

SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN PANEL SOLAR. CORRELACIÓN CON DATOS EXPERIMENTALES

Pablo Hernández Fernández^[*], Miguel Ángel Rey Ronco^[], Teresa de Jesús Alonso Sánchez^[**]**

[*] Alumno

[**] Tutores

e-mail: uo209313@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

El objetivo fundamental del presente trabajo es la modelización teórica del comportamiento de un colector solar térmico plano, pretendiendo así llegar a obtener una ecuación que describa, de la manera más real posible, la el comportamiento térmico del panel.

Se dispone de gran cantidad de mediciones reales con las que comparar los resultados teóricos obtenidos para tratar de determinar que parámetros poseen mayor o menor importancia.

Las mediciones reales de partida se han realizado en condiciones diferentes, variando en general la distancia existente entre la placa absorbente y la cubierta de cristal del panel.

Se tratará de simplificar los modelos teóricos para reducir su complejidad de la manera más exacta posible a la realidad, pero simplificándolas para reducir su complejidad y no tener que recurrir a ningún software de elementos finitos para su determinación, sin que ello suponga una reducción de precisión en el modelo.

Palabras clave: colector solar, placas planas, modelización, modelos simplificados.

ABSTRACT

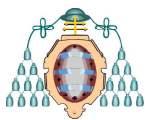
The main objective of this paper is the theoretical modeling of the behavior of a flat solar thermal collector, trying to reach an equation that describes, as realistic as possible, the energetic evolution on the panel.

A lot of experimental measurements will be compared with results obtained by theoretical methods. This will determine which parameters are most relevant in theoretical models and which have a lower relevance.

Experimental measurements were performed under different conditions, varying the distance between the absorber plate and the glass cover of the panel.

Theoretical models are adjusted to reality, making simplifications to reduce complexity. No finite element resolution software has been used for obtaining the theoretical models.

Keywords: solar collector, flat plate, modeling, simplified models.



INTRODUCCIÓN

El colector solar de placas planas protegidas es un dispositivo ampliamente utilizado para la transformación de energía solar en energía térmica debido a su sencillez estructural y a su bajo costo de fabricación y mantenimiento.

El captador se ubica en una caja rectangular, cuya cara expuesta al sol está cubierta por un vidrio (habitualmente templado), mientras que las cinco caras restantes son opacas y están aisladas térmicamente. Dentro de la caja, expuesta al sol, se sitúa una placa metálica. Esta placa está unida o soldada a una serie de conductos por los que fluye un caloportador (generalmente agua, glicol, o una mezcla de ambos). A dicha placa se le aplica un tratamiento selectivo para que aumente su absorción de calor, o simplemente se pinta de negro.

Aprovechan tanto la radiación solar directa como la difusa, y al no disponer de sistemas de seguimiento solar, las placas se encuentran adecuadamente inclinadas respecto de la horizontal con la finalidad de mejorar la captación de la irradiación solar. Además, la superficie que absorbe la radiación solar es igual a la superficie que la capta porque no usan sistemas concentradores.

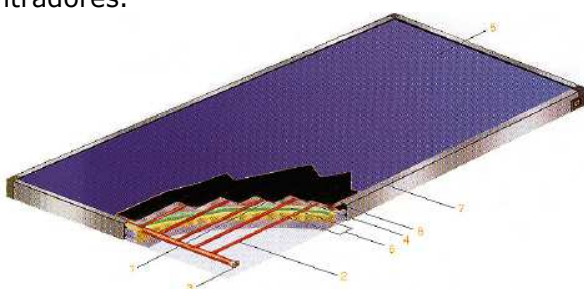


Ilustración 1: Colector solar placas planas

Al modelizar el comportamiento del colector, se pretende llegar a obtener una ecuación que describa, de la manera más real posible, el comportamiento térmico de dicho panel y resulta ser una herramienta de gran utilidad para predecir el comportamiento de los diferentes

componentes del sistema así como la optimización de materiales y dimensiones.

En el presente trabajo se obtendrán una serie de parámetros propios de un colector plano ubicado en la zona de Mieres, que permitan modelizar captadores solares planos y de esta manera, realizar estudios teóricos de viabilidad más precisos, sin necesidad de diseñar y montar captadores experimentales.

Para ello se dispone de gran cantidad de mediciones reales, realizadas en condiciones diferentes, con las que realizar un modelo diferente para cada uno de los distintos experimentos, con el objetivo de determinar que modelos se ajustan mejor a la realidad.

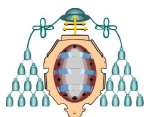
Una vez obtenidos los modelos, se tratará de ajustarlos de la manera más exacta posible a la realidad, es decir, intentar realizar pequeñas modificaciones en los parámetros que las distintas bibliografías recomiendan, con el fin de asimilar el comportamiento teórico al real.

Estos modelos aplican una temperatura media en la placa, por lo que no son válidos para obtener la distribución de las temperaturas en la propia placa. Aún así, estos modelos son mucho más simples desde el punto de vista matemático y son válidos

- | |
|-----------------------------|
| 1 - SUPERFICIE de ABSORCIÓN |
| 2 - RED de CONDUCTOS |
| 3 - CONEXIÓN de TUBERÍAS |
| 4 - PERFIL de ALUMINIO |
| 5 - CAPTADOR SOLAR |
| 6 - AISLAMIENTO |
| 7 - CARCASA |
| 8 - SELLADO |
| 9 - PARTE TRASERA |

para calcular instalaciones de ACS

Como se había comentado antes, los captadores solares térmicos se emplean para calentar agua sanitaria (ACS) y por tanto, llevan acoplados una serie de tubos que recogen el calor aportado por la placa absorbente mediante un fluido caloportador.



Sin embargo, el colector que será motivo de estudio, carece de este sistema de tubos, por lo que no se estudiarán las pérdidas sufridas en dicha transmisión de calor.

Es necesario obtener los valores de los ángulos horarios (H), como las diferentes declinaciones solares (δ) para obtener la radiación. Para ello se usan las siguientes ecuaciones:

$$H = 180 - 15 \cdot t \quad (1)$$

$$\delta = 23^{\circ}27' \cdot \sin\left(360 + \frac{284 + d}{365}\right) \quad (2)$$

MÉTODO TRABAJO

Se determinarán las diferentes ganancias y pérdidas energéticas sufridas por el colector solar plano, con el objetivo de generar una ecuación, que sea capaz de reflejar un balance térmico total de la placa absorbente de dicho colector. Cuando se determine dicha ecuación, se procederá a su resolución empleando los métodos de cálculo que se consideren oportunos y eficaces.

En líneas generales, la metodología llevada a cabo en este trabajo se resume en los siguientes puntos:

Siendo t (1) las horas de un día d (2). Se obtiene:

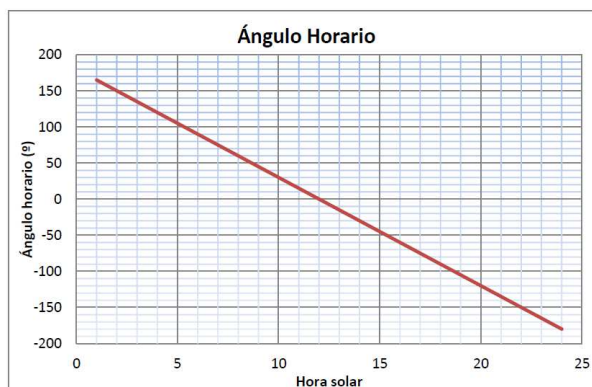


Ilustración 2: Evolución temporal del ángulo horario

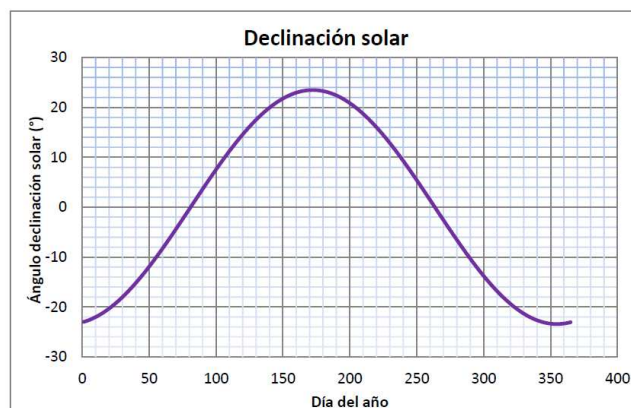


Ilustración 3: Evolución temporal del ángulo de declinación solar

- Determinación de la energía proveniente del Sol que es capaz de captar el panel (Irradiación solar).
- Cálculo de las diferentes pérdidas energéticas sufridas por la placa absorbente:
 - Pérdidas por conducción.
 - Pérdidas por convección.
 - Pérdidas por radiación.
- Resolución de la ecuación diferencial a la que da lugar el balance energético

❖ Irradiación solar

La placa solar con la se han realizado los experimentos se encuentra situada en la latitud $43^{\circ} 14' 31''$ ($43,24^{\circ}$) y se ha empleado una determinada constante solar (G_0), recomendada por la biografía consultada, de 1353 W/m^2 , que representa el flujo medio de energía solar por unidad de área que incide sobre la atmósfera terrestre cuando el planeta se encuentra a su distancia media del Sol.

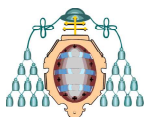
Se puede obtener los valores de radiación directa e indirecta sobre el plano horizontal mediante las siguientes ecuaciones:

$$I_{DH} = G_0 \cdot t_d \cdot \sin A \quad (3)$$

$$I_{difH} = G_0 \cdot (0,2170 - 0,2939 \cdot t_d) \cdot \sin A \quad (4)$$

Donde:

$$t_d = a \cdot e^{\frac{-b}{\sin A}} \quad (5)$$



Siendo a y b de la ecuación (5) parámetros característicos de las condiciones climatológicas locales determinados mediante criterios estadísticos, reflejados en la tabla 1:

Estado del cielo	Despejado	Normal	Algo cubierto (zona industrial)
a	0,87	0,88	0,91
b	0,17	0,26	0,43

Tabla 1: Parámetros del coeficiente de transmisión atmosférica para radiación directa

Se toman como valores iniciales a=0,84 y b=0,18

Sin embargo, los colectores solares se colocan inclinados para captar más radiación. En este caso, el colector solar forma un ángulo de 47° respecto a la horizontal (ilustración 4) y su orientación presenta una desviación de 5,5° respecto al sur geográfico (ilustración 5):

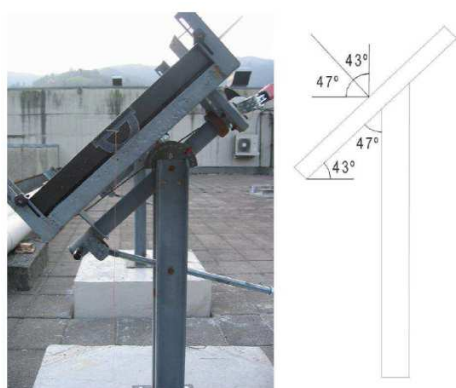


Ilustración 4: Ángulo de inclinación del colector solar

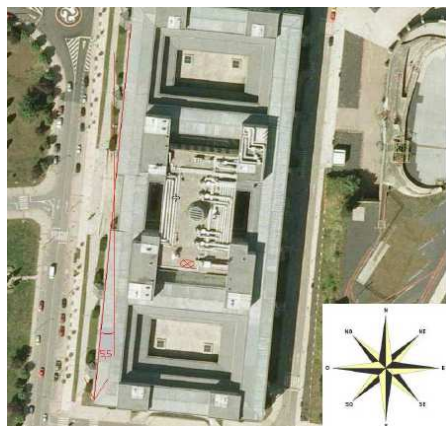


Ilustración 5: Orientación del colector solar

Se obtienen los nuevos valores de radiación directa y difusa para el plano inclinado:

$$I_{DI} = G_0 \cdot t_d \cdot (\sin \theta \cos A \cos(Z - \zeta) + \cos \theta \sin A) \quad (6)$$

$$I_{difI} = I_{difH} \cdot \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right) \quad (7)$$

$$I_{albeldo} = I_{TotalH} \cdot r \cdot \left(\frac{1 - \cos \theta}{2} \right) \quad (8)$$

$$I_{TotalH} = I_{DH} + I_{difH} \quad (9)$$

Donde r (8) es el coeficiente de reflexión del suelo, que depende del tipo de terreno predominante en el emplazamiento del colector. Se selecciona un valor de 0,25 debido a las características del emplazamiento y a la tabla 2:

Terreno	Albedo
Suelo desnudo	0,15 - 0,20
Praderas	0,25 - 0,45
Nieve pisada	0,60
Nieve virgen	0,90

Tabla 2: Valores del coeficiente de reflexión del suelo

Con todo esto, se obtiene el siguiente gráfico con las evoluciones temporales a lo largo del año de las radiaciones directas, difusas y totales, que inciden, tanto sobre el plano horizontal, como sobre el plano inclinado:

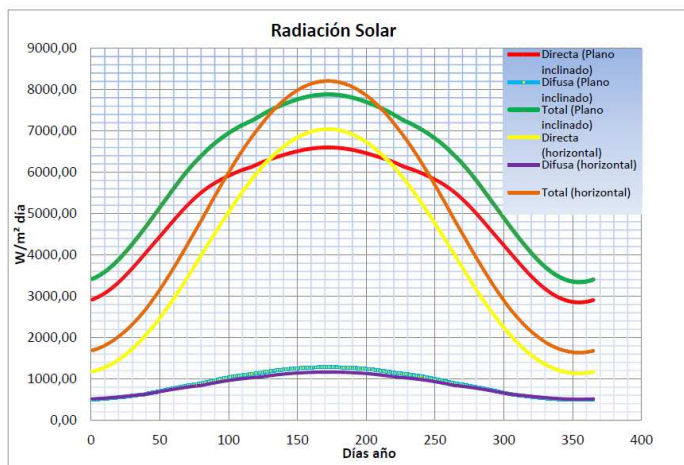
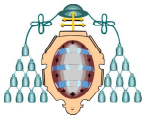


Ilustración 6: Radiaciones solares a lo largo de un año



Se busca una fórmula que permita la aproximación de las gráficas radiación solar para cada uno de los días del año y para ello se obtiene una función genérica, que aproxime todos los días del año de manera precisa variando sus coeficientes.

La radiación total incidente sobre un plano inclinado a lo largo de un día sigue una distribución como la que se puede observar en la Ilustración 7:

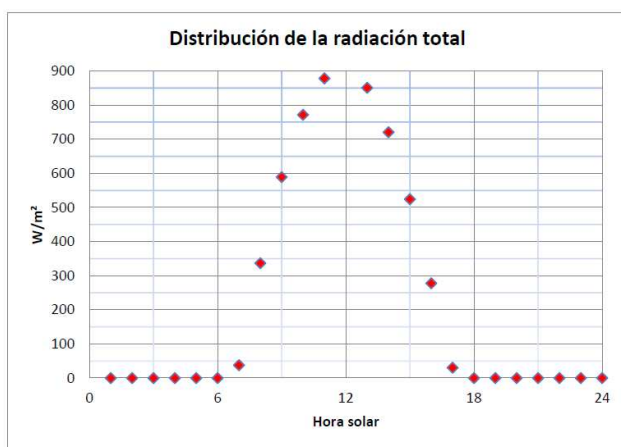


Ilustración 7: Distribución de la radiación total incidente a lo largo del día

Dicha distribución se asemeja a una función de Fourier de segundo orden:

$$I_{Fourier} = a_0 + a_1 \cdot \cos(\omega t) + b_1 \cdot \sin(\omega t) + a_2 \cdot \cos(2\omega t) + b_2 \cdot \sin(2\omega t) \quad (10)$$

Esta función depende de 6 coeficientes que variarán para cada uno de los días que se proceda a estudiar.

Para determinar la energía total absorbida por la placa del colector basta con multiplicar la función obtenida por el área del panel (0,25 m²), la transmisividad del vidrio (0,95) y la absorptividad de la placa de cobre (0,95):

$$I = A_{placa} \cdot \tau \cdot absorptividad \cdot I_{Fourier} \quad (11)$$

$$I = 0,225625 \cdot [a_0 + a_1 \cdot \cos(\omega t) + b_1 \cdot \sin(\omega t) + a_2 \cdot \cos(2\omega t) + b_2 \cdot \sin(2\omega t)] \quad (12)$$

❖ Pérdidas por conducción

Las pérdidas por conducción en el panel son totalmente lineales. Considerando que la temperatura de la cara superior del aislante es igual a la temperatura de la placa absorbente y la de la cara inferior del poliestireno igual a la ambiente, se pueden estimar de la siguiente forma:

$$P_{cond} = A_{placa} \cdot \Delta T \cdot \frac{K}{L_{aisl}} = \frac{A_{placa} \cdot K}{L_{aisl}} \cdot (T_p - T_{amb}) \quad (13)$$

Siendo K el coeficiente de conductividad térmica de la capa de aislante (0,034 W/m²K) y L su grosor (0,031m).

Es necesario representar la temperatura ambiente como una función el tiempo. Esto es debido a que en la ecuación diferencial que va el comportamiento térmico del panel, sólo podrán existir funciones del tiempo y funciones de la temperatura de placa del panel.

Se comprueba que la distribución de Fourier de segundo orden se asemeja muy bien la evolución de la temperatura ambiente a lo largo de un día:

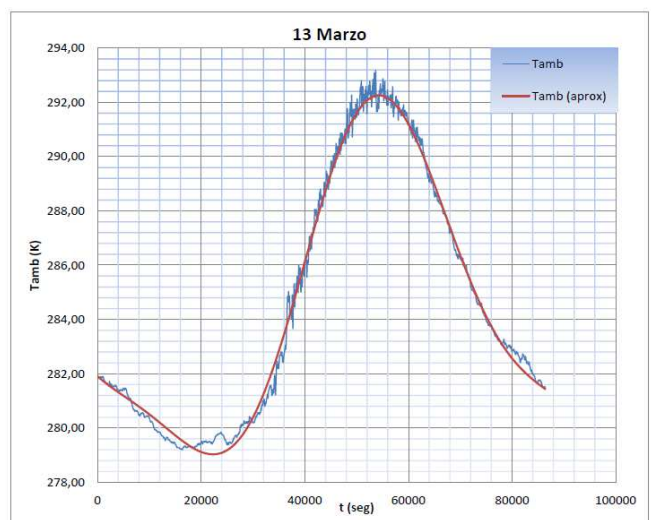
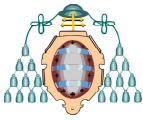


Ilustración 8: Temperatura ambiente medida experimentalmente y su ajuste



La ecuación final para determinar las pérdidas por conducción es:

$$P_{cond} = \frac{A_p \cdot K}{L_{aisl}} \cdot (T_p - [c_0 + c_1 \cdot \cos(zt) + d_1 \cdot \sin(zt) + c_2 \cdot \cos(2zt) + d_2 \cdot \sin(2zt)]) \quad (14)$$

Donde:

$$\frac{A_{placa} \cdot K}{L_{aisl}} = 0,2742 \quad (15)$$

El tiempo ha de estar definido en su unidad del Sistema Internacional, es decir, en segundos, mientras que los parámetros c_0 , c_1 , d_1 , c_2 , d_2 y z serán variables en función del día de estudio.

❖ Pérdidas por convección

Las pérdidas por convección miden la energía que se pierde desde la placa absorbente hacia la capa de aire que hay en el cristal y dicha placa. Se pueden determinar mediante la siguiente ecuación:

$$P_{conv} = h \cdot A_{placa} \cdot \Delta T = h \cdot A_{placa} \cdot (T_p - T_{cristal}) \quad (16)$$

La temperatura del cristal se debe representar o en función de la temperatura ambiente o en función de la temperatura de la placa. La segunda opción es más sencilla e induce a obtener menos errores.

Se obtiene dicha relación bastante aproximada mediante unas medidas experimentales de la temperatura de la placa y del cristal.

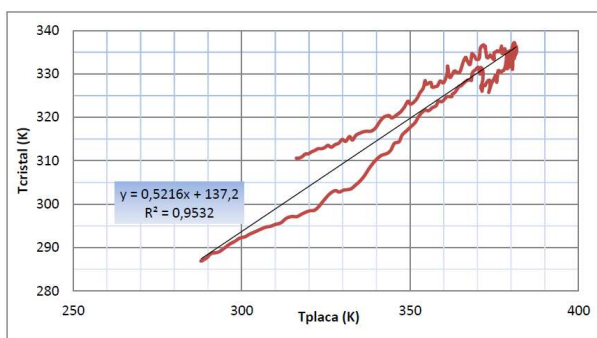


Ilustración 9: Relación entre la temperatura de la placa y el cristal

Dicha relación presenta un error inferior al 3%:

$$T_{cristal} = 0,5216 \cdot T_p + 137,2 \quad (17)$$

Para calcular el coeficiente de convección (h), se hace uso de las ecuaciones propuestas por Hollands y los valores de viscosidad cinemática y coeficiente de conductividad térmica del aire propuestas por Mills:

$$h = \frac{Nu_L \cdot K_a}{L_a} \quad (18)$$

$$Ra_L = \frac{\beta \cdot (T_p - T_{cristal}) \cdot g \cdot L_a^2}{\nu^2} \cdot Pr \quad (19)$$

$$Nu_L = 1 + 1,44 \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra_L \cdot \cos \theta} \right] \left[1 - \frac{1708 \cdot (\sin 1,8\theta)^{1,6}}{Ra_L \cdot \cos \theta} \right] + \left[\left(\frac{Ra_L \cdot \cos \theta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (20)$$

K (W/m·K)	$\nu \cdot 10^6$ (m/s)	T media (K)
0,0249	13,06	270
0,0255	13,91	280
0,0261	14,77	290
0,0267	15,66	300
0,0274	16,54	310
0,0281	17,44	320
0,0287	18,37	330
0,0294	19,32	340
0,03	20,3	350

Tabla 3: viscosidad cinemática y conductividad térmica del aire a distintas temperaturas, según Mills

Siendo β el inverso de la temperatura media, Pr el número de Prandtl (de valor 0,69, en este caso) y L_a la longitud de la capa de aire (0,017m).

Todos estos parámetros se introducen en la ecuación (16), dando como resultado una distribución de las pérdidas de de conducción en el panel en función de la temperatura de la placa.

Dicha distribución se puede simplificar como una función lineal que presenta un error muy pequeño en la zona de trabajo del panel, simplificando así las ecuaciones.

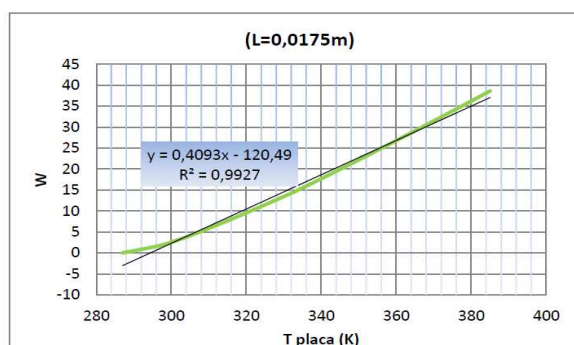
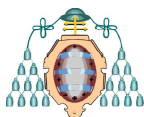


Ilustración 10: Distribución pérdidas de convección y su linealización

Por tanto, la ecuación final para determinar las pérdidas por convección es:

$$P_{conv} = 0,4093 \cdot T_p - 120,49 \quad (17)$$

❖ Pérdidas por radiación

Las pérdidas por radiación poseen una gran importancia, pero son requeridas unas consideraciones previas.

El colector solar emite radiación electromagnética hacia todas las direcciones visibles desde la placa, por lo que se necesita conocer el porcentaje de dicha radiación que va a parar al suelo y el que va a parar al cielo.

Mediante el uso de una estación total, se determina el perfil topográfico de las montañas locales en donde se encuentra el colector, representándolo en una proyección polar equiareal.

Dichos datos se obtienen para el plano horizontal, por lo que es necesario transformarlos al plano del colector, inclinado 43° respecto a la horizontal

En la ilustración 11, se muestra el perfil de las montañas (en gris) y la parte de la bóveda celeste libre de obstáculos (en azul) correspondiente al plano inclinado del colector.

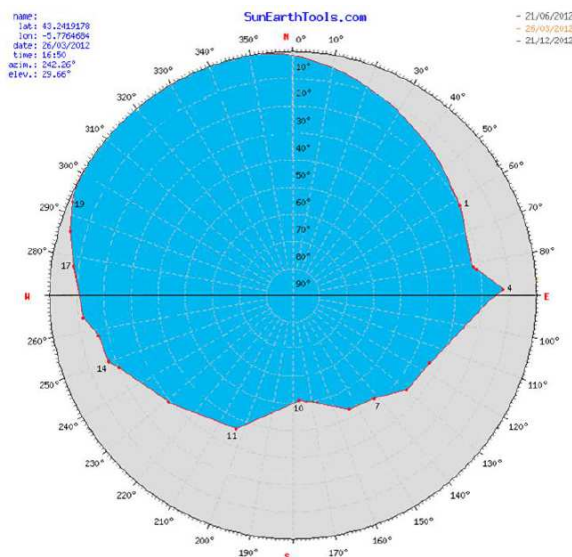


Ilustración 11: Perfil montañas y bóveda celeste libre para el plano del colector solar

Se determina que un 62,02% del total de la bóveda celeste corresponde a parte libre (cielo) y el 37,98% restante al perfil montañoso

Con esto se obtiene la ecuación de las pérdidas por radiación:

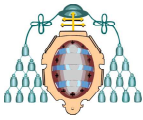
$$P_{rad} = A_p \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot [0,6202 \cdot (T_p^4 - T_{ci}^4) + 0,3798 \cdot (T_p^4 - T_{amb}^4)] \quad (18)$$

Siendo σ la constante de Stefan-Boltzmann, ε la emisividad de la placa absorbente (0,85, medida experimentalmente) y T_{ci} la temperatura del cielo (243°K a unos 8000m de altura).

Se busca una simplificación de la ecuación (18) para obtener una expresión que permita obtener una ecuación diferencial que sea resoluble analíticamente. Se usa, en este caso, una distribución lineal del tipo $P_{rad}=A \cdot T_p+B$

Considerando la temperatura del cielo constante y la del ambiente fija para cada linealización, se obtiene la ecuación final para determinar las pérdidas por radiación:

$$P_{rad} = 2,031 \cdot T_p - 0,4737 \cdot T_{amb} - 451,09 \quad (19)$$



Hay que tener en cuenta que la linealización realizada en la ecuación (19) sólo es válida en el entorno del punto de funcionamiento de la placa: no es válida para puntos fuera del funcionamiento.

❖ Balance energético

El balance final de energía de la placa es:

$$I - P_{cond} - P_{conv} - P_{rad} = m_p \cdot C_p \cdot \frac{dT_p}{dt} \quad (20)$$

En la ecuación (20) se ha introducido un elemento diferencial para poder tener en cuenta la inercia térmica que sufre la placa al enfriarse y calentarse.

Dadas las ecuaciones (12), (14), (17), (19) y (20):

$$432,13 \cdot \frac{dT_p}{dt} = 0,22 \cdot \left[\begin{array}{l} a0 + a1 \cdot \cos(\omega t) + \\ + b1 \cdot \sin(\omega t) + a2 \cdot \cos(2\omega t) + \\ + b2 \cdot \sin(2\omega t) \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} c0 + c1 \cdot \cos(z t) + \\ + d1 \cdot \sin(z t) + c2 \cdot \cos(2z t) + \\ + d2 \cdot \sin(2z t) \end{array} \right] \quad (21)$$

Se representa la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$\frac{dT_p}{dt} + p(t) \cdot T_p = f(t) \quad (22)$$

$$\frac{dT_p}{dt} + 6,3 \cdot 10^{-3} \cdot T_p = 1,328 + 2,31 \cdot 10^{-3} \cdot \left[\begin{array}{l} 0,2256 \cdot (a0 + a1 \cdot \cos(\omega t) + b1 \cdot \sin(\omega t) + \\ + a2 \cdot \cos(2\omega t) + b2 \cdot \sin(2\omega t)) + \\ + 0,7479 \cdot (c0 + c1 \cdot \cos(z t) + d1 \cdot \sin(z t) + \\ + c2 \cdot \cos(2z t) + d2 \cdot \sin(2z t)) \end{array} \right] \quad (23)$$

Integrando la ecuación diferencial lineal de primer orden (23):

$$T_p(t) = e^{-\int p(t) \cdot dt} \cdot \left(\int f(t) \cdot e^{\int p(t) \cdot dt} \cdot dt + K \right) \quad (24)$$

Se obtiene la ecuación final del panel:

$$T_p = 2,31 \cdot 10^{-3} \cdot \left[0,2256 \cdot a1 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(\omega t) + w \cdot \sin(\omega t)}{(6,3 \cdot 10^{-3})^2 + w^2} + \right. \\ + 0,2025 \cdot b1 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(\omega t) + w \cdot \cos(\omega t)}{(6,3 \cdot 10^{-3})^2 + w^2} + \\ + 0,2256 \cdot a2 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(2\omega t) + 2 \cdot w \cdot \sin(2\omega t)}{(6,3 \cdot 10^{-3})^2 + 4 \cdot w^2} + \\ + 0,2256 \cdot b2 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(2\omega t) + 2 \cdot w \cdot \cos(2\omega t)}{(6,3 \cdot 10^{-3})^2 + 4 \cdot w^2} + \\ + 0,7479 \cdot c1 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(z t) + z \cdot \sin(z t)}{(6,3 \cdot 10^{-3})^2 + z^2} + \\ + 0,7479 \cdot d1 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(z t) + z \cdot \cos(z t)}{(6,3 \cdot 10^{-3})^2 + z^2} + \\ + 0,7479 \cdot c2 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(2z t) + z \cdot \sin(2z t)}{(6,3 \cdot 10^{-3})^2 + 4 \cdot z^2} + \\ + 0,7479 \cdot d2 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(2z t) + z \cdot \cos(2z t)}{(6,3 \cdot 10^{-3})^2 + 4 \cdot z^2} + \\ \left. + \frac{0,2256 \cdot a0 + 0,7479 \cdot c0}{6,3 \cdot 10^{-3}} \right] + \frac{1,328}{6,3 \cdot 10^{-3}} + K \quad (25)$$

Siendo K:

$$K = 300 - \frac{1,328}{6,3 \cdot 10^{-3}} - 2,31 \cdot 10^{-3} \cdot \left[0,2256 \cdot a1 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^{-3}}{(6,3 \cdot 10^{-3})^2 + w^2} - \right. \\ - 0,2256 \cdot b1 \cdot \frac{w}{(6,3 \cdot 10^{-3})^2 + w^2} + 0,2256 \cdot a2 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^{-3}}{(6,3 \cdot 10^{-3})^2 + 4 \cdot w^2} + \\ + 0,2256 \cdot b2 \cdot \frac{2 \cdot w}{(6,3 \cdot 10^{-3})^2 + 4 \cdot w^2} + 0,7479 \cdot c1 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^{-3}}{(6,3 \cdot 10^{-3})^2 + z^2} - \\ - 0,7479 \cdot d1 \cdot \frac{z}{(6,3 \cdot 10^{-3})^2 + z^2} + 0,7479 \cdot c2 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^{-3}}{(6,3 \cdot 10^{-3})^2 + 4 \cdot z^2} + \\ \left. + 0,7479 \cdot d2 \cdot \frac{2 \cdot z}{(6,3 \cdot 10^{-3})^2 + 4 \cdot z^2} + \frac{0,2256 \cdot a0 + 0,7479 \cdot c0}{6,3 \cdot 10^{-3}} \right] \quad (26)$$

Sustituyendo los valores para un día concreto:

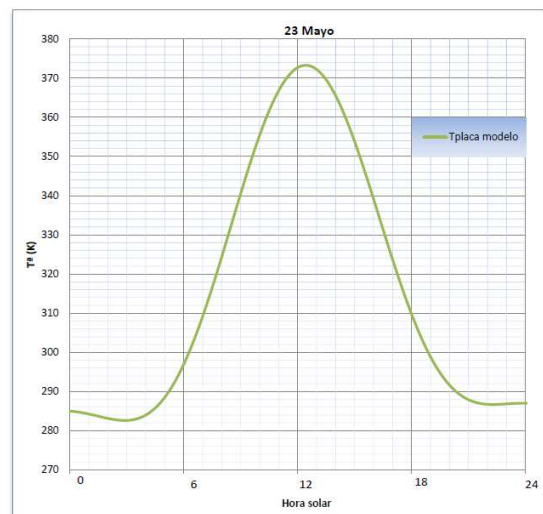
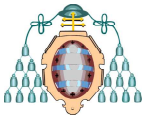


Ilustración 12: Evolución teórica de la temperatura del 23 de Mayo



Se trata de una función similar, en cuanto a forma a la irradiación solar, que posee un máximo en torno a las 12:30 (hora solar), lo cual concuerda perfectamente con la teoría, ya que la irradiación es máxima hacia las 12:00 pero la placa necesita cierto tiempo para calentarse debido a la inercia térmica.

El valor máximo alcanzado por la temperatura de la placa es de casi 374 K (101 °C), resultado lógico si se tiene en cuenta la época del año y las temperaturas que suelen alcanzar los colectores solares.

Sin embargo, el ajuste no se puede considerar satisfactorio hasta que no se compare con los datos reales medidos. Para ello, se han de generar los modelos de cada uno de los días a estudiar.

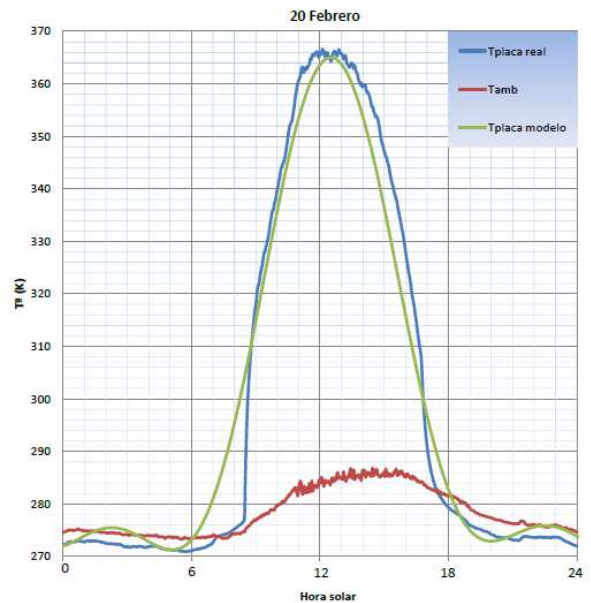


Ilustración 14: Comparación modelo-realidad para el 20 de Febrero

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se dispone de datos experimentales de la evolución de la temperatura ambiente y la de la placa a lo largo de varios días. Es necesario comparar estos datos experimentales con los resultados teóricos que se pueden obtener con la modelización matemática para comprobar la precisión y validez de dicha modelización.

Se procede a graficar la temperatura de placa (azul) y la temperatura ambiente (roja) medidas, junto con el modelo teórico de la evolución de la temperatura de placa (verde) de varios días diferentes:



Ilustración 13: Meteorología existente en los días comparados

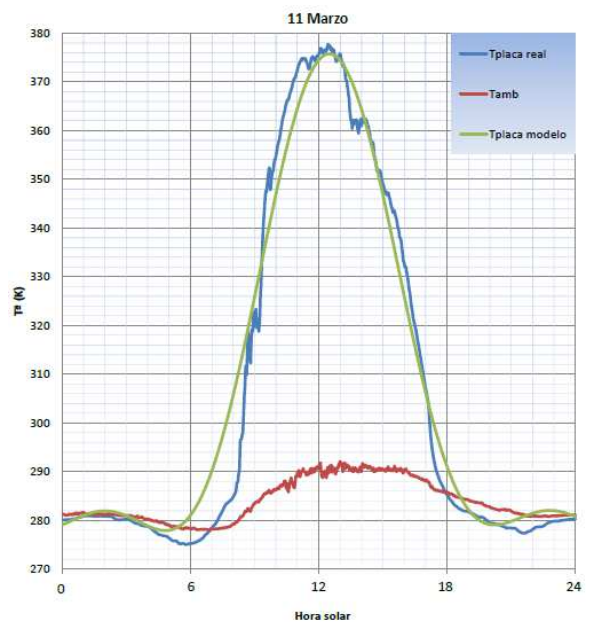


Ilustración 15: Comparación modelo-realidad para el 11 de Marzo

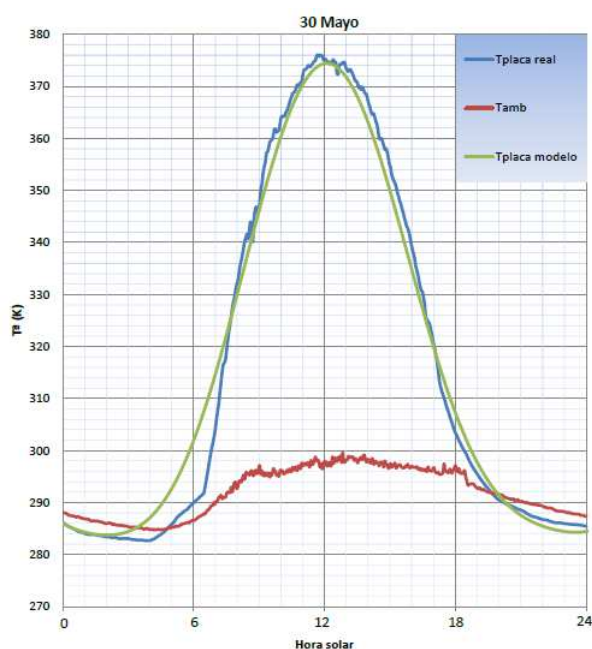
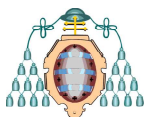


Ilustración 16: Comparación modelo-realidad para el 30 de Mayo

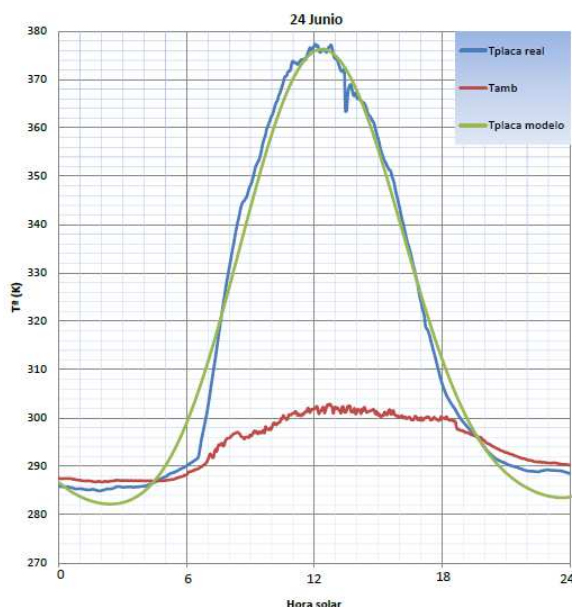


Ilustración 17: Comparación modelo-realidad para el 24 de Junio

A la vista de los resultados obtenidos conviene mencionar una serie de aspectos:

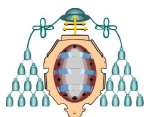
- En general, los modelos se ajustan a la realidad de una manera satisfactoria teniendo en cuenta los límites lógicos y simplificaciones realizadas en este trabajo.
- Se observa mayor precisión en los modelos, conforme se avanza hacia el verano. Esto puede deberse o bien a que la irradiación incidente está mejor determinada para los días con mayor altura solar, o bien a que el cielo en los días estivales tiende a presentar un estado más despejado, es decir, menor cantidad de nubes.
- Las gráficas que describen la evolución teórica de la temperatura de placa tienden a presentar ciertas ondulaciones características de las funciones senoidales y cosenoidales. Esto es debido a que se han empleado funciones de este tipo para modelizar tanto la temperatura ambiente como la irradiación solar incidente.
- Existe una correspondencia temporal altamente precisa entre la función teórica y la real. Dicha correspondencia se puede corroborar, sin más que observar donde alcanzan sus máximos una y otra función.

En definitiva, aunque los modelos podrían ajustarse en mayor medida a la realidad, se considera que son bastante precisos y por tanto aceptables.

Hay que tener en cuenta, la dificultad que entraña modelizar un proceso real, que es función de cientos de variables distintas, sin incurrir en coste económico alguno, simplemente apoyándose en datos medidos y en un análisis matemático exhaustivo.

CONCLUSIONES

Se pretendía realizar un modelado matemático de un proceso real, en concreto, del comportamiento de la temperatura de la placa absorbente de un colector solar plano, a lo largo del tiempo.



Por tanto, se trataba de obtener una función capaz de reflejar la evolución real de dicha temperatura a lo largo de un determinado período de tiempo y posteriormente, comparar dicha función con la evolución real de la temperatura de placa, obtenida mediante medición.

Para ello se asumieron una serie de simplificaciones, con el fin de obtener una solución asequible, en cuanto a complejidad se refiere.

Al comparar los resultados obtenidos con los reales, se pretendía corregir los parámetros citados por unos característicos de la zona en la que se encuentra situado el colector que ha sido sometido a estudio.

El objetivo de obtener dichos parámetros, reside en el hecho de poder realizar futuros estudios de viabilidad, con una mayor precisión, sin necesidad alguna de construir un panel experimental, con las grandes ventajas, tanto económicas como logísticas, que ello supone.

A la vista de los resultados obtenidos, es posible afirmar que, aunque los modelos teóricos no se ajustan a la perfección a los datos reales, si que estiman de una manera bastante precisa el comportamiento de la temperatura de la placa.

En general, los ajustes obtenidos se asemejan de una manera más acertada a los valores reales de lo que cabía esperar dadas las simplificaciones realizadas y el hecho de no haber empleado ningún tipo de software de elementos finitos para su determinación.

En conclusión, se han cumplido los objetivos marcados de una manera exitosa, ya que se han realizado una serie de modelos bastante precisos en un modelado matemático, sin incurrir en coste económico alguno.

NOMENCLATURA

G_0	constante solar, 1353 W/m^2
H	ángulo horario, $^\circ$
δ	declinación solar, $^\circ$

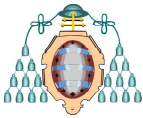
I_{DH}	irradiación directa sobre el plano horizontal, $\text{W/m}^2 \text{ día}$
I_{diffH}	irradiación difusa sobre el plano horizontal, $\text{W/m}^2 \text{ día}$
ϕ	complem. del ángulo rayos solares sobre plano inclinado, $^\circ$
θ	inclinación del panel respecto a la horizontal, $^\circ$
ζ	ángulo azimutal. Desviación de la superf. respecto al sur geo, $^\circ$
Φ	complem. del ángulo rayos solares sobre plano inclinado, $^\circ$
I_{Di}	irradiación directa sobre el plano inclinado, $\text{W/m}^2 \text{ día}$
I_{diffi}	irradiación difusa sobre el plano inclinado, $\text{W/m}^2 \text{ día}$
$I_{albeldo}$	irradiación difusa procedente del suelo, $\text{W/m}^2 \text{ día}$
I_{TotalH}	irradiación total incidente plano horizontal, $\text{W/m}^2 \text{ día}$
A_{placa}	área de la placa del panel solar, m^2
τ	transmisividad vidrio, 0,95
abs	absortividad placa de cobre, 0,95
K	Coef. conductividad térmica capa de aislante, $0,034 \text{ W/m}^2\text{K}$
L_{aisl}	grosor capa aislante térmico, 0,031m
h	entalpía en la capa de aire entre el cristal y la placa, $\text{W/m}^2\text{K}$
Nu_L	número de Nusselt
Ra_L	número de Rayleigh
Pr	número de Prandtl, 0,69
La	longitud capa de aire entre el cristal y la placa, 0,0175m
β	inverso temperatura media entre el cristal y la placa, K^{-1}
ϵ	emisividad placa absorbente colector solar, 0,85
σ	constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
T_{ci}	temperatura del cielo, a la altura donde existen cumulonimbos
T_{amb}	temperatura del ambiente
I	Potencia total incidente sobre la placa, W
P_{cond}	pérdidas por conducción, W
P_{conv}	pérdidas por convección, W
P_{rad}	pérdidas por radiación, W
C_p	Calor específico cobre, 387 J/kg K
m_p	masa de la placa, 1,1166 kg

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis tutores y a mis padres

REFERENCIAS

[1] J. L. Prieto, J. C. Martínez-García, D. García, R. Santoro y A. Rodríguez. 2009. MAPA SOLAR DE ASTURIAS, Departamento de Física, Universidad de Oviedo.



[2] Rufes Martínez, P. "Energía solar térmica. Técnicas para su aprovechamiento". 2010. Ed. Marcombo.

[3] Mills A.F. "Transferencia de calor". 1995. Ed. Mc Graw-Hill

[4] Yunus A. Çengel, "Transferencia de calor". 2008

[5] Ramón Frederik G., "Apuntes de transferencia de calor". Universidad de Chile. (2006)

[6] José Antonio Aguilera Folgueiras. "Apuntes de Prácticas de Tecnología Energética". 2006. Ingeniería Industrial (5º), Departamento de Energía, Universidad de Oviedo.

[7] José Ramón Martínez Catalán. "Apuntes de Aplicaciones de la proyección estereográfica a la geofísica". 2001. Licenciado en Geología (4º). Departamento de Geología, Universidad de Salamanca.