \cdot F' \cdot \theta_f = 0$$

Para: $y = 0$:

$$\theta_f = \theta_{fe}$$

Se obtiene, por tanto, el campo de temperaturas del fluido en la dirección axial del tubo:

$$\theta_{fs} = \theta_{fs}(y = L_t) = \theta_{fe} \cdot \exp\left(-U_L \cdot W \cdot F' \cdot \frac{L_t}{\dot{m}_t \cdot cp_f}\right)$$

Si se deshace el cambio de la temperatura equivalente realizado anteriormente, se llega a:

$$T_{fs} = \left(T_{fe} - T_{amb} - \frac{S}{U_L}\right) \cdot \exp\left(-U_L \cdot W \cdot F' \cdot \frac{L_t}{\dot{m}_t \cdot cp_f}\right) + T_{amb} + \frac{S}{U_L}$$

Se llega a la expresión del factor de evacuación de calor (FR):

$$FR = \frac{(G \cdot A \cdot cp_f \cdot (T_{fs} - T_{fe}))}{A \cdot (S - U_L \cdot (T_{fe} - T_{amb}))} = \frac{G \cdot cp_f}{U_L} \cdot \left(1 - \left(\frac{\theta_{fs}}{\theta_{fe}}\right)\right)$$

Se obtiene finalmente, una vez obtenido el factor de evacuación, la temperatura media de la placa:

$$\bar{T}_p = T_{fe} + \left(\frac{\left(\frac{Q_u}{A}\right)}{FR U_L}\right) \cdot (1 - FR)$$

3. SOFTWARE

3.1 Introducción

La mayor parte del tiempo se ha empleado en realizar el código del modelo del captador solar plano en el software matemático *EES* (“*Engineering Equation Solver*”). Este programa es de gran utilidad a la hora de implementar toda serie de ecuaciones relacionadas con las propiedades termodinámicas de todo tipo de fluidos. Para un manejo más fácil para el usuario, se opta por realizar una visualización, tanto de variables de entrada y de salida en la misma ventana, en el propio *EES*. Mediante la pestaña *Diagram Window*, se introducen las variables de entrada y de salida diferenciando entre distintas secciones:

- Captador
- Tubos
- Aislante
- Cubierta
- Placa absorbente
- Condiciones operativas
- Resultados

Una vez realizado el código en *EES* y visualizar el resultado en *Diagram Window*, se procedió a la implementación de las ecuaciones en *MATLAB*. Este programa permite crear una interfaz de *GUIDE*, la cual enlaza las ventanas anteriores entre sí mediante la incorporación de botones de *Inicio*, *OK* y *Calcular*. El manejo de esta interfaz permite al usuario introducir de forma sencilla las variables de entrada y obtener los resultados relevantes respecto al captador solar plano.

En el Anexo 2, se adjunta un Manual para el Usuario, explicando desde la instalación hasta la visualización de resultados de parámetros característicos del captador solar plano, tanto del software *EES* como del de *MATLAB*.

3.2 Concepción general del programa

El programa *EES* es un software que calcula la solución de un conjunto de ecuaciones algebraicas. Puede resolver cientos de ecuaciones, de forma eficiente, no lineales acopladas. También permite la resolución de ecuaciones diferenciales de valor inicial.

Este software incorpora una gran cantidad de funciones matemáticas y termofísicas. En el ámbito termodinámico, el programa implementa la Ley de Gibbs-Duhem para la resolución de propiedades termodinámicas, de las cuales se han hecho uso en el código implementado.

EES proporciona la capacidad de realizar un estudio paramétrico mediante las tablas paramétricas. En éstas pueden simularse diversas situaciones en las que, a partir de las ecuaciones propuestas, se estudie una o varias variables según un número deseado de *Runs*. A parte, se pueden realizar gráficos (*plots*) con la tabla paramétrica. También posee la capacidad del cálculo de un máximo o mínimo, mediante el comando *Min/Máx*, para la optimización de una variable previamente comentada.

El comando *Diagram Window* es el más utilizado para la visualización y un manejo rápido de las variables de entrada (*inputs*) y las de salida (*outputs*). Se pueden incorporar botones de cálculo, *inputs* y *outputs*, textos, imágenes, gráficos audio-visuales termodinámicos o no, *checkboxs* y *Radio groups*.

En lo referente a lo programado en *MATLAB*, este software tiene un manejo más complejo que *EES* pero admite la realización de *GUIDES* enlazadas y de *Apps* de desarrollo profesional.

MATLAB contiene numerosas funciones implementadas en el propio programa de formar que a la hora de realizar el *GUIDE* solo haya que diseñar las ventanas junto con los comandos en los distintos botones y los editables de texto.

3.3 Estructura del programa

En el código implementado en *EES*, para la resolución de las ecuaciones del balance térmico del captador solar plano, se estructura en primer lugar con las funciones necesarias para el cálculo de la radiación solar absorbida por la placa, del rendimiento del captador y de la energía útil del captador. A continuación, se detallan las variables de entrada con las que se van a resolver las ecuaciones.

CARACTERÍSTICAS PLACA		
Índice refracción del aire	1	n_1
Espesor cámara de aire	25 mm	δ_{cam}
Absortancia	0,9	α
Emisividad	0,10	ε_p
Espesor	2 mm	δ_p
Conductividad	$300 \frac{W}{m \cdot K}$	k_p

Tabla 3: Características de la placa absorbente

GEOMETRÍA DEL CAPTADOR		
Área	2,31 m ²	A
Longitud	2,1 m	L
Ancho	1,1 m	w_c
Espesor	0,1 m	E
Inclinación	40 °	β

Tabla 4: Geometría del captador

CONDICIONES DE OPERACIÓN		
Ángulo incidencia	30 °	$ang_{incidencia}$
Tª entrada fluido	40 °C	T_{fe}
Caudal fluido específico	$0,02 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$	G
Velocidad del viento	$5 \frac{m}{s}$	u_v

Tabla 5: Condiciones de operación

CARACTERÍSTICAS CUBIERTA		
Nº de cubiertas	1	N_c
Espesor	0,0032 m	δ_c
Emisividad	0,88	ε_v
Índice de refracción	1,526	n_2
Coefficiente de extinción	5	k_{ext}

Tabla 6: Características de la cubierta

CARACTERÍSTICAS TUBOS		
Nº de tubos	10	N_t
Diámetro exterior	7,5 mm	D_{ext}
Espesor	0,5 mm	e_t
Diámetro interior	5,5 mm	D_{int}
Longitud	1,90 m	L_t
Distancia entre tubos	11 cm	W
Conductancia tubo-placa	$40 \frac{W}{m \cdot K}$	C_B

Tabla 7: Características de los tubos

Las ecuaciones se estructuran en primer lugar, aquellas necesarias para hallar el coeficiente global de pérdidas (U_L). Tras éstas, se implementan las expresiones del balance térmico en el captador para las distintas disposiciones de los tubos, el producto transmitancia-absortancia, y el rendimiento del captador solar.

Mediante el comando *Diagram Window*, se incorporan una serie de variables de entrada en lo referente al captador y a las condiciones operativas, y los resultados como variables de salida, requeridos para conocer la recta rendimiento y calor útil del colector. Finalmente, se ha incorporado un botón para el cálculo del código implementado.

En cuanto a la estructura del código en *MATLAB*, se sigue prácticamente la misma que en la realizada en *EES*, tan solo cambia el lenguaje de programación. Para la visualización de las interfaces, se usó el comando *GUIDE* en las ventanas de comandos y se diseñó cada una de ellas entrelazando sus funciones posteriormente.

Los botones de *Inicio* incorporados en cada una de las ventanas secundarias, es decir, las posteriores al *MENÚ PRINCIPAL*, se han programado de forma que en cualquier equivocación en la introducción de datos se pueda volver a dichas ventanas y corregir el dato erróneo. Al igual que con el botón de *Inicio*, el botón de *OK* agregado a cada una de las ventanas da paso a la introducción de los datos de la siguiente ventana. Finalmente se añade el botón *Calcular*, para la resolución del código y la muestra de los resultados en su correspondiente ventana.

Adicionalmente, se ha codificado una sección para los errores en caso de que, si el usuario introduce una de las variables de entrada fuera de su rango operativo, saldrá una notificación emergente indicando el intervalo de

valores que tiene dicha variable.

3.3.1 Condiciones de operación

En la sección de condiciones de operación, se muestran aquellas variables de entrada a modificar en caso de situar el captador solar en distintos entornos. Dichas condiciones permiten el estudio del comportamiento del captador, por ejemplo, para las horas de sol al día, o durante un mes determinado. que afectan al captador solar son:

- Caudal específico del fluido que circula por el interior de los tubos
- Inclinación del captador
- Irradiancia global
- Porcentaje de radiación directa
- Ángulo de incidencia de la radiación
- Temperatura ambiente
- Temperatura de entrada del fluido caloportador
- Velocidad del viento

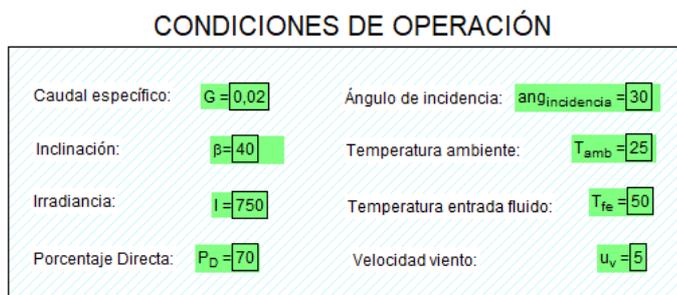


Figura 39: Condiciones de operación en EES

3.3.2 Captador

En esta ventana se introducen los variables de entrada relevantes al captador solar plano. Mediante un manejo rápido, se puede realizar un estudio de distintos tipos de captadores solares planos de una serie de fabricantes específicos. Se diferencian varias secciones:

- Dimensiones:
 - Área del captador
 - Longitud del captador
 - Ancho del captador
 - Espesor del captador
- Tubos:
 - Diámetro exterior
 - Espesor
 - Longitud
 - Número de tubos
 - Distancia entre tubos
 - Conductancia de la unión tubo-placa
 - Disposición de los tubos en la placa. Esta disposición puede ser según si los tubos se localizan bajo la placa, sobre la placa o adheridos a la placa.
- Aislante:

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

- Conductividad
- Espesor del aislante lateral
- Espesor del aislante posterior

- Cubierta:
 - Emisividad del vidrio
 - Espesor
 - Número de cubiertas
 - Índice de refracción
 - Coeficiente de extinción

- Placa absorbente:
 - Absortancia
 - Espesor
 - Emisividad
 - Conductividad
 - Espesor de la cámara de aire

CAPTADOR

Dimensiones

Área: $A = 2,31$

Longitud: $L = 2,1$

Ancho: $w_c = 1,1$

Espesor: $E = 0,1$

Tubos

Diámetro exterior: $D_{ext} = 0,01905$

Espesor: $e_t = 0,00127$

Longitud: $L_t = 1,9$

Número de tubos: $N_t = 10$

Distancia entre tubos: $W = 0,11$

Conductancia tubo-placa: $C_B = 40$

Disposición de tubos

Tubos bajo placa

Tubos sobre placa

Tubos en placa

Aislante

Conductividad: $k_{ap} = 0,045$

Espesor lateral: $e_{al} = 0,01$

Espesor posterior: $e_{ap} = 0,05$

Cubierta

Emisividad: $\epsilon_v = 0,88$

Espesor: $\delta_c = 0,0032$

Número de cubiertas: $N_c = 1$

Índice de refracción: $n_2 = 1,526$

Coeficiente de extinción: $k_{ext} = 5$

Placa absorbente

Absortancia: $\alpha = 0,9$

Emisividad: $\epsilon_p = 0,1$

Espesor cámara: $\delta_{cam} = 0,025$

Espesor: $\delta_p = 0,002$

Conductividad: $k_p = 300$

Figura 40: Captador en EES

3.3.4 Resultados

Como parámetros de interés en el comportamiento del captador, se ha optado por las siguientes variables:

- Temperatura del fluido a la salida
- Factor eficiencia de la aleta
- Factor de eficiencia del captador
- Factor de evacuación de calor
- Factor óptico ($FR(\tau\alpha)$)
- Modificador del ángulo de incidencia
- Rendimiento

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

- Pérdida de carga



Figura 41: Resultados en EES

A continuación se muestran en las Figuras 42, 43, 44 y 45, las ventanas diseñadas en MATLAB:

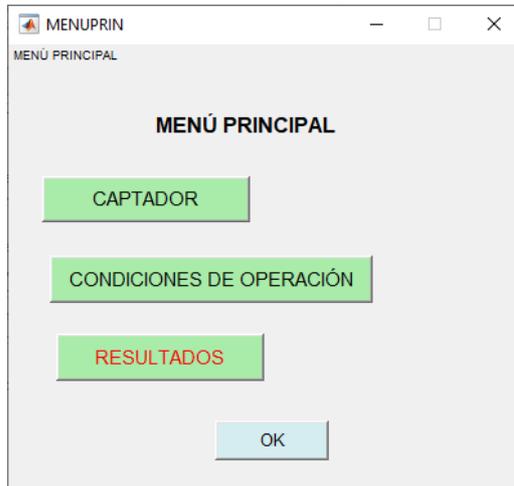


Figura 42: Menú principal en MATLAB



Figura 43: Condiciones de operación en MATLAB

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

INICIO

CAPTADOR

Dimensiones

Área [m²]

Longitud [m]

Ancho [m]

Espesor [m]

Tubos

Número

Longitud [m]

Diámetro exterior [m]

Espesor [m]

Conductividad tubo-placa [W/(m·K)]

Disposición tubos

Tubos bajo placa

Tubos sobre placa

Tubos en placa

Cubierta

Número

Índice de refracción

Coefficiente extinción[m⁻¹]

Espesor [m]

Emisividad (0-1)

Placa absorbente

Espesor [m]

Emisividad (0-1)

Conductividad [W/(m·K)]

Absortividad (0-1)

Espesor cámara [m]

Aislante

Espesor posterior [m]

Espesor lateral [m]

Conductividad [W/(m·K)]

OK

Figura 44: Captador en MATLAB

INICIO

RESULTADOS

Recta Rendimiento

FR (tau-alpha)n K50

Q_{útil} [kW]

tau-alpha

(tau-alpha)n

Tª salida fluido [°C]

F

FR

F'

FRUL

FR (tau-alpha)

Rendimiento

K_{theta}

Pérdida de carga [KPa]

CALCULAR

Figura 45: Resultados en MATLAB

3.4 Estudio paramétrico

Mediante el uso de tablas paramétricas del software EES y Excel, se procede a realizar un estudio paramétrico de

las variables más relevantes del captador solar plano.

3.4.1 Recta rendimiento

Ya se vio en el apartado 2.5.2 la forma que tenía la recta rendimiento, así como las definiciones de Factor Óptico o de ganancias ($FR(\tau\alpha)$), que representa al corte con el eje de ordenadas, y el Factor de Pérdidas (FRU_L), que representa la pendiente de la recta de rendimiento. En este apartado se va a obtener la recta rendimiento de un captador específico tomando como variables paramétricas la irradiancia, la temperatura ambiente y la temperatura de entrada del fluido al captador. Los datos del captador y las condiciones de operación serán las correspondientes a las Tablas 3, 4, 5, 6 y 7. En la Tabla 4, se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para una incidencia normal, manteniendo el caudal:

T_{fe}	30	30	30	40	40	40	50	50	50
T_{amb}	30	20	10	30	20	10	30	20	10
$T_{fe} - T_{amb}$	0	10	20	10	20	30	20	30	40
I	400	700	1000	400	700	1000	400	700	1000
$\frac{T_{fe} - T_{amb}}{I}$	0	0,0143	0,02	0,025	0,0286	0,03	0,05	0,0429	0,04
T_{fs}	33,53	35,61	37,72	42,96	45,04	47,12	52,39	54,47	56,55
Q_u	0,6822	1,084	1,486	0,5723	0,974	1,376	0,4624	0,8641	1,266
FRU_L	0,004757	0,00474	0,00475	0,00471	0,0047	0,00476	0,004757	0,004757	0,004757
$FR(\tau\alpha)$	0,738	0,737	0,735	0,738	0,737	0,735	0,738	0,737	0,735
η	0,7383	0,6703	0,6431	0,62214	0,6023	0,5955	0,5004	0,5344	0,548

Tabla 4: Resultados simulaciones

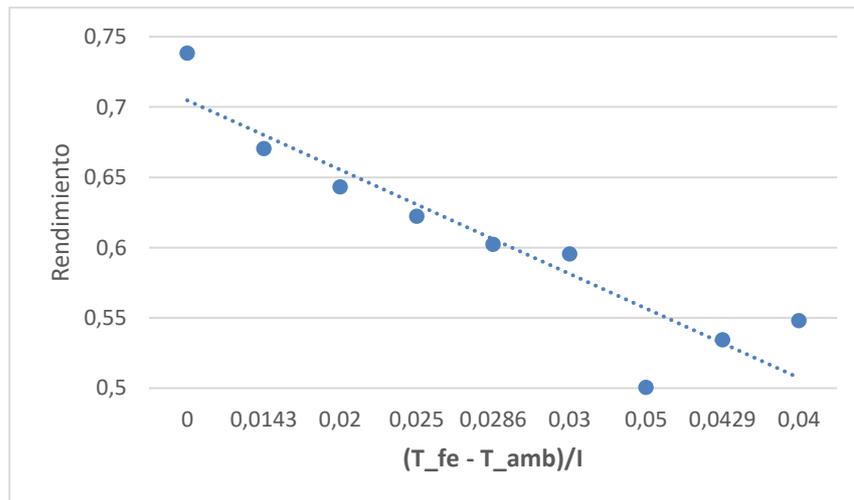


Gráfico 5: Recta rendimiento

3.4.2 Condiciones de operación

En este apartado, se verá la influencia de cuatro parámetros concretos respecto a las condiciones de operación donde se instale el captador solar plano con el rendimiento de éste. Estas variables serán: el ángulo de incidencia, la temperatura ambiente, la velocidad del viento y la temperatura de entrada del fluido que entra al captador.

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

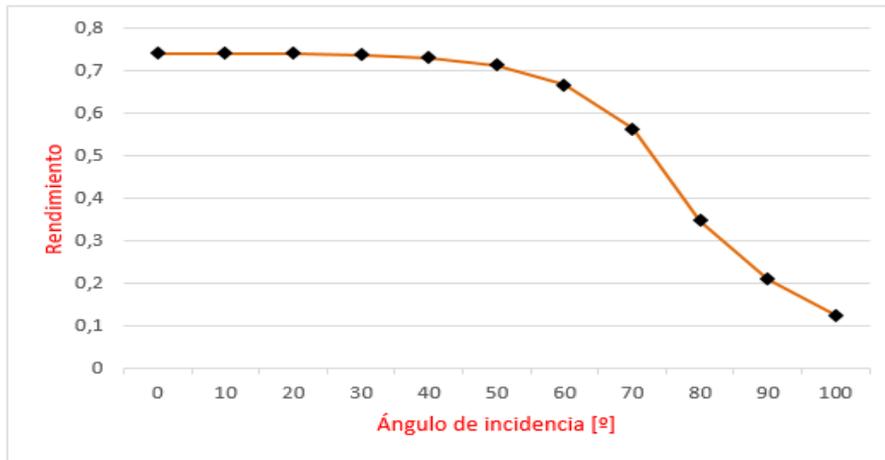


Gráfico 6: Rendimiento del captador en función del ángulo de incidencia

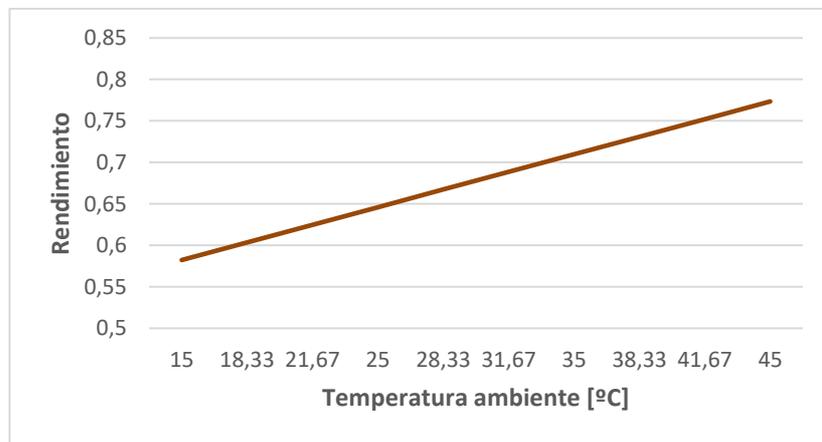


Gráfico 7: Rendimiento del captador en función de la temperatura ambiente

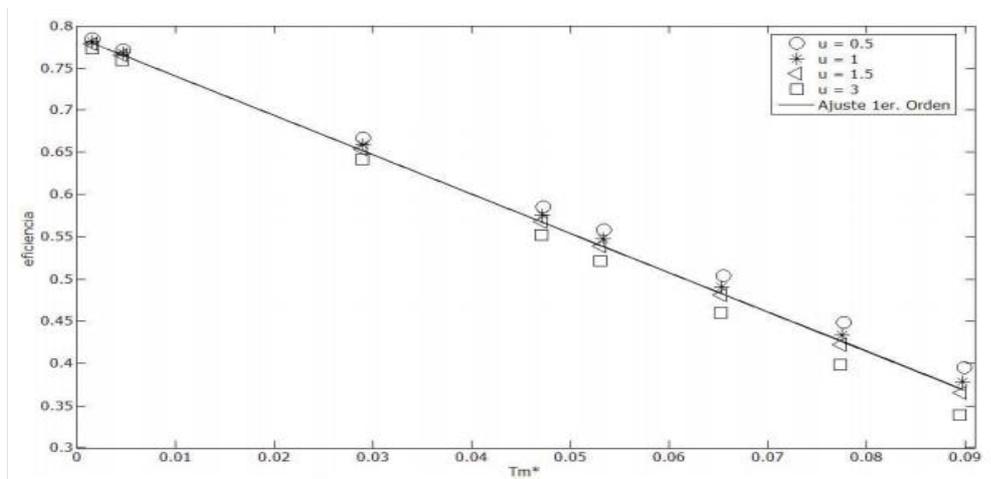


Gráfico 8: Rendimiento en función de la velocidad del viento

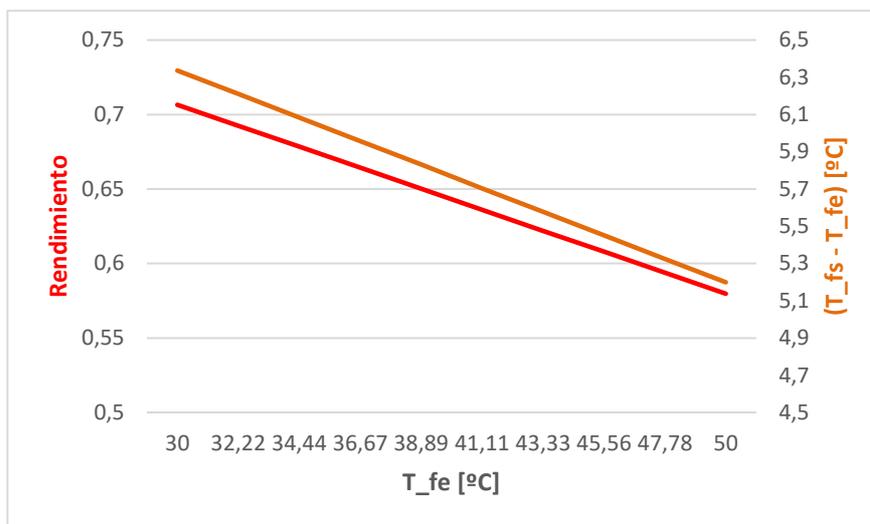


Gráfico 9: Rendimiento y diferencia de temperaturas en función de la temperatura de entrada del fluido

En primer lugar, el Gráfico 6 muestra la influencia del ángulo de incidencia respecto al rendimiento del captador. A medida que aumenta el ángulo de incidencia se produce una disminución del rendimiento. Este efecto va ligado al concepto del modificador del ángulo de incidencia detallado en el apartado 2.5.2, en el que éste se calculaba como la relación entre el rendimiento del captador, cuando la temperatura de entrada del fluido es la misma que la temperatura ambiente, y el factor óptico para una incidencia normal.

El Gráfico 7 representa la temperatura ambiente donde se encuentra el captador en función del rendimiento de éste. Se puede observar que a una menor temperatura hay un menor rendimiento. Esto se debe a que la instalación del captador solar plano en climas más fríos conlleva a un aumento notable de las pérdidas térmicas.

La influencia de la velocidad del viento respecto al rendimiento del captador reflejada en el Gráfico 8 es pequeña. Para una mayor velocidad del viento, se puede ver cómo el rendimiento disminuye. El hecho de la disminución del rendimiento conforme a la velocidad del viento era esperable, aunque queda así, demostrado analíticamente.

Por último, en el Gráfico 9 se ha representado la temperatura de entrada del fluido al captador en función del rendimiento y de la diferencia de temperaturas que experimenta el fluido a la salida. La tendencia que sigue el gradiente de temperaturas es similar a la del rendimiento. Una temperatura de entrada al captador menor, supone una reducción de las pérdidas por convección, y, por tanto, el rendimiento es mayor.

3.4.3 Aislamiento

Para reducir las pérdidas de calor hacia el exterior, se coloca material aislante en la parte posterior y en los laterales del captador, ya que son las únicas partes opacas del captador y por las que no es necesario que entre la radiación solar.

El material aislante ha de tener baja conductividad térmica, como es lógico, y también debe mantener inalterables sus propiedades y no degradarse con el calor. El aislamiento posterior del captador puede llegar a alcanzar temperaturas similares a las de la placa absorbente (cerca de 150°C), por lo que debe resistir sin descomponerse ni emitir gases que puedan ensuciar la parte interior de la cubierta del captador.

En los Gráficos 10 y 11 se representa el espesor del aislamiento en función de las pérdidas térmicas y el rendimiento para distintos tipos de aislamientos, tales como: Poliestireno moldeado, Poliestireno extrusión, Lana mineral, Espuma de poliuretano y Lana de vidrio. Como puede observarse, una disminución de los espesores de aislamiento suponen un aumento de las pérdidas térmicas, y con ello, una disminución del rendimiento del captador.

Los materiales aislantes más utilizados son las lanas minerales debido a que tiene una temperatura límite de empleo lo suficientemente grande con una baja conductividad, como puede observarse en la Tabla 5:

AISLANTE	Tª LÍMITE DE EMPLEO	CONDUCTIVIDAD (W/mK)
Poliestireno moldeado	80 °C	0,045
Poliestireno extrusión	80 °C	0,035
Lana mineral	150 °C	0,040
Espuma rígida de poliuretano	80 °C	0,031
Lana de vidrio	430 °C	0,065

Tabla 5: Tipología de aislante térmico del captador solar

Mediante un pequeño estudio de mercado de distintos fabricantes, se ha llegado a que la mayor parte de los espesores de aislamiento que se utilizan en captadores solares planos se encuentran en torno a un rango de 40-50 mm:

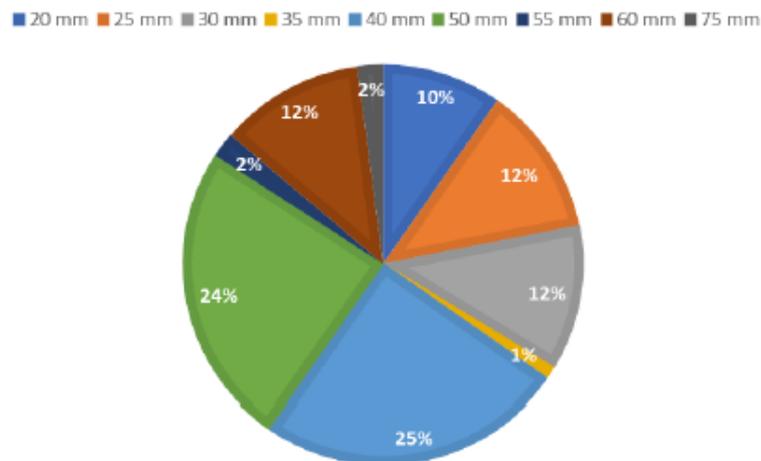


Gráfico 10: Esesor de aislamiento

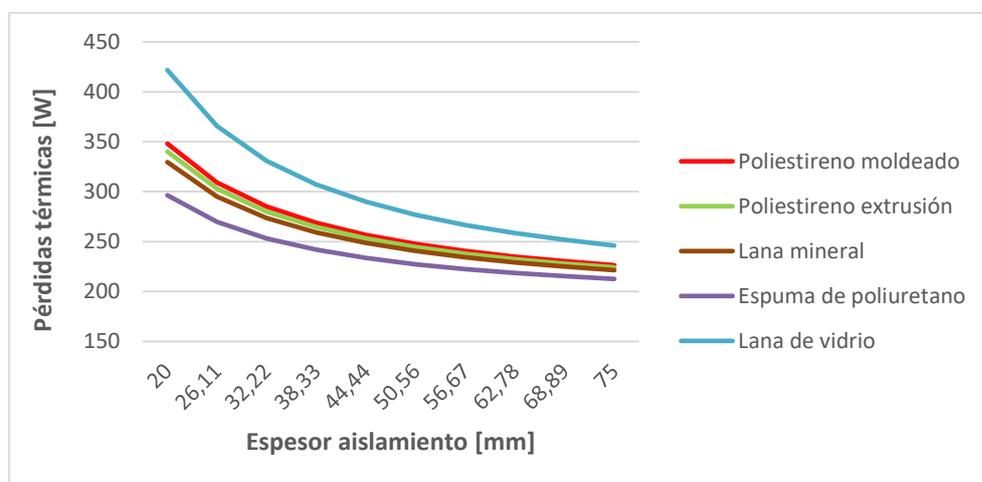


Gráfico 11: Pérdidas térmicas en función del espesor y tipo de aislamiento

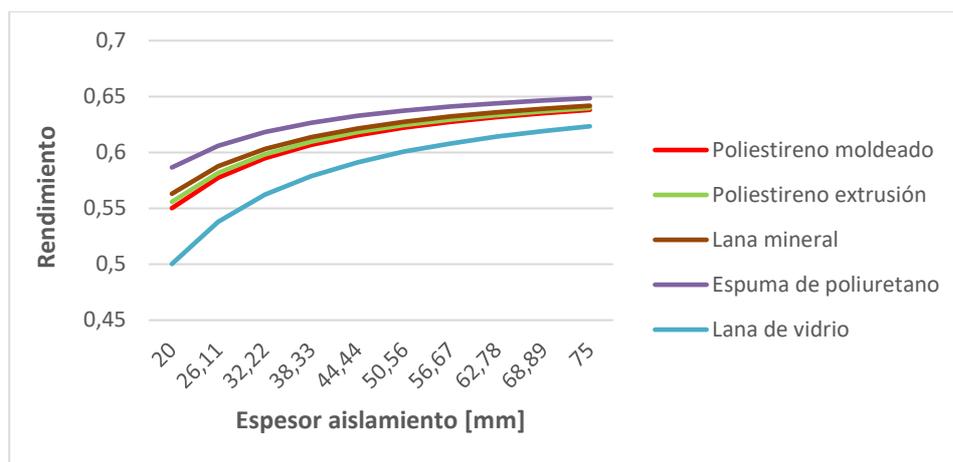


Gráfico 12: Rendimiento en función del espesor y tipo de aislamiento

3.4.4 Caudal específico

Para la mejora de una instalación solar térmica siempre se busca la optimización del rendimiento. En este apartado nos centramos en cómo puede influir el uso de un caudal diferente, no convencional, en el funcionamiento de la instalación.

Los sistemas de ACS comúnmente trabajan con caudales en torno a un rango entre 0,01 y 0,02 kg/sm². Los sistemas de bajo flujo trabajan con caudales del orden de 0,001 a 0,002 kg/sm². Este tipo de sistemas son bastante interesantes ya que debido a la baja velocidad del fluido caloportador hace que los costs de instalación se vean reducidos puesto que permite una instalación de tubos con diámetros más pequeños sin que la pérdida de carga aumente.

Respecto al caudal en sistemas de ACS, se busca maximizar el factor de evacuación de calor, FR , o bien reducir todo lo posible el coeficiente de pérdidas.

El aumento del factor de evacuación de calor no tiene por qué traducirse en un aumento del rendimiento, ya que a medida que la velocidad del flujo aumente, la temperatura a la entrada del captador solar puede ser superior a lo óptimo, aumentando de ese modo las pérdidas térmicas.

Este hecho puede deberse en parte a que el fluido no estratifica en el tanque y hay una circulación más continua.

En primer lugar, se va a analizar el factor de evacuación de calor en función del caudal específico. Hay que tener en cuenta que caudales menores tienen la ventaja de permitir que el depósito de acumulación se encuentre más estratificado, y esto supone que el gradiente de temperaturas a lo largo del depósito será elevado, es decir, que el fluido más caliente, el que se encuentra en la parte superior del tanque estratificado, estará disponible para satisfacer la demanda requerida por el usuario, y el líquido más frío circular por la parte inferior del depósito y será la que vaya a la entrada del captador solar.

El factor de evacuación de calor en función del caudal específico, en la configuración de parrilla del captador, presenta el efecto de transición de flujo laminar a turbulento (véase el Gráfico 13). Al contrario que en la configuración de serpentín, en el tipo parrilla, se tiene un mayor rendimiento si se trabajan con caudales más reducidos, que disminuyen los desequilibrios de flujo. Sin embargo, esta configuración sufre la disminución de energía útil, consecuencia del uso de menores caudales respecto a la configuración de serpentín. Cuando se recurre a un captador con configuración serpentín, se obtiene una ligera mejora de funcionamiento para el mismo área, diámetro de tubos y separación de éstos. Esto se debe al inicio más temprano del régimen turbulento, que aumenta el coeficiente de transferencia de calor y por tanto el rendimiento. Sin embargo, cuando el flujo comienza a ser turbulento, la potencia requerida para el bombeo se incrementa de forma muy significativa.

El cálculo del factor de evacuación en la configuración en serpentín del captador es de mayor dificultad, ya que hay una diferencia de transferencia de calor entre los tubos y el serpentín. Lund (1989) expresó este factor en

función de la efectividad-NTU, determinando el factor de forma según la conducción a través del tubo y la forma del tubo. Chiu y Perera (1986) también realizaron el análisis del serpentín del captador para diferente número de vueltas.

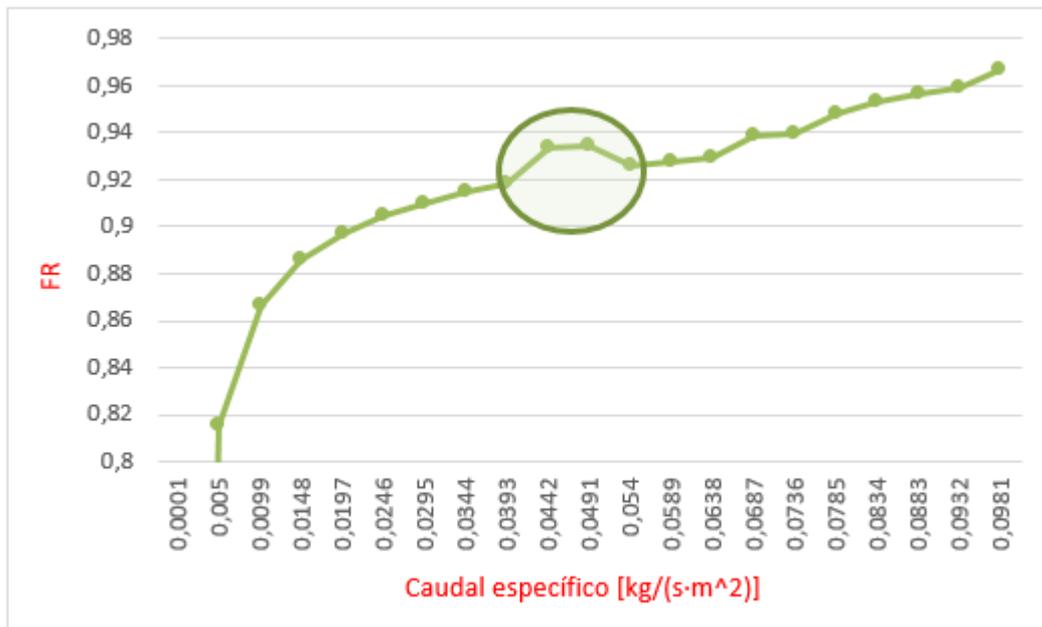


Gráfico 13: Factor de evacuación del calor en función del caudal específico

También se ha representado en el Gráfico 14, el caudal en función del factor de evacuación de calor y la disposición de los tubos en el captador. Los tubos situados en la placa o bajo ésta, muestran prácticamente la misma tendencia respecto al factor de evacuación de calor. Sin embargo, los tubos situados sobre la placa absorbente tienen mayores pérdidas térmicas.

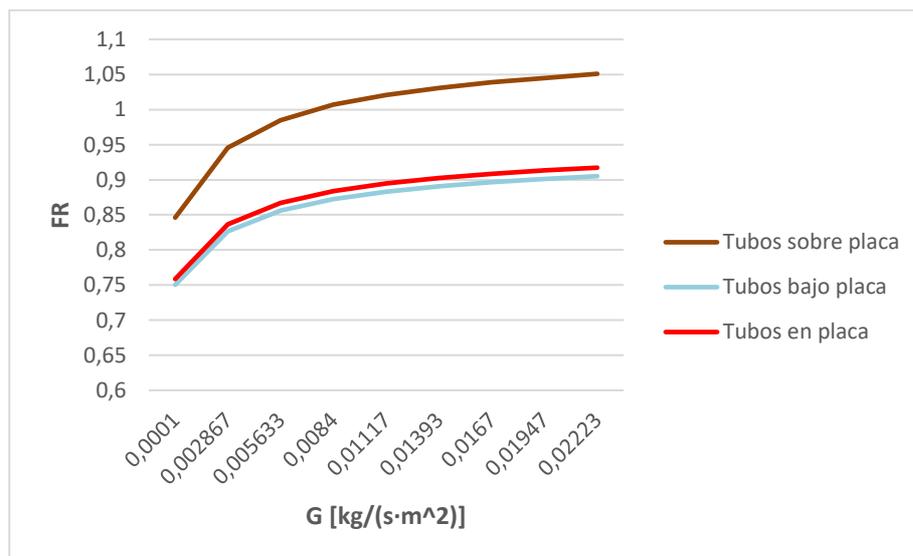


Gráfico 14: Factor de evacuación del calor en función del caudal específico según la disposición de los tubos

A continuación, se ha representado, en el Gráfico 15, el caudal específico en función de la pérdida de carga al circular el fluido por el interior de los tubos del captador. Se debe estimar un caudal de circulación primario,

necesario para calcular las pérdidas de carga y dimensionar la red hidráulica, así como seleccionar un intercambiador de calor concreto. Sin embargo, no existe ninguna indicación sobre qué caudal es el óptimo para las condiciones particulares de cada instalación solar térmica.

La premisa fundamental en aquellos casos en los que el circuito primario conecte con los captadores solares será la de enviar el fluido caloportador hacia captadores con la menor temperatura posible, lo que además garantice unas pérdidas térmicas hacia el ambiente reducidas. Por tanto, al seleccionar un intercambiador para una instalación solar térmica, los saltos térmicos a fijar en cada circuito dependerán del caudal con el que se vaya a trabajar, y sobre todo, de si se quiere mantener un alto grado de estratificación en el acumulador. Una vez fijados estos valores, se deberá comprobar que la eficiencia del intercambio es la adecuada y que las pérdidas de carga sean admisibles.

Si se desea mantener un valor mínimo de eficiencia y controlar las pérdidas de carga, conforme se aumenta el caudal se precisa incrementar el número de placas o variar el modelo de intercambiador para obtener mayor área de intercambio, lo que conlleva un encarecimiento. Por el contrario, proponiendo bajos caudales se alcanzarían buenos resultados con intercambiadores ajustados, tanto en tamaño como en precio.

Las pérdidas de carga hidráulicas del circuito primario de una instalación solar térmica dependen directamente del caudal de trabajo, por lo que el punto de trabajo de la bomba se obtendrá una vez se conozcan los diámetros nominales de tubería a instalar, para mantener una pérdida de carga lineal.

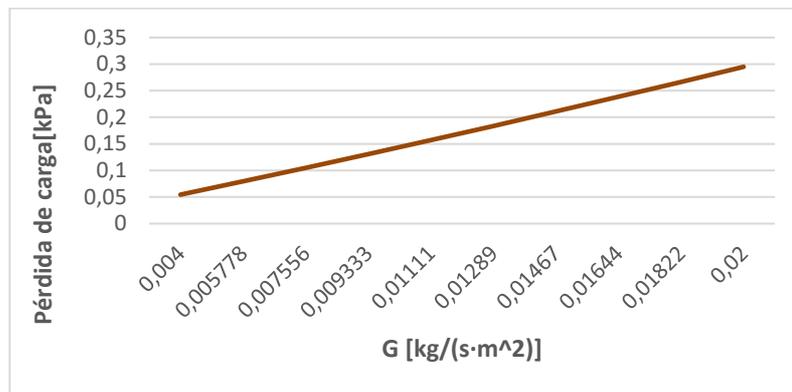


Gráfico 15: Pérdida de carga en función del caudal específico

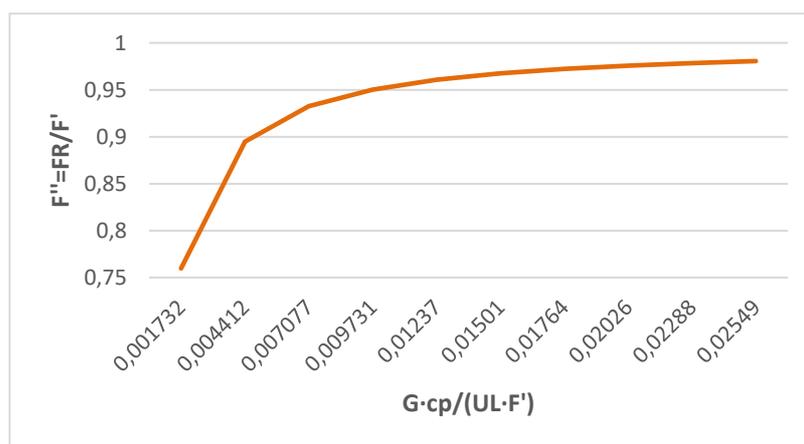


Gráfico 16: Factor de flujo del captador en función del caudal

En el Gráfico 16 se muestra uno de los gráficos característicos del captador solar, en el que se puede visualizar la influencia del caudal sobre el captador. El factor de flujo (F'') se expresa como la relación entre el factor de evacuación de calor y el factor de eficiencia del captador. El primero de los parámetros tiene un efecto notorio ante la modificación del caudal, sin embargo, el factor de eficiencia del captador depende muy débilmente del caudal, ya que lo hace a través del coeficiente convectivo de la resistencia térmica, y este valor es muy débil

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

respecto a la conductancia de la placa y la cámara de aire que son las resistencias de calor controlantes en dicha resistencia.

Finalmente, se han representado, en el Gráfico 17, para distintos valores de caudal específico, la influencia en el rendimiento del captador solar plano, así como su calor útil. Se puede ver como un aumento del caudal específico provoca un aumento del calor útil y del rendimiento. Según la expresión del rendimiento, el caudal influye directamente en su valor, al igual que en la energía captada.

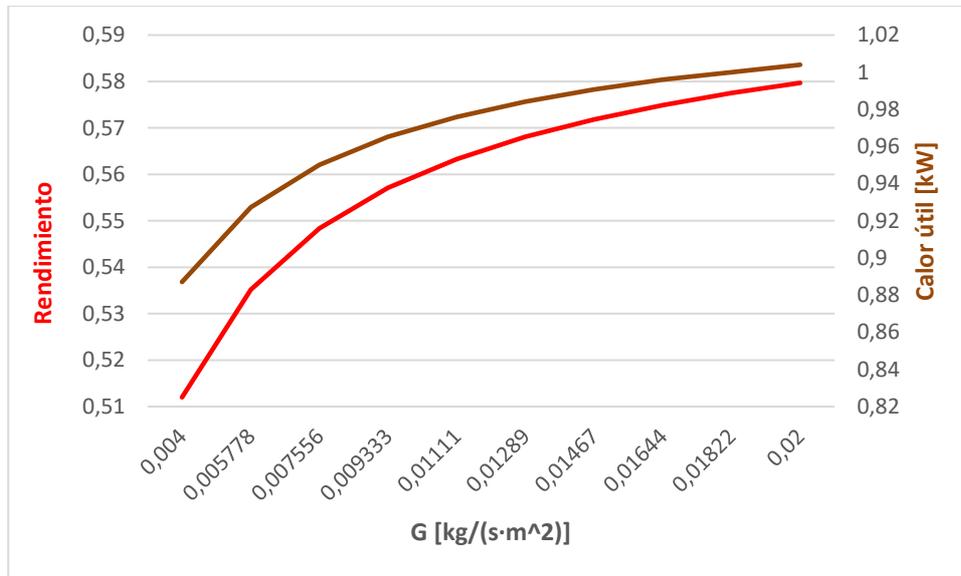


Gráfico 17: Rendimiento y calor útil en función del caudal específico

4. Resumen y Conclusiones

En el primer capítulo se ha realizado una breve introducción de la radiación solar, concretando el aprovechamiento de ésta en España y Andalucía, así como la energía solar térmica valorando la posición estratégica de nuestra región y la evaluación de las instalaciones solares térmicas a baja temperatura respecto a las demás fuentes de energías renovables. También se ha realizado un estudio superficial del mercado de energía solar a baja temperatura en España.

En el segundo capítulo, se ha analizado en profundidad el captador solar plano. Se ha explicado su principio de funcionamiento, detallando los elementos que lo integran y clasificándolo según determinados criterios. Posteriormente se ha profundizado en un estudio en régimen permanente del captador solar plano, estudiando las ecuaciones que modelan su funcionamiento.

Finalmente, en el tercer capítulo, se ha descrito el software empleado para simular el comportamiento del captador solar en régimen permanente. Se han analizado todas las alternativas que se plantearon y se ha descrito la interfaz finalmente escogida. En primer lugar, se ha descrito el software EES ('Engineering Equation Solver') y posteriormente, para hacer un manejo más sencillo a un determinado usuario, se implementó una *Guide* en el software de MATLAB. Posteriormente, mediante dichas herramientas, se ha realizado un estudio paramétrico con las variables más características del captador solar plano.

Se expondrán, a continuación, las conclusiones extraídas del trabajo. Se hará hincapié en el estudio paramétrico llevado a cabo mediante los programas implementados en EES y Matlab:

- En cuanto a las condiciones de operación, se ha comprobado que un aumento de la temperatura ambiente supone un aumento del rendimiento del captador. La tendencia que sigue la gráfica del rendimiento respecto a la temperatura ambiente es lineal, de forma que al aumentar 10°C dicha temperatura, el rendimiento crece un 11% aproximadamente. Respecto a la temperatura de entrada del fluido que circula a través de los tubos del captador, se ha visualizado como un aumento de esta temperatura hace que disminuya el rendimiento, y, por tanto, la diferencia de temperaturas a la salida. Para una temperatura de entrada de 30°C, se ha obtenido un rendimiento del 70% aproximadamente con un gradiente de temperaturas de 6,3°C. Al aumentar la temperatura unos 10°C, se traduce en una disminución tanto del rendimiento, como del gradiente de temperaturas, de un 11% aproximadamente.
- El estudio del factor de evacuación de calor ha sido uno de los más complejos. Se ha llegado a que un aumento del caudal específico que circula por los tubos hace que aumente el factor de evacuación de calor. Para un valor usual del caudal específico de 0,02 kg/(s·m²) se ha obtenido un valor de 0,9 de dicho factor. Un incremento del 23% hace que aumente el factor de evacuación de calor en un 1,7%. A partir de un valor de 0,04 kg/(s·m²) de caudal, el crecimiento del factor de evacuación de calor es marginal. Por otro lado, según la disposición de los tubos, para un caudal de 0,0056 kg/(s·m²) aproximadamente se obtienen valores del factor de evacuación de calor que siguen creciendo hasta 0,022 kg/(s·m²) de caudal, que se mantiene un valor prácticamente constante de dicho factor para los tres tipos de disposición.
- Respecto a la pérdida de carga en función del caudal específico, ésta sigue una tendencia prácticamente lineal creciente. Al aumentar el caudal en un 16%, la pérdida de carga aumenta un 26,7% aproximadamente.
- Según el tipo de aislante térmico para el captador, se ha obtenido que el material de lana de vidrio es el que mayores pérdidas térmicas, y, por tanto, menor rendimiento, produce respecto a los otros materiales aislantes. Este tipo de aislante presenta una gran temperatura límite de operación en comparación a los demás materiales. La lana mineral se encuentra en un punto intermedio de temperatura límite de operación con un equilibrio entre menores pérdidas térmicas y alto rendimiento relativamente frente a los otros aislantes.

- Por último, se ha llegado a que un aumento del caudal específico supone un incremento del rendimiento y el calor útil del captador solar. Para un valor de $0,02 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ de caudal se ha obtenido un rendimiento del 58% y un calor útil de 1 kW aproximadamente. Si se produce un incremento del 35% de caudal, tanto el rendimiento y el calor útil, al seguir una tendencia prácticamente igual, aumentan en un 2%. Este incremento irá disminuyendo a medida que aumente el caudal específico.

Referencias bibliográficas

- [1] A. Básicos and D. E. L. A. Radiación, “Energía solar.”
- [2] “calculationsolar.com.” [Online]. Available: <http://calculationsolar.com/blog/?cat=2>.
- [3] “Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT.”
- [4] “index @ www.adrase.es.” [Online]. Available: <http://www.adrase.es/>.
- [5] Á. R. Ridao, E. H. García, B. M. Escobar, and M. Z. Toro, “Solar energy in Andalusia (Spain): present state and prospects for the future,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. 1, pp. 148–161, 2007, doi: 10.1016/j.rser.2004.12.007.
- [6] I. S. T. Subsistema and F. Caloportador, “Ere02.- .instalaciones solares: subsistemas.,” pp. 1–28, [Online]. Available: <https://coolproyect.es/website/wp-content/uploads/2017/02/Energia-solar-1.pdf>.
- [7] “Esquema general de una instalacion de energia solar para agua caliente sanitaria.” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Esquema-general-de-una-instalacion-de-energia-solar-para-agua-caliente-sanitaria-2_fig1_259470624.
- [8] “ayudasenergia.com.” [Online]. Available: <https://ayudasenergia.com/casa-solar/aire-acondicionado-con-energia-solar/>.
- [9] “www.hidromainake.com.” [Online]. Available: <http://www.hidromainake.com/portfolio-view/calefaccion-para-piscinas/>.
- [10] “@ termicol.es.” [Online]. Available: <https://termicol.es/productos/accesorios-energia-solar-termica/>.
- [11] C. J. A. C. Jim, “1154,” 2008.
- [12] “ASIT,” [Online]. Available: <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2019/10/2017-06-27-Estado-actual-y-perspectivas-de-futuro-de-la-energia-solar-termica-ASIT-fenercom.pdf>.
- [13] caloryfrio.com, “Aislamiento térmico solar-descripcion-y-funcionamiento @ www.caloryfrio.com.” <https://www.caloryfrio.com/161-aislamiento-termico-solar-descripcion-y-funcionamiento.html>.
- [14] J. Manuel, C. Tutor, and J. G. Macho, “Trabajo Fin de Grado Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales Estudio del comportamiento de los captadores solares planos. Análisis de mercado.,” 2017.
- [15] G. De Termotecnia, “2. captador solar. fundamentos.”

Anexo 1: Código EES

"!Código Trabajo Fin de Grado: Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano "

"Función para el cálculo del rendimiento del captador"

Function Rendimiento (Qu_1 ; I_1 ; A_c1)

If I_1 = 0 Then

Rendimiento = 0

Else Rendimiento = (Qu_1 / ((I_1/1000)* A_c1))

End

"Datos"

"Área del captador" A = 2,31

"Longitud del captador" L = 2,1

"Ancho del captador" w_c = 1,1

"Espesor del captador" E = 0,1

"Número de los tubos" N_t = 10

"Número de cubiertas" N_c = 1

"Espesor de la cubierta de vidrio" delta_c = 0,0032

"Emisividad del vidrio" epsilon_v = 0,88

"Índice de refracción del vidrio" n_2 = 1,526

"Coeficiente de extinción del vidrio" k_ext = 5

"Índice de refracción del aire" n_1 = 1

"Espesor de la cámara de aire" delta_cam = 0,025

"Absortancia de la placa" alpha = 0,9

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

"Emisividad de la placa" $\epsilon_p = 0,1$

"Espesor de la placa" $\delta_p = 0,002$

"Conductividad de la placa" $k_p = 300$

"Diámetro exterior de los tubos" $D_{ext} = 0,01905$

"Espesor de los tubos" $e_t = 0,00127$

"Diámetro interior de los tubos" $D_{int} = D_{ext} - 2 * e_t$

"Longitud de los tubos" $L_t = 1,9$

"Distancia entre los tubos" $W = w_c / N_t$

"Conductancia tubo-placa" $C_B = 40$

"Espesor del aislamiento posterior" $e_{ap} = 0,050$

"Espesor aislamiento lateral" $e_{al} = 0,01$

"Conductividad térmica aislante posterior" $k_{ap} = 0,045$

"Conductividad térmica aislante lateral" $k_{al} = 0,045$

"Radiación solar incidente" $I = 750$

"Ángulo de incidencia" $\text{ang_incidencia} = 30$

"Porcentaje Radiación Directa" $P_D = 70$

"Radiación directa" $I_D = (P_D / 100) * I$

"Radiación difusa" $I_{dif} = ((100 - P_D) / 100) * I$

"Temperatura ambiente" $T_{amb} = 25$

"Temperatura de entrada del fluido al captador" $T_{fe} = 50$

"Caudal de fluido específico" $G = 0,02$

"Velocidad del aire" $u_v = 5$

"Temperatura media de la placa" $T_{mp} = 50$

"Inclinación del captador" $\beta = 40$

"Temperatura media del fluido" $T_{mf} = 50$

"Sigma" $\sigma = 5,67 * 10^{(-8)}$

"!ECUACIONES"

"Reflectancia de la cubierta para la radiación difusa"

$\theta_1 = 60$

"Ley de Snell"

$$n_1 * \sin(\theta_1) = n_2 * \sin(\theta_2)$$
$$\rho_{\text{perp_dif}} = (\sin(\theta_2 - \theta_1)^2) / (\sin(\theta_2 + \theta_1)^2)$$
$$\rho_{\text{para_dif}} = (\tan(\theta_2 - \theta_1)^2) / (\tan(\theta_2 + \theta_1)^2)$$

"Transmitancia de las pérdidas por reflexión"

$$\rho_{\text{dif}} = 0,5 * (\rho_{\text{perp_dif}} + \rho_{\text{para_dif}})$$
$$R_{\text{d}} = \rho_{\text{dif}} * (1 + (((1 - \rho_{\text{dif}})^2 * \tau_{\text{dif}}^2) / (1 - (\rho_{\text{dif}}^2 * \tau_{\text{dif}}^2))))$$
$$\tau_{\text{dif}} = \exp(-k_{\text{ext}} * l_{\text{dif}})$$
$$l_{\text{dif}} = \delta_c / \cos(\theta_2)$$

"Producto transmisividad-absortividad para la directa"

"Ley de Snell"

$$n_1 * \sin(\text{ang_incidencia}) = n_2 * \sin(\theta_{2D})$$
$$\rho_{\text{perpD}} = (\sin(\theta_{2D} - \text{ang_incidencia})^2) / (\sin(\theta_{2D} + \text{ang_incidencia})^2)$$
$$\rho_{\text{paraD}} = (\tan(\theta_{2D} - \text{ang_incidencia})^2) / (\tan(\theta_{2D} + \text{ang_incidencia})^2)$$
$$\rho_{\text{D}} = 0,5 * (\rho_{\text{perpD}} + \rho_{\text{paraD}})$$
$$\tau_{\text{D}} = \exp(-k_{\text{ext}} * l_{\text{D}})$$
$$l_{\text{D}} = \delta_c / \cos(\theta_{2D})$$
$$R = \rho_{\text{D}} * (1 + (((1 - \rho_{\text{D}})^2 * \tau_{\text{D}}^2) / (1 - (\rho_{\text{D}}^2 * \tau_{\text{D}}^2))))$$
$$T = (\tau_{\text{D}} * (1 - \rho_{\text{D}})^2) / (1 - (\rho_{\text{D}}^2 * \tau_{\text{D}}^2))$$
$$T_{\text{n}} = (\tau_{\text{D}} * (1 - \rho_{\text{n}})^2) / (1 - (\rho_{\text{n}}^2 * \tau_{\text{D}}^2))$$

"Incidencia normal"

$$\rho_{\text{n}} = ((n_1 - n_2) / (n_1 + n_2))^2$$

"Tau alpha total de la directa"

$$\tau_{\text{alpha}} = (T * \alpha) / (1 - ((1 - \alpha) * R_{\text{d}})) \quad \tau_{\text{alpha_normal}} = (T_{\text{n}} * \alpha) / (1 - ((1 - \alpha) * R_{\text{d}}))$$

"Cálculo del modificador del ángulo de incidencia"

$$K_{\theta} = \tau_{\text{alpha}} / \tau_{\text{alpha_normal}}$$
$$K_{\theta} = 1 - b_0 * ((1 / \cos(\text{ang_incidencia})) - 1)$$
$$K_{50} = 1 - b_0 * ((1 / \cos(50)) - 1)$$
$$K_{60} = 1 - b_0 * ((1 / \cos(60)) - 1)$$

"!Coeficientes de transferencia de calor"

"Coeficiente de película por convección entre tubo y fluido"

Call pipeflow('Water' ; T_mf ; 101,325 ; m_t ; D_int ; L_t ; 0 ; h_f ; h_H ; DELTAP ; Nu_f ; frictionfactor ; Re_f)

$$m_{\dot{}} = G * A$$

$$m_t = m_{\dot{}} / N_t$$

"Coeficiente de película convectivo-radiante entre cubierta y ambiente"

$$h_v = 2,8 + (3 * u_v)$$

"!Coeficiente global de pérdidas"

$$U_L = U_t + U_b + U_e$$

"Coeficiente global de pérdidas superior"

$$f_q = (1 + (0,089 * h_v) - (0,1166 * h_v * \epsilon_p)) * (1 + 0,07866 * N_c) \quad C = 520$$
$$* (1 - (0,000051 * (\beta)^2))$$

$$d = 0,43 * (1 - (100 / (T_{mp} + 273,15)))$$

$$t_e = (((2 * N_c) + f_q - 1 + (0,133 * \epsilon_p)) / \epsilon_v) - N_c \quad h_t =$$
$$(\epsilon_p + (0,00591 * N_c * h_v))^{-1}$$

$$w_p = \sigma * (T_{mp} + 273,15 + 25 + 273,15) * ((T_{mp} + 273,15)^2 + (25 + 273,15)^2)$$

$$x = ((N_c / ((C / (T_{mp} + 273,15)) * ((T_{mp} - 25) / (N_c + f_q))^d)) + (1 / h_v))^{-1}$$

$$U_t = x + (w_p / (h_t + t_e))$$

"Coeficiente global de pérdidas lateral"

$$U_e = (k_{al} / e_{al}) * ((E * (2 * L + 2 * w_c)) / A)$$

"Coeficiente global de pérdidas inferior"

$$U_b = k_{ap} / e_{ap}$$

"!ECUACIONES DEL BALANCE TÉRMICO"

"Balance en el fluido"

$$Q_{\dot{}}_{util} = m_{\dot{}} * c_{p_f} * (T_{fs} - T_{fe})$$

$$c_{p_f} = cp(\text{Water} ; T = T_{mf} ; P = 101,325)$$

"Factor de eficiencia de la aleta"

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

$$F = \tanh(m * (W - D_{\text{ext}})/2) / (m * (W - D_{\text{ext}}) / 2)$$

$$m = \text{sqrt}(U_L / (k_p * \text{delta}_p))$$

"Factor de eficiencia del captador"

"Tubos bajo la placa"

$$F_{\text{prima}} = 1 / (((W * U_L) / (\pi * D_{\text{int}} * h_f)) + ((W * U_L) / C_B) + (W / (D_{\text{ext}} + (W - D_{\text{ext}}) * F)))$$

{"Tubos sobre la placa"

$$F_{\text{prima}} = 1 / (((W * U_L) / (\pi * D_{\text{int}} * h_f)) + (1 / ((D_{\text{ext}} / W) + (1 / (((W * U_L) / C_B) + (W / (D_{\text{ext}} + (F * (W - D_{\text{ext}}))))))))))$$

{"Tubos en la placa"

$$F_{\text{prima}} = 1 / (((W * U_L) / (\pi * D_{\text{int}} * h_f)) + (W / (D_{\text{ext}} + (W - D_{\text{ext}}) * F)))$$

"Factor de evacuación del calor"

$$FR = ((G * c_{p_f}) / (U_L / 1000)) * (1 - \exp((- (U_L / 1000) * F_{\text{prima}}) / (G * c_{p_f})))$$

"Temperatura del fluido a la salida"

$$T_{\text{fs}} = ((T_{\text{fe}} - T_{\text{amb}} - S / U_L) * \exp((- (U_L / 1000) * W * F_{\text{prima}} * L_t) / (m_t * c_{p_f}))) + T_{\text{amb}} + S / U_L$$

"Factor de flujo del captador solar"

$$F2_{\text{prima}} = FR / F_{\text{prima}}$$

$$B = (G * c_{p_f}) / (U_L * F_{\text{prima}})$$

"Pérdida de carga del fluido con los tubos"

$$\text{Perdida_carga} = (\text{frictionfactor} * \text{densidad_water} * ((L_t * N_t) / D_{\text{int}}) * ((\text{velocidad_water}^2) / 2)) / 100$$

$$\text{densidad_water} = \text{density}('Water'; T = T_{\text{mf}}; P = 101,325) \quad \text{velocidad_water} = m_t / (\text{densidad_water} * (\pi * D_{\text{int}}^2) / 4)$$

"Diferencia de temperaturas"

$$\text{Delta_temp} = T_{\text{fs}} - T_{\text{fe}}$$

"Rendimiento del captador"

$$\text{Eta} = \text{Rendimiento}(Q_{\text{dot_util}}; I; A)$$

$$FR_{\text{tau_alpha}} = FR * \text{tau_alpha}$$

$$FRUL = FR * (U_L / 1000)$$

$$\text{Eta} = FR_{\text{tau_alpha}} - (FRUL * (T_{\text{fe}} - T_{\text{amb}}) / (I / 1000))$$

$$FR_{\text{tau_alpha_n}} = FR_{\text{tau_alpha}} / ((K_{\text{theta}} * (P_D / 100)) + (K_{60} * ((100 - P_D) / 100)))$$

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

"Pérdidas térmicas"

$$\text{Perdidas_termicas} = U_L * A * (T_mp - T_amb)$$

Anexo 2: Manual del usuario

En este apartado se van a describir los pasos necesarios a seguir por el usuario desde la instalación previa del programa necesario hasta la visualización de resultados respecto a los datos introducidos por éste del captador solar plano.

En primer lugar, se procede a detallar el software *EES* (“*Engineering Equation Solver*”).

Lo primero a realizar por el usuario es la instalación de EES en su ordenador. Esta versión de EES está diseñada para operar con cualquiera de los sistemas operativos de Windows Microsoft.

Una vez instalado el programa, el usuario descargará, pulsando dos veces seguidas y presionando *Abrir* en el siguiente vínculo donde se encuentra el código implementado y el diseño del *Diagram Windows*.



TFG_entrega.EES

En el Anexo 1, se muestra el código implementado para la simulación del comportamiento del captador solar plano en régimen permanente. En este se han detallado las funciones, datos y ecuaciones necesarias para la obtención de los resultados respecto a los datos introducidos por el usuario en el denominado *Diagram Windows*



. A raíz de esta herramienta proporcionada por el software EES se ha diseñado una única pantalla en la que aparecen distintas secciones tales como: Captador, Condiciones de operación y Resultados. En la Figura 46, se muestra de forma global la pantalla que le aparecerá al usuario descargándose el programa proporcionado.

Por último, una vez introducidos los datos por el usuario de las secciones de *Captador* y *Condiciones de operación*, éste presionará el botón  situado en la barra de herramientas superior. Mediante éste, se obtendrán de forma automática los resultados, que serán reflejados en la sección *Resultados*.

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

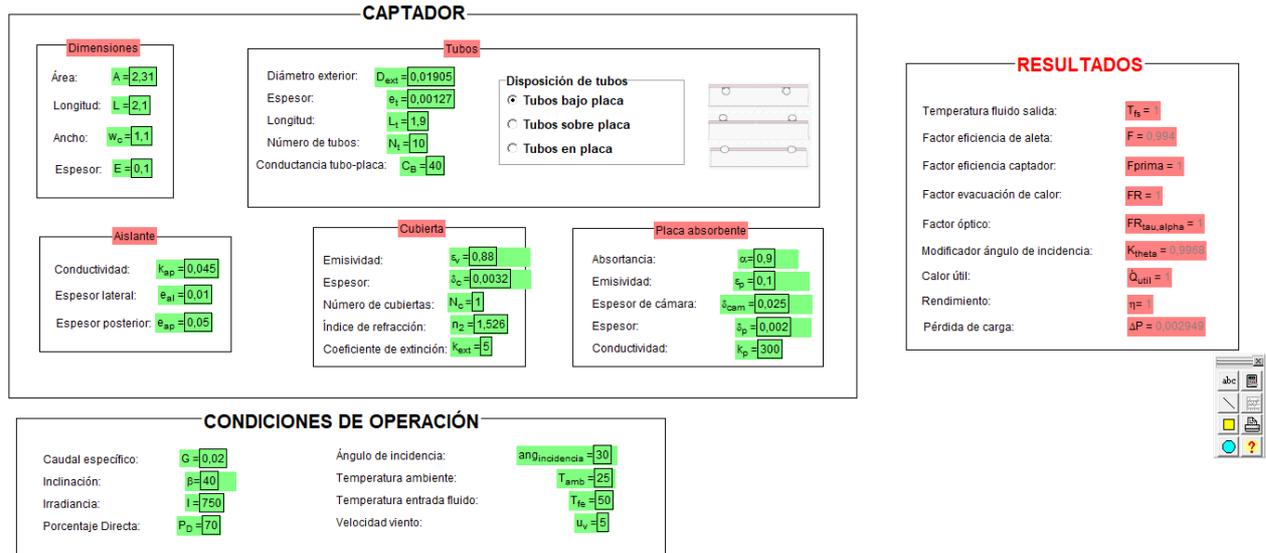


Figura 46: Diagram Windows en EES

En segundo lugar, se ha realizado mediante el mismo código, pero siguiendo el lenguaje propio del programa Matlab. Con la realización de este programa, se ha buscado hacer al usuario una introducción de datos más sencilla mediante la incorporación de ventanas enlazadas.

Una vez obtenido el programa, el usuario deberá descargar cuatro *scripts* (Ventanas). Dichos scripts vendrán asociados a cada una de las ventanas que le saldrán al usuario para la introducción de los datos referentes al captador solar plano. A continuación, se adjuntan los cuatro enlaces para la obtención de los scripts (Realizar doble clickeo en cada uno para su descarga, manteniendo el formato del documento en Word):



Al realizar el doble clickeo saldrá un cuadro adicional (véase Figura 47). Pulsar en Abrir:

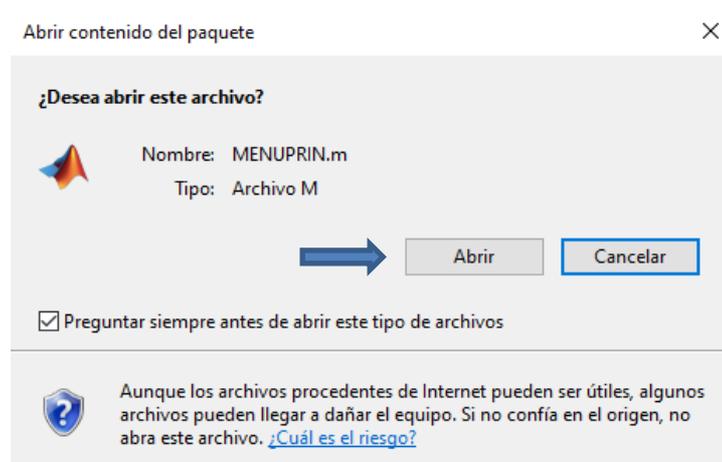


Figura 47: Cuadro adicional manual

Se detallan los pasos a seguir por el usuario en el orden correcto para introducir los datos y la obtención de los resultados pertinentes:

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

1. Una vez se hallan abierto los cuatro scripts, el usuario debe dirigirse a la pestaña del primer script y cliquer una sola vez: MENUUPRIN.m. Aparecerá en primer lugar la Figura 48:

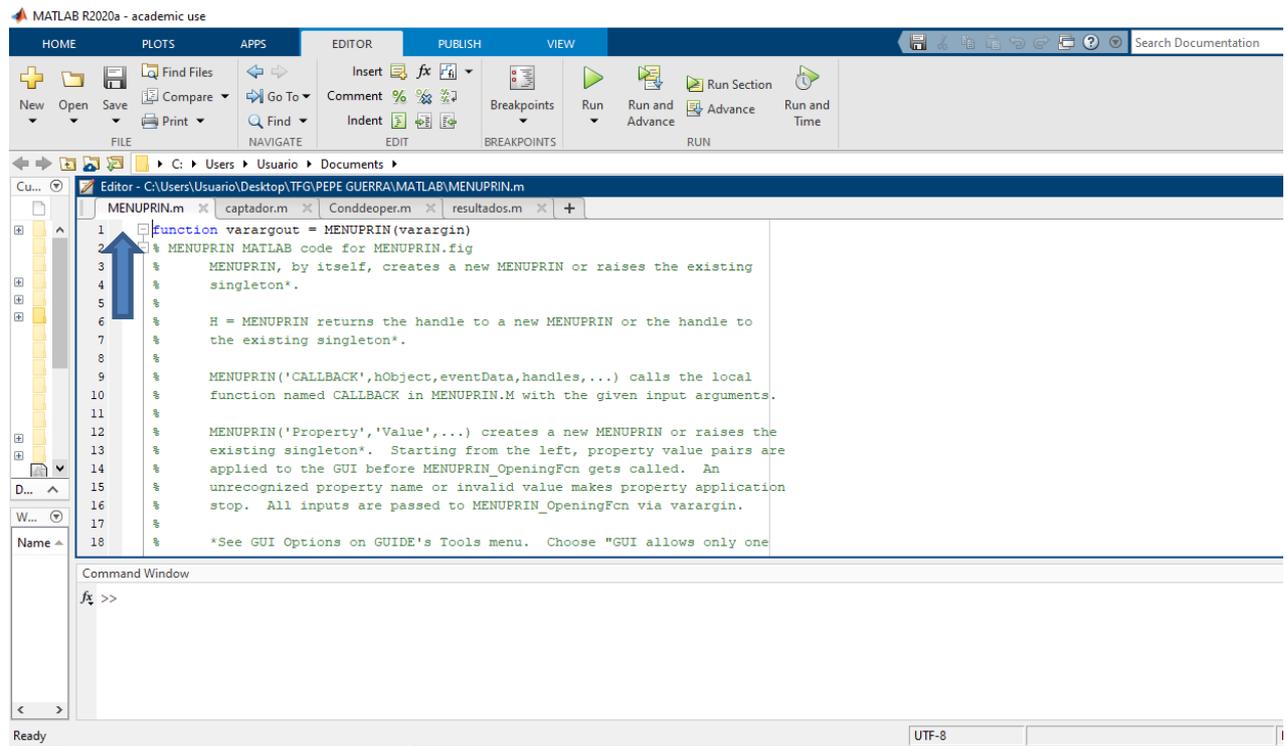


Figura 48: Primera pantalla del manual

2. A continuación, se pulsa el botón de Run, situado en la barra de herramientas superior, véase Figura 49:

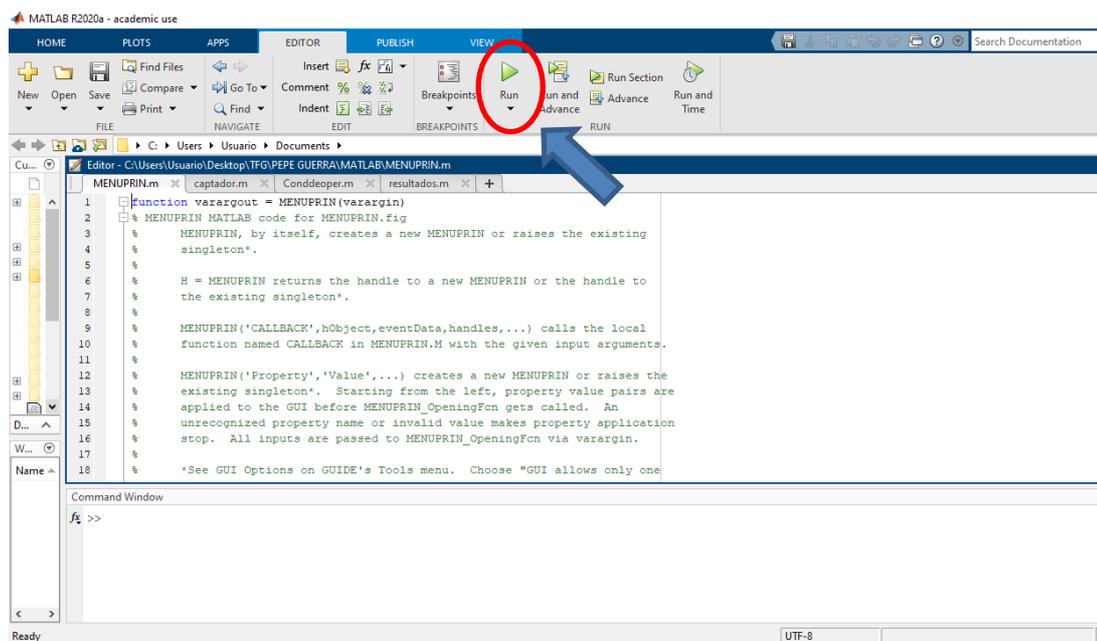


Figura 49: Primera pantalla manual (1)

2.1. Al pulsar el botón de Run, sale un cuadro adicional (véase Figura 50). Pulsar en Change Folder:

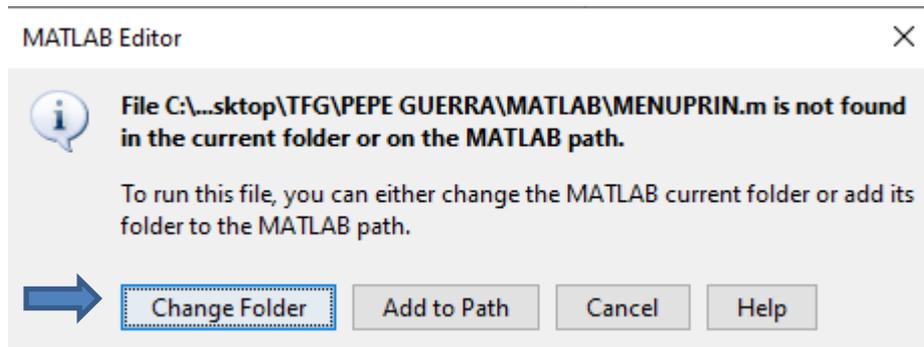


Figura 50: Cuadro adicional manual (2)

3. Una vez de ejecuta este script, aparecerá automáticamente la ventana del menú principal (véase Figura 51). Para comenzar a introducir los datos, el usuario comenzará por aquellos relevantes al captador. Se pulsa el botón de *CAPTADOR*:



Figura 51: Menú principal según manual

4. De forma automática, aparecerá la ventana con los datos a introducir por el usuario (véase Figura 52). En esta ventana se encuentran dos botones: INICIO y OK. El primero de ellos, dirigirá al usuario al menú principal de nuevo, en cambio, el botón OK lo llevará a la siguiente pestaña: Condiciones de operación, una vez se hallan introducidos los datos de forma correcta:

Desarrollo de un programa de simulación en régimen permanente del comportamiento térmico de un captador solar plano

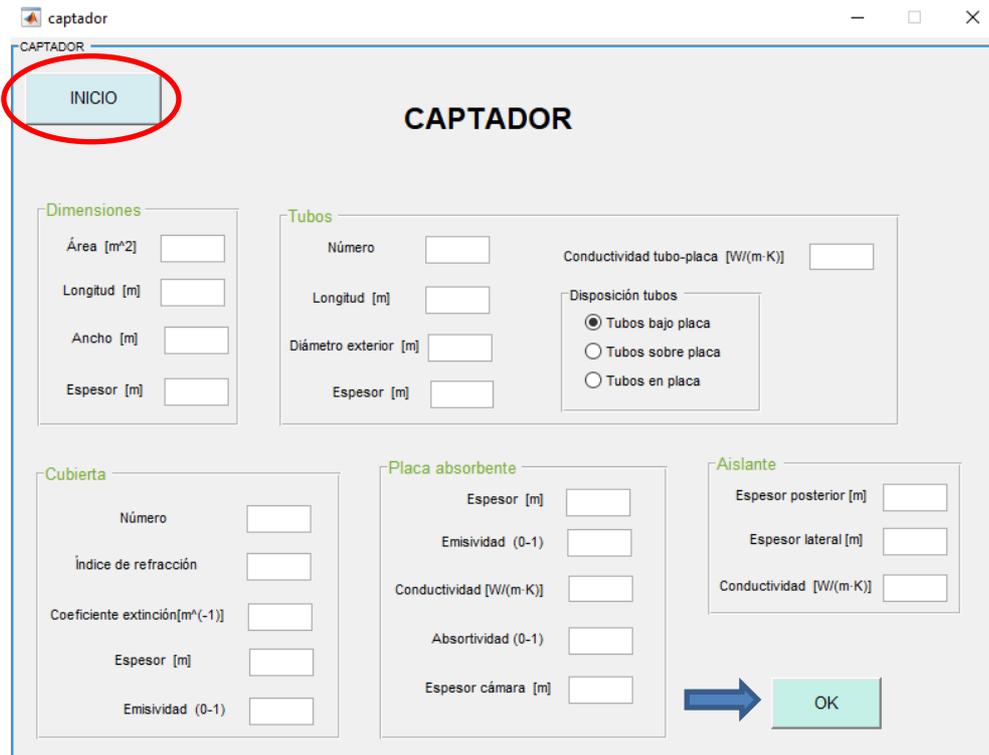


Figura 52: Ventana Captador según manual

4. A continuación, aparecerá la ventana de *Condiciones de operación*. De la misma forma, se introducirán los datos de esta ventana y se pulsará OK. También consta de un botón de Inicio por si el usuario necesita volver al menú principal (véase Figura 53):

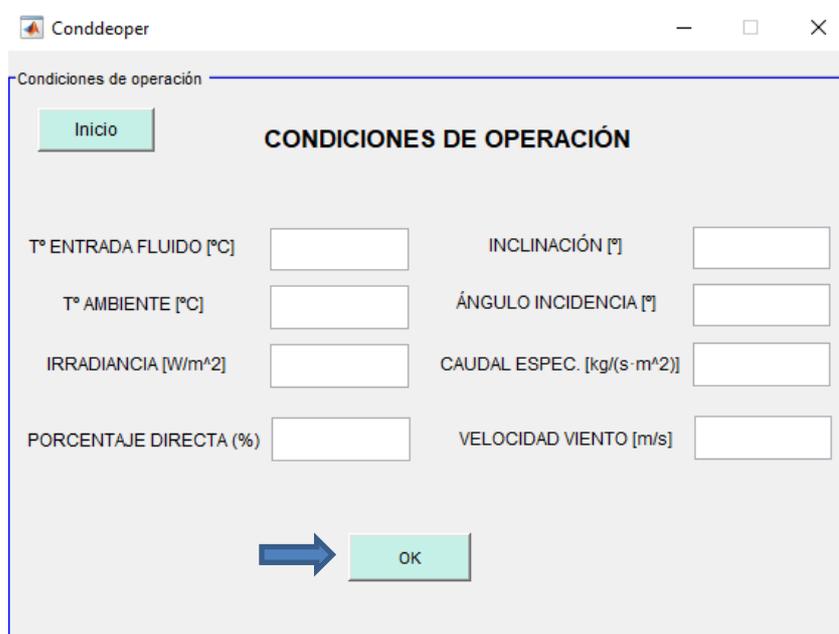


Figura 53: Ventana Condiciones de operación según manual

5. Finalmente, aparecerá de forma automática la ventana de *RESULTADOS*. El usuario pulsará el botón **CALCULAR** para obtener los resultados referentes a los datos introducidos en las dos ventanas anteriores. Una vez se hallan visualizado los datos y se quiera volver a introducir nuevos, el usuario deberá clicar en el botón de **INICIO** que lo llevará de nuevo al menú principal (véase Figura 54):



Figura 54: Ventana Resultados según manual