



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

Estudio y caracterización de sistemas solares térmicos semiesféricos de nueva generación

Study and characterization of new generation semispherical thermal collectors

Máster de Física Aplicada: especialidad de Energías Renovables

Alumno: Ana Sofía Morillo Candás

(asmcandas@estumail.ucm.es)

Directores: Carlos Armenta Déu y Mohamed Khayet Souhaimi

(cardeu@fis.ucm.es)

(khayetm@fis.ucm.es)

Convocatoria: Septiembre 2012

Calificación:

Resumen

En este trabajo se ha llevado a cabo un análisis de un captador de geometría semiesférica con el fin de determinar el factor de interceptación de la irradiancia solar sobre una superficie de geometría curva y discontinua. Este factor de interceptación es fundamental a la hora de poder desarrollar un algoritmo que permita obtener la ecuación para el rendimiento de captadores de geometría esférica, dado que las expresiones existentes son únicamente válidas para captadores planos. Este ha sido uno de los objetivos fundamentales del trabajo y constituye la aportación más novedosa al conocimiento dentro del campo de la energía solar térmica.

Complementariamente, el desarrollo del trabajo ha perseguido la caracterización de captadores solares térmicos de geometría semiesférica desde el punto de vista de su comportamiento térmico, por medio de su curva de rendimiento. El análisis de los resultados obtenidos a partir de dicha curva ha permitido determinar algunos de los parámetros más característicos de este tipo de captadores, como son su eficiencia óptica y su coeficiente global de pérdidas. Los valores obtenidos han mostrado buena concordancia con los valores teóricos, a partir de las propiedades de los materiales utilizados, y han permitido verificar los errores de cálculo que se producen cuando se emplea la ecuación convencional del rendimiento para captadores planos en este tipo de geometrías.

Palabras clave: Captador solar semiesférico, Energía solar térmica, Factor de captación Coeficiente de pérdidas térmicas, Balance energético, Rendimiento óptico, Rendimiento térmico.

Summary

This work has been aimed at developing the analysis of semi-spherical solar thermal collectors, with the goal of determining the interception factor of solar radiation onto a discontinuous surface of semi-spherical geometry. This factor is essential to develop the appropriate algorithm to obtain the efficiency curve for semi-spherical solar collectors, so the existing one is only valid for flat plate collectors. This has been one of the main goals of the work and it represents the most valuable contribution to the knowledge in the solar energy thermal field.

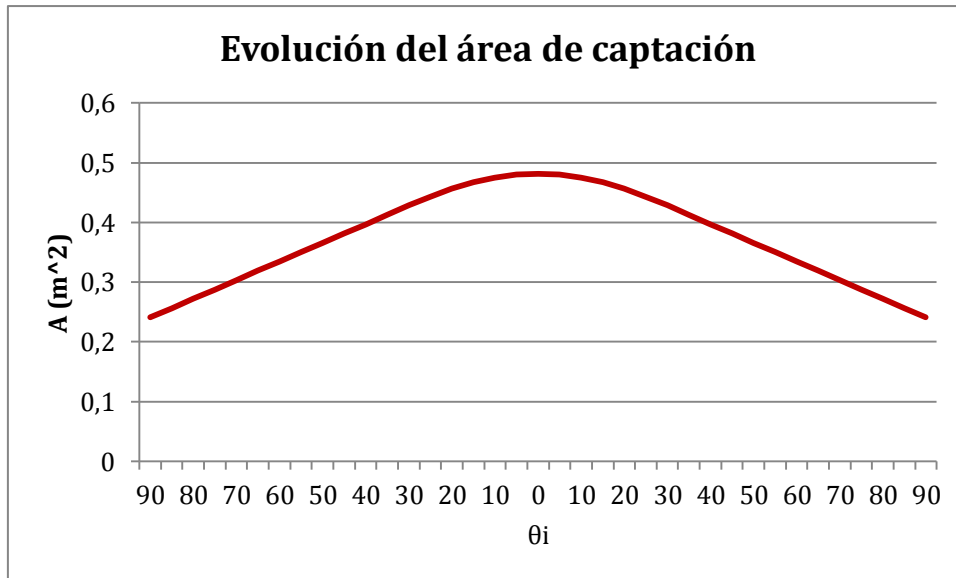
Additionally, the work has pursued the characterization of semi-spherical solar collectors as for their thermal performance, using the efficiency curve. The analysis of the experimental

results has allowed determining the optical efficiency and thermal losses coefficient of this type of collectors. The so obtained values have resulted in close agreement with theoretical ones, from the physical properties of the used materials, also showing the errors in the calculations when the flat plate collectors efficiency curve is used.

Keywords: Semi-spherical solar collector, Thermal solar energy, Interception factor, Thermal losses coefficient, Energy balance equation, Optic efficiency, Thermal efficiency.

Fe de erratas

La gráfica 1 de la página 34 ha de ser sustituida por la siguiente gráfica:



Índice:

1. Objetivos	Pág. 1
2. Introducción	Pág. 1
3. Consideraciones teóricas	Pág. 4
• Irradiancia solar	Pág. 4
• Ecuación de balance energético.....	Pág. 10
• Coeficiente de pérdidas.....	Pág. 12
• Rendimiento.....	Pág. 14
4. Dispositivo experimental	Pág. 15
• Descripción del captador y justificación del diseño.....	Pág. 15
• Descripción del sistema.....	Pág. 17
• Proceso de toma de datos	Pág. 18
5. Cálculos teóricos	Pág. 19
• Cálculo del área efectiva de captación	Pág. 19
• Cálculo de la irradiancia recibida.....	Pág. 31
• Cálculo del producto absorbancia-transmitancia.....	Pág. 32
6. Resultados experimentales.....	Pág. 33
• Medidas de temperatura.....	Pág. 33
• Medidas de irradiancia	Pág. 34
• Potencia recibida	Pág. 36
• Rendimiento.....	Pág. 37
7. Conclusiones	Pág. 42
8. Trabajo futuro	Pág. 43
9. Bibliografía	Pág. 44
10. Anexo.....	Pág. A1

1. Objetivos

Los objetivos planteados durante este trabajo son esencialmente dos. En primer lugar, estudiar teóricamente el comportamiento térmico de captadores solares semiesféricos desarrollando un algoritmo para determinar el área efectiva del captador, la irradiancia solar recibida y el balance energético de dichos captadores en distintas condiciones de operación. En segundo lugar, verificar la validez del algoritmo mediante ensayos experimentales y obtener la curva de rendimiento y el coeficiente global de pérdidas.

2. Introducción

Durante estos últimos años se ha ido incrementando paulatinamente el interés por la obtención de energía a partir de medios no tradicionales, más sostenibles y menos contaminantes, no sólo por parte de personas más concienciadas ecológicamente, sino simplemente por motivos económicos, ya que hasta ahora la energía que la mayor parte de la población mundial ha estado empleando se ha obtenido a partir de combustibles fósiles, sin embargo, éstos no son ilimitados y la previsible reducción de la reservas, el consiguiente aumento de precios y finalmente su agotamiento, hacen que sea necesario encontrar fuentes de energía alternativas. Del estudio de estas fuentes y su aprovechamiento se ocupa la disciplina de las energías renovables.

Dentro del consumo energético en general, una gran parte se produce en la obtención de agua caliente sanitaria, ACS, y en sistemas de calefacción. La energía solar térmica, entre otras opciones, es una posible solución al gasto energético en este capítulo, y en estos años se han desarrollado varios sistemas de captación solar, con diferentes diseños, y aplicaciones posibles, que aprovechan una fuente natural de calor, como es el sol. Nuestro trabajo analiza un nuevo modelo de captador, de simetría semiesférica, que pertenece a una última generación de captadores que intentan mejorar el rendimiento y la capacidad de captación, y reducir las pérdidas que se daban en los captadores tradicionales.

Los tipos de captadores solares que se pueden encontrar actualmente en el mercado son los siguientes:

- Captadores de placa plana CPP: Estos captadores constan de una o varias cubiertas de vidrio que dejan pasar la irradiancia visible, la cual incide sobre una placa absorbidora selectiva, que se

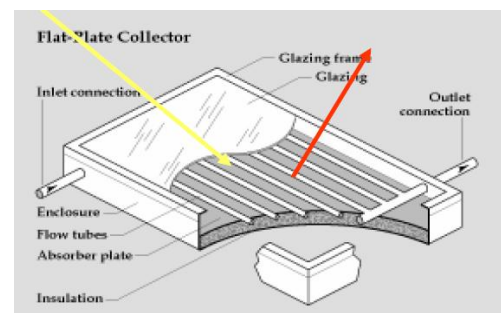


Figura 1: Esquema de un captador solar de placa plana

calienta y, por conducción, transfiere esta energía térmica hacia los conductos por los que fluye un fluido caloportador, que suele ser agua. El sistema está aislado por los laterales y el fondo y la cubierta de vidrio que impide el paso de la radiación infrarroja de regreso a la atmósfera. Estos sistemas presentan una temperatura de operación baja, que no suele superar los 75 u 80 °C en el mejor de los casos, por este motivo se han destinado a la producción de ACS o calefacción por aire caliente.

- Captadores parabólicos, CP o cilindro-parabólicos CCP: Son sistemas de concentración

basados en un reflector de simetría parabólica que concentra los rayos solares en el foco de la parábola, en el cual está el tubo captador con el fluido caloportador en su interior, que puede ser agua o un aceite sintético. Los sistemas cilindro-parabólicos tienen un factor de concentración inferior al de los parabólicos pero la circulación del fluido es más sencilla. Los

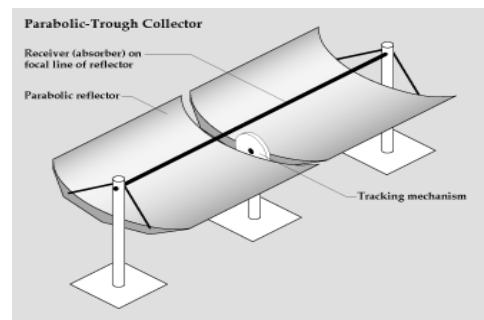


Figura 2: Esquema de un captador solar CCP

sistemas parabólicos tienen mayor factor de concentración, pero la circulación del fluido es compleja y eso hace que estos sistemas se empleen para otro tipo de aplicaciones como la obtención de electricidad mediante un motor Stirling o como cocinas solares.

Todos estos sistemas suelen incluir un sistema motorizado de seguimiento, que sigue el movimiento del sol a lo largo del día o a lo largo del año, ya que para optimizar el rendimiento, los rayos solares deben entrar prácticamente paralelos al eje de la parábola,

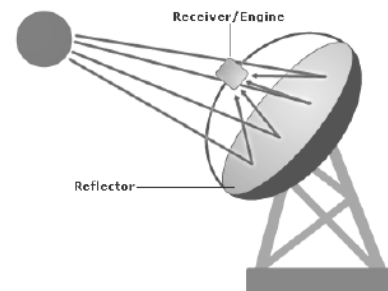


Figura 3: Esquema de un captador parabólico

dentro de un ángulo sólido no superior a 1°, y permiten alcanzar temperaturas de operación de entre 300 y 400 °C. Las aplicaciones de estos sistemas son variadas, desde sistemas de calefacción, aplicaciones industriales u obtención de electricidad en centrales termo-solares.

- Concentradores parabólicos compuestos CPC: Son un híbrido entre los captadores planos y los sistemas de concentración. Su estructura externa es semejante a la de los primeros, pero en vez de tener una placa absorbidora plana, tienen un espejo reflector que concentra la radiación en un foco. Su capacidad de concentración es menor que la

de los sistemas concentradores tradicionales por lo que alcanzan temperaturas más bajas que éstos, pero su gran ventaja es que no necesitan sistema de seguimiento y aunque el tiempo en el que están captando irradiancia solar es menor que en el caso de los captadores planos, permiten alcanzar temperaturas ligeramente superiores a los 100 °C, mayores que las obtenidas con los CPP con un tiempo de captación no mucho menor. Esto hace que sean ideales para aplicaciones térmicas como por ejemplo en sistemas de calefacción por agua caliente, aunque por ahora, su fabricación no está extendida por razones técnicas y económicas.

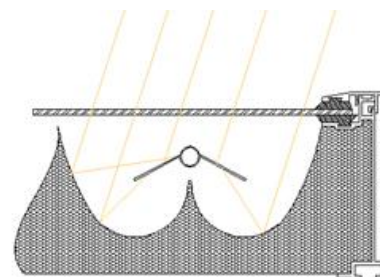


Figura 4: Sección de un captador CPC

- Campos de heliostatos y centrales de torre: Los campos de heliostatos son grandes conjuntos de espejos de gran tamaño que se orientan siguiendo el sol y que reflejan los haces solares hacia un punto concreto de una torre en la que está el sistema absorbedor. Son sistemas que alcanzan temperaturas muy altas, hasta de 4000 °C y que se emplean en instalaciones industriales especialmente en centrales termoeléctricas en las que se obtiene electricidad mediante turbinas que se mueven por el vapor producido gracias al calor obtenido en la torre.

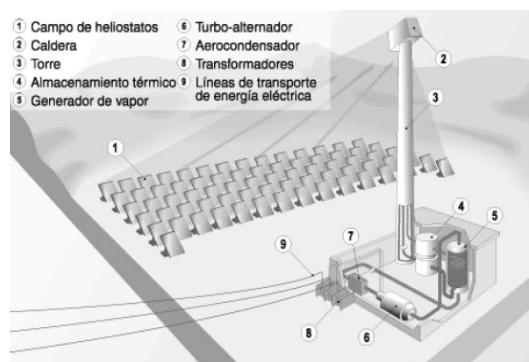


Figura 5: Central de torre y campo de heliostatos

- Nuevos modelos de captadores: Como hemos comentado anteriormente, se está investigando en nuevos diseños de dispositivos captadores, especialmente para aplicaciones de ACS y calefacción, entre los que está incluido el dispositivo que estudiamos en este trabajo. Muchos de ellos, como es nuestro caso, intentan aumentar el área de captación empleando geometrías esféricas o semiesféricas. En el Grupo de Energías Renovables ya se ha analizado un captador esférico, que ha mostrado tener numerosas ventajas frente a captadores planos de un tamaño equivalente. Entre ellas se encuentra el hecho de que su superficie de captación es un 75% mayor que la de un captador solar de placa plana cuya sección recta sea



Figura 6: Captador solar esférico

equivalente. Este diseño presenta un mayor aprovechamiento de la irradiancia difusa y del albedo, la luz reflejada en el suelo, por la parte trasera y lateral y sin tener sistema de seguimiento, siempre hay una sección del captador que recibe irradiancia solar de forma perpendicular al captador. Además los estudios llevados a cabo con anterioridad sobre este tipo de captadores han mostrado que el coeficiente global de pérdidas es ligeramente más bajo que el de muchos captadores de placa plana.

Una variante de los dispositivos de geometría esférica son los captadores solares semiesféricos que comparten con los anteriores el mismo tipo de simetría, pero que presentan la variedad de tener una superficie captadora discontinua, en lugar de la superficie continua que caracteriza a los captadores esféricos. La razón principal del nuevo diseño es reducir las pérdidas térmicas, manteniendo un área de captación adecuada para alcanzar los valores de temperatura necesarios y poder proporcionar el nivel de energía suficiente para a las aplicaciones a las cuales va destinado este tipo de captador.

3. Consideraciones teóricas

Los estudios teóricos realizados hasta ahora, citados en la bibliografía, y en los que nos vamos a basar se han hecho esencialmente sobre captadores de placa plana y en algunos casos sobre captadores de concentración. No hay por tanto un soporte teórico específico para los captadores de otras geometrías, así pues emplearemos los mismos conceptos y expresiones matemáticas que en el caso de los captadores planos y posteriormente estimaremos las diferencias entre estos y nuestro captador gráficamente.

Irradiancia solar

Con objeto de poder analizar el comportamiento de un captador solar y caracterizarlo adecuadamente, se hace necesario conocer la irradiancia que incide sobre su superficie absorbadora, lo que permitirá establecer la cantidad de energía recibida. Para ello, vamos a realizar un breve análisis de la irradiancia solar y de cómo varía según distintos parámetros.

- **Tipos de irradiancia y ecuaciones**

La irradiancia solar se clasifica en varios tipos, a saber:

G =Irradiancia global, que corresponde a la suma de todas las componentes.

B =Irradiancia directa (*beam*), que es la que alcanza la superficie absorbadora procedente directamente de sol sin sufrir desviaciones en su trayectoria.

D =Irradiancia difusa, es la que se difunde en la atmósfera a través de distintos mecanismos de dispersión, no presentando una dirección definida.

R =Irradiancia reflejada o albedo. Es la irradiancia reflejada por las superficies adyacentes al captador, como el suelo y las paredes próximas.

La ecuación genérica que relaciona los distintos tipos de irradiancia es:

$$G = B + D + R \quad (1)$$

Esta ecuación es válida para un plano perpendicular al haz de radiación directa, si el plano sobre el que incide de la luz tuviera cualquier otra inclinación la expresión se transformaría en:

$$G = B \cos(\theta_i) + D + R \quad (2)$$

Donde θ_i es el ángulo de incidencia, que es el ángulo que hay entre el haz de irradiancia directa y la normal al plano de incidencia.

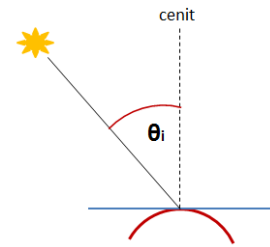


Figura 7: Representación del ángulo de incidencia

Estas ecuaciones son útiles en el caso de sistemas que distinguen entre los diferentes tipos de irradiancia, como puede ser por ejemplo el caso de los sistemas de concentración que aprovechan únicamente la irradiancia directa. En la bibliografía aparecen 2 expresiones para distintos tipos de captadores, en las que se aprecian las distintas aportaciones a la irradiancia global:

Colector de placa plana

$$G = \overbrace{I_b R_b K_{\tau\alpha,b}(\tau\alpha)_n}^{\text{Directa}} + \overbrace{I_d K_{\tau\alpha,d}(\tau\alpha)_n \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right)}^{\text{Difusa}} + \overbrace{\rho_g (I_b + I_d) K_{\tau\alpha,g}(\tau\alpha)_n \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right)}^{\text{Reflejada}} \quad (3)$$

Colector de concentración

$$G = \overbrace{I_b \rho(\gamma\tau\alpha)_n K_{\gamma\tau\alpha}}^{\text{Directa}} \quad (4)$$

donde:

I_b : Irradiancia directa	β : Inclinación del captador
R_b : Coeficiente de radiación directa	ρ_g : Reflectancia
$K_{\tau\alpha,b}$: Modificador del ángulo de incidencia para irradiancia directa	$K_{\tau\alpha,g}$: Modificador del ángulo de incidencia para irradiancia reflejada
$(\tau\alpha)_n$: Producto transmitancia-absortancia	$\gamma\tau\alpha$: Funciones del ángulo de incidencia de la radiación
I_d : Irradiancia difusa	
$K_{\tau\alpha,d}$: Modificador del ángulo de incidencia para irradiancia difusa	$K_{\gamma\tau\alpha}$: Modificador del ángulo de incidencia.

Estas expresiones no pueden ser empleadas en nuestro sistema ya que éste capta por igual los 3 tipos de irradiancia sin distinguir entre ellos. Por otro lado, estas expresiones están desarrolladas para captadores planos o de concentración, no para una geometría esférica. Por todo esto vamos a partir de la siguiente expresión en la que quedan englobadas todas las aportaciones a la irradiancia, para desarrollar posteriormente una ecuación que se ajuste a la nueva geometría:

$$I = I_c \cos(\theta_i) \quad (5)$$

donde:

I_c =Irradiancia solar sobre el plano perpendicular al haz de luz solar. Esta magnitud se puede predecir teniendo en cuenta la constante solar, el factor de excentricidad, y factores de atenuación atmosférica.

I =Irradiancia solar sobre el plano del captador o del sensor.

El interés de esta expresión reside en el hecho de que, en la práctica totalidad de los casos, las bases de datos de irradiancia siempre se refieren a irradiancia I sobre plano horizontal. De esta forma, calculando el ángulo de incidencia, el que hay entre el haz de luz y la vertical, podríamos obtener I_o y posteriormente calcular la irradiancia sobre nuestro captador aplicando de nuevo la expresión e introduciendo su ángulo de incidencia particular, que en este caso sería el ángulo entre el haz de luz y la normal al plano del captador y que dependerá de varios factores como por ejemplo la inclinación del captador o su orientación, como veremos más adelante.

En nuestro caso medimos directamente la irradiancia sobre el plano del captador, es decir medimos I y operando obtendremos la irradiancia I_o en el plano perpendicular al haz de luz. En nuestro captador, al tener una geometría de tipo esférico, habrá zonas que reciban irradiancia I de forma perpendicular la haz de luz solar, y la irradiancia en este caso ya estaría calculada, pero otras la recibirán con otro ángulo. En este caso emplearemos de nuevo la ecuación reformulada:

$$I_n = I_c \cos(\sigma_n) \quad (6)$$

donde (σ_n) será el ángulo entre las zonas consideradas y la zona de incidencia perpendicular, I_c será la irradiancia en el plano perpendicular al haz e I_n la irradiancia recibida por cada una de distintas zonas que consideraremos.

- **Calculo del ángulo de incidencia**

Captador en plano horizontal

Cuando tenemos un captador solar plano, o un sensor, en posición horizontal, podemos calcular el ángulo de incidencia solar empleando la siguiente expresión:

$$\cos\theta_i = \text{sen}\delta\text{sen}\phi + \text{cos}\delta\text{cos}\phi\text{cos}\omega \quad (7)$$

donde:

θ_i =Ángulo de incidencia solar.

α =Ángulo de altura solar.

δ =Ángulo de declinación solar, que depende

exclusivamente del día del año en que estemos y que se define como el ángulo entre el ecuador y el plano de la eclíptica, que es el plano formado por la tierra y el sol. Hay distintas expresiones para calcular δ , si bien nosotros emplearemos la siguiente:

$$\delta = 0,409 \cdot \frac{180}{\pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi J}{365} - 1,39\right) \quad (8)$$

siendo J el día ordinal del año en el que estemos, o día juliano. En esta expresión el argumento del seno está en radianes y que la operación nos da el valor de δ en grados.

ϕ =Latitud, la cual depende exclusivamente del punto geográfico sobre la Tierra sobre el que nos encontremos, y es el ángulo entre el Ecuador y el paralelo que pase por nuestro punto geográfico.

ω =Ángulo horario, depende de la hora del día a la que estemos.

Se define como el ángulo entre el meridiano sur y el que contiene al sol. Se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

$$\omega = -15(t - 12) \quad (9)$$

Donde t es el tiempo solar, medido en horas, y ω viene dado en grados. El criterio de signos es que hacia el este, o por la mañana, el valor será positivo, y hacia el oeste o por la tarde, el valor será negativo. A medio día el valor es 0.

Como se puede ver en los dibujos, dependiendo de nuestra posición geográfica y del día del año en que estemos, la posición del orto, salida del sol, y del ocaso, puesta del sol, va variando, es decir la duración del día solar se modifica con la posición geográfica y con el

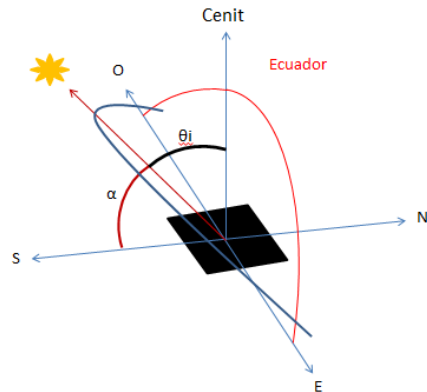


Figura 8: Representación de θ_i y de α

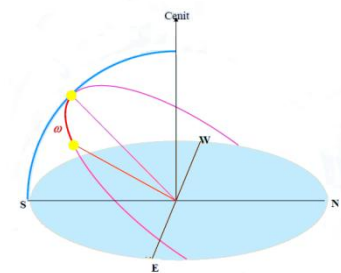


Figura 9: Representación de ω

día del año. El ángulo horario máximo, que determina el momento del amanecer o del anochecer viene dado por la siguiente expresión:

$$\omega_m = \cos^{-1}[-tg\delta tg\phi] \quad (10)$$

La duración del día solar es:

$$L = 2 \frac{\omega_m}{15} \quad (11)$$

El resultado viene expresado en horas. En el ecuador L siempre vale 12 horas.

Captador en plano inclinado y/o desorientado

Cuando tenemos un captador solar plano en un plano inclinado y/o desorientado la expresión cambia y es la siguiente:

$$\cos\theta_i = \text{sen}\delta(\text{sen}\phi\cos\beta - \cos\phi\text{sen}\beta\cos\gamma) + \cos\delta\cos\omega(\cos\phi\cos\beta + \text{sen}\phi\text{sen}\beta\cos\gamma) + \cos\delta\text{sen}\beta\text{sen}\gamma\text{sen}\omega \quad (12)$$

donde:

β =Ángulo de inclinación del captador respecto a la horizontal.

γ =Ángulo azimutal o ángulo de orientación del panel respecto al meridiano que pase por el lugar.

Si tenemos orientación sur, que es lo más habitual, dentro del hemisferio norte, la expresión anterior se transforma en la siguiente:

$$\cos\theta_i = \text{sen}\delta\text{sen}(\phi - \beta) + \cos\delta \cos(\phi - \beta) \cos\omega \quad (13)$$

Esta expresión es muy semejante a la ecuación 7 en la que se sustituye ϕ por $(\phi - \beta)$ que es esencialmente una latitud efectiva.

Así por ejemplo si β valiera lo mismo que la latitud del lugar en el que estemos, la latitud efectiva sería nula y el captador recibiría los rayos solares con la misma inclinación que los recibiría si estuviera en el ecuador. Sin embargo, la duración del día podría cambiar, ya que en este caso el ángulo horario máximo está dado por la expresión:

$$\omega_m = \min\{\cos^{-1}[-tg\delta tg\phi], \cos^{-1}[-tg\delta tg(\phi - \beta)]\} \quad (14)$$

Si consideramos un sistema desorientado la expresión para el ángulo horario máximo es mucho más compleja ya que, de hecho, la expresión cambia para el orto y para el ocaso y también es diferente si orientamos el captador hacia el este o hacia el oeste. Como no es nuestro caso, nuestro captador está orientado al sur, este caso no va a ser tratado.

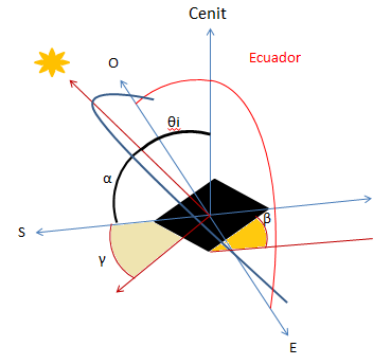


Figura 10: Representación de β y γ

- **Cálculo del producto transmitancia-absortancia $(\tau\alpha)_n$**

El producto transmitancia-absortancia es un factor que limita la irradiancia que se puede obtener y que es debido a los procesos de reflexión y absorción que se dan en la cubierta transparente y en la superficie absorbidora respectivamente. Su expresión es igual para todos los captadores con cubierta transparente y viene dada por:

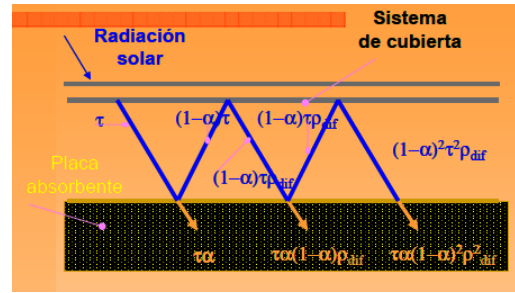


Figura 11: Representación del cálculo de $(\tau\alpha)_n$

$$(\tau\alpha)_n = \tau\alpha \sum_0^{\infty} [(1 - \alpha)\rho_{dif}]^n = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_{dif}} \quad (15)$$

donde ρ_{dif} es la reflectividad de irradiancia difusa que viene dada por la ecuación:

$$\rho_{dif} = \rho_{esp}(60^\circ) \quad (16)$$

siendo ρ_{esp} es la reflectividad especular. Esta ecuación nos indica que la irradiancia difusa es igual a la especular considerando que ésta incide con un ángulo de 60° .

- **Cálculo del modificador del ángulo de incidencia**

La transmitancia del vidrio y la absorbancia del tubo absorbedor tienen una cierta dependencia con el ángulo de incidencia que hay que tener en cuenta. Como ejemplo de esta dependencia tenemos que, dependiendo del ángulo de incidencia, el haz de luz atraviesa mayor o menor cantidad de material de cubierta, con lo que hay mayores o menores pérdidas por absorción debido al aumento de camino óptico y la transmitancia de la cubierta se ve afectada. También se debe tener en cuenta que al pasar por la cubierta el rayo se refracta y esa refracción cambia el ángulo de incidencia sobre el tubo absorbedor, lo que afecta a la absorbancia de éste. El modificador del ángulo de incidencia es un factor que da cuenta de esa dependencia y de la posible reducción de ganancia energética que implica. Su expresión general es la siguiente:

$$K(\theta) = \frac{(\tau\alpha)_\theta}{(\tau\alpha)_n} \quad 0 < K(\theta) < 1 \quad (17)$$

donde $(\tau\alpha)_\theta$ es el producto transmitancia-absortancia para un ángulo de incidencia θ y $(\tau\alpha)_n$ lo es para una incidencia normal. Para obtener la irradiancia obtenida en el captador deberíamos multiplicar la irradiancia medida por $(\tau\alpha)_\theta$ pero esto es difícil de calcular. Por ello, en la práctica, se multiplica por el factor $(\tau\alpha)_n K(\theta)$ ya que el modificador del ángulo de incidencia se puede calcular mediante esta expresión:

$$K(\theta) = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos(\theta_i)} - 1 \right) \quad (18)$$

Donde b_0 es un coeficiente que depende del número de cubiertas y que en nuestro caso vale 0,1.

Ecuación de balance energético

En cualquier sistema se cumple la siguiente relación:

$$\text{Energía obtenida} = \text{Energía recibida} - \text{Pérdidas} \quad (19)$$

• Análisis de cada término

Para establecer la energía obtenida en nuestro sistema captador debemos realizar un análisis de cada elemento en términos de flujo de calor:

- **Energía obtenida:** Es la energía útil. En nuestro caso esta energía se va a destinar íntegramente a calentar agua, luego la expresión para este término es la siguiente:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}c(T_s - T_e) = \dot{m}c\Delta T \quad (20)$$

siendo:

\dot{m} = Flujo másico de agua que circula por el circuito:

$$\dot{m} = \rho\dot{v} \quad (21)$$

\dot{v} = Caudal, dato que mediremos durante el experimento.

ρ = Densidad del agua.

c = Calor específico del agua.

T_e = Temperatura del agua a la entrada a los captadores.

T_s = Temperatura del agua a la salida de los captadores.

- **Energía recibida:** La única fuente de energía es, como hemos mencionado la energía que proviene del sol, es decir la irradiancia solar. El flujo de calor correspondiente a esta energía es:

$$\dot{Q} = IA \quad (22)$$

donde I es la irradiancia solar, medida en W/m^2 y A_c el área de captación solar. Este término ha de ir multiplicado por los factores mencionados anteriormente $(\tau\alpha)_n K(\theta) = (\tau\alpha)_\theta$ y también por el factor F_R , el factor global de transferencia de energía, que cuantifica en cierto modo las pérdidas que se producen en la transferencia de la energía que llega al tubo absorbedor hacia el fluido caloportador. Todos estos factores limitan la energía que recibe el fluido y por ello deben ser tenidos en cuenta en la ecuación de balance de energías.

- **Pérdidas:** Las pérdidas en un sistema de captación térmica son debidas a tres fenómenos, radiación, conducción y convección. Todos los términos de pérdidas se suelen incluir en el denominado coeficiente global de pérdidas U_L . El término de pérdidas viene entonces dado por:

$$\dot{Q}_L = F_R U_L A_P \Delta T' = F_R U_L A_P (T_e - T_a) \quad (23)$$

donde F_R es nuevo el factor global de transferencia de energía que afecta tanto a la ganancia de energía como a las pérdidas ya que en ambos casos se produce el paso de energía del fluido al tubo o viceversa. T_e es la temperatura de entrada al captador. En la ecuación en vez de T_e debería aparecer realmente la temperatura media de la placa absorbidora, pero al ser un valor muy complejo de medir se sustituye dicho valor por la temperatura de entrada, admitiendo que ambas son prácticamente iguales y siendo el error introducido muy pequeño. T_a es la temperatura ambiente y A_P es el área de pérdidas. Este área no coincide con el área de captación A_c vista en el punto anterior y que calcularemos posteriormente, ya que la captación sólo se produce en la parte del tubo captador a la que llega irradiancia solar, mientras que las pérdidas se producen en todo el área del tubo. El valor de este parámetro está dado por el fabricante del captador y es:

$$A_P = 1,2422 \text{ m}^2$$

Las pérdidas, representadas a través del coeficiente U_L , tienden a reducir la ganancia de energía útil, razón por la cual es muy importante minimizar este parámetro mediante un diseño adecuado o el uso de elementos que reduzcan dichas pérdidas.

La ecuación global sería entonces:

$$\dot{Q}_u = F_R (\tau\alpha)_n K(\theta) A_c I - U_L F_R A_P \Delta T' = \dot{m} c \Delta T \quad (24)$$

- **Cálculo del factor F_R**

Este factor, que da cuenta de la pérdida de energía útil y cuyo valor oscila entre 0 y 1, se puede obtener empleando la siguiente expresión:

$$F_R = \frac{\dot{m} c}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m} c}\right) \right] \quad (25)$$

donde los significados de los parámetros son los habituales salvo F' , que es el factor de eficiencia en la transferencia de calor hacia el tubo, y que viene dado por:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad (26)$$

siendo:

W =Distancia de separación entre tubos. D_i = Diámetro interno del tubo.
 D = Diámetro del tubo. h_{fi} = Coeficiente de transferencia de calor entre tubo y fluido.
 C_b = Conductancia del material.

F = Factor de eficiencia de transferencia de calor de la placa al tubo, dado por:

$$F = \frac{\tanh[m(W - D)/2]}{m(W - D)/2} \quad (27)$$

donde m es un factor dependiente de la conductividad del material.

Esta expresión está desarrollada para captadores planos en los que la estructura interna es la que se aprecia en la imagen. Como se ve, tenemos una placa absorbidora continua en la que están embebidos los tubos por los que circula el fluido caloportador. En nuestro caso los tubos se corresponden con la propia la superficie absorbidora, no existe placa, por ello podemos considerar que en nuestro captador se cumple que $F' \cong 1$.

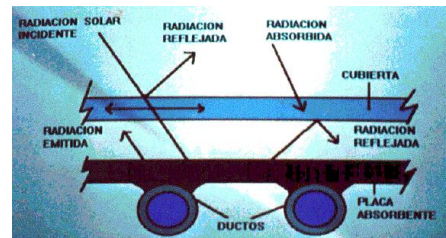


Figura 12: Estructura captador plano

Coefficiente de pérdidas

La determinación del coeficiente de pérdidas es esencial para caracterizar el captador que estamos analizando. La expresión que se emplea para calcular el coeficiente de pérdidas es la siguiente:

$$U_L = \left(\frac{1}{\sum_i R_i} \right) \quad (28)$$

El parámetro R_i representa las distintas aportaciones al coeficiente global de pérdidas de los distintos elementos que componen la estructura del captador. Estas distintas aportaciones, que dependen de las características del sistema, pueden deberse a radiación, convección y conducción, de forma individual o combinada. Las expresiones generales para cada uno de los fenómenos mencionados son las siguientes:

$$\text{Convección } R = \frac{1}{h_{conv}}$$

$$\text{Conducción } R = \frac{L}{K}$$

$$\text{Radiación } R = \frac{1}{h_r}$$

Sin embargo las expresiones combinadas asociadas a las distintas aportaciones son más complejas. En nuestro sistema tendríamos las siguientes contribuciones al coeficiente de pérdidas:

a) Pérdidas entre el tubo absorbedor y la cubierta:

$$\frac{1}{R_1} = h_c + h_r = \frac{k}{L_1} + \frac{k}{L_2} + \sigma \frac{(T_{abs} + T_c)(T_{abs}^2 + T_c^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{abs}} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (29)$$

donde:

k = Conductividad térmica del aire que rodea al tubo.

L_1 = Distancia tubo absorbedor-cubierta.

L_2 = Distancia media tubo absorbedor-base del captador.

σ = Constante de Stefan-Boltzmann= $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

T_{abs} = Temperatura del tubo absorbedor.

T_c = Temperatura de la cubierta.

ε_{abs} = Emisividad del tubo absorbedor.

ε_c = Emisividad de la cubierta.

En esta ecuación aparecen dos términos en la parte correspondiente a la conducción debido a que la distancia de los tubos con la cubierta exterior y con la base del captador es muy diferente. Realmente los tubos conducen en todas las direcciones, no solo hacia la cubierta y hacia la base, por lo que habría que añadir más términos, además de considerar que cada tubo está a una distancia distinta de la base. Sin embargo la conductividad térmica del aire es muy baja, con lo que esos términos serán mucho menores que el correspondiente a la radiación y la aproximación realizada no tendría mucha incidencia en el resultado de la ecuación.

b) Pérdidas de la cubierta al ambiente:

$$\frac{1}{R_2} = h_{conv} + h_r = (5,7 + 3,8V) + \sigma \varepsilon_c (T_c + T_{cielo})(T_c^2 + T_{cielo}^2) \frac{(T_c - T_{cielo})}{(T_c - T_{amb})} \quad (30)$$

siendo:

T_{cielo} = Temperatura del cielo.

V = Velocidad del viento.

T_{amb} = Temperatura ambiente.

Hemos de mencionar que en ningún caso se han considerado pérdidas por absorción en los materiales, ya que son muy pequeñas en comparación con el resto.

Como hemos podido observar, las ecuaciones son muy complejas, por lo que para determinar el coeficiente de pérdidas deberíamos medir muchos datos que no son fáciles de obtener, como por ejemplo la temperatura del tubo absorbedor o la temperatura de cielo. Además, en general, estas expresiones presentan el problema añadido de estar

desarrolladas para captadores planos. Por ello, en el siguiente apartado desarrollaremos un nuevo método para determinar el coeficiente de pérdidas de forma experimental, a partir del rendimiento del sistema.

Rendimiento

El rendimiento es una de las magnitudes más relevantes de un captador solar y uno de sus parámetros más característicos, por lo que es fundamental tenerlo en cuenta a la hora del diseño o su análisis. Mide la eficacia con que el dispositivo es capaz de aprovechar la energía incidente y transferirla al fluido caloportador para su posterior utilización como agua caliente sanitaria o en sistemas de calefacción. Su definición más general es la siguiente:

$$\eta = \frac{\int \dot{Q}_u dt}{A \int \underbrace{G_T}_I dt} \quad (31)$$

Sin embargo se emplea comúnmente el rendimiento instantáneo, que se define como la relación entre la ganancia de energía útil y la energía solar incidente sobre la superficie de captación, es decir:

$$\eta_i = \frac{\dot{Q}_u}{A_c G_T} = \frac{F_R [(\tau\alpha)_n K(\theta) A_c I - U_L A_P (T_e - T_a)]}{A_c I} = F_R (\tau\alpha)_\theta - \frac{F_R U_L (T_e - T_a) A_P}{I A_c} \quad (32)$$

Para poder aplicar esta expresión debemos conocer en detalle los valores del coeficiente global de transferencia de calor F_R , el coeficiente global de pérdidas U_L y el producto $(\tau\alpha)_\theta$. Esto no es fácil como ya hemos comprobado y por eso esta ecuación no suele emplearse bajo la forma presentada. Sin embargo, teniendo en cuenta que la energía útil aprovechada por el captador viene expresada de la forma:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}c(T_s - T_e) = \dot{m}c\Delta T \rightarrow \eta_i = \frac{\dot{m}c(T_s - T_e)}{A_c I} \quad (33)$$

Podemos determinar el rendimiento instantáneo de forma mucho más sencilla puesto que simplemente hay que determinar el área de captación, pudiendo medir directamente el resto de magnitudes

En general, si representamos η_i frente a la llamada temperatura equivalente, $\frac{(T_e - T_{amb})}{I}$ obtenemos una recta que se conoce como curva de rendimiento, semejante a la gráfica lateral, correspondiente a un captador plano.

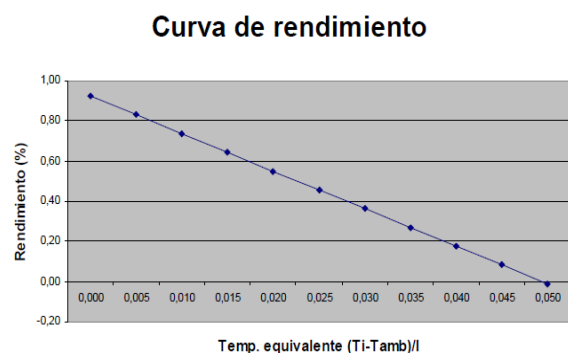


Figura 13: Ejemplo de curva de rendimiento para un captador plano

En nuestro caso, combinando las ecuaciones 32 y 33 podemos obtener:

$$\eta_i = \frac{\dot{m}c(T_s - T_e)}{A_c I} = F_R(\tau\alpha)_\theta - \frac{F_R U_L (T_e - T_a) A_P}{I A_c} \quad (34)$$

Esta es la ecuación de una recta:

$$y = \eta_o + \eta_t x \quad (35)$$

$$y = \frac{\dot{m}c(T_s - T_e)}{A_c I} = \eta_i \quad \eta_o = F_R(\tau\alpha)_\theta \quad \eta_t = -F_R U_L \quad x = \frac{(T_e - T_a) A_P}{I A_c} = T_{eq} \quad (36)$$

Donde η_o es el rendimiento óptico del sistema y η_t el rendimiento térmico. Como puede comprobar, en nuestro caso ha cambiado la definición de temperatura equivalente ya que hemos incluido la relación entre el área de pérdidas y el área de captación. Con esta ecuación y la representación gráfica podemos obtener el producto $F_R(\tau\alpha)_\theta$ de forma experimental, ya que dicho valor se corresponde con la ordenada en el origen de la recta generada y donde el término $F_R U_L$ se puede obtener a partir de la pendiente, lo cual nos permitiría, a su vez, poder determinar el coeficiente de pérdidas U_L .

4. Dispositivo experimental y proceso de toma de datos

Descripción del captador y justificación del diseño

El captador solar semiesférico, cuyo estudio vamos a detallar a continuación, está formado por un domo semiesférico de metacrilato transparente, apoyado en una base de poliuretano expandido recubierto con una lámina de aluminio de alta reflectividad, en el interior del cual se sitúa la superficie absorbedora formada por un tubo corrugado de polietileno negro de alta absorptividad por el interior del cual circula el fluido caloportador, agua. La distribución



Figura 14: Imagen del captador semiesférico

del tubo, que actúa como superficie captadora, sigue una espiral concéntrica ascendente desde la parte inferior de la semiesfera, plano ecuatorial, donde se sitúa la entrada desde el exterior, hasta prácticamente el vórtice superior, descendiendo desde allí por el exterior de la esfera para retornar al plano ecuatorial desde donde vuelve a salir hacia el exterior.

La razón del diseño semiesférico de este tipo de captador se basa en los estudios preliminares llevados a cabo sobre superficies esféricas continuas, en los que se apreciaba que una parte considerable de la superficie captadora no recibía irradiación solar a lo largo del día,

emitiendo, sin embargo, radiación infrarroja durante las horas nocturnas, lo que incrementaba las pérdidas térmicas, y motivando que la eficiencia se viera disminuida.

En efecto, si consideramos la estructura del captador esférico en la que la superficie absorbedora actúa al mismo tiempo como conducto para el fluido caloportador, al igual que ocurre en nuestro dispositivo, únicamente la cara exterior de la superficie absorbedora recibe irradiación solar, en tanto que la cara interior permanece a menor temperatura; esto crea un gradiente térmico que reduce la eficiencia en el intercambio calorífico y disminuye el valor del coeficiente de transferencia F_R , lo que hace, a su vez, disminuir el rendimiento del captador.



Figura 15. Estructura del captador solar esférico

Aparentemente, una superficie continua mejora la eficiencia de captación al disponer de una mayor superficie en contacto con la irradiación solar incidente; esto, sin embargo no es totalmente cierto, ya que la sección eficaz interceptora de la irradiación se corresponde, en ese caso, con la de una esfera, en tanto que para una superficie discontinua es preciso considerar el sumatorio del desarrollo de la sección circular de cada uno de los elementos que conforman dicha superficie, lo que puede representar un aumento significativo de la superficie interceptora, especialmente bajo ciertas condiciones de incidencia solar.

En el caso de nuestro captador, la discontinuidad en la superficie captadora permite que, a ciertas horas del día y en ciertas épocas del año, el aumento de superficie captadora debido al aprovechamiento del desarrollo de la sección circular del tubo absorbedor compense la fracción de “huecos” que deja la discontinuidad en la superficie.

El hecho de utilizar un tubo de polietileno, en lugar de tubo de cobre abarata los costes de fabricación, además de reducir el peso del captador. Por otra parte, permite desarrollar la espiral ascendente de la superficie captadora de manera sencilla, lo que sería prácticamente imposible en el caso de utilizar tubo metálico rígido como en el caso de los captadores solares convencionales. Es cierto que el factor de intercambio calorífico para el polietileno es menor que el de un tubo metálico, debido a su menor conductividad, pero este inconveniente puede quedar compensado por las ventajas que aportan el resto de las características que se han mencionado anteriormente.

Para caracterizar el funcionamiento del nuevo tipo de captador solar se ha acoplado el mismo a un circuito de prueba, tal y como muestra la figura adjunta, donde se pueden ver los distintos componentes del dispositivo experimental utilizado:

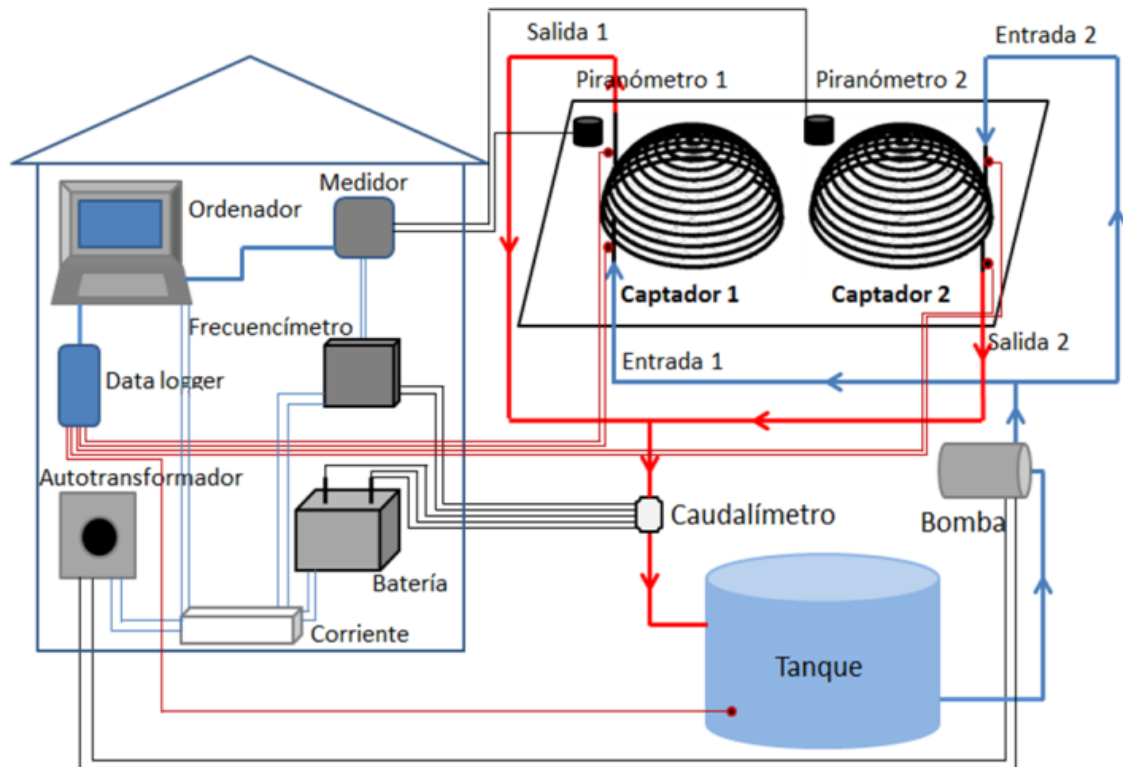


Figura 16. Esquema del dispositivo experimental



Figuras 17 y 18: Fotografías del dispositivo experimental

Descripción del sistema

El dispositivo experimental funciona mediante el siguiente principio: El agua entra en cada uno de los captadores procedente del tanque, impulsada por una bomba con un caudal

máximo de 25 l/min y una carga de elevación de 2 m, a través de un conducto de polibutileno de alta resistencia térmica de 8 mm de diámetro que se bifurca a la salida de la bomba. Tras pasar por los captadores sale a través de un conducto de idénticas características y las dos ramas se unen antes de entrar de nuevo en el tanque.

Este tanque actúa como almacenador y amortiguador térmico, de manera que la temperatura de entrada a los captadores se mantenga lo más uniforme posible durante el tiempo de ensayo. El caudal se puede regular actuando sobre el voltaje que alimenta la bomba mediante un variador de tensión (autotransformador). La medida del caudal se realiza mediante un caudalímetro óptico cuya señal de pulsos es transformada a voltaje en un frecuencímetro y llevada a un sistema de registro.

La medida de la temperatura se realiza mediante sensores termométricos, de tipo termopar, situados en los puntos representativos del circuito, uno en la entrada de cada uno de los captadores, uno en cada salida, uno en el tanque de almacenamiento y un último que mide la temperatura ambiente. El control de la temperatura se realiza mediante un sistema automático de adquisición de datos.

Para la determinación de la irradiancia solar se han utilizado dos piranómetros de termopila para espectro visible e IR próximo, situados en el plano ecuatorial de cada uno de los captadores, de modo que se mide la irradiancia que llega sobre el plano del captador independientemente de la inclinación del mismo. Al igual que la temperatura, los datos de irradiancia son registrados y almacenados por un sistema de adquisición de datos.

Para la realización de los ensayos en condiciones variables de operación, se ha dispuesto de un soporte articulado que permite variar la inclinación de la base de los captadores entre 0° y 90°; este soporte permite inclinar de manera independiente la estructura de cada uno de los captadores, de manera que se puedan realizar ensayos simultáneos con distintas inclinaciones.

Proceso de toma de datos

En primer lugar se comprueba el estado del sistema y se rellena el tanque de agua, purgando el circuito hidráulico en caso que sea necesario. Fijamos el valor de voltaje del autotransformador que alimenta la bomba correspondiente al caudal deseado. Para ello, se lleva a cabo un proceso previo de calibración, en el que se determina la curva de respuesta del caudal en función del voltaje de la bomba.

Seguidamente, se inicia el proceso de caracterización mediante la toma de datos de los siguientes parámetros: temperaturas de entrada y salida a cada uno de los captadores, temperatura ambiente y del agua en el tanque, irradiancia solar sobre cada captador solar, y caudal de agua circulante. Los datos se toman en intervalos de 15 minutos y el período de medida se extiende durante 12 horas.

5. Cálculos teóricos

Uno de los objetivos del trabajo es desarrollar un algoritmo para calcular teóricamente la energía obtenida por el captador, según una serie de parámetros, para así poder predecir lo que podemos obtener en un momento concreto o durante un cierto periodo de tiempo, para lo cual es imprescindible determinar el área de captación. También hay que calcular otros parámetros como la irradiancia y la potencia recibida. Posteriormente, en el siguiente apartado nos ayudaremos de las expresiones y valores obtenidos para obtener parámetros como el coeficiente de pérdidas o el rendimiento.

Cálculo del área efectiva de captación

Una de las cosas que diferencia a nuestro captador de otros captadores, como por ejemplo los planos o los esféricos, es que el área de captación es variable y discontinua, y depende del ángulo de incidencia de los rayos del sol. Esto se puede comprobar observando la siguiente serie de imágenes esquemáticas del captador, obtenidas con el programa Matlab, que representan cómo varía la superficie iluminada del captador desde el amanecer, momento en el que los rayos solares inciden de forma prácticamente horizontal, representado en la figura de la izquierda, hasta el mediodía solar, en el que los rayos inciden de forma vertical, representado en la imagen de la derecha.

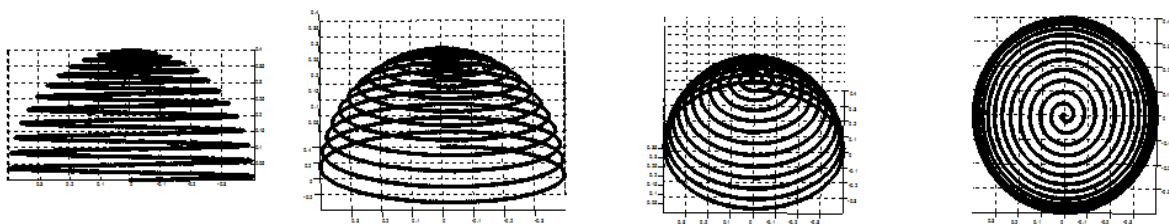


Figura 19: Imágenes esquemáticas del captador

Las otras imágenes representan estadios intermedios, que se darían durante la mañana o equivalentemente por la tarde. Al anochecer, la situación sería igual que al amanecer, con los rayos incidiendo horizontalmente. Esta situación está representada para un ángulo de incidencia que varía tal y como ocurre en el ecuador, para otras latitudes, el ángulo de

incidencia es ligeramente distinto, y por ejemplo al mediodía la incidencia no es totalmente vertical. Las variaciones del ángulo de incidencia se pueden calcular según la ecuación 7.

Para hallar el área del tubo captador que recibe irradiancia solar, vamos a dividir el captador en franjas verticales, que tendrán un grosor determinado. Para cada una de ellas calcularemos la longitud ocupada por tubo captador, lo que llamaremos factor de captación.

El grosor de las franjas será constante pero la longitud total de las franjas y el factor de captación dependerán tanto del ángulo de incidencia de los rayos solares, como de la posición de cada franja dentro de la semiesfera.

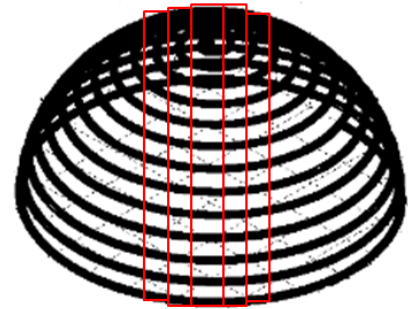


Figura 20: División del captador en franjas

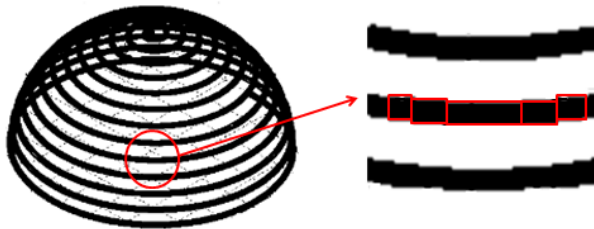


Figura 21: Aproximación realizada

Dentro de cada franja supondremos que tenemos tubos cilíndricos perfectos, sin curvatura, así cuando calculemos el factor de captación dentro de cada franja y multipliquemos por la anchura de las franjas tendremos el área total de captación. Esto es realmente una

aproximación que incluso el programa Matlab hace al representar la imagen del captador, y que puede ser considerada válida dado el diámetro de la sección recta del tubo en comparación con el diámetro del captador. Ampliando la simulación para que se vea mejor la aproximación realizada tenemos la siguiente figura:

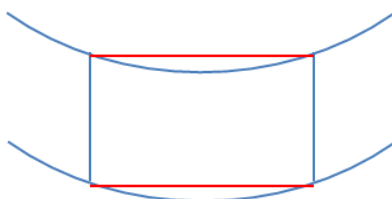


Figura 22: Ampliación de la aproximación realizada

El área rodeada por líneas azules sería el área real a considerar, las líneas verticales son las que delimitan la franja y nuestra aproximación sería el área rodeada por líneas rojas. Se ve que puede introducirse un error, pero pequeño ya que el área que se pierde por un lado se gana aproximadamente por el otro.

- **Grosor de las franjas**

Si nos fijamos ahora en la imagen de la semiesfera vista desde arriba, tenemos:

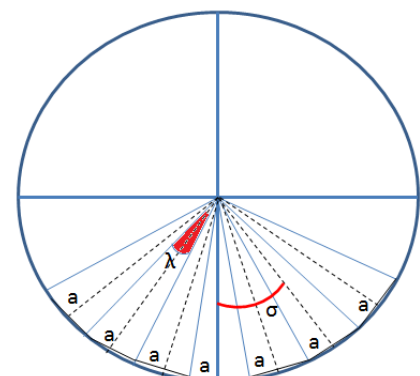


Figura 23: Esquema de la semiesfera visto desde arriba

El valor del ángulo λ se elige arbitrariamente y determinará el valor de a . Este parámetro es el valor por el que luego se multiplicará el factor de captación para obtener el área efectiva de captación del sistema, ya que es el valor de la anchura de los cilindros indicados en la figura 21. Aunque no es realmente el grosor de las franjas, porque éste sería la proyección de los distintos segmentos de longitud 'a' sobre un plano, nos referiremos a este parámetro como anchura de las franjas. Dado λ , el parámetro a se puede calcular fácilmente mediante la expresión:

$$a = 2R \operatorname{sen}\left(\frac{\lambda}{2}\right) \quad (36)$$

Donde R es el radio de la semiesfera. El ángulo σ es el que indica en qué franja estamos. Dependiendo del número de franjas en que queramos dividir la semiesfera, es decir del valor de λ , el ángulo σ se definirá de una forma o de otra. Tomando el valor para el ángulo $\lambda = 4^\circ$, se tiene:

$$\text{Número de franjas} = \frac{180^\circ}{\lambda} = 45 \text{ franjas}$$

$$\sigma = \sigma_n = \lambda n = 4n \quad \text{Con } n = 0, \dots, 22 \quad (37)$$

Así pues, tenemos 22 franjas a cada lado más la franja central. El motivo por el que se ha elegido ese valor para el ángulo λ es porque el haz de irradiancia directa procedente del sol forma un cono de aproximadamente 4° .

La anchura de las franjas es constante, no variando a lo largo de toda la semiesfera. Para el correcto seguimiento de los cálculos se debe evitar interpretar la división de la semiesfera, como si de una división por meridianos se tratara, tal y como aparece en la imagen izquierda de la figura. La división realizada se asemeja más bien a un corte vertical en segmentos, tal y como se puede apreciar en la imagen derecha de la misma figura.

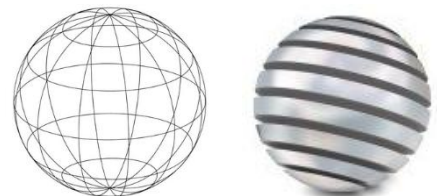


Figura 24: División en franjas de la esfera

- **Número de vueltas de captador por franja**

Representando nuestro captador desde un plano cenital (derecha) y otro frontal (izquierda),

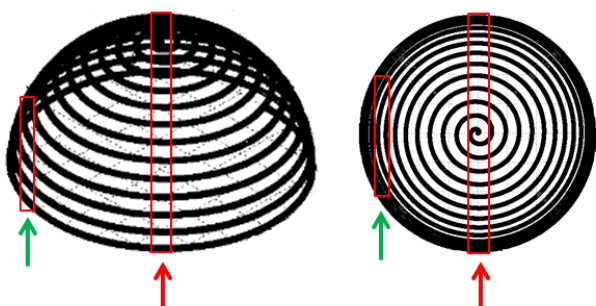


Figura 25: Comparación del número de vueltas para dos franjas

podemos comprobar que la franja señalada por la flecha roja "ve" todas las franjas posibles. Sin embargo la señalada por la flecha verde "ve" sólo entre 6 y 8 franjas. La determinación del número de

vueltas de captador que hay en cada franja es esencial para conocer el área de captación en cada franja. Además no sólo cambia el número de vueltas del captador sino que también lo hace la longitud de las franjas. Para hacer el cálculo nos ayudamos de la siguiente imagen esquemática de un corte frontal del captador:

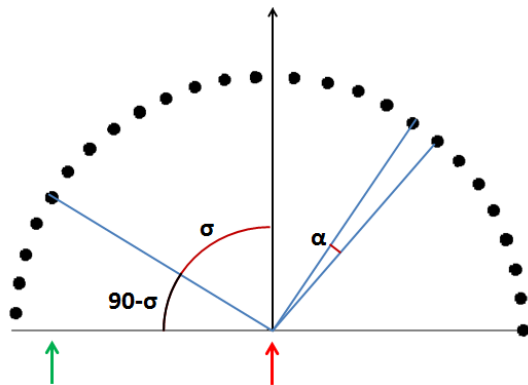


Figura 26: Corte frontal del captador

En esta imagen el ángulo α es el ángulo que hay entre una vuelta de captador y la siguiente. Ese ángulo es constante y su valor es el cociente entre la amplitud angular total de un hemisferio entre el número total de vueltas de captador:

$$\alpha = \frac{180^\circ}{26} = \frac{90^\circ}{13} \quad (38)$$

Para la franja señalada con la flecha verde, y equivalentemente para cualquiera de las franjas en que dividimos en captador, cuyas posiciones son determinadas, como hemos comentado anteriormente, por el ángulo σ , el número de vueltas de tubo captador viene dado por:

$$N_n = 2 \frac{90^\circ - \sigma_n}{\alpha} \quad (39)$$

El factor 2 es debido a que aunque aquí estemos viendo un corte del captador en la realidad pasa la misma vuelta de captador por delante y por detrás del punto más alto de la franja con lo que hemos de contarlo dos veces ya que la aportación al área de captación es doble. Esto se ve mejor en la imagen de la derecha de la figura 25.

El resultado de esta ecuación es probablemente un número con decimales, sin embargo el número de vueltas debe ser entero por lo que hacemos un redondeo a las unidades. Esto introduce un pequeño error porque habrá franjas que tengan una zona de captación y no sea contada y otras en las que sí se tenga en cuenta. Sin embargo los errores se compensan en el sumatorio final del área de captación.

Una vez que sabemos el número de vueltas que hay en cada franja podemos representar esquemáticamente un corte transversal de cada franja. Para la franja central el corte será semejante al de la figura anterior debido a la simetría del captador, sin embargo para la franja lateral señalada en verde será diferente:

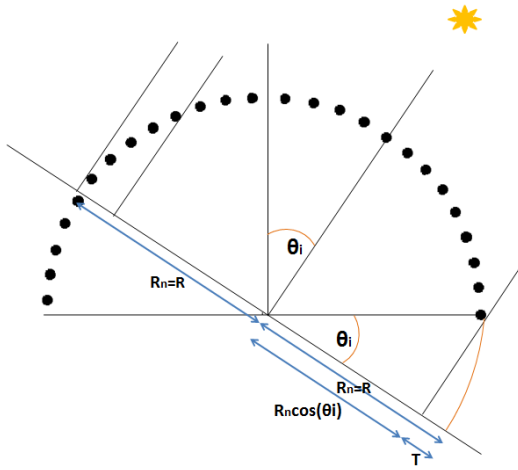


Figura 27: Corte vertical franja roja

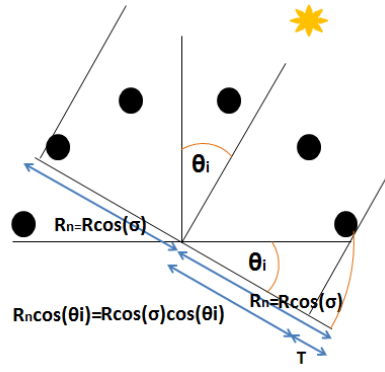


Figura 28: Corte vertical franja verde

Para cada franja podemos determinar un ángulo α_n que es el ángulo entre cada vuelta de captador, y que emplearemos posteriormente:

$$\alpha_n = \frac{180^\circ}{N_n} \quad (40)$$

Para el caso de la franja central este ángulo α_n coincide con el ángulo α debido a la simetría semiesférica. En la figura anterior vemos que el radio de las franjas es distinto y que depende de σ . La expresión general para el radio de cada franja es:

$$R_n = R \cos(\sigma_n) \quad (41)$$

También se puede apreciar en la figura, que por la parte izquierda de las imágenes tenemos una distancia R_n desde el centro de la semiesfera hasta el fin de la zona de captación, sin embargo por el otro lado esa distancia es menor, $R_n - T$, donde T es una cantidad que vamos a denominar 'truncamiento' y cuyo valor depende del ángulo de incidencia θ_i y viene dado por la expresión:

$$T = R_n(1 - \cos(\theta_i)) = R \cos(\sigma)(1 - \cos(\theta_i)) \quad (42)$$

Este truncamiento es debido a la geometría semiesférica del captador, si tuviéramos un captador esférico este factor no aparecería ya que la intersección de un plano, el de incidencia de los rayos solares en este caso, con una esfera es siempre una circunferencia. Por el contrario la intersección de un plano con una semiesfera depende del ángulo y varía entre una circunferencia y una semicircunferencia. De esta variación es de la que da cuenta el parámetro T , que representa en cierto modo lo que le falta a la imagen de la semiesfera para ser la correspondiente a una esfera.

- **Cálculo del ángulo de interferencia**

Dentro de cada franja se puede apreciar que de todas las vueltas del tubo captador que están iluminadas, una fracción sufre interferencia de otras franjas, es decir la franja anterior tapa parte de la posterior. Es fundamental determinar cuántas vueltas están sometidas a esta restricción para poder calcular la cantidad de energía obtenida. Para ello hemos de definir una serie de parámetros para lo cual nos ayudamos del siguiente dibujo:

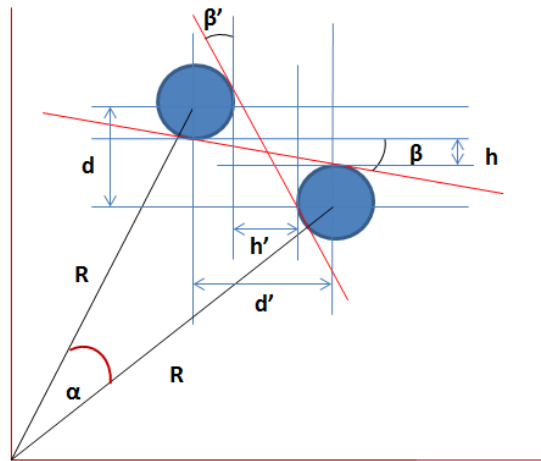


Figura 29: Imagen esquemática de dos vueltas sucesivas de tubo captador

Del dibujo anterior se pueden obtener algunas relaciones útiles que emplearemos más adelante:

$$h=d-2e \quad h'=d'-2e \quad (43)$$

Donde e es el radio del captador. Si nos fijamos ahora en la imagen de la franja central:

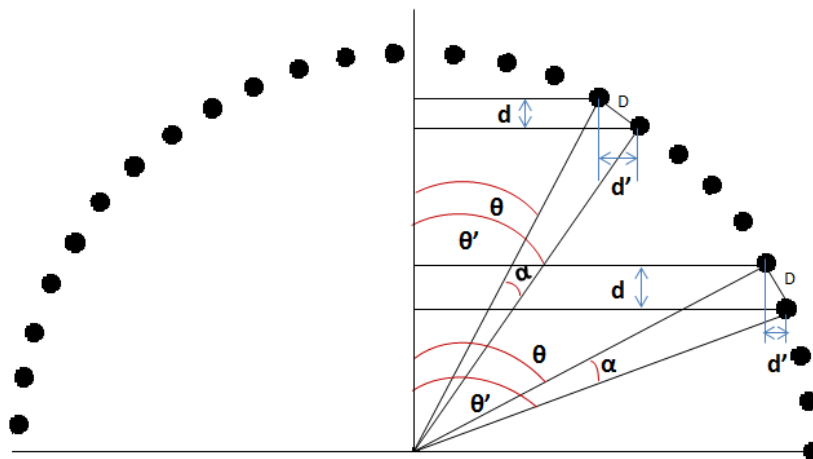


Figura 30: Relación entre ángulos franja central

Podemos comprobar que $\theta' = \theta + \alpha$ para cualquier par de vueltas, como esto ocurre para cualquier franja podemos incluir el subíndice n . Igualmente, para cualquier par de vueltas sucesivas de captador en cualquier franja se cumplen las siguientes relaciones:

$$d = R_n(\cos\theta_n - \cos(\theta_n + \alpha_n)) \quad (44a)$$

$$d' = R_n(\sen(\theta_n + \alpha_n) - \sen\theta_n) \quad (44b)$$

Para un cierto ángulo de incidencia del sol θ_i , la parte del captador que queda afectada por la interferencia debido a la vuelta inferior del captador es aquella cuyo θ es tal que se cumple que h , tal y como lo hemos definido en la figura 29, se hace nulo, ya que ese valor es el que marca el comienzo de la interferencia por parte de la vuelta situada abajo a la derecha. Operando:

$$\begin{aligned} h = 0 \rightarrow d = 2e \rightarrow R_n(\cos\theta_n - \cos(\theta_n + \alpha_n)) &= 2e \\ &= R_n\cos\theta_n - R_n\cos\theta_n\cos\alpha_n + R_n\sen\theta_n\sen\alpha_n \quad (45) \\ &= R_n(\cos\theta_n(1 - \cos\alpha_n) + \sen\theta_n\sen\alpha_n) \end{aligned}$$

Tanto R_n , como e y como α_n son valores conocidos, por tanto podemos reducir la anterior ecuación a la siguiente:

$$a_n = b\cos\theta_n + c\sen\theta_n \quad (46)$$

Donde:

$$a_n = \frac{2e}{R_n} \quad b_n = 1 - \cos\alpha_n \quad c_n = \sen\alpha_n \quad (47)$$

Resolviendo la ecuación obtenemos un valor del ángulo de interferencia θ_n para cada franja:

$$\begin{aligned} a_n &= b_n\cos\theta_n + c_n\sen\theta_n \rightarrow (a_n - b_n\cos\theta_n) = c_n\sqrt{1 - (\cos\theta_n)^2} \\ &\rightarrow a_n^2 + b_n^2(\cos\theta_n)^2 - 2a_nb_n\cos\theta_n = c_n^2(1 - (\cos\theta_n)^2) \quad (48) \\ &\rightarrow (b_n^2 + c_n^2)(\cos\theta_n)^2 - 2a_nb_n\cos\theta_n + (a_n^2 - c_n^2) = 0 \end{aligned}$$

$$\cos\theta_n = \frac{-b' \pm \sqrt{b'^2 - 4a'c'}}{2a'} = \frac{2a_nb_n \pm \sqrt{(2a_nb_n)^2 - 4(b_n^2 + c_n^2)(a_n^2 - c_n^2)}}{2(b_n^2 + c_n^2)} \quad (49)$$

Equivalentemente la parte del captador que queda afectada por la interferencia debido a la vuelta superior del captador es aquella cuyo θ_n' es tal que se cumple que h' se haga nulo, ya que ese valor es el que marca el comienzo de la interferencia por parte de la vuelta situada arriba a la izquierda.

$$\begin{aligned}
h' = 0 \rightarrow d' = 2e \rightarrow R_n(\text{sen}(\theta'_n + \alpha_n) - \text{sen} \theta'_n) &= 2e \\
&= R_n \text{sen} \theta'_n \cos \alpha_n + R_n \cos \theta'_n \text{sen} \alpha_n - R_n \text{sen} \theta'_n \quad (50) \\
&= R_n(\text{sen} \theta'_n(\cos \alpha_n - 1) + \cos \theta'_n \text{sen} \alpha_n)
\end{aligned}$$

Empleando los valores conocidos de α_n , e y R_n obtenemos:

$$a_n = d_n \text{sen} \theta'_n + c_n \cos \theta'_n \quad (51)$$

Tanto a como c valen lo mismo que en caso anterior, y $d=-b$. Aplicando la misma relación que en el caso anterior y operando obtenemos:

$$\begin{aligned}
a_n = d_n \text{sen} \theta'_n + c_n \cos \theta'_n \rightarrow (a_n - c_n \cos \theta'_n) &= d_n \sqrt{1 - (\cos \theta'_n)^2} \\
\rightarrow a_n^2 + c_n^2 (\cos \theta'_n)^2 - 2a_n c_n \cos \theta'_n &= d_n^2 (1 - (\cos \theta'_n)^2) \quad (52) \\
\rightarrow (d_n^2 + c_n^2) (\cos \theta'_n)^2 - 2a_n c_n \cos \theta'_n + (a_n^2 - d_n^2) &= 0
\end{aligned}$$

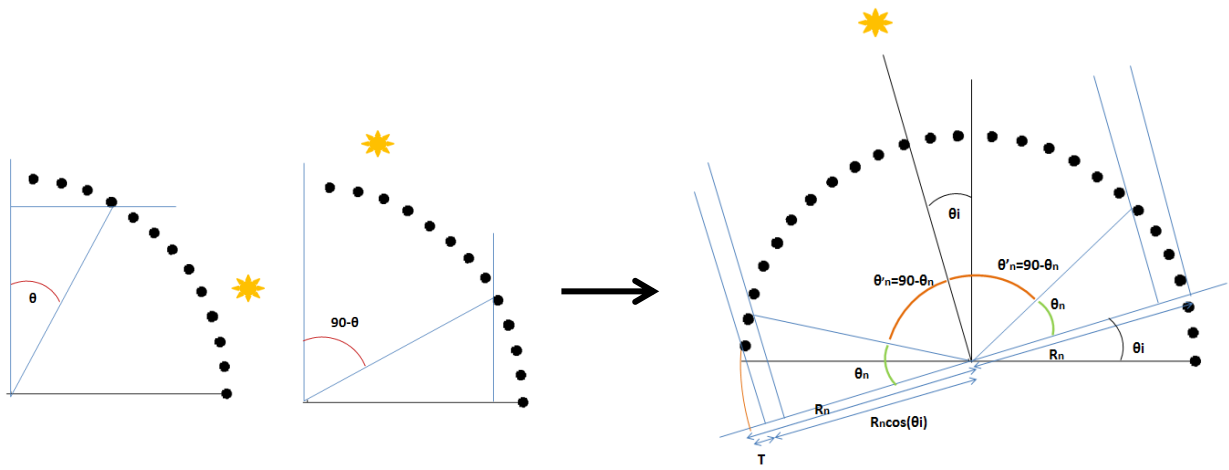
$$\cos \theta'_n = \frac{-b' \pm \sqrt{b'^2 - 4a'c'}}{2a'} = \frac{2a_n c_n \pm \sqrt{(2a_n c_n)^2 - 4(d_n^2 + c_n^2)(a_n^2 - d_n^2)}}{2(d_n^2 + c_n^2)} \quad (53)$$

En el primer caso, ecuación 49, sólo hay un posible resultado para el ángulo θ_n para cada franja, el obtenido a partir del valor positivo de la raíz, sin embargo en este caso se obtienen dos posibles resultados válidos, que no generan errores al calcular el arco-coseno. Al operar y obtener valores concretos nos fijamos en que uno de los resultados es el ángulo complementario del que se obtiene en la primera operación. Como ejemplo ilustrativo calculamos los valores obtenidos para el caso de la franja central:

$$\sigma = 0^\circ \rightarrow R_n = R \cos(\sigma) = R = 0,35 \text{ m} \quad \alpha_n = \frac{180^\circ}{N} = \frac{180^\circ}{26} \quad e = 0,0125 \text{ m}$$

$$\theta = 32,80^\circ \quad \theta' = \left\{ \begin{array}{l} (+) 50,27^\circ \\ (-) 57,20^\circ \end{array} \right\}$$

El resultado con el que nos debemos quedar es el del valor negativo de la raíz, que es el que nos proporciona el ángulo complementario ya que en cada caso nos referimos a interferencia por un lado o por el otro, ambas son incompatibles, no se pueden dar a la vez, cuando hay interferencia por un lado no la hay por el otro. Se ve claramente en la siguiente figura, en la que las líneas verticales marcan la zona de interferencia:



Figuras 31 y 32: Relación entre ángulos de interferencia

Así pues, sólo vamos a tener en cuenta el parámetro θ_n puesto que el otro ángulo se puede calcular de manera inmediata a partir de él.

El cálculo del ángulo de interferencia es importante porque se va a considerar que la zona de interferencia representa un continuo de captación, es decir se va a tomar como una superficie continua, ya que debido al solapamiento no se puede distinguir entre las vueltas consecutivas del tubo.

- **Cálculo del factor de captación**

Una vez que tenemos los valores del radio de cada franja, el número de vueltas de tubo captador que pasan por ella, y el ángulo de interferencia, podemos calcular ya el factor de captación para cada franja. Para ello vamos a emplear la función de Heaviside o función escalón, que se define de la siguiente forma:

$$H(x) = \begin{cases} 0 & \text{Si } x < 0 \\ 1 & \text{Si } x > 0 \end{cases} \quad (54)$$

Esta función nos será muy útil a la hora de tener en cuenta el efecto del truncamiento sobre el área de captación.

El factor de captación que vamos a calcular es un factor de captación plano, es decir, se obtiene proyectando el área de captación sobre un plano perpendicular a la dirección del haz de radiación incidente, posteriormente, para calcular el área definitiva, se realizará el proceso inverso teniendo en cuenta la superficie curva, cilíndrica, que tiene el tubo captador. Como ejemplo ilustrativo se puede considerar la sombra de los tubos captadores sobre el plano perpendicular a la superficie de captación: el factor de captación F_n representaría en este caso la longitud que queda en sombra para cada franja.

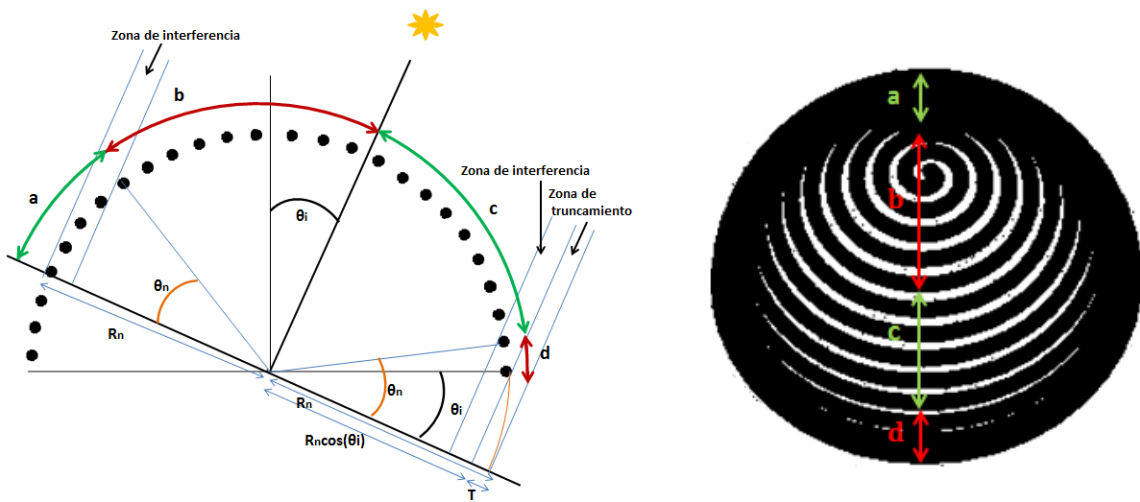
Para calcular el área proyectada debida a las vueltas que no sufren interferencia se procede a contar dichas vueltas y se multiplica el resultado por su diámetro, que es la proyección

plana del cilindro. Por otra parte, para la zona que sufre interferencia lo contaremos como un continuo de captación, calculando la longitud total de la zona afectada. Una vez hecho esto debemos tener en cuenta el truncamiento, si éste se limita a la zona de interferencia podemos restar la longitud de la zona de truncamiento de la longitud de la zona de interferencia. Sin embargo si el truncamiento entra dentro de la zona de vueltas bien diferenciadas ya no podemos hacer una simple resta de longitudes ya que parte de la longitud corresponderá a vueltas de captador y parte a los huecos que hay entre ellas. Para separar matemáticamente las dos situaciones se utiliza la función escalón.

A partir de las consideraciones anteriores, se obtiene la expresión final para el factor de captación para cualquier franja:

$$F_n = \overbrace{R \cos(\sigma_n)(1 - \cos\theta_i)}^a + 2e \overbrace{\frac{(90 - \theta_n)}{\alpha_n}}^b + \overbrace{\left[H(\theta_n - \theta_i) 2e \left(\frac{90 - \theta_n}{\alpha_n} \right) \right] + \left[H(\theta_i - \theta_n) 2e \left(\frac{90 - \theta_i}{\alpha_n} \right) \right]}^c + \overbrace{\left[H(\theta_n - \theta_i) R \cos(\sigma_n)(\cos\theta_i - \cos\theta_n) \right]}^d \quad (55)$$

Donde cada uno de los términos se puede interpretar con la ayuda de las siguientes figuras:



Figuras 33 y 34: Representación de los términos de la ecuación 55

En estas figuras se representa un corte frontal de la franja central y una visión a escala del captador desde arriba con 4 líneas de color que corresponden a los 4 términos de la ecuación de F_n . A pesar de que en la figura de la izquierda las líneas son curvas hemos de recordar que los términos se refieren a la proyección del tubo captador sobre el plano inclinado. La explicación de cada término es la siguiente:

- **a:** Este término tiene en cuenta la zona de interferencia por el lado que no sufre truncamiento. Como dijimos esto se considera como un continuo de captación.
- **b:** En el numerador de este término aparece el ángulo que hay entre la dirección de incidencia del sol y la zona de interferencia. Al dividirlo por el ángulo que hay entre las vueltas de tubo, ese cociente nos da el número de vueltas de captador que no sufren interferencia y que están en la mitad de la semiesfera en la que no hay truncamiento. Para cada vuelta de tubo se aporta el valor del diámetro del tubo.
- **c:** El término se refiere a la mitad de la semiesfera que sí sufre truncamiento, de ahí la aparición de la función escalón. Como el ángulo de interferencia y el ángulo de incidencia, que determina el truncamiento, no están relacionados entre sí, debemos tener en cuenta los dos casos posibles, que el truncamiento se quede en la zona de interferencia, es decir que el ángulo θ_n sea mayor que θ_i , que es el caso representado en el dibujo, con lo que contamos las vueltas de tubo captador que no sufren interferencia sabiendo que no les va a afectar el truncamiento, o bien, la otra posibilidad es que el truncamiento sí entre en la zona de no interferencia, porque θ_i sea mayor que θ_n con lo que sólo se contabilizan las vueltas que hay hasta el truncamiento.
- **d:** Si el truncamiento sobrepasa la zona de interferencia no hay ningún término más que añadir, sin embargo si no lo hace hay que tener en cuenta la zona que sufre interferencia, que es un continuo de captación y que no sufre truncamiento. De ello es de lo que da cuenta este último término.

- **Cálculo del área de captación**

Para cada franja hemos calculado el factor de captación plano. Para deshacer la proyección simplemente debemos tener en cuenta el área que tiene un cilindro y compararla con el área de un rectángulo, de modo que:

$$A_{cilindro} = 2\pi rL = 2\pi eL \quad (56)$$

$$A_{rectángulo} = lL = 2eL \quad (57)$$

El cociente entre ambas relaciones nos dará el factor de desproyección, pero debemos tener en cuenta que la luz solo incide en la mitad del cilindro que conforma el tubo captador, parte amarilla del dibujo, por lo tanto ese factor debe ser la mitad de lo previsto, luego el factor de desproyección es:

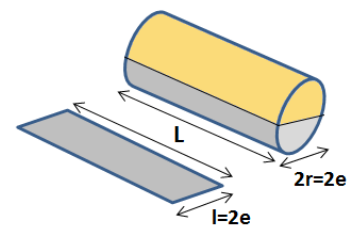


Figura 35: Comparativa entre un cilindro y su proyección sobre un plano

$$\frac{1}{2} \frac{A_{cilindro}}{A_{rectángulo}} = \frac{\pi}{2} \quad (55)$$

Una vez calculada la anchura de las franjas el factor de captación y el factor de desproyección, podemos calcular el área total de captación de nuestro sistema como:

$$A = \sum_n \frac{\pi}{2} a F_n \quad (56)$$

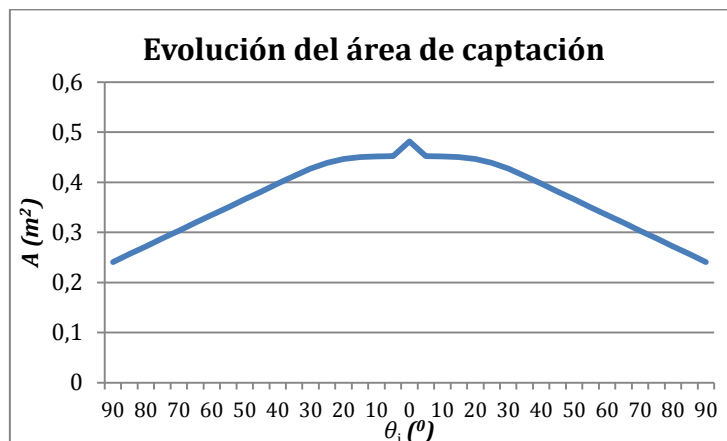
En este proceso se ha realizado la aproximación de considerar que las partes que sufren interferencia tienen también forma cilíndrica, es decir:



Figura 36: Aproximación realizada en la zona de interferencia

Esta aproximación introduce un pequeño error en el área calculada, pero esas zonas son las que menos irradiancia van a recibir por el gran ángulo con que incide el haz de irradiancia directa, por tanto el error introducido no repercutirá de manera apreciable en los cálculos posteriores. Hemos de mencionar también que no se ha tenido en cuenta la posible captación de irradiancia por las vueltas de la parte trasera del captador a las que pudiera llegar iluminación debido a los huecos que hay entre las vueltas de la parte delantera. Se ha realizado esta aproximación porque ese área, de existir es mínima, de hecho en la representación a escala del captador de la figura 34 no aparecía ningún área de captación de esas características.

Empleando todas las expresiones obtenidas se ha calculado el área de captación que se tendría si el sistema estuviera en el ecuador, o bien con una inclinación del sistema igual a la latitud, obteniéndose la siguiente gráfica:



Gráfica 1: Resultados del cálculo para el área de captación

Para comprobar si los cálculos realizados son correctos podemos compararlos con los datos que ofrece el fabricante en el manual del captador, que son el área máxima y el área mínima de captación:

Área (m ²)	Fabricante	Cálculo	Error relativo (%)
Área máxima	0,503	0,482	4,23
Área mínima	0,256	0,241	5,92

Tabla 1: Comparativa entre valores calculados y valores del fabricante

Como se puede apreciar el error cometido es bastante bajo, a pesar de las aproximaciones realizadas, por lo que podemos considerar que el algoritmo desarrollado para hallar el área de captación es adecuado.

Hemos de mencionar también que como dato para el radio de la semiesfera se ha introducido un valor de 0,35 m. El valor que da el fabricante es de 0,4 m, sin embargo ese es el valor del radio de la cubierta de metacrilato, no de los tubos captadores que es el que afecta al área de captación. Como se puede apreciar en las fotos del dispositivo vistas en el punto 4 hay un cierto espacio entre la esfera de metacrilato y los tubos. Hemos medido ese espacio y el valor medio obtenido es de 0,05 m, lo que asegura la exactitud del valor utilizado dentro de la incertidumbre de las medidas.

Cálculo de la irradiancia recibida

Se va a emplear la expresión 5:

$$I = I_c \cos(\theta_i) \rightarrow I_c = \frac{I}{\cos(\theta_i)} \quad (57)$$

I_c es la irradiancia solar sobre el plano perpendicular al haz de luz solar, la que recibe la franja central. I es la irradiancia solar sobre el plano del captador, en nuestro caso es sobre plano horizontal y es el dato medido por los detectores de irradiancia. Para el resto de franjas debemos tener en cuenta el ángulo de inclinación con respecto a la franja central σ :

$$I_n = I_c \cos(\sigma_n) \quad (58)$$

En este caso σ_n son los ángulos de incidencia de cada una de las n zonas que consideramos. Operando obtenemos la expresión definitiva que vamos a emplear para el cálculo de la irradiancia:

$$I_n = I \frac{\cos(\sigma_n)}{\cos(\theta_i)} \quad (59)$$

En la ecuación 34 obtenida para el cálculo del rendimiento tenemos en el numerador el producto $A_c I$, este producto, una vez calculada el área de captación, expresión 56, y la irradiancia se puede englobar en una única expresión, que representa la potencia obtenida por el captador:

$$P = A_c I = \sum_n \underbrace{\frac{\pi}{2} a F_n}_{\text{área de cada franja}} \cdot I \underbrace{\frac{\cos(\sigma_n)}{\cos(\theta_i)}}_{\text{irradiancia recibida en cada franja}} \quad (60)$$

Cálculo del producto absorbancia-transmitancia

Para poder despejar el coeficiente de pérdidas y el factor F_R , factor global de transferencia de energía, debemos calcular el producto absorbancia-transmitancia, que se definió como:

$$(\tau\alpha)_\theta = (\tau\alpha)_n K(\theta) \quad (61)$$

con:

$$K(\theta)_n = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos(\theta_i)_n} - 1 \right) \quad (\tau\alpha)_n = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_{dif}} \quad (62a \quad 62b)$$

Los valores de los parámetros que aparecen en las ecuaciones son los siguientes:

$$\tau(\text{cubierta}) = 0,92 \text{ (dado por el fabricante)}$$

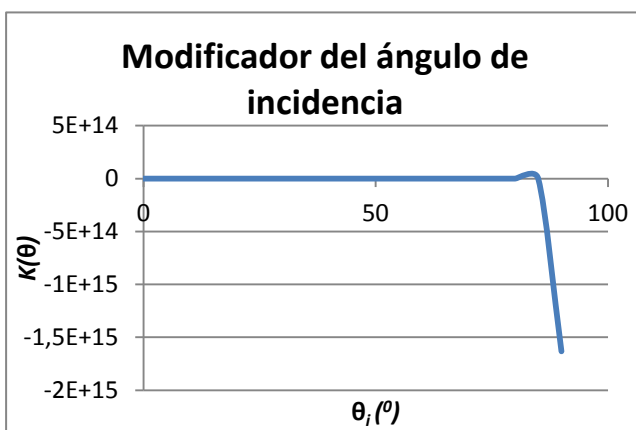
$$\alpha(\text{tubo captador}) = 0,93 \text{ (bases de datos)}$$

$$\rho_{dif} = 0,04 \text{ (bases de datos)}$$

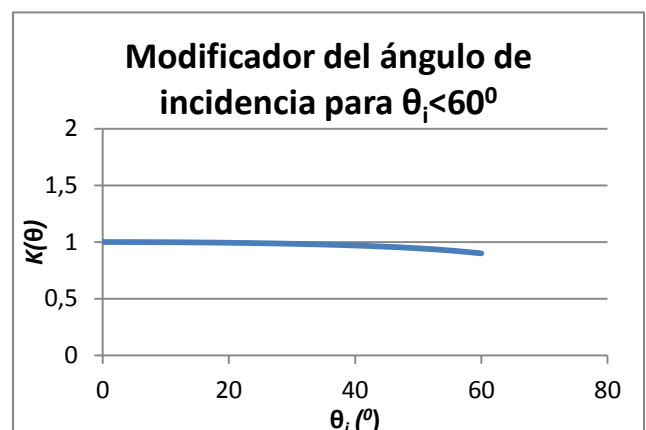
Por lo tanto:

$$(\tau\alpha)_n = 0,86 \quad (63)$$

Para el modificador del ángulo se obtienen las siguientes gráficas en las que se muestra el valor de $K(\theta)$ frente al ángulo de incidencia:



Gráfica 2: Resultados del cálculo para $K(\theta)$



Gráfica 3: Resultados del cálculo para $K(\theta < 60^\circ)$

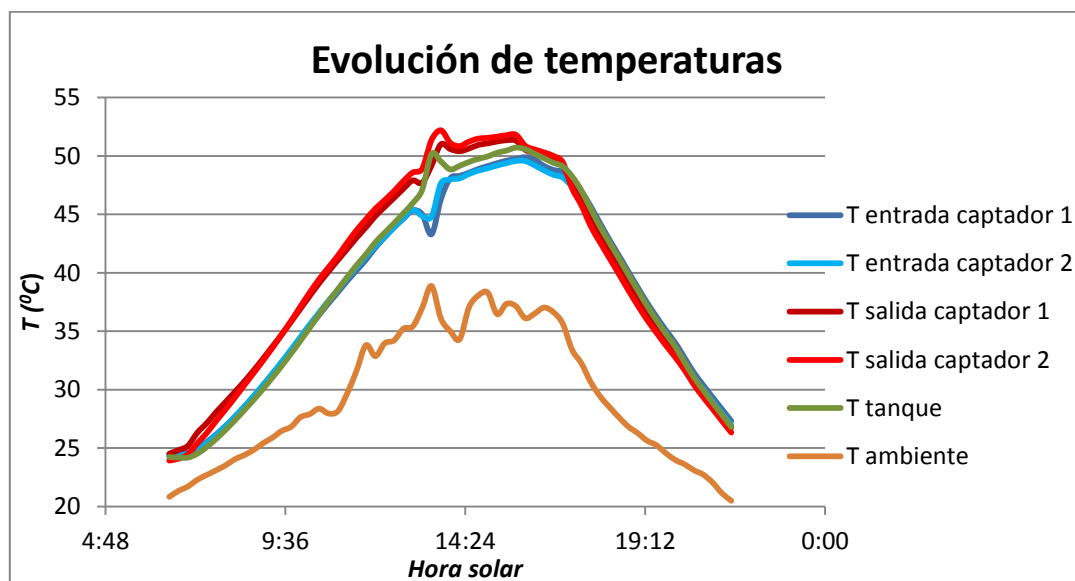
Se aprecia que el valor de este parámetro es esencialmente constante salvo para casos de ángulos de incidencia muy elevados. En nuestro caso la mayor parte de la irradiancia se recibirá en las franjas que tienen un menor ángulo de incidencia, es decir las franjas más próximas a la franja central para la que $\theta_i=0$. Para las franjas extremas, las que tiene un mayor ángulo de incidencia la irradiancia recibida es mínima, como se verá gráficamente en el próximo punto, por lo tanto podemos considerar un valor del modificador del ángulo de incidencia de 1, sin que error cometido sea excesivo. Por lo tanto:

$$(\tau\alpha)_\theta = (\tau\alpha)_n K(\theta) = 0,86$$

6. Resultados experimentales

Medidas de temperatura

Los valores de temperatura obtenidos son unos de los datos más importantes a la hora de caracterizar un captador, ya que aparte de ser necesarios para calcular parámetros como el rendimiento, son los que van a determinar las aplicaciones para las que es apto el dispositivo. Veamos la evolución de las temperaturas para uno de los días de medida:



Gráfica 4: Evolución de temperaturas

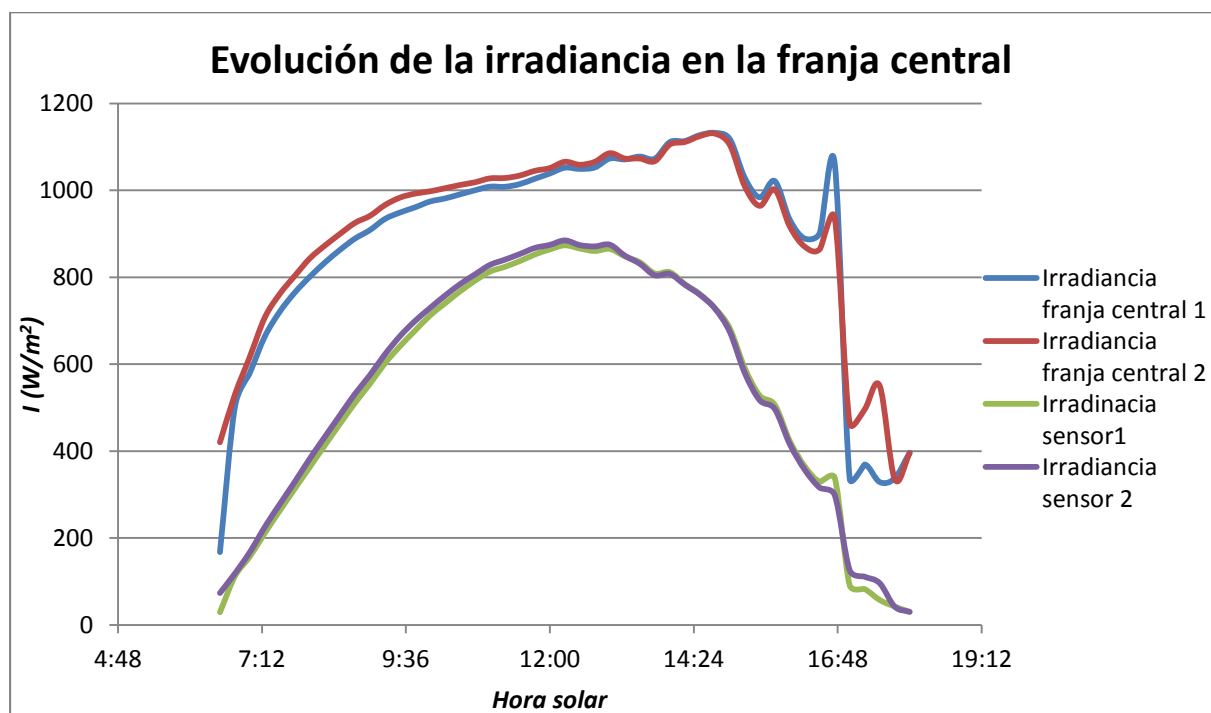
Vemos como la diferencia entre la temperatura del tanque, y la temperatura ambiente va aumentando según avanza el día debido a la energía térmica obtenida por el captador solar. Cuando empezamos a medir, las temperaturas de entrada, las de salida y la del tanque son prácticamente iguales, sin embargo una vez que empieza a aumentar la cantidad de irradiancia recibida se abre una brecha entre las temperaturas de entrada y las de salida que

representa cualitativamente la energía obtenida cada vez que el fluido recorre el circuito interior de los captadores. Esta energía se va acumulando en el tanque y es la causante del aumento de la diferencia de temperaturas entre el tanque y el ambiente.

Un vez que empieza a disminuir la irradiancia solar incidente, las temperaturas de entrada y de salida se van igualando por que los captadores no reciben la energía suficiente para aumentar la temperatura del fluido que circula por el circuito, y a partir de ese momento la temperatura el tanque y la temperatura ambiente disminuyen de forma prácticamente proporcional.

Medidas de irradiancia

Se han tomado datos de irradiancia sobre el plano de los dos captadores que conforman el dispositivo experimental. Teniendo en cuenta la hora a la que se han tomado los datos, siempre traducida a hora solar, la latitud a la que se encuentra aproximadamente la facultad $40,452^\circ$, dato que corresponde a la estación de AEMET próxima a la universidad, y la fecha de la toma de datos, podemos calcular el ángulo de incidencia solar. Una vez calculado este ángulo podemos aplicar la expresión 59 para calcular la irradiancia. Como caso ilustrativo lo calculamos para la franja central, $\sigma=0$, para comparar la irradiancia medida por el sensor y la recibida por una de las franjas para ambos captadores. La representación gráfica de los resultados es la siguiente:

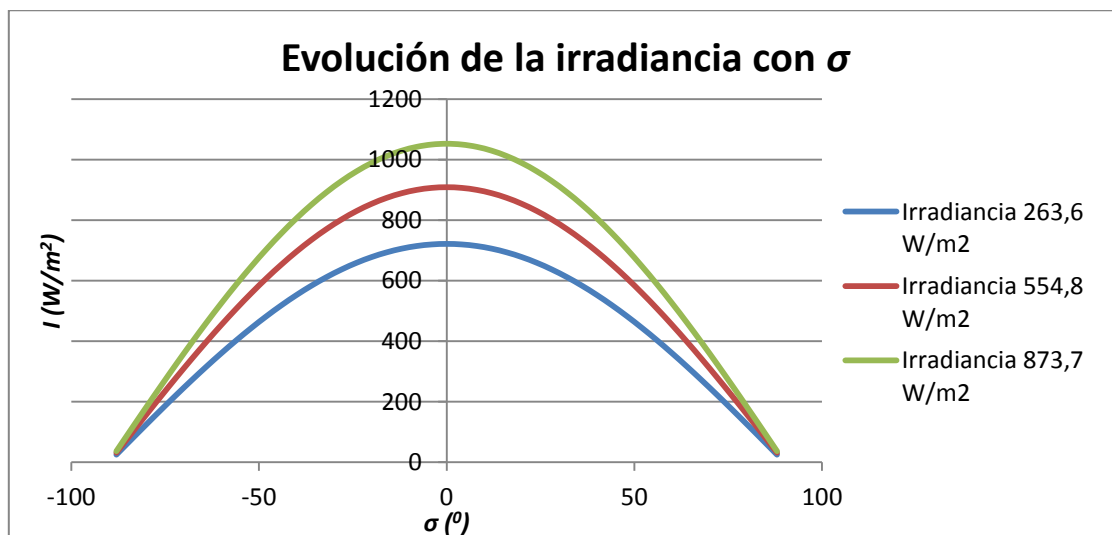


Gráfica 5: Evolución de la irradiancia en la franja central

Como se puede observar, la gráfica indica que, debido a que el haz de luz solar incide de forma perpendicular sobre la franja central, ésta recibe mucha más irradiancia que la que recibe el sensor, cuya gráfica es equivalente a la que tendríamos para un captador plano en posición horizontal. Esta es una de las ventajas de los captadores de simetría esférica, siempre hay alguna franja del captador que recibe irradiancia de forma perpendicular, con lo que la irradiancia recibida es la máxima posible, para captadores planos esta potencia máxima sólo se produce cuando el ángulo de incidencia es nulo, y si está en posición horizontal eso sólo ocurre a mediodía en el ecuador. Esa es también una de las causas por las que los captadores planos se suelen colocar con una cierta inclinación, generalmente igual a la latitud, para que al menos durante algún tiempo cercano al medio día el ángulo de incidencia sea nulo o prácticamente nulo, y la irradiancia captada sea máxima.

Además, se aprecia que la subida es más brusca en el caso de la franja, con lo que se obtiene más irradiancia a horas más tempranas y también en las últimas horas de la tarde, aunque en este caso se aprecian ciertas irregularidades en las gráficas debido probablemente a la presencia de nubes.

Otra comparación interesante es en la que vemos las diferencias que hay en la irradiancia que reciben las distintas franjas. Fijando 3 valores de irradiancia arbitrarios representamos la variación de la irradiancia con el ángulo σ :



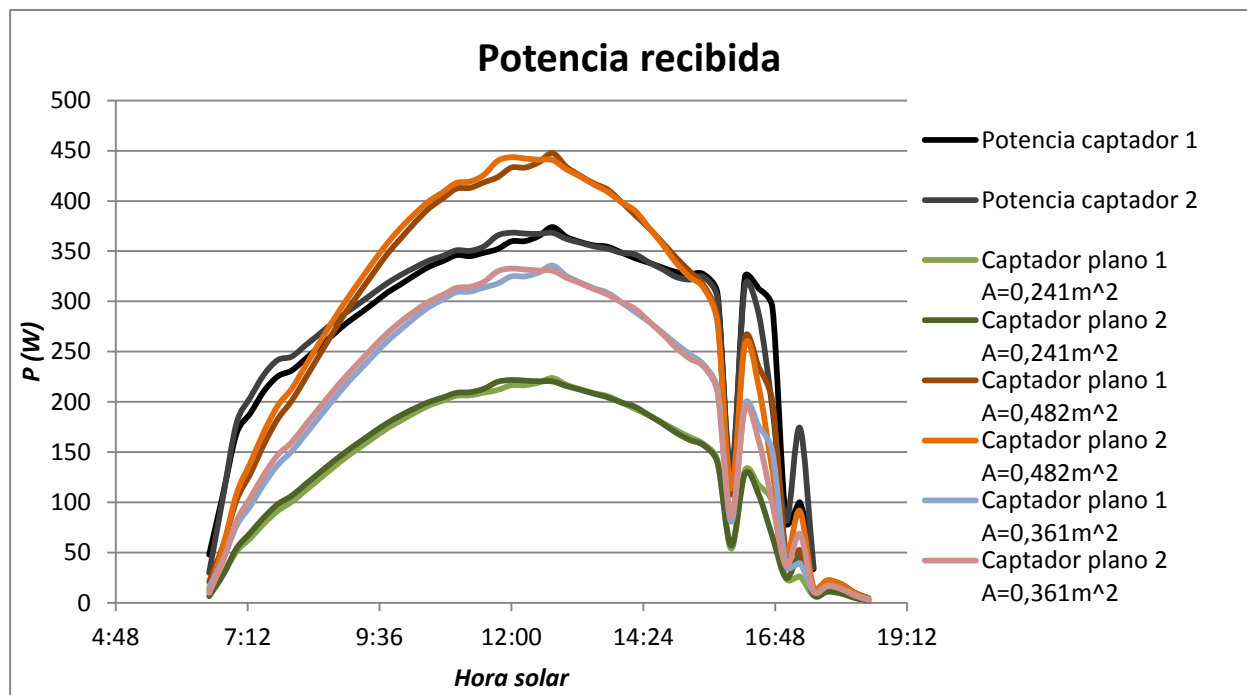
Gráfica 6: Evolución de la irradiancia con σ

Podemos observar como en las franjas laterales la irradiancia recibida es mínima, debido al gran ángulo con que la reciben. Como se comentó anteriormente, para hacer los cálculos del área de captación en esa zona se han realizado varias aproximaciones, pero al recibir tan

poca irradiancia en comparación con la que reciben las franjas que tiene un ángulo σ más próximo a cero, los errores introducidos en el cálculo no afectan prácticamente al resultado final, ni influirán en los resultados de la potencia obtenida ni del rendimiento que veremos a continuación.

Potencia recibida

Representamos para el día 30 de agosto, el producto del área por la irradiancia recibida calculado según la ecuación 60, que nos da la potencia total recibida, para los dos captadores. Además representamos la potencia que obtendríamos con tres captadores planos en posición horizontal, uno con un área igual a la máxima área posible calculada para nuestro captador ($0,482 \text{ m}^2$) y otro con un área igual a la mínima posible ($0,241 \text{ m}^2$) y otro con un área igual al valor medio de los posibles valores del área de captación ($0,361 \text{ m}^2$).



Gráfica7: Potencia recibida

En esta gráfica se pueden apreciar varias cosas, en primer lugar a primeras horas de la mañana y a últimas de la tarde, a pesar de la presencia de irregularidades debidas a las nubes, la potencia recibida es mayor que la que se obtendría con cualquiera de los tres captadores planos, con lo que si nuestra aplicación requiere que se alcance una cierta temperatura con rapidez y esa temperatura es accesible para el captador semiesférico, éste sería más adecuado para esa aplicación.

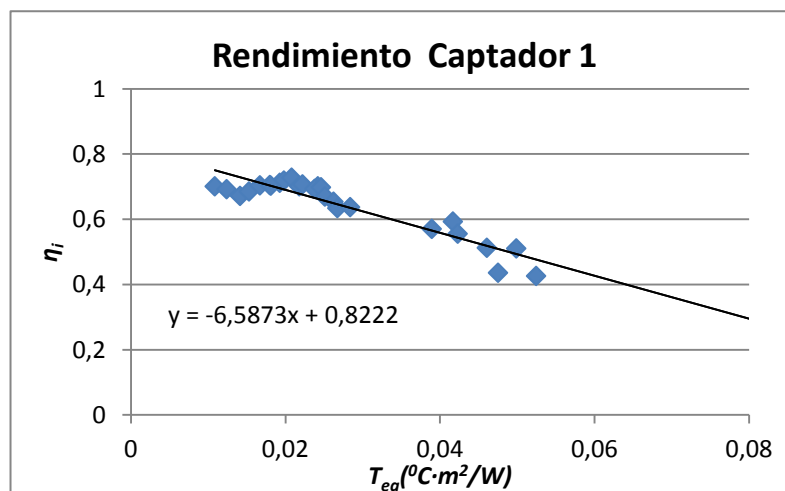
Por otra parte tanto el captador plano más pequeño como el que tiene un área media, siempre reciben una potencia menor a la del captador semiesférico, sin embargo el captador más grande a partir de cierta hora, próxima a las 9:00 hora solar, 11:00 hora local, empieza a recibir una mayor potencia. Este captador plano, tiene como hemos dicho un área de 0,482 m², el área que ocupa el captador semiesférico, y ahora nos referimos al área de suelo ocupada por todo el sistema es de 0,7396 m², mayor por tanto que la ocupada por el captador plano. Por tanto podemos considerar que el aprovechamiento del suelo en cuanto a potencia recibida, con captadores planos tradicionales es mayor que si pusiéramos captadores semiesféricos. Sin embargo hay que considerar también que las pérdidas en ambos sistemas y los factores de transferencia de calor, son distintos, y que no es lo mismo la potencia incidente o recibida que la que potencia calorífica que se obtiene al final.

Se ve también que para el captador plano más grande se obtiene un pico de potencia más alto, lo que, a pesar de lo comentado anteriormente, en principio supondría un valor de temperatura pico más alto. Dependiendo de la aplicación para la que necesitemos el captador habría que sopesar si compensa más tener una temperatura pico más alta o alcanzar la temperatura de operación durante una mayor cantidad de tiempo.

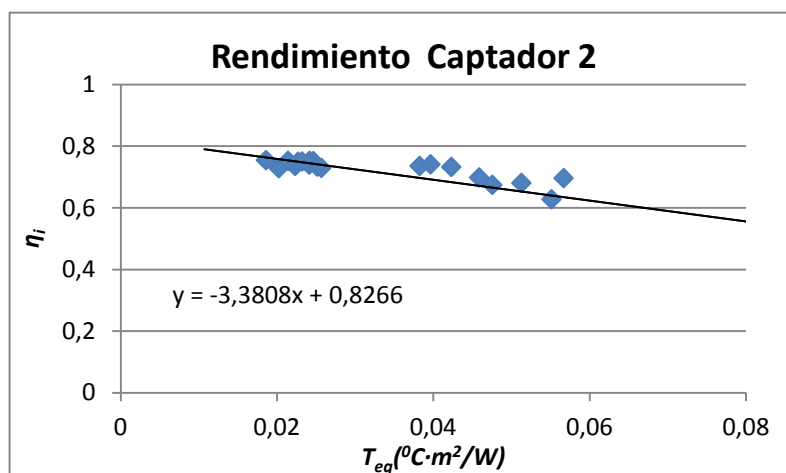
Rendimiento

Para calcular el rendimiento empleamos las expresiones 32, 33, 34, 35 y 36. Todos los parámetros que aparecen en las variables x e y, son medidos o, en el caso del producto $A_c I$, calculados con las expresiones desarrolladas en el punto 5. Haciendo la representación gráfica de estas variables obtenemos la curva de rendimiento y con ella podemos hallar los valores del factor de transferencia global de calor F_R y del coeficiente de pérdidas del captador U_L .

Vemos las gráficas obtenidas para los dos captadores para un conjunto de datos.



Gráfica 8: Rendimiento captador 1



Gráfica 9: Rendimiento captador 2

Las ecuaciones de las rectas obtenidas son:

$$\text{Captador 1: } y = 0,8222 - 6,5873x$$

$$\text{Captador 2: } y = 0,8266 - 3,3808x$$

Analizando la ordenada en el origen para ambos captadores, tenemos:

$$C1: F_R(\tau\alpha)_\theta = 0,8222 \quad C2: F_R(\tau\alpha)_\theta = 0,8266$$

Esta ordenada, η_o , representa el rendimiento óptico del captador, y depende sólo de las características de los materiales con que está fabricado. Ambos valores son muy parecidos, y si los comparamos con los valores habituales que se obtienen para captadores sin concentración, como por ejemplo los captadores planos, que están entre 0,8 y 0,9, vemos que los resultados obtenidos son muy razonables. Si empleamos el valor de $(\tau\alpha)_\theta$ obtenido en la ecuación 63, podemos despejar el valor del factor global de transferencia de energía F_R :

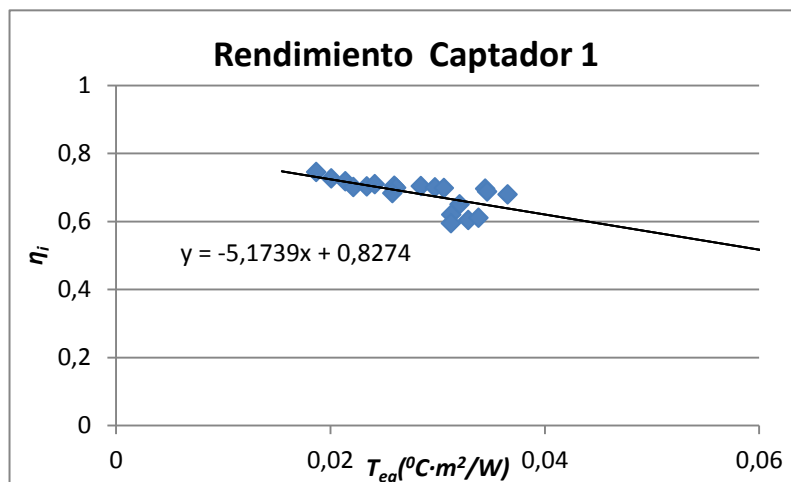
$$C1: F_R = 0,9560 \quad C2: F_R = 0,9612$$

Ambos valores son razonables y consecuentes con las características del sistema y con los resultados obtenidos en captadores sin concentración. Por otra parte las pendientes de las curvas, η_t , representan el rendimiento térmico de los captadores y su valor depende de las características térmicas de estos, como por ejemplo de la conductividad térmica, como ya se mencionó en el apartado de consideraciones experimentales. Puede haber también una dependencia con las variables ambientales, que intervienen esencialmente en las pérdidas de tipo radiativo. Del valor de las pendientes y empleando el valor obtenido para F_R , podemos despejar los valores de U_L .

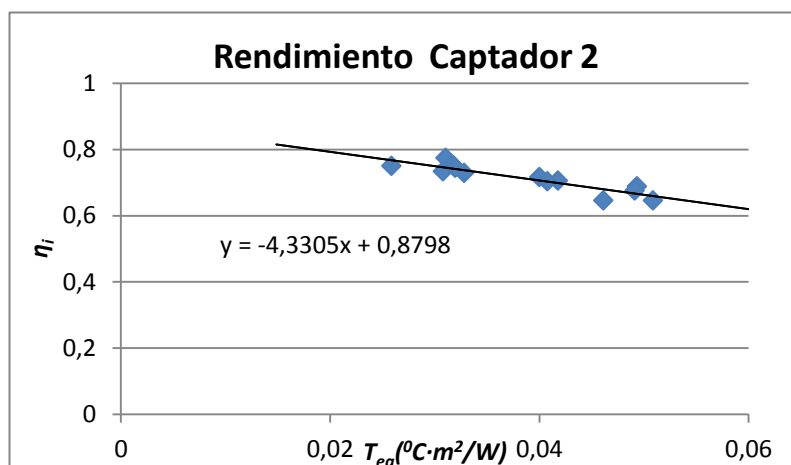
$$\eta_t = -F_R U_L$$

$$C1: U_L = 6,8905 \text{ W/m}^2\text{K} \quad C2: U_L = 3,5173 \text{ W/m}^2\text{K}$$

El valor obtenido para el captador 1 es muy razonable, teniendo en cuenta que los captadores para poder ser homologados han de tener un valor del coeficiente de pérdidas menor que $9 \text{ W/m}^2\text{K}$. Sin embargo, el valor obtenido para el captador 2 es un poco bajo, además las medidas para ambos captadores se han realizado en las mismas condiciones de operación, mismo caudal y misma inclinación, con lo que el resultado debería ser semejante. Es posible que la obtención de este resultado se deba a errores en alguna medida o bien a condiciones ambientales locales que hayan podido afectar al valor del coeficiente de pérdidas. Por ello se ha procedido a realizar otro conjunto de medidas, con las que obtenemos las siguientes curvas de rendimiento:



Gráfica 10: Rendimiento captador 1



Gráfica 11: Rendimiento captador 2

Las ecuaciones de las rectas obtenidas son:

Captador 1: $y = 0,8274 - 5,1739x$

Captador 2: $y = 0,8798 - 4,3305x$

Y operando como en el caso anterior podemos obtener:

$$C1: F_R = 0,9621 \quad C2: F_R = 1,0230$$

$$C1: U_L = 5,3777 \text{ W/m}^2\text{K} \quad C2: U_L = 4,2330 \text{ W/m}^2\text{K}$$

En este caso observamos que los valores para el coeficiente de pérdidas son razonables en ambos casos. Sin embargo el valor de F_R para el captador 2 es un valor incorrecto, ya que no puede ser mayor que 1, y que ha podido darse por los mismos motivos que se mencionaron anteriormente, algún problema de medida o algún suceso local que haya podido influir sobre el captador. Si hacemos los valores medios de los resultados correctos, descartando los que se ha mencionado, podemos dar un resultado final para los parámetros:

$$\eta_o = 0,83 \quad F_R = 0,96 \quad U_L = 5,50 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Si analizamos la curva del rendimiento que ofrece el fabricante del captador:

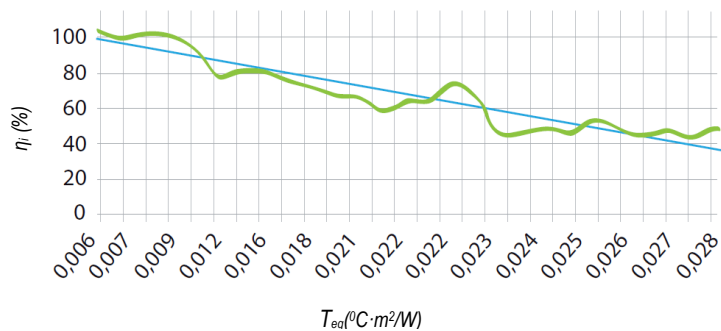


Figura 37: Imagen de la curva de rendimiento dada por el fabricante

Vemos que para ellos la ordenada en el origen tiene un valor 1, o lo que es lo mismo obtienen un rendimiento óptico del 100%. Eso es físicamente imposible porque todos los materiales tienen una cierta absorbanza y un cierta reflectividad, por mínimas que sean. Nuestro valor es un resultado razonable, en consonancia con otros captadores del mismo tipo, y que muestra además que a pesar de emplear unos materiales, como metacrilato para la cubierta y polipropileno para el tubo captador, que tienen un coste mucho más bajo que los que se emplean en otros captadores como es el caso de los captadores planos que emplean vidrio y cobre, el rendimiento óptico del sistema es prácticamente igual de bueno, aunque de cara a recomendar el uso de estos materiales habría que considerar también su durabilidad.

En cuanto al valor del coeficiente de pérdidas, el fabricante da un valor de 18 W/m²K. Este valor es bastante superior al obtenido en nuestros ensayos. Esto se debe a que hemos

definido la temperatura equivalente del captador de forma diferente a la definición para captadores planos:

$$T_{eq} = \frac{(\overline{T_e} - T_a) A_p}{I A_c} \quad (64)$$

Cuando habitualmente se define como $T_{eq} = \frac{(\overline{T_e} - T_a)}{I}$. El motivo por el que se ha llevado a cabo esta definición es porque en primer lugar el área de pérdidas y el área de captación no son iguales como ocurre en los captadores planos para los que está desarrollada la expresión habitual, y eso hay que tenerlo en cuenta, y en segundo lugar el área de captación es una variable, que a la hora de hacer el ajuste y representar la curva debe ir englobado en la coordenada x. Si dividimos el área de pérdidas por el valor medio del área de captación calculado tanto con sus valores como con los obtenidos mediante nuestro modelo teórico (ver tabla 1), tenemos:

$$\frac{A_p}{A_c} = \frac{1,2422}{0,3795(\text{fabricante})} = 3,2733 \quad \frac{A_p}{A_c} = \frac{1,2422}{0,3615(\text{modelo})} = 3,4362$$

Y si dividimos su valor de U_L por el nuestro obtenemos:

$$\frac{18}{5,50} = 3,27$$

Es decir, el fabricante ha calculado su curva de rendimiento sin tener en cuenta la variabilidad del área de captación y la diferencia del área de pérdidas respecto del área de captación. Ha supuesto que ambas son iguales y lo ha tomado como un valor constante empleando la misma definición de temperatura equivalente que para un captador plano con área constante, cuando esa no es la realidad del captador, y ha obtenido un valor del coeficiente de pérdidas erróneo. Gracias al algoritmo desarrollado para el cálculo del área de captación y del producto $A_c I$, hemos podido tener en cuenta las circunstancias propias del captador y obtener un valor del coeficiente de pérdidas adecuado.

7. Conclusiones

1. Se ha desarrollado un algoritmo que permite determinar la superficie real de intercepción de la irradiancia solar para captadores de geometría semiesférica, lo que supone un avance significativo en el estudio y caracterización de este tipo de sistemas.
2. Se ha desarrollado una nueva expresión, completamente novedosa, para el estudio y caracterización de captadores sin concentración de geometría no plana, mediante la introducción de un factor de corrección que tiene en cuenta la superficie eficaz de captación. Este desarrollo ha conducido a la obtención de una nueva expresión para determinar el rendimiento en captadores de geometría esférica o semiesférica.
3. Se ha redefinido el concepto de temperatura equivalente teniendo en cuenta la energía real recibida en función de la superficie eficaz de captación.
4. El desarrollo del nuevo algoritmo para la superficie eficaz de intercepción de la irradiancia solar, junto con el factor corrector de la temperatura equivalente han permitido determinar el coeficiente global de pérdidas del captador de manera correcta.
5. El captador solar térmico analizado presenta un área de captación variable. Se ha desarrollado un algoritmo para calcularla en función del ángulo de incidencia, lo que permite hallarla para cualquier localización geográfica, disposición del captador y momento de medida. El error máximo cometido en el cálculo de dicha área respecto de los valores dados por el fabricante es de un 5,9 %.
6. Se ha obtenido un valor del rendimiento óptico del captador de 0,83. Este es un valor semejante al de otros captadores sin concentración, lo que significa que empleando materiales de un coste relativamente bajo se pueden conseguir unas propiedades ópticas semejantes a las de captadores que utilizan materiales de coste superior.
7. Se ha obtenido un valor del coeficiente de pérdidas de 5,5 W/m²K. Este valor es inferior al obtenido por el fabricante. Analizando los datos se ha observado que es debido a que en su curva de rendimiento no han tenido en cuenta la variabilidad del área de captación ni la diferencia que hay entre ésta y el área de pérdidas.
8. El valor obtenido del factor global de transferencia de calor es de 0,96. Este es un valor coherente con las características del sistema, en el que el tubo captador es a su vez el canal por el que circula el fluido caloportador, con lo que las pérdidas asociadas a la transferencia de calor han de ser muy bajas, menores que las obtenidas en captadores

planos, en los que la captación térmica se da en la placa absorbedora y de ahí se transfiere el calor a los tubos por los que circula el fluido.

9. Se ha observado que, para las fechas en las que se han realizado la toma de datos, la potencia recibida por el captador es mayor que la tendría un captador plano en posición horizontal de área igual al área mínima o al área media del área de captación de nuestro sistema. Sin embargo es menor que la que se obtendría con un captador plano de área igual al valor del área máxima. La superficie de suelo ocupada por el captador semiesférico es mayor que la que ocuparía el captador plano de área máxima por lo que el aprovechamiento del suelo en cuanto a potencia recibida es menor para el captador semiesférico, para las fechas mencionadas.
10. El captador analizado tiene siempre una parte del área de captación que recibe irradiación de forma perpendicular, por lo que cuando el ángulo de incidencia es bajo la potencia recibida es mayor que para cualquier captador plano, tal y como ocurre a primeras horas de la mañana y a últimas horas de la tarde. Es por tanto probable que para fechas en las que los rayos de sol incidan con ángulos bajos, como durante el invierno, y parte del otoño y la primavera la potencia obtenida por el captador semiesférico sea siempre superior a la obtenida en cualquier captador plano en posición horizontal, ya que la potencia recibida por estos captadores tiene una gran dependencia con el ángulo de incidencia.

8. Trabajo futuro

El trabajo realizado hasta ahora puede tener continuidad en un futuro. Se pueden hacer más medidas para corroborar los resultados obtenidos del coeficiente de pérdidas y del rendimiento óptico del sistema. Sería también conveniente realizar medidas con los captadores semiesféricos inclinados y comparar los resultados con lo que se obtendrían para captadores planos inclinados. Tendría también mucho interés tomar datos en distintas fechas, para obtener la evolución de los distintos parámetros a lo largo del año, y comprobar que para ángulos de incidencia bajos, el captador esférico tiene un mejor comportamiento que cualquier captador plano.

9. Bibliografía:

- [1] Solar engineering of thermal processes John A. Duffie, William A. Beckman. Third Edition. Ed John Wiley & Sons.
- [2] Estudio y caracterización de un captador de simetría esférica para producción de ACS por Energía Solar. Trabajo Fin de Máster en Física Aplicada, UCM. Ignacio Santos Gallego.
- [3] Estudio y caracterización óptica de la irradiancia solar sobre captadores solares esféricos. Trabajo Fin de Máster en Física Aplicada, UCM. Leticia Bragado Alonso.
- [4] Applied solar energy. An introduction. Aden B. Meinel, Marjorie R. Meinel. Ed. Addison-Wesley.
- [5] Principles of solar engineering. Yogi Goswami, Franck Kreith, Jan F. Kreider. Second edition. Ed. Taylor & Francis.
- [6] Solar Collectors. Test Methods and Design Guidelines. Solar Energy R&D in the European Community, Series A Volume 6. D. Reidel Publishing Company.

Anexo: Programa Matlab empleado para representar las figuras.

Para hacer el estudio teórico del captador, nos ayudamos de las imágenes creadas mediante de un programa realizado en el soporte Matlab. Este programa es el siguiente:

```
function spiraltoroidal(r,R,k)

%R=Radio de la semiesfera
%k=Numero de vueltas de la hélice sobre la esfera
%r=Espesor del tubo

v=linspace(0,2*pi,500);%vector fila
u=linspace(0,pi/2,500)';%vector columna

x=R*(sin(u).*sin(4*k*u))*ones(size(v))+r*sin(4*k*u)*cos(v);
y=R*(sin(u).*cos(4*k*u))*ones(size(v))+r*cos(4*k*u)*cos(v);
z=(R*cos(u)*ones(size(v)))+(r*ones(size(u))*sin(v));

surf(x,y,z)
axis equal
grid on
end
```

Con este programa se genera la siguiente imagen:

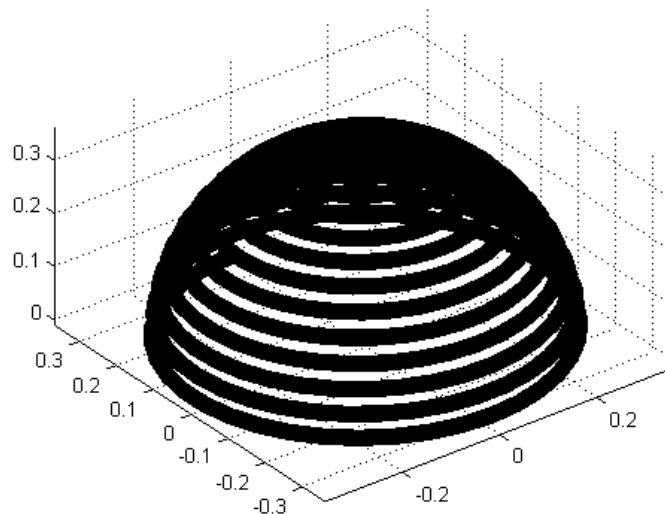


Figura 1: Imagen esquemática del captador semiesférico

Esta es una imagen esquemática a escala del tubo colector. En los parámetros de entrada del programa se pueden elegir las dimensiones del sistema. Para hacer la representación gráfica de la figura anterior se han introducido los valores reales del captador analizado, $R=0,35$ m, $r=0,0125$ m y $k=13$.