

## CONCEPTUALIZACIÓN, DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE UN COLECTOR SOLAR NO ACRISTALADO PARA INTEGRACIÓN EN FACHADA

Roberto Garay Martinez -- Ingeniero Industrial <sup>1</sup> \*

Beñat Arregi Goikolea -- Arquitecto <sup>1</sup>

Paul Bonnamy -- Ingeniero <sup>2</sup>

Saed Raji -- Doctor Ingeniero <sup>2</sup>

Jérôme Lopez -- Doctor Ingeniero <sup>2</sup>

1 Tecnalia, Parque Tecnológico de Bizkaia, Edificio 700, E-48160 Derio, España

2 Nobatek-Inef4, 67 rue de Mirambeau, F-64600 Anglet, Francia

\* Roberto.garay@tecnalia.com +34 667 178 958

Recibido: -- Aceptado: - DOI: 10.(A cumplimentar por el Editor)

## CONCEPT, DEVELOPMENT AND THERMAL CHARACTERIZATION OF AN UNGLAZED SOLAR THERMAL COLLECTOR FOR FAÇADE INTEGRATION

### ABSTRACT:

In this work, an innovative solar thermal collector system is presented for façade integration. The developed modular unglazed solar collector system is designed for low temperature energy capture, and compatible with a heat pump based combined solar thermal system. The main advantage of this system is that the lack of a glazed surface allows for its integration into common façade systems without architectural implications. Modularity, color or textures are unaffected by the integration process. This work presents the development of the collector, together with its thermal modeling and experimental assessment.

**Keywords:** Solar collector, Façade integration, Construction, Solar systems, Ventilated façade

### RESUMEN:

En este artículo se presenta un innovador sistema de fachada con integración de un sistema de captación solar térmica. El sistema térmico desarrollado puede clasificarse como colector solar no acristalado, es modular y está pensado para la captura de energía solar a baja temperatura, compatible con un sistema solar combinado que integre bombas de calor. Este sistema presenta la novedad de que la integración del sistema captador no modifica la apariencia externa del sistema, permitiendo el diseño y construcción de la fachada sin implicaciones arquitectónicas –modularidad, color, textura...– derivadas del sistema solar. En este artículo se presentan el desarrollo realizado, tanto en la concepción del sistema como su modelización numérica, y los resultados experimentales realizados.

**Palabras clave:** Colector solar; Integración en fachada; Edificación; Sistemas solares; Fachada ventilada

## 1.- INTRODUCCIÓN

El potencial de la energía solar es enorme en comparación con las fuentes fósiles de energía, hasta el punto en que la cantidad de energía solar que llega a la superficie de la tierra en una hora es mayor que la energía utilizada en el mundo en un año [1]. Por lo tanto, se apunta hacia el desarrollo de conceptos y soluciones que promuevan el uso de energía solar en los edificios, asignándoles un papel importante en su equilibrio energético.

El Código Técnico de la Edificación (CTE) detalla la contribución solar mínima de agua caliente sanitaria (ACS) en su Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía [2]. Esta contribución mínima se establece en forma de una fracción solar o porcentaje sobre la demanda energética anual de ACS que debe aportarse mediante energía solar (30 a 70%, dependiendo de la demanda total y la zona climática). Dicha contribución puede sustituirse por una instalación alternativa (de otras energías renovables, recuperador de calor o proceso de cogeneración), si se justifica una reducción equivalente en consumo de energía primaria y emisiones de dióxido de carbono. Las exigencias del rendimiento de las instalaciones térmicas se desarrollan en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) [3].

Algunas de las razones por las que las tecnologías solares térmicas no son ampliamente adoptadas por arquitectos y planificadores urbanos son el aspecto económico [4] y la falta de productos adecuados para su integración en la

construcción [5]. Los módulos solares no deberían desarrollarse únicamente como elementos técnicos adicionales, sino como componentes de construcción multifuncionales que cumplan con los requisitos constructivos, funcionales y formales de los elementos de construcción a los que sustituyen.

La instalación de colectores solares térmicos como elementos de fachada ofrece ventajas notables, tales como una mejor disponibilidad de espacio y un mayor asoleamiento en invierno que en verano. Sin embargo, su uso es todavía muy limitado, en gran parte debido a la falta de soluciones que se integren no solo en edificios singulares sino también en el lenguaje de la arquitectura común. La integración formal de colectores solares en fachada es un asunto tan crucial como complejo, y puede conseguirse de manera satisfactoria atendiendo a una serie de consideraciones arquitectónicas [6]:

- La posición y dimensión del colector debe ser coherente con la composición del edificio
- El tamaño y proporción del módulo tiene que articularse con la malla compositiva y las dimensiones de los demás elementos de la fachada
- El material, textura y color del colector debe ser compatible con el resto de materiales
- Los encuentros y juntas con los materiales adyacentes deben ejecutarse de manera coherente con el lenguaje arquitectónico de la fachada (juntas de goma, perfilierías similares a las ventanas, otros elementos de transición, sin juntas visibles, etc.)

Existe una serie de proyectos de investigación recientes que intentan mejorar la aplicabilidad de las tecnologías solares en fachada [7], [8], [9], [10]. Es en este contexto donde se desarrolla el proyecto BATISOL [11] para la generación de una tecnología solar no acristalada, de bajo coste, para su integración no intrusiva en el trasdós de revestimientos metálicos. La integración del revestimiento con sistemas solares combinados y bomba de calor permitirá, en última instancia, suministrar energía térmica para calefacción y ACS mediante una tecnología de alta eficiencia.

Las principales ventajas de BATISOL radican en que está conceptualizado para un impacto arquitectónico nulo, y una integración modular con uniones flexibles que facilitan su aceptación por parte de usuarios finales –impacto estético– y profesionales –facilidad de ensamblaje y substitución–.

## 2.- POSICIONAMIENTO DEL SISTEMA DESARROLLADO

En el mercado actual de colectores solares integrados en envolvente se encuentran soluciones diversas, tales como colectores integrados en elementos acristalados [12] [13], colectores de tubos de vacío vistos sobre la fachada [14] [15] [16], y elementos integrados en módulos de muro cortina [17] [18] [19], entre otras soluciones.

BATISOL busca una integración de tecnologías solares en acabados comunes en la edificación, mediante tecnologías modulares en tamaño y uniones en seco, que puedan integrarse en sistemas constructivos convencionales, y por tanto substituir y ser complementadas con materiales comúnmente empleados en el sector. De esta forma, el sistema propuesto podrá complementarse con acabados convencionales en aquellos módulos donde se producen ajustes dimensionales y de modularidad (p.ej. en la proximidad de ventanas, recovecos, etc.).

De entre las soluciones desarrolladas en proyectos de investigación recientes, varias de ellas presentan soluciones en esta línea [7] [8] [9] [20]. Sin embargo, la modularidad de [7] [9] [20] dificulta su adaptación e integración en el edificio. [8] presenta una ejecución en húmedo, dificultando el control de calidad, la reparación y substitución de paneles. Igualmente [7] presenta una ejecución rígida en la que las uniones entre placas y conducciones se realizan con un conexionado en paralelo, dificultando su generalización para el trazado de redes hidráulicas en edificios con ventanas u otros elementos que obliguen a interrumpir las hiladas de placas.

Si bien la integración estética es un criterio cualitativo, [9] presenta una apariencia característica difícilmente compatible con actuaciones en el parque edificado consolidado. [8] proporciona una buena solución para acabados cementosos. Otras soluciones [7] [20] son compatibles con acabados metálicos, generalmente en acero, comunes en edificación terciaria.

En la actualidad, debido a sus múltiples beneficios arquitectónicos, térmicos, higrotérmicos y estéticos, existe una tendencia hacia los sistemas de fachada ventilada. Estos sistemas, caracterizados por el uso de una subestructura metálica para el soporte de la hoja exterior, permiten el uso de varios materiales de acabado. Entre estos materiales se encuentran los compuestos de plástico-aluminio, cuya envolvente exterior metálica presenta una oportunidad para la integración de colectores solares por el trasdós. El sistema desarrollado en BATISOL permite su correcta integración en esta solución, que por otra parte no es compatible con el resto de sistemas analizados.

## 3.- HIBRIDACIÓN DE SISTEMA DE FACHADA CON COLECTOR SOLAR NO ACRISTALADO

### 3.1.- Concepto

Se ha desarrollado un sistema de acabado metálico para sistemas de fachada ventilada, compatible con los sistemas arquitectónicos de composite-aluminio.

Los sistemas de fachada ventilada presentan variaciones en función del tipo de acabado empleado, el nivel de flexibilidad deseado en su modularidad, etc. Estos se componen de una subestructura metálica, comúnmente de aluminio, que se fija sobre un paño resistente en los edificios. Esta subestructura presenta la doble función de soportar la capa exterior de acabado de la fachada y alojar una capa de aislamiento térmico que reduzca la transmisión de calor entre el edificio y su entorno.

En el desarrollo del sistema que se presenta en este documento, se ha buscado su compatibilidad con los sistemas de fijación de composite-aluminio, y particularmente, con sistemas basados en el mecanizado del borde de bandejas [21].

El colector desarrollado (figura 1) se compone de una superficie captadora metálica (a), un cuerpo (b) sobre el que se mecaniza el circuito hidráulico (d), y conectores hidráulicos de entrada y salida (c). El circuito hidráulico consiste en canales de sección rectangular cuyo conexionado puede ser en paralelo o en serie, dependiendo de cada caso.

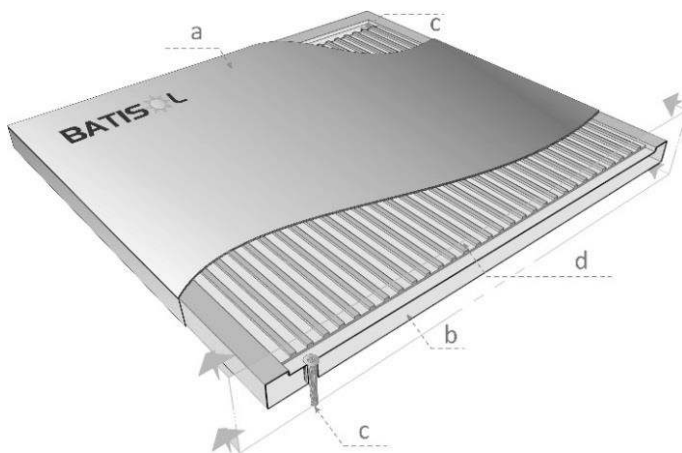


Fig. 1: Partes del colector

Aunque no ha sido parte del proceso desarrollado en este artículo, los autores consideran que este colector vería su rendimiento mejorado sustancialmente mediante el uso de acabados superficiales (pinturas) con propiedades selectivas a la longitud de onda de la radiación.

### 3.2.- Integración en sistema de fachada ventilada

El uso de las fachadas ventiladas está en auge, tanto en obra nueva como en soluciones de rehabilitación de muros exteriores. Además de su mayor durabilidad y mejor acabado, estas fachadas proporcionan buenas prestaciones energéticas a la vez que protegen contra el sobrecalentamiento o las humedades.

Las fachadas ventiladas se caracterizan por presentar una cámara de aire (drenada y normalmente ventilada) tras el revestimiento exterior, fijado mecánicamente a una subestructura que a su vez traslada las cargas al muro exterior o a los forjados. Habitualmente, estas soluciones incorporan una capa de aislamiento térmico que se fija contra la cara exterior del muro, de forma que queda protegido por el revestimiento exterior y la cámara de aire.

Los elementos exteriores de acabado no deben ser portantes ni estancos, existiendo para este fin un amplio abanico de materiales disponibles, tales como paneles de madera, plástico, hormigón prefabricado o reforzado con fibra de vidrio (GRC), composites, y materiales cerámicos, laminados o metálicos, entre otros.

Para la integración con colectores solares se plantea el uso de acabados metálicos debido a su alta capacidad de absorción de la radiación solar, así como su mayor ligereza en comparación con acabados cerámicos o pétreos. Los materiales más comunes para este fin son el acero y el aluminio. En el caso de este último, los paneles se componen de dos hojas de aluminio unidas por un núcleo de resina termoplástica [22]. Estos paneles pueden ser mecanizados, perforados o plegados, y permiten una amplia variedad de tratamientos de acabado.

### 3.3.- Integración en sistema solar térmico combinado

Los sistemas solares combinados son conjuntos de elementos que incorporan tecnologías solares con sistemas de almacenamiento térmico y fuentes de energía externas, tales como calderas y bombas de calor de diversos tipos, para satisfacer cargas térmicas de calefacción, refrigeración y ACS en los edificios.

La configuración más habitual de estos sistemas es la integración de varias fuentes de generación de forma que el campo de colectores solares se emplea como fuente de calor principal, con aportes adicionales de la caldera para situaciones en las que la temperatura del depósito de acumulación, o de la derivación a los sistemas de consumo, no alcanza la temperatura de consigna. Puede encontrarse bibliografía específica en [23].

El sistema presentado en este artículo, al igual que varios de los sistemas identificados [24-26] [7-9], se caracteriza por emplear la superficie exterior como elemento captador. El hecho de no disponer de elementos vidriados externos conlleva un nivel óptimo de absorción solar, a la vez que altos niveles de pérdidas térmicas. En [27] se identifican los niveles de rendimiento de varias tecnologías solares, incluyendo sistemas solares no acristalados como BATISOL.

En general, el rendimiento térmico de los elementos no acristalados presenta una alta sensibilidad al gradiente térmico entre el colector y el ambiente exterior, con lo que deben ser operados a temperaturas bajas para obtener rendimientos térmicos comparables a los de los captadores vidriados. Con estas consideraciones, y teniendo en cuenta que la temperatura del campo de colectores es dependiente de la cantidad de energía solar incidente y de la energía extraída de él, se puede estimar que el sistema BATISOL puede operar razonablemente entre 10 y 15 °C por encima de la temperatura ambiental, para niveles de radiación solar de 500 W/m<sup>2</sup>. En estos valores, se obtendría un rendimiento térmico global del captador solar en torno al 50-60%.

Este nivel térmico es claramente insuficiente para satisfacer directamente el consumo térmico de un edificio, tanto de calefacción como de refrigeración. Es por ello que la integración del colector propuesto en este artículo se realiza en forma de fuente de calor para una bomba de calor agua-agua que eleve el nivel térmico del circuito secundario hasta la temperatura requerida por el sistema de distribución. Según se puede observar en la figura 6 (material adicional), el incremento de 10 a 15 °C en la temperatura de la fuente, se traslada en forma de incremento de COP de 1,5 a 2 unidades.

## 4.- MODELIZACIÓN NUMÉRICA

Se han realizado varios modelos térmicos numéricos del colector solar:

- Cálculo térmico bidimensional (2D) de la sección transversal del colector (figura 2).
- Modelado pseudo-tridimensional (2+1D) de un canal del colector térmico, dónde se repite n veces el cálculo 2D en la dirección del fluido y se aplica un balance de energía en la línea de fluido para cada sección n.
- Modelado tridimensional (3D) de un canal del colector térmico, mediante la discretización del canal completo en elementos finitos.

En la figura 7 (material adicional), puede encontrarse un esquema conceptual de los modelos térmicos realizados.

### 4.1.- MODELO BIDIMENSIONAL

Se han realizado modelos numéricos bidimensionales mediante el programa COMSOL [28]. Mediante este cálculo se ha establecido el rendimiento de captación solar para distintas geometrías del colector.

De forma similar a [29], y considerando la operación de este sistema a baja temperatura, el rendimiento de captación del colector se define en forma de una ecuación lineal de la forma mostrada en (1).

$$\eta = c_0 + c_1 \cdot \frac{T_{sup} - T_{ext}}{I_{sol}} \quad (1)$$

Para reducir el tiempo de cálculo, el área incluida en los modelos se ha reducido al menor elemento posible, y se ha optimizado la malla incrementando su densidad en las zonas de mayor flujo de calor. La figura 2 muestra una sección del colector solar, y la discretización y el mallado realizados. El área discretizada se corresponde con la sección existente entre los planos de simetría de un canal y el plano de simetría entre dos canales adyacentes. En la misma figura se referencian los flujos de calor en la cara externa del colector (irradiación solar, intercambio radiante y convectivo con el ambiente) y los elementos según lo definido en el apartado 2.1.

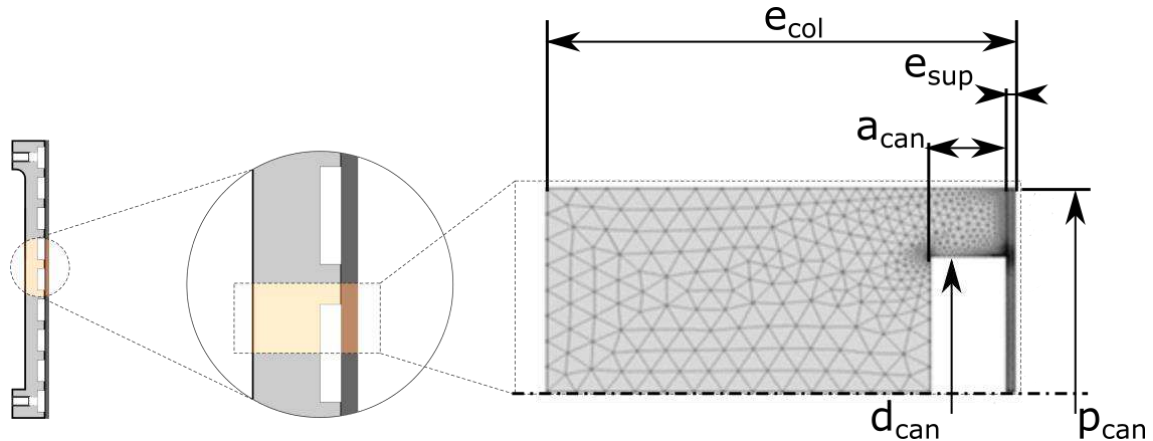


Fig. 2: Sección transversal del colector BATISOL y modelo bidimensional calculado con COMSOL

## 4.2.- HIPÓTESIS DE CÁLCULO

El colector estudiado presenta características particulares que se traducen en las siguientes hipótesis de cálculo:

- Contrariamente a la mayoría de los colectores solares, la superficie colectora no está protegida por un sistema vidriado, sino en contacto directo con el aire exterior. En consecuencia, las pérdidas de calor por convección en la cara externa del elemento son relevantes. Se han tomado los siguientes coeficientes de transmisión térmica:  $h_{ext} = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$  en situaciones de viento calmo, y  $h_{ext} = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$  para velocidades de viento significativas (8 km/h). Estos valores se corresponden con dos situaciones relativamente comunes en la edificación. Los valores de intercambio térmico seleccionados son susceptibles de discusión. El criterio de selección se basa en los valores normativos y la regla de cálculo expresados en [30]. Basados en la experiencia, se han descartado los valores de viento seleccionados para la expresión del coeficiente de transmisión térmica en dicha referencia, por ser excesivos, y no representativos, y se han tomado valores que permitan acotar el rendimiento del colector entre los valores de viento calmo y significativo.
- Al tratarse de una fachada, la superficie colectora se posiciona en vertical. El flujo radiante que incide sobre el panel está compuesto de la radiación solar directa, de onda corta, y de la radiación de onda larga, que se estima proveniente a partes iguales de la esfera celeste y del ambiente externo más cercano (suelo, edificios...).
- Si bien en la experimentación referenciada no se ha empleado tal propiedad, se considera que el colector solar puede mejorarse por pintura selectiva que mejore la captación de la radiación solar. Siendo así, se toma distinto valor para la absorptividad y emisividad de la superficie colectora, quedando la expresión resultante como sigue:

$$Q_a = \alpha \cdot I_{sol} + \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left( \frac{T_{ext}^4 + T_c^4}{2} - T_{sup}^4 \right) \quad (2)$$

- En la fase experimental, que se realiza en interiores, el flujo radiativo se compone de la radiación de onda corta proveniente de las lámparas y de la radiación del ambiente próximo del laboratorio. Siendo así, el intercambio radiante queda expresado mediante la ecuación (3).

$$Q_a = \alpha \cdot I_{sol} + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{lab}^4 - T_{sup}^4) \quad (3)$$

- El caudal del colector es muy bajo: de 25 a 50 l/h por  $\text{m}^2$  de captador solar. Dado que en estas situaciones el número de Reynolds es  $Re \ll 2300$  el sistema se encuentra siempre en régimen laminar.
- La transferencia de calor por convección entre el agua y las paredes del canal, así como las pérdidas de presión, se modelizan mediante las correlaciones de Dharaiya y Kandlikar [31] y de Kakac et al. [32]. Estas correlaciones se consideran válidas para situaciones con flujo plenamente estabilizado.

$$Nu = 2,2808 + 0,868ff - 1,8511E^{-2}ff^2 - 6,6889E^{-2}ff^3 + 1,6317E^{-2}ff^4 - 1,5144E^{-3}ff^5 + 5,0253E^{-5}ff^6 \quad (4)$$

$$ff = \frac{e_{can,ll}}{e_{can,lc}} \quad (5)$$

$$Nu = \frac{h \cdot Dh}{\lambda} \quad (6)$$

$$f = \frac{24}{Re} * (1 - 1,3553 \cdot ff + 1,9467 \cdot ff^2 - 1,7012 \cdot ff^3 + 0,9564 \cdot ff^4 - 0,2537 \cdot ff^5) \quad (7)$$

$$f = \frac{dP}{dx} \cdot \frac{Dh}{2\rho v^2} \quad (8)$$

g) El rendimiento térmico se define en (9)

$$\eta = \frac{Q_a}{I_{sol}} \quad (9)$$

### 4.3.- ESTUDIO PARAMÉTRICO BIDIMENSIONAL

Se ha realizado un estudio paramétrico del comportamiento térmico del colector solar. Para ello, se ha fijado una configuración de referencia, sobre la que se han realizado variaciones. En la tabla I se muestran los valores de referencia y el rango de variación estudiado para cada uno de los parámetros y variables de entrada necesarias para esta modelización. En total se han simulado más de 220 variaciones.

Parámetro	Unidad	Valor de referencia	Valores evaluados
$I_{sol}$	W/m <sup>2</sup>	400	400
$T_{ext}$	°C	0	
$T_a$	°C	5	
$h_{ext}$	W/(m <sup>2</sup> ·K)	15	5, 15
$e_{col}$	mm	30	0, 10, 20, 30, 40, 50
$e_{sup}$	mm	1	0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4
$d_{can}$	mm	35	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
$a_{can}$	mm	15	2, 3, 5, 6, 9, 10, 12, 15, 18, 20, 21, 24, 27, 30
$p_{can}$	mm	2	1, 2, 3, 4

Tabla I: Parámetros y rangos de variación evaluados en el estudio bidimensional

Se ha realizado un análisis de sensibilidad mediante el método de Morris [33][34][35], del que se extraen las siguientes conclusiones:

- En relación al rendimiento del colector, el orden de influencia de las variables es el siguiente: profundidad del canal, anchura del canal, espesor del aislante en la cara trasera del colector y distancia entre canales.
- En relación al factor de forma del canal, el rendimiento se incrementa para mayores relaciones anchura/profundidad del canal.
- La geometría de los canales y el paso entre ellos son los parámetros más influyentes en el rendimiento del colector.
- Para un caudal dado, aumentar la profundidad del canal resulta en un incremento del diámetro hidráulico y una reducción del coeficiente de convección superficie-agua, reduciendo así el rendimiento del colector.
- Cuanto mayor sea el ratio anchura/profundidad del canal (proporción de superficie del captador que está en contacto directo con el fluido portador de calor), mayor será el rendimiento del colector.
- El espesor del cuerpo del colector es un parámetro fundamental para controlar el peso.
- La influencia en el comportamiento térmico de los distintos materiales es poco significativa en el peso final del sistema.
- El espesor del aislamiento y la chapa metálica captadora del captador influyen muy levemente sobre el rendimiento.
- En cuanto a las pérdidas de presión, el parámetro más influyente es la profundidad del canal, seguido de la anchura del canal y, finalmente, el paso.

Como conclusión básica, se establece que los parámetros de referencia seleccionados son la configuración óptima, por lo que se desarrollaron prototipos para su evaluación experimental.

Para esta configuración, la tabla II presenta el rendimiento térmico del panel para varios acabados superficiales y velocidad de viento. El rendimiento se establece en función del cociente entre diferencia de temperatura y radiación

$\Delta T/I = (T_a - T_{ext}) / \text{Isol}$ . Los acabados presentados son acero galvanizado ( $\alpha = 0,6 \ \varepsilon = 0,2$ ) o pintura negra mate ( $\alpha = 0,95 \ \varepsilon = 0,95$ ), mientras que las condiciones convectivas se corresponden con velocidades de viento significativas ( $h = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) o reducidas ( $h = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

#### 4.4.- MODELO PSEUDO-TRIDIMENSIONAL

Las correlaciones anteriormente determinadas son necesarias para determinar el funcionamiento del modelo pseudo-tridimensional. Para un circuito hidráulico con canales paralelos, se da por válida la aproximación de que todos los canales se comportan de la misma manera, y se modeliza un solo canal del colector. Esta modelización se realiza mediante el ensamblaje de secciones bidimensionales sucesivas, para las que la temperatura del agua de entrada es igual a la temperatura del agua de salida de la sección inmediatamente anterior. Así, para cada sección se aplican las ecuaciones (10) y (11).

$$\eta = \text{Función} \left( \frac{T_{a,e} + T_{a,s} - T_{ext}}{I_{sol}} \right) \quad (10)$$

$$T_{a,s} = T_{a,e} + \text{Función} \left( \frac{I_{sol}}{\rho_a \cdot V_a \cdot C p_a} \right) \quad (11)$$

Estas ecuaciones deben resolverse mediante un cálculo iterativo. Para ello se ha adoptado un criterio de convergencia basado en un error relativo de  $1 \times 10^{-8}$ .

#### 4.5.- RESULTADOS DEL MODELO PSEUDO-TRIDIMENSIONAL

En la tabla II se presenta curvas de rendimiento calculadas mediante el modelo pseudo-tridimensional para un colector de  $1000 \times 350 \text{ mm}$  con 10 canales en serie, que corresponde a una longitud total de canal de 10 m.

$\alpha$	$\varepsilon$	h	$\eta, f(\Delta T/I)$	
			2D	Pseudo-3D
0,6	0,2	5	$0,576 - 7,44 \cdot \Delta T/I$	$0,578 - 7,44 \cdot \Delta T/I$
0,6	0,2	15	$0,549 - 16,2 \cdot \Delta T/I$	$0,546 - 14,0 \cdot \Delta T/I$
0,95	0,95	5	$0,899 - 10,9 \cdot \Delta T/I$	$0,885 - 12,7 \cdot \Delta T/I$
0,95	0,95	15	$0,855 - 19,3 \cdot \Delta T/I$	$0,830 - 19,7 \cdot \Delta T/I$

Tabla II: Parámetros de las curvas de rendimiento del colector bajo varias hipótesis de modelado

De los resultados se observa que la variación de los coeficientes de las fórmulas se encuentra siempre en el segundo dígito significativo. De la inspección de los coeficientes se observa que el coeficiente constante es en torno al 90% del valor de la absorptividad del acabado superficial del colector. Expresado de otra forma, y ante ausencia de gradiente térmico entre el colector y el ambiente exterior, el rendimiento de la geometría empleada es del 90%. Por ello se considera que se trata de un diseño satisfactorio dentro de la tipología de colector solar en la que se encuadra.

#### 4.6.- MODELO TRIDIMENSIONAL COMPLETO

Adicionalmente al modelo pseudo-tridimensional, se ha realizado un modelo tridimensional del colector completo empleando COMSOL. La construcción de este modelo no se detalla aquí, pero los resultados presentados permiten validar la metodología de la modelización pseudo-tridimensional. De hecho, sus curvas de rendimiento se encuentran muy próximas.

El tiempo de computación empleado en el modelo tridimensional es 200 veces superior al empleado para los modelos bidimensionales. Siendo así, se justifica la elección de la aproximación pseudo-tridimensional. Los autores consideran que, en casos de geometrías simples similares, la aproximación mediante modelos pseudo-tridimensionales permite optimizar el proceso de cálculo, que puede realizarse de forma rápida y con limitados recursos computacionales.

## 5.- ESTUDIO EXPERIMENTAL

El estudio teórico se ha complementado con un ensayo físico en el que se han ensayado varios prototipos en un sistema experimental desarrollado específicamente para este fin. Mediante esta doble caracterización se ha buscado la validación experimental de los modelos numéricos para su uso en cálculos integrados de sistemas solares combinados.

### 5.1.- PROTOTIPOS DESARROLLADOS

Se han desarrollado varios estudios experimentales con el objeto de validar el modelo de simulación.

Se ha tomado un colector con dimensiones aproximadas de 1000×350 mm (área de 0,35 m<sup>2</sup>), cuyo circuito hidráulico consiste en 10 canales en serie. Estos canales tienen una anchura de 15 mm y una profundidad de 2 mm, con un paso de 35 mm entre ellos.

Se han realizado ensayos con distintos acabados superficiales, coincidentes con los definidos en el cálculo numérico: acero galvanizado sin pintar ( $\alpha = 0,6$   $\varepsilon = 0,2$ ), y pintura de color negro mate ( $\alpha = 0,95$   $\varepsilon = 0,95$ ).

### 5.2.- BANCO DE PRUEBAS Y MATERIALES DE ENSAYO

El banco de ensayo se ha diseñado y fabricado para poder realizar ensayos a diferentes prototipos de colectores y determinar su comportamiento en las condiciones de funcionamiento. De acuerdo a los parámetros de diseño previstos, el banco se ha construido para permitir el estudio del rendimiento del sistema con caudales de circulación bajos, en el rango de 20 a 80 l/h por m<sup>2</sup>, correspondiendo a 7 a 28 l/h para las superficies de colector ensayadas.

El banco de pruebas (figura 3) se ha diseñado de la siguiente manera: un depósito de alimentación (3) de 200 l almacena agua a temperatura ambiente; una bomba de elevación (6) eleva esta agua hasta un tanque de distribución (2) equipado con un rebosadero que estabiliza el nivel el agua con precisión y un desagüe que dirige el agua hacia el colector (1), tras lo cual se recoge en un depósito de recuperación (4) de 200 l ubicado en la parte inferior.

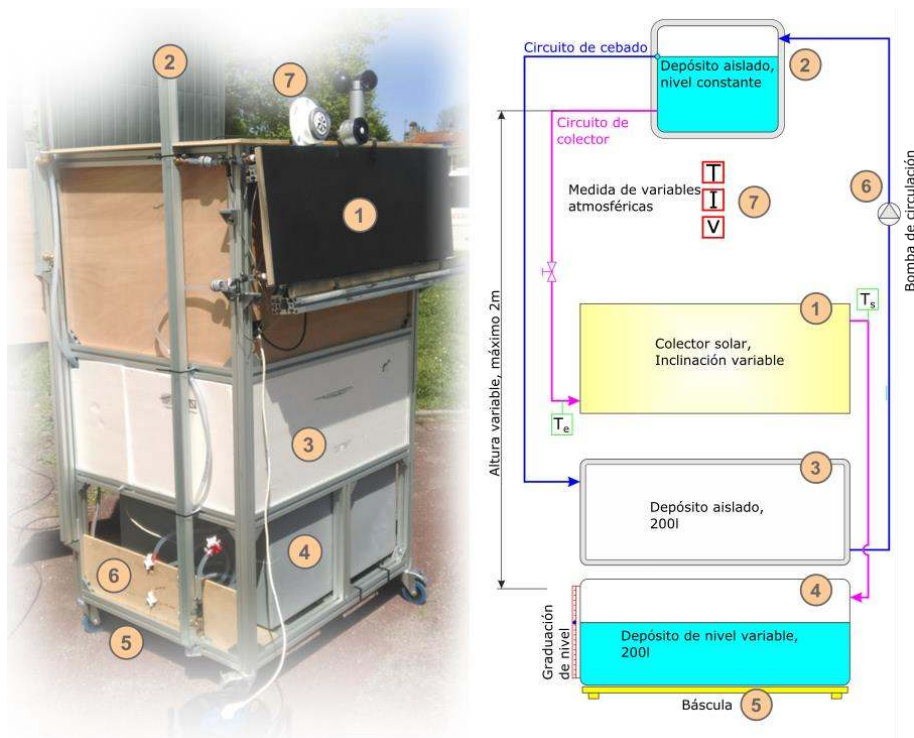


Fig. 3: Banco de ensayo

El flujo de agua a través del colector se produce por gravedad, mediante la diferencia de cota entre el tanque de distribución y el depósito de recuperación (~2 m), regulándose el caudal de agua mediante una válvula. El banco de



pruebas está equipado con sensores Pt100 que miden la temperatura del agua en la entrada y salida del colector, así como la temperatura ambiente. Una balanza (5) situada bajo el depósito de recuperación permite medir la cantidad de agua recuperada y calcular así el caudal. La radiación y la velocidad del aire se registran mediante un piranómetro Kipp & Zonen SMP3 y un anemómetro modelo RB-WT1000. Todas estas mediciones se recogen en un registrador HOBO UX120-006M de cuatro canales.

El banco de ensayo se ha diseñado para su uso tanto en interiores como en exteriores. Para los ensayos en interiores, la radiación solar se simula mediante dos lámparas solares Honle SOL500, cuyo espectro de emisión es semejante al solar, y un deflector de aluminio. Se observó que la distribución superficial de la radiación producida no es uniforme. Por ello, se realizó un estudio de la homogeneidad de la radiación incidente sobre la superficie mediante protocolos de medida puntual localizada con anterioridad y posterioridad a cada ensayo.

### 5.3.- CONDICIONES DE CONTORNO

Los ensayos se han realizado con los parámetros señalados en la tabla III.

Parámetro	Unidad	Valores evaluados
V	l/h	8, 15, 20, 30
I	W/m <sup>2</sup>	500
h	W/(m <sup>2</sup> ·K)	5 (velocidad de viento reducida, 0 m/s), 15 (velocidad de viento significativa, 15 m/s)
Acabado	-	acero galvanizado ( $\alpha = 0,6$ $\varepsilon = 0,2$ ), pintura negra mate ( $\alpha = 0,95$ $\varepsilon = 0,95$ )
$\Delta T_{col-ext}$	°C	0, 5

Tabla III: Condiciones de contorno experimentales

Para cada serie de ensayos, las mediciones se tomaron tras la estabilización de la temperatura del agua de salida  $T_{a,s}$ .

### 5.4.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS

La figura 4-izda presenta la evolución de la diferencia de temperatura entrada/salida ( $\Delta T$ ) en función del caudal, para la geometría de referencia. La figura 4-dcha presenta los rendimientos experimentales registrados en función del cociente entre diferencia de temperatura y radiación ( $\Delta T/I$ ). En ambos casos, las configuraciones mostradas se referencian en la tabla IV.

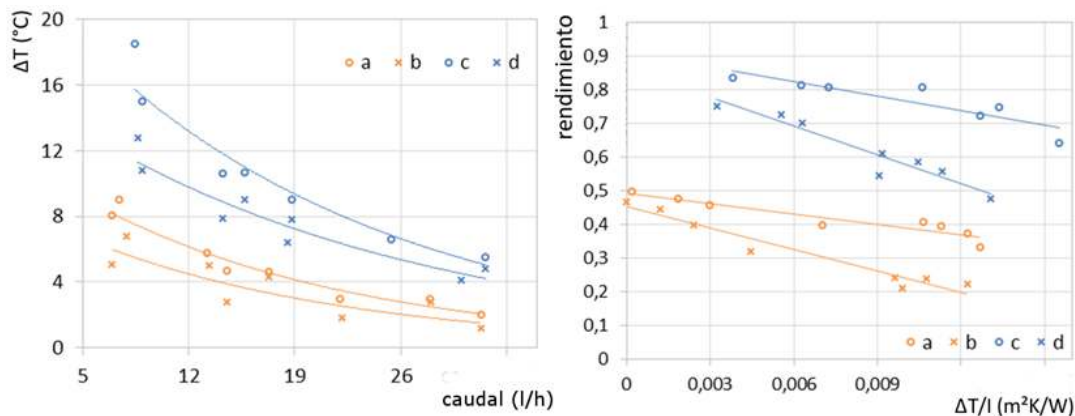


Fig. 4: Resultados experimentales del colector. Izda: diferencia de temperatura entrada/salida  $\Delta T$  en función del caudal. Dcha: Rendimiento en función de  $\Delta T/I$

Configuración	(a)	(b)	(c)	(d)
Acabado superficial	Acero Galvanizado		Negro Mate	
Velocidad de aire	Calmo	8 km/h	Calmo	8 km/h

Tabla IV: Configuraciones experimentales

En la figura 5 se muestran conjuntamente los resultados provenientes de modelización numérica y los provenientes de la caracterización experimental para el caso con velocidad de aire débil.

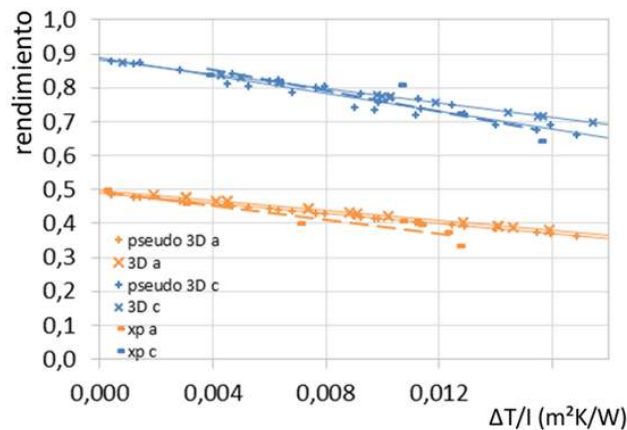


Fig. 5: Comparación de simulación pseudo-tridimensional, simulación tridimensional y experimental con viento débil

Puede encontrarse información adicional en relación con el estudio numérico y experimental en [36].

## 6.- CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha presentado un sistema que incorpora la funcionalidad de captación solar dentro de las funciones ordinarias de un recubrimiento de fachada. El desarrollo presentado se basa en una tecnología solar no acristalada de bajo coste, y se ha conceptualizado para su integración en subestructuras de fachada ventilada. Sus principales ventajas radican en un impacto estético neutro (no se modifica el diseño ni la construcción de la fachada) y su integración modular con uniones en seco, facilitando su ensamblaje y sustitución.

Se ha estimado que el uso combinado de este colector en sistemas solares con bomba de calor conduce a incrementos de rendimiento térmico global del sistema-COP en torno a 1,5-2 unidades.

Se han realizado modelos numéricos y han sido contrastados con la experimentación de forma satisfactoria. Así pues, se considera que estos modelos pueden emplearse para la parametrización de variantes de diseño. En este sentido, el estudio de sensibilidad realizado arroja que el espesor de la chapa metálica tiene una influencia menor en el rendimiento del colector, siendo los factores más influyentes la geometría y dimensiones de los canales, así como el acabado del colector.

En general, y considerando datos de bibliografía tales como [27], se considera que el diseño del colector es satisfactorio, esperándose rendimientos térmicos próximos al 50-60%, correspondientes a esta tecnología en operación a 10-15 °C por encima de la temperatura ambiental.

## 7.- AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por INEF4, Institut pour la Transition Energétique, creado en 2013 gracias a los fondos del Commissariat Général à L'Investissement CGI/ANR y el Consejo Regional de Aquitania.

## 8.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] Lester R. Brown et al. (2008). Time for Plan B, Earth Policy Institute.
- [2] Código Técnico de la Edificación (CTE). Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE). Septiembre 2013.
- [3] Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). Septiembre 2013.
- [4] Matteo d'Antoni & Onorio Saro (2012). Massive Solar-Thermal Collectors: A critical literature review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, pp. 3666-3679
- [5] A. Giovanardi et al. (2015). Integrated solar thermal façade system for building retrofit, Solar Energy 122, pp. 1100-1116

- [6] M.C. Munari Probst & Christian Roecker (2011). Architectural Integration and Design of Solar Thermal Systems. Lausanne, EPFL.
- [7] SOLABS, Development of unglazed solar absorbers (resorting to coloured selective coatings on steel material) for building facades, and integration into heating systems, European Union's Fifth Framework Programme FP5, Project Reference ENK6-CT-2002-00679, [http://cordis.europa.eu/project/rcn/67210\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/67210_en.html) (11/05/2016)
- [8] Cost-Effective, Resource- and Cost-effective integration of renewables in existing high-rise buildings, European Union's Seventh Framework Programme FP7/2007-2011, grant agreement n° 212206, <http://www.cost-effective-renewables.eu/> (11/05/2016)
- [9] MacSheep, New Materials and Control for a next generation of compact combined Solar and heat pump systems with boosted energetic and exergetic performance, European Union's Seventh Framework Programme FP7/2007-2011, grant agreement n° 282825, [http://cordis.europa.eu/project/rcn/101598\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/101598_en.html) (11/05/2016)
- [10] NEGST, New Generation of Solar Thermal Systems. European Union's Sixth Framework Programme FP6/2002-2006, Project Reference 503119, <http://www.swt-technologie.de/html/negst.html> (11/05/2016)
- [11] BATISOL, INEF4, Institut pour la Transition Energetique, [www.inef4.com](http://www.inef4.com) (27/06/2016)
- [12] H+S ThermiePanel 38, panel captador de doble acristalamiento, <http://www.hssolar.ch/thermiepanel/thermiepanel-38.html> (04/10/2016)
- [13] Energy Glas, captador metálico integrado en triple acristalamiento, <http://energy-glas.com/> (04/10/2016)
- [14] SunRain, colector tubular de vacío, <http://en.sunrain.com/> (04/10/2016)
- [15] SwissPipe Balkone, colector tubular integrado en barandilla de balcón, <https://www.schweizer-energie.ch> (04/10/2016)
- [16] WICONA sistema de colectores tubulares en fachada, [http://www.paradigma-iberica.es/descargas/sistema\\_de\\_fachadas\\_con\\_tubos\\_cpc.pdf](http://www.paradigma-iberica.es/descargas/sistema_de_fachadas_con_tubos_cpc.pdf) (04/10/2016)
- [17] VarioSol E, colector plano para fachadas o cubiertas, <http://www.winklersolar.com/collectors-winkler-variosol-e.html> (04/10/2016)
- [18] DOMA FLEX, colector plano para fachadas, <http://www.domasolar.com/> (04/10/2016)
- [19] Aventa AS, colector polimérico modular, <http://www.avena.no/eng/Solar-Energy/AventaSolar-solar-collector> (04/10/2016)
- [20] WAF, sistemas solares modulares de aluminio para fachadas, <http://www.waf.at/solar-systems/?lang=en> (04/10/2016)
- [21] Sistema Composite CU, EUROPRIM, <http://www.europrim.es/> (27/06/2016)
- [22] Panel de composite STACBOND, Sistemas Técnicos del Accesorio y Componentes S.L. [www.stacbond.es](http://www.stacbond.es) (27/06/2016)
- [23] IEA, SHC task 26, Solar Combisystems, <http://task26.iea-shc.org/> (23/11/2016)
- [24] IEA, SHC task 32, Advanced Storage Concepts for Solar and Low Energy Buildings, <http://task32.iea-shc.org/> (23/11/2016)
- [25] IEA, SHC task 42, Compact Thermal Energy Storage, <http://task42.iea-shc.org/> (23/11/2016)
- [26] IEA, SHC task 44, Solar and Heat Pump Systems, <http://task44.iea-shc.org/> (23/11/2016)
- [27] Giovanardi, A.; Integrated solar thermal facade component for building energy retrofit, University of Trento, 2012.
- [28] COMSOL Multiphysics®, v5. <https://www.comsol.com/release/5.0> (10/04/2016)
- [29] AENOR. UNE-EN ISO 9806:2014 Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo. (ISO 9806:2013).
- [30] AENOR, UNE-EN ISO 6946:2012 Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo. (ISO 6946:2007), Anexo A
- [31] Dharaiya, V.V., Kandlikar, S.G. (2011). Numerical investigation of heat transfer in rectangular microchannels under H2 boundary condition during developing and fully developed laminar flow. Journal of heat transfer, 134(2)
- [32] Kakaç, S., Shah, R.K., Aung, W. (1987). Handbook of single-phase convective heat transfer. John Wiley & Sons, Nueva York.
- [33] Max D. Morris. (1991) Factorial sampling plans for preliminary computational experiments, Technometrics 161-174
- [34] Bertrand looss (2009). Analyses d'incertitudes et de sensibilité de modèles complexes. Applications dans des problèmes d'ingénierie. Rencontres Maths-Météo, Toulouse.
- [35] Saltelli, Andrea, Paola Annoni, Ivano Azzini, Francesca Campolongo, Marco Ratto & Stefano Tarantola (2010). Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index, Computer Physics Communications 181(2), pp. 259-270
- [36] Bonnamy, P., Raji, S., Lopez, J., Garay, R., (2016) Expérimentation et modélisation d'un capteur solaire opaque pour préchauffage de l'eau, Congrès Française de Thermique, Toulouse

## DOCUMENTACIÓN ADICIONAL

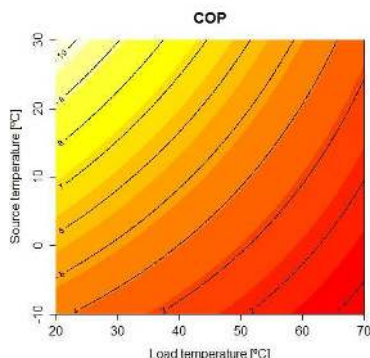


Fig. 6: Curva característica de COP de una bomba de calor agua-agua

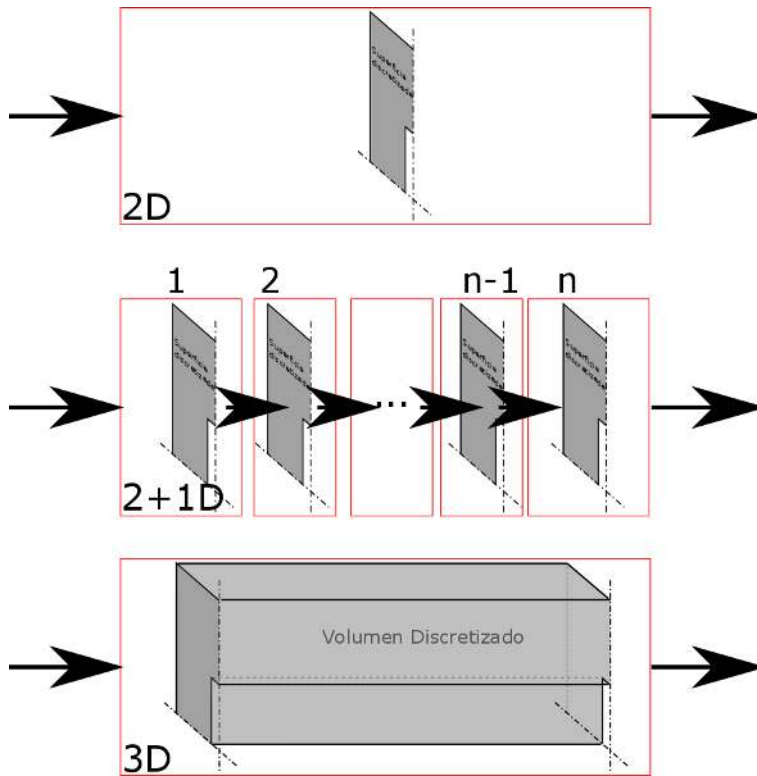


Fig. 7: Modelo conceptual de los modelos térmicos

NOMENCLATURA		
Variables y constantes		Unidad
$\alpha$	absortividad solar (onda corta)	-
$\varepsilon$	emisividad térmica (onda larga)	-
$\eta$	rendimiento	-
$\lambda$	conductividad	W/(m·K)
$\nu$	viscosidad cinemática	m <sup>2</sup> /s
$\rho$	densidad	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	constante de Stefan-Boltzmann (5.67×10 <sup>-8</sup> )	W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )
$a$	anchura	mm
$C_p$	calor específico	J/(kg·K)
$D$	diámetro	Mm
$d$	distancia	Mm
$e$	espesor	Mm
$f$	coeficiente de fricción	-
$ff$	factor de forma	-
$h$	coeficiente de convección	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$I$	irradiación solar	W/m <sup>2</sup>
$Nu$	número de Nusselt	-
$P$	presión	Pa
$p$	profundidad	Mm
$Q$	calor, potencia térmica	W
$Re$	número de Reynolds	-
$T$	temperatura	K
$V$	caudal volumétrico	m <sup>3</sup> /s
$v$	velocidad	m/s
Configuraciones geométricas		

1D	unidimensional	
2D	bidimensional	
2+1D	bidimensional, integrado en una dimensión adicional	
3D	tridimensional	
<b>Subíndices</b>		
ext	exterior	
a	agua, fluido	
sol	solar	
col	colector	
can	canal	
sup	superficie captadora	
lab	laboratorio	
h	hidráulico	
e	entrada del colector	
s	salida del colector	
lc	lado corto	
ll	lado largo	
<b>Operadores</b>		
<b>Función(, f)</b>	<b>función</b>	<b>Unidad</b>
$\Delta T$	diferencial de temperatura	K
$\Delta T/I$	diferencial de temperatura/irradiación solar	$m^2 \cdot K/W$
$dP/dx$	variación de presión a lo largo del eje de circulación del fluido	Pa/m