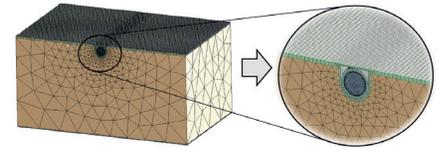


# Nuevo concepto de colector solar integrado en un panel sándwich a modo de fachada activa; estudio paramétrico mediante CFD y aplicación a un caso de estudio



## New concept of solar collector integrated into a sandwich panel as an active façade; CFD based parametric assessment and case study



Peru Elguezabal<sup>1</sup>, Alex Lopez<sup>2</sup>, Jesús-María Blanco<sup>2</sup> y José-Antonio Chica<sup>1</sup>

<sup>1</sup> TECNALIA. Building Technologies Division. Parque Tecnológico. Astondo Bidea, Ed.700 – 48160 Derio, Vizcaya (España)

<sup>2</sup> UPV/EHU. Escuela de Ingenieros. Dpto. Ingeniería Nuclear y Mecánica de Fluidos. Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1 – 48013 Bilbao (España)

DOI: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.6036/9274> | Recibido: 31/05/2019 • Inicio Evaluación: 04/06/2019 • Aceptado: 06/09/2019

### ABSTRACT

- The use of renewable energy sources is a clear commitment in the process of developing alternatives to reduce the high energy consumption in buildings. Although with intermittent production, renewable energies are unlimited and have a demonstrated potential to be integrated within buildings. The facade is a key element in a strategic position for harnessing renewable solar energy by means of the Active Solar Façade concept. Through a CFD model, a parametric study has been developed to evaluate different alternatives in the design of an Active Solar Façade, composed by a sandwich panel as unglazed solar collector. The high influence of the conductivity together with the absorptivity has been demonstrated. Directly linked to the material selection for solving the absorber and the hydraulic circuit, the advantage of metals compared with plastics, has been verified. The minor effect of the insulation has also been analyzed, although the necessity of a minimum quantity has been stated looking to avoid significant heat losses. Additionally, the performance of the system has been evaluated in order to determine the potentially achievable energy. The result of the extensive campaign monitored in KUBIK® and developed in different days in a period of 12 months, has resulted in an average daily production of 320 Wh/m<sup>2</sup>. This study highlights the potential benefits of this type of solutions and the necessity to properly dimension and design them. In such way it is aimed to contribute to a greater use of renewable energy in buildings, and consequently for reducing the use of fossil fuels, by means of alternatives that enable the mitigation of the climate change.
- **Keywords:** Solar Active Façade; Sandwich Panels; Unglazed and Integrated Solar Collector; Solar Production; CFD Model; Parametric Assessment.

### RESUMEN

El uso de fuentes renovables supone una clara apuesta en el proceso de desarrollo de alternativas para la reducción del alto consumo energético de los edificios. Aunque con una producción intermitente, las energías renovables son ilimitadas y cuentan con un potencial demostrado en aplicaciones integradas en la edificación. La fachada es un elemento clave, posicionado estratégicamente para aprovechar la energía solar renovable

a través del concepto de Fachada Solar Activa. A través de un modelo CFD, se ha desarrollado un estudio paramétrico para evaluar alternativas en el diseño de una fachada solar activa compuesta por un panel sándwich que actúa como un colector no vidriado. Se ha constatado la alta influencia de la conductividad y de la absorptividad, aspectos estrechamente ligados a los materiales seleccionados para resolver el absorbente y el circuito hidráulico, destacando la ventaja de los metales frente a los plásticos. En el caso del aislamiento, aunque tiene un menor efecto, resulta necesario disponer de cierta cantidad de material aislante que evite pérdidas de calor significativas. De forma complementaria, se ha evaluado el rendimiento del sistema con el objetivo de determinar la capacidad energética. El resultado de la extensa campaña monitorizada en KUBIK® y desarrollada durante una serie de días en un periodo de 12 meses ha supuesto una producción promedio diaria de 320 Wh/m<sup>2</sup>. Con este estudio se destacan los potenciales beneficios de este tipo de soluciones y la necesidad de dimensionar y diseñar convenientemente los mismos. De esta forma se pretende contribuir a un mayor aprovechamiento de las energías renovables en los edificios, permitiendo así reducir el uso de combustibles fósiles, ofreciendo alternativas que permitan mitigar el cambio climático.

**Palabras clave:** Fachada Solar Activa, Panel Sándwich, Colector solar integrado no vidriado, Producción solar, Modelo CFD, Análisis paramétrico.

### 1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción sigue siendo actualmente un sector ineficiente en términos de consumo y rendimiento energético. Esta situación ha motivado el interés del sector para plantear alternativas centradas en la reducción de la huella de carbono, principalmente para la fase de uso, que es aquella en la que se dan mayores impactos. El promedio normalizado de energía final consumida en la UE28 fue de 173,18 kWh/m<sup>2</sup> para los edificios residenciales en 2014 y 251,39 kWh/m<sup>2</sup> para los edificios no residenciales en 2013 [1]. Esta situación demuestra que todavía hay un largo camino para alcanzar el objetivo de edificios de consumo energético casi nulo (NZEB). La definición específica de este concepto de edificio en cuanto a la cuantificación de la energía con-

sumida ha generado cierta controversia [2], aunque la Comisión ha proporcionado algunas recomendaciones, planteando un rango en la energía primaria final entre 15 - 65 kWh/m<sup>2</sup> para nuevas viviendas unifamiliares y de 20 a 70 kWh/m<sup>2</sup> para oficinas [3].

En este contexto, desarrollar nuevos y modernos edificios equipados con tecnologías de vanguardia contribuirá a reducir esta brecha. De hecho, incluso en el caso de que se construyeran numerosos edificios eficientes en los próximos años, la tasa de sustitución sería insuficiente para revertir la situación hasta dentro de varias décadas. El Instituto BPIE (*Buildings Performance Institute Europe*) [4] ha estimado recientemente que el 97 % de los edificios de la UE deben ser renovados para alcanzar los objetivos de la descarbonización de 2050, pero únicamente un 0,4-1,2% son renovados al año.

Las estrategias de mejora se orientan principalmente a tres acciones. El primer enfoque consiste en reducir el consumo minimizando la demanda, para lo que habitualmente se emplean soluciones con mayores niveles de aislamiento [5], sistemas de control solar [6] así como dispositivos de recuperación de energía. Como segunda medida, se busca que esa menor demanda sea cubierta con energías renovables (RES), siendo la solar y la eólica las fuentes que mayor aceptación tienen en este ámbito. Por último, una vez reducidas las necesidades al mínimo y contando con una contribución significativa de las RES, el resto de las necesidades no cubiertas por la producción intermitente renovable deben estar bien coordinadas y controladas por sistemas de gestión.

En este contexto la fachada es un elemento clave. Es la interfaz que conecta el ambiente interior, donde se busca el confort con el exterior, sujeto a condiciones ambientales variables. Tradicionalmente concebida para proporcionar cobijo y aislamiento, la fachada debe evolucionar para aprovechar la energía ilimitada y accesible que suponen las renovables [7-8] para lo que se debe coordinar convenientemente la respuesta de la fachada activa resultante.

### 1.1 INTEGRACIÓN DE FACHADAS TÉRMICAS SOLARES EN EDIFICIOS

De acuerdo con la clasificación habitual para colectores solares térmicos, tres son las tecnologías principales para integrar en la envolvente: tubos de vacío, colectores planos vidriados y no vidriados. El término no vidriado se adopta porque, en comparación con vidriados, no tienen vidrio exterior ni tampoco cámara de aire para capturar el calor entre el absorbente y el vidrio. Si bien los vidriados generalmente incorporan aislamiento en la cara posterior, los sistemas no vidriados pueden diseñarse con o sin aislamiento. Así, el panel sin vidrio simplifica la solución al dejar el absorbente en la cara expuesta del panel, obteniendo en general mayores niveles de integración [9].

Las fachadas solares son actualmente interesantes para sistemas térmicos más amplios que combinan colectores con otros componentes (almacenamiento energético, sistema HVAC). La función principal del colector en fachada será capturar la energía. Dependiendo del diseño, también pueden cubrir funcionalidades adicionales como almacenar o distribuir energía bajo un enfoque más multifuncional [10].

La colocación de colectores en la orientación vertical representa una menor radiación, pero bajo un patrón de producción más regular durante todo el año [11].

En definitiva, a pesar de que existen múltiples y diversas posibilidades para integrar colectores solares en la envolvente del edificio, no resultan tan evidentes los beneficios, ni tampoco se encuentra información clara para este tipo de soluciones. El poten-

cial de estos sistemas no se conoce ni cuantifica adecuadamente, por lo que resultan necesarias demostraciones que describan las ventajas y posibilidades reales de estos conceptos.

El presente estudio detalla el caso de una fachada solar activa en la que se estudian las consideraciones del diseño y se valoran alternativas. Asimismo, se analiza una aplicación en condiciones reales de uso, proporcionando datos reales acerca de la capacidad de producción del sistema.

## 2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El estudio se centra en el comportamiento de una fachada activa compuesta por un colector no vidriado integrado en un panel sándwich de acero como continuación de las investigaciones desarrolladas por [12], basadas a su vez en los resultados de un proyecto de investigación previo: BASSE [13] finalizado en 2016. El principal objetivo de dichos estudios previos era buscar un mayor aprovechamiento de la alta conductividad del acero, planteando así una "activación" del panel sándwich pasivo, para convertirlo en un colector solar de baja temperatura.

Como extensión de dichos estudios previos, en los que se valoraron factores dinámicos de diseño y el efecto de los parámetros meteorológicos, se plantean ahora nuevas opciones para optimizar el panel y sus principales elementos constructivos. A través de un modelo de fluido dinámica computacional (CFD), validado con resultados medidos experimentalmente, se desarrolló un estudio paramétrico para cuantificar la influencia de varios parámetros que definen los principales componentes del panel (chapas, tubos y aislamiento). Considerando variaciones factibles con rangos de valores habituales para las principales tecnologías y materiales, se adoptó la temperatura de salida en el colector como factor representativo de su comportamiento. Por último, se presentan a modo de ejemplo valores de rendimiento medidos para el colector trabajando bajo una aplicación real.

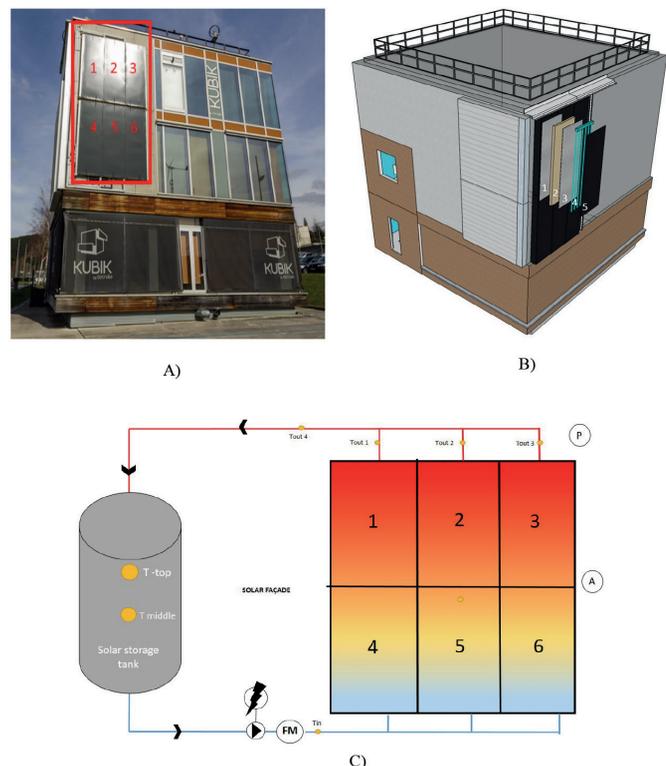


Figura 1: A) Paneles instalados en la fachada sur de Kubik® B) Detalle de los principales componentes del sistema C) Esquema del circuito solar

### 3. MODELO EXPERIMENTAL

El sistema fue instalado en la fachada sur del edificio experimental Kubik® de Tecnalia en su sede de Derio, España. Esta ubicación cuenta con un promedio anual de 1.300 kWh/m<sup>2</sup> de radiación. Un total de 6 paneles (3m<sup>2</sup> cada uno) fueron instalados en la fachada del edificio (figura 1 (A)).

Cada panel cuenta con cinco componentes (figura 1 (B)). El panel sándwich con núcleo de poliuretano (2)  $\lambda_c=0,025\text{W/m}^2\text{K}$  combinado con dos chapas de acero ranuradas (1, 3) ( $\lambda_s=50\text{W/m}^2\text{K}$ ). Tubos de nylon (4) ( $\lambda_p=0,2\text{W/m}^2\text{K}$ ) instalados en las ranuras de la chapa exterior y una chapa adicional de acero (5) que actúa como absorbedor. Cada panel tiene seis tubos paralelos conectados mediante unos elementos modulares de conexión incorporados dentro del módulo. Las dimensiones principales del panel estándar son: 3 m de longitud, 1 m de ancho y 0,08 m de espesor.

La fachada activa está conectada a un tanque de almacenamiento de tal forma que se genera un circuito solar (Figura 1 (C)). Los componentes del circuito son la fachada solar (6 paneles), el tanque de almacenamiento (285 litros), el sistema de distribución, la bomba de circulación y el sistema de monitorización. Además, existen 7 sensores de temperatura; 5 en el circuito solar, 1 a la entrada del colector ( $T_{in}$ ), 4 para temperaturas de salida del fluido ( $T_{out}$ ). Los otros dos 2 se ubican en el depósito (posición central y superior). El caudalímetro (FM) registra el flujo ( $\dot{m}$ ), el piranómetro (P) la radiación solar ( $I_{sol}$ ) en el plano sur de fachada, una estación meteorológica en cubierta registra la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), y el anemómetro (A) registra velocidad y dirección del viento (U).

### 4. MODELO CFD DEL COLECTOR SOLAR

El modelo numérico se desarrolló mediante ANSYS FLUENT® v18.2 bajo condiciones no transitorias, modelo que se basó en el prototipo de fachada descrito (figura 1 (A)). El objetivo del modelo es representar los principales fenómenos térmicos dentro del colector, como la conducción y la convección, siendo la radiación solar incidente el principal aporte de energía.

De esta forma el modelo permite el cálculo de transferencia de calor entre sólidos y entre sólidos y fluidos considerando los fenómenos térmicos [14-16], obteniendo como resultado la temperatura de salida del fluido. Con esta temperatura se calcula la energía adsorbida, así como la diferencia entre la temperatura de entrada y salida para un determinado flujo másico (Ecuación 1).

$$Q = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

#### 4.1. MALLADO COMPUTACIONAL

La malla se definió buscando minimizar el esfuerzo computacional sin afectar a la precisión. La geometría fue dividida en cuatro dominios: tubos, chapas metálicas, aislamiento y fluido. Las zonas entre chapa y tubo están malladas mediante elementos hexaédricos, con un mayor refinamiento en las zonas de contacto donde el fenómeno de transferencia de calor es más acusado (Fi-

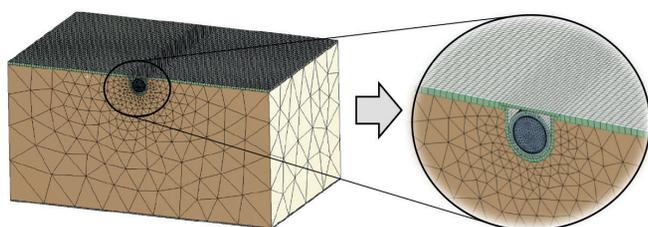


Figura 2: Mallado del dominio computacional (izquierda) y el detalle del factor de crecimiento alrededor del tubo (derecha)

gura 2). El líquido y el aislamiento se mallaron mediante elementos tetraédricos, aplicando en el dominio del fluido una capa límite para poder capturar los efectos viscosos.

Con el objetivo de reducir el error computacional se realizó un análisis de sensibilidad de la malla, con diferentes niveles de refinamiento, empleando valores experimentales de  $T_{out}$  como referencia para la validación del modelo. Se calculó el PMAE [17] para tres diferentes estrategias de refinamiento de malla. La malla 1 con 280.000 celdas, la malla 2 con 360.000 celdas y la malla 3 con 510.000 celdas, mostraron un error de 7,25 %, 3,40 % y 0,85 %, respectivamente. Como conclusión se seleccionó la "malla 3" por su elevada precisión frente al coste computacional.

#### 4.2. CONDICIONES DE CONTORNO

Para analizar la capacidad de transferencia de calor al variar las características de los componentes principales, se desarrolló un estudio paramétrico tomando como referencia los valores mostrados en la Tabla 1.

La radiación solar incidente fue modelada como un "flujo de calor" [16], siendo el calor absorbido por la superficie expuesta del colector,  $q_{irrad}$ , igual al producto de la radiación  $I_{sol}$  y la absorptividad ( $\alpha$ ). El calor es cedido al aire exterior mediante convección natural ( $q_{conv}$ ), y mediante convección forzada por acción del viento.

$$q_{irrad} = \alpha I_{sol} \quad (2)$$

$$q_{conv} = h_{w,n}(T_{amb} - T_s) \quad (3)$$

El modelo fue contrastado frente a condiciones climáticas de verano con intensidades significativas de radiación. Utilizando  $T_{amb}$ ,  $T_{in}$  y como entradas al modelo, la radiación se transforma en un flujo de calor y la velocidad del viento [18] sirve para estimar el coeficiente de transferencia de calor [19] que determina las pérdidas por convección (h).

El solver utilizado, está basado en la presión. El algoritmo utilizado para discretizar la presión fue el SIMPLE (Método Semi

Parámetro	Valor	Componente / Material
Conductividad del tubo ( $\lambda_p$ )	0.25 W/m <sup>2</sup> K	Tubo / poliamida (P)
Espaciado entre tubos	160 mm	
Diámetro interior del tubo ( $D_{in}$ )	8 mm	
Profundidad del tubo ( $D_e$ )	0 mm	
Espesor del aislamiento ( $e_c$ )	80 mm	Aislamiento / poliuretano (I)
conductividad del Aislamiento de ( $\lambda_c$ )	0.025 W/m <sup>2</sup> K	
Grosor de la chapa ( $e_s$ )	0.7 mm	Absorbedor y chapas /acero (S) y (A)
Conductividad de la chapa ( $\lambda_s$ )	50 W/m <sup>2</sup> K	
Absortividad de la chapa ( $\alpha$ )	0.8	

Esquema

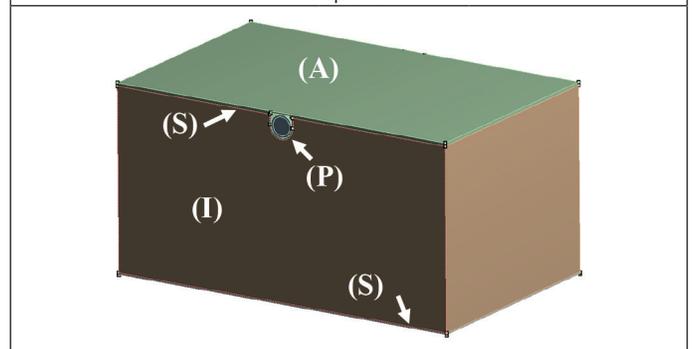


Tabla 1: Valores de referencia

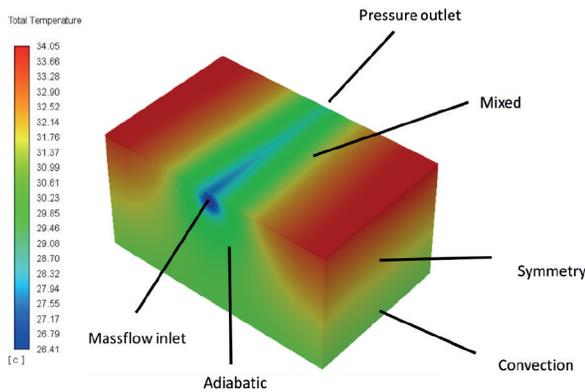


Figura 3: Condiciones de contorno para el dominio computacional

Implícito para Ecuaciones relacionadas con la Presión) y SECOND ORDER UPWIND para resolver el momento y la ecuación de la energía. La transferencia de calor por convección entre el fluido y las diferentes zonas se resolvió mediante el acople de las ecuaciones del momento y de la energía.

La Figura 3 representa el contorno de temperaturas en el dominio 3D, incluyendo las condiciones de contorno [20]. Las dimen-

siones del modelo inicial (tabla 1), suponen una muestra de 160 mm de ancho y 82,1 mm de alto y 100 mm de largo. Se planteó la condición de contorno mixta en el absorbedor para contemplar la radiación y las pérdidas de calor por convección. Para la chapa trasera, únicamente se utilizó la convección a fin de analizar la respuesta de la cámara de aire que se genera entre el muro del edificio y la fachada activa. Por último, se consideró simetría en las dos caras laterales para habilitar la representación de varios tubos, permitiendo así el cálculo de varios conductos en paralelo en el conjunto del panel (6 en el caso de referencia).

## 5. RESULTADOS

Se estudiaron diferentes alternativas en la definición de los tres elementos principales del conjunto:

- Chapa
- Aislamiento
- Tubo

### 5.1. CHAPA

Se analizó el efecto del espesor ( $e_s$ ) y la absorptividad ( $\alpha$ ) para diferentes conductividades ( $\lambda_s$ ), para obtener la respuesta del sistema al cambiar el diseño de la chapa. Los valores de conductividad varían desde 0,5 W/m<sup>2</sup>K (polímero) hasta 386 W/m<sup>2</sup> K (cobre), cubriendo así un amplio rango entre materiales poliméricos y metálicos.

Los valores de absorptividad oscilan entre 0,2 a 0,98 [20]. En la figura 4 (A) se aprecia el incremento de la capacidad de transferencia de calor a medida que aumenta la absorptividad y la conductividad, demostrando así la mayor influencia de las altas conductividades (metales) frente a las más bajas (plásticos).

En cuanto al grosor de chapa una variación de 0,2 mm a 2,5 mm supone un incremento en la capacidad de transferencia de calor, principalmente para valores bajos de conductividad (figura 4 (B)). Para valores altos, la variación es menos significativa.

### 5.2 AISLAMIENTO TÉRMICO

La función principal del aislamiento térmico es evitar pérdidas de calor, por lo que se analizaron diferentes rangos de espesores ( $e_i$ ) con diferentes conductividades ( $\lambda_i$ ). La figura 4 (C) muestra que cuanto mayor es el espesor, mayor es la capacidad de transferencia de calor. Sin embargo, para valores superiores a 80 mm el efecto se atenúa.

#### 5.2.1. Diferentes casos de estudio para una solución sin aislamiento

Se estudiaron escenarios alternativos para una solución sin aislamiento, para poder evaluar tanto el caso sin aislamiento, como para establecer la influencia de la cámara de aire que se genera en la parte posterior del panel.

Con el fin de modelar diferentes condiciones en la cámara (cerrada o ventilada), se tomaron diferentes valores de convección. Para representar la condición cerrada se escogió 5

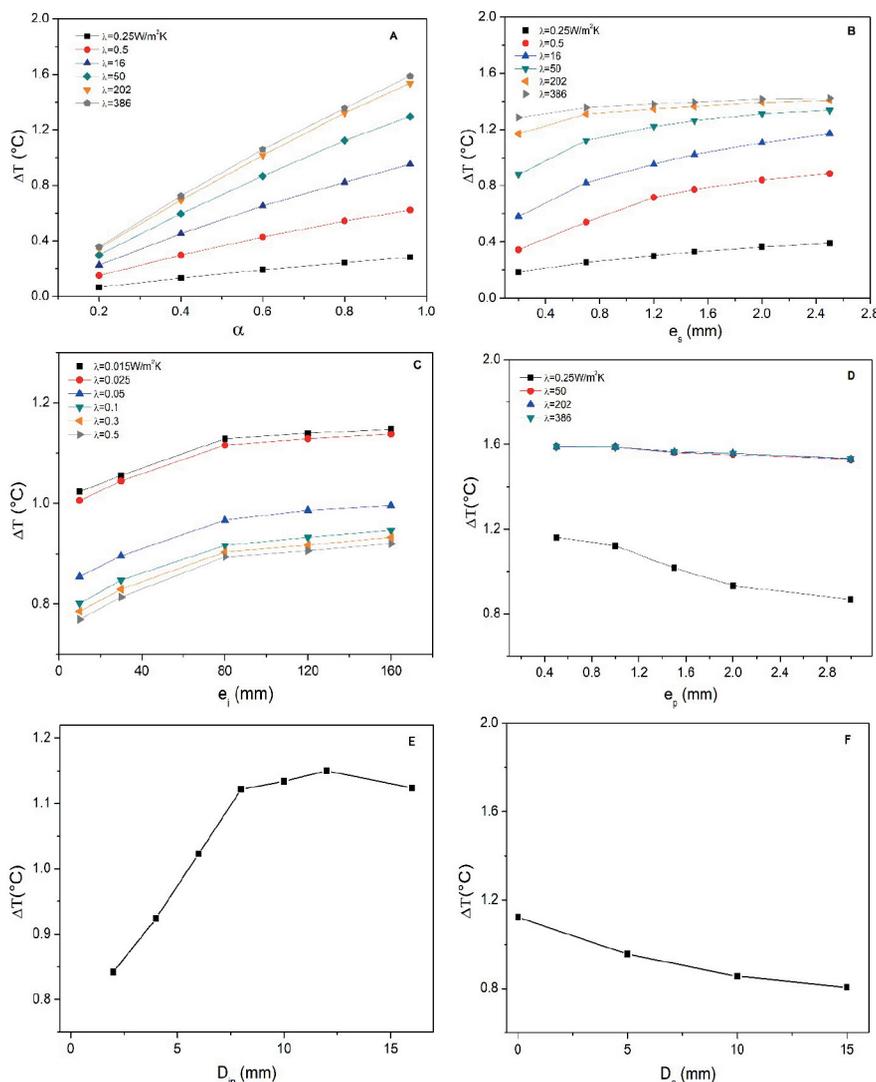


Figura 4: Capacidad de transferencia de calor frente a A) Absorptividad de la chapa metálica y B), Espesor de chapa C) Espesor de aislamiento y D) Grosor del tubo para diferentes conductividades térmicas. E) Diámetro interior del tubo, y f) Profundidad del tubo

$W/m^2 K$  y para la ventilada se tomó un valor igual al factor de convección externa ( $h = h_{ext}$ ). Para representar distintas épocas del año se combinaron estos datos con tres temperaturas exteriores (10, 21 y 31 °C).

Como era de esperar, el resultado fue un menor salto térmico en las cámaras de aire ventiladas debido al efecto de la refrigeración. En promedio, la diferencia para una cámara cerrada sin aislamiento se redujo de 1,12 °C a 0,95 °C, mientras que para la cámara ventilada dicho valor se reduce hasta 0,77 °C.

### 5.3 TUBO

Para los tubos, se analizaron diferentes valores para el diámetro interior ( $D_{in}$ ), la profundidad ( $D_c$ ) y el grosor ( $e_p$ ), combinando este último con diferentes conductividades del material ( $\lambda_p$ ).

En la figura 4 (D) se aprecia que partiendo de valores bajos como  $\lambda_p = 0,25 W/m^2 K$  (plásticos) hasta  $\lambda_p = 386 W/m^2 K$  (metales), la respuesta es similar al caso de la chapa metálica. A mayor conductividad, mayor transferencia de calor. La transferencia de calor es casi imperceptible para diferentes espesores de tubo con altas conductividades (metales), pero en conductividades bajas como 0,25  $W/m^2 K$  (plásticos) sí se dan ciertas variaciones cuando aumenta el espesor del tubo.

El diámetro interior del tubo (figura 4 (E)) muestra un aumento de la capacidad de transferencia de calor a medida que el diámetro aumenta, logrando un valor máximo de  $\Delta t = 0,30 °C$  al pasar de 2 mm a 12 mm. Para diámetros superiores a 12 mm disminuye ligeramente.

Por último, en cuanto a la profundidad del tubo, la capacidad de transferencia de calor disminuye a medida que ésta aumenta (figura 4 (F)). Existe una progresión decreciente hasta los 10 mm de profundidad, atenuándose el efecto para mayores profundidades.

## 6. ENERGÍA ÚTIL APROVECHADA POR EL SISTEMA DE FACHADA SOLAR ACTIVA

Para comprender el potencial del sistema y la producción de energía que puede lograrse con esta fachada activa, se analizaron los resultados obtenidos a través de una extensa campaña experimental.

Para este análisis, se seleccionó un sistema compuesto por un colector solar conectado a un tanque de almacenamiento térmico (figura 1 (C)). La energía obtenida por el panel se calcula de acuerdo con la expresión presentada en la ecuación 1, y la energía dentro del tanque se controla por medio de la temperatura media.

Las condiciones de trabajo del sistema se estudian para un modo de funcionamiento en circuito cerrado, por lo que el agua circula por el colector cargando y descargando el tanque, intercambiando energía con el ambiente exterior. En esta situación,

no existe una carga térmica específica asociada que extraiga la energía del circuito solar. Aunque la interacción con otros dispositivos HVAC, como bombas de calor, es prometedora para obtener mayores rendimientos, en este caso se configuró este modo de operación con el fin de estudiar el potencial del circuito cerrado como un elemento aislado.

Por tanto, la cantidad de energía alcanzable estará limitada por la capacidad del tanque y una vez se alcanza su nivel máximo durante el día, ya no existe posibilidad de aumentar esa energía debido a que no existe ningún sumidero hasta el momento en el que comienza a bajar la temperatura exterior. De esta forma, la referencia queda definida por ciclos solares diarios que proporcionan la energía para llenar el tanque, mientras que esa energía puede ser desechada durante la noche.

La Figura 5 muestra un total de ocho días monitorizados entre 2017 y 2018 que permiten diferenciar los extremos entre días soleados con una alta productividad y radiación, frente a aquellos con escasa energía solar y que representan una respuesta limitada del sistema. La Tabla 2 describe las condiciones para la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) y la radiación en fachada sur, así como la respuesta del sistema expresada a través de la energía producida y la eficiencia promedio. La producción diaria es la energía total obtenida para un período diario que combina el salto térmico con el flujo másico medido (figura 1 (C)). La radiación diaria es la energía acumulada para cada día específico medida en la fachada sur.

Un análisis más extenso que abarca diferentes días en un período de 12 meses dio como resultado una producción diaria promedio de 320  $Wh/m^2$ . Para poner en contexto la energía producida y a pesar de no tratarse de una relación directa, si se compara con el consumo promedio de ACS (agua caliente sanitaria) de 1.508  $kWh/vivienda$  para la UE 28 [1], cada metro cuadrado de fachada podría llegar a cubrir algo menos del 8% de la energía total requerida.

## 7. DISCUSIÓN

A través de un estudio paramétrico, se analizaron alternativas para los tres componentes principales. Para los valores de referencia considerados la diferencia de temperatura alcanzada es de 1,12 °C, mientras que utilizando valores óptimos el salto térmico es de 1,59 °C. Sin embargo, para valores mínimos el salto térmico resultante es de apenas 0,06 °C. Estos resultados demuestran que hay espacio para obtener mejoras significativas si se seleccionan diseños ajustados.

Se puede obtener un incremento de 0,37 °C sobre la del caso de referencia, con una mejor transferencia de calor que se logra entre absorbedor y fluido si se aumenta la conductividad del tubo. El espesor tiene poca influencia en los metales, aunque para los

	$T_{amb}$ (°C)	Radiación diaria acumulada ( $kWh/m^2$ )	Producción diaria ( $kWh/m^2$ )	Eficiencia promedio (%)
10/03/2017	16.05	5.70	0,764	0.15
14/03/2017	12.33	2.02	0.326	0.22
28/08/2017	21.37	3.76	0,589	0.17
31/08/2017	17.16	1.61	0.055	0.07
03/10/2017	19.09	0.92	0,053	0.09
08/10/2017	13,72	5.69	0.586	0.13
06/12/2017	5.19	5.41	0.391	0.11
02/01/2018	12,46	0.25	0.015	0.11

Tabla 2: Eficiencia monitorizada en la campaña experimental para un total de 8 días en diferentes épocas del año

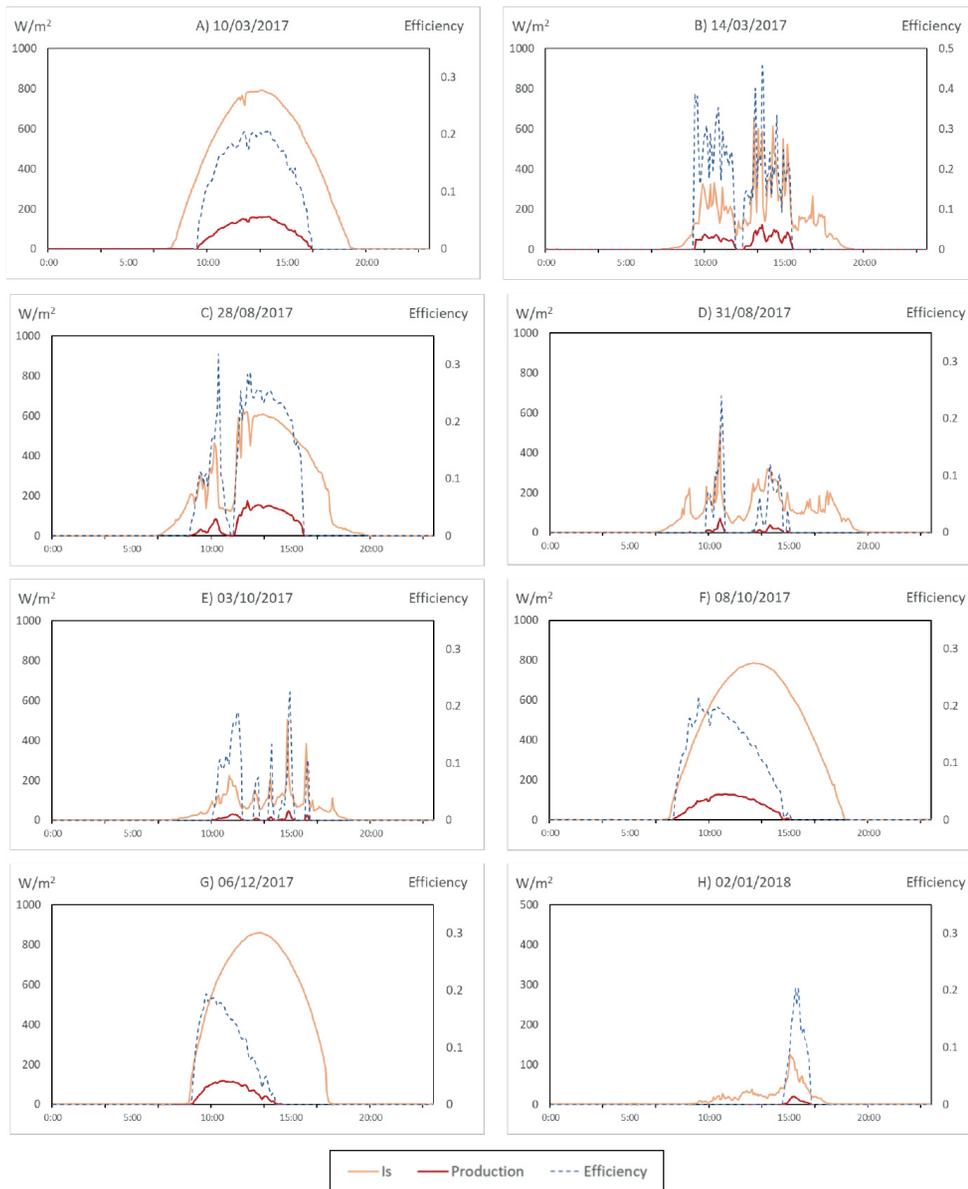


Figura 5: Evolución de la eficiencia del sistema de ASF y producción en comparación con la radiación solar incidente en 8 días diferentes durante la campaña experimental

materiales plásticos si tiene cierta importancia. El diámetro y profundidad del tubo presentan valores óptimos en 12 mm y 0 mm respectivamente, por lo que, para el caso de referencia, apenas existe margen de mejora, aunque una incorrecta selección de ambos sí que podría disminuir significativamente el rendimiento.

La conductividad de la chapa y su absorptividad son también parámetros muy influyentes, que muestran un límite superior de 1,57 °C de salto térmico en su rango superior. El grosor de la chapa supone una diferencia de temperatura máxima de 1,2 °C para los máximos espesores analizados.

Por último, el valor de 80 mm de aislamiento está bastante ajustado, con pequeños incrementos para espesores mayores. Sin embargo, es importante contar con materiales lo suficientemente aislantes como para evitar fugas de calor.

En cuanto a la energía obtenida, existe una relación directa entre ésta y el salto térmico. El caso presentado ha estimado que, aunque modesta, la contribución de la ASF puede cubrir algunas de las necesidades de energía de un edificio estándar. Cabe destacar que la energía obtenida ha sido evaluada para un elemento desacoplado y que, una vez conectado a determinadas condiciones de carga, se esperan rendimientos muy superiores.

Asimismo, esta es la primera versión de un prototipo que cuenta con un claro margen de mejora en cuanto a su diseño, tal y como demuestra el estudio paramétrico descrito y los diferentes modos de funcionamiento previstos.

## 8. CONCLUSIONES

De los parámetros constructivos analizados, la conductividad y la absorptividad de la chapa, así como la conductividad del tubo, han sido identificadas como las variables más influyentes para la transferencia de calor. Por otro lado, el grosor de los componentes principales (chapa, tubería y aislamiento) tiene un efecto menor, mientras que el diámetro y la profundidad del tubo tienen un impacto intermedio. La combinación efectiva de estos factores puede proporcionar una solución con un salto térmico interesante que representa una producción significativa de energía, aunque la rentabilidad de modificar el diseño en comparación con la energía obtenida debe valorarse adecuadamente. Sin embargo, en el otro extremo apenas se captará energía si los parámetros seleccionados están en el rango inferior. Aunque con menor influencia, el aislamiento también juega un papel relevante. Para evitar pérdidas de calor importantes, se ha demostrado la necesidad de contar con una cantidad mínima de aislamiento, así como con una cámara

de aire no ventilada.

Finalmente, se ha cuantificado la cantidad de energía que, en un rango inferior, se puede extraer del sistema, lo que supone de forma significativa a las necesidades energéticas del edificio. Este modo de trabajo, sin carga térmica conectada, representa la energía mínima alcanzable y el potencial para aumentar esa energía representa una posibilidad prometedora para el sector de la rehabilitación.

En esta línea, se están realizando investigaciones adicionales para demostrar los beneficios de los paneles activos en diferentes modos de operación cuando se conectan a una bomba de calor donde la eficiencia mejorará de forma sinérgica tanto para el panel, como para la bomba de calor.

Para concluir, se quiere destacar la gran oportunidad que representan las fachadas activas para la mejora de la respuesta de los sistemas y tecnologías actuales mejorando la eficiencia energética de los edificios, gracias al aprovechamiento de fuentes renovables como la solar, contribuyendo así a mitigar el cambio climático.

## REFERENCIAS

- [1] Comisión Europea. EU Building Stock Observatory. Directorate-General for Energy. <https://ec.europa.eu/energy/en/eubuildings> (26/09/2019)
- [2] Agostino, D. D., & Mazzarella, L. (2019). What is a Nearly zero energy building ? Overview, implementation and comparison of definitions. *Journal of Building Engineering*, 21 (Octubre 2018), 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.019>
- [3] Comisión Europea. Commission Recommendation (EU) 2016/1318, (2016), of 29 July 2016 on guidelines for the promotion of nearly zero-energy buildings and best practices to ensure that, by 2020, all new buildings are nearly zero-energy buildings.
- [4] Buildings Performance Institute Europe. BPIE. Future-proof buildings for all Europeans – a guide to implement the Energy Performance of Buildings Directive. Retrieved from: <http://bpie.eu/> (26/09/2019)
- [5] Elguezabal, P., & Garay, R. (2015). Experiences when employing different alternatives for envelope upgrading. *Journal of Façade Design & Engineering* 3(1), 81–89. DOI: <https://doi.org/10.3233/FDE-150032>
- [6] Blanco, J.M.; Arriaga, P.; Roji, E.; Cuadrado, J., Investigating the thermal behavior of perforated double-skin perforated sheet façades: Model characterization and validation procedure; optimization assessment (Part A), *Building & Environment*, 82, (2014) 50–62 (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.007>)
- [7] Kalogirou S. A., Building integration of solar renewable energy systems towards zero or nearly zero energy buildings, *Int. J. Low-Carbon Technol.* 10 (2015) 379–385. DOI: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt071>.
- [8] O'Hegarty, R., Kinnane, O. & McCormack, S. J. (2016). Review and analysis of solar thermal facades. *Solar Energy*. Vol. 135 (2016), pp. 408–422
- [9] Giovanardi, A., Passera, A., Zottele, F., Lollini R., Integrated solar thermal façade system for building retrofit, *Sol. Energy*. 122 (2015) 1100–1116. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2015.10.034>.
- [10] D'Antoni, M.; Bonato, P.; Fedrizzi, R. On the development of a façade-integrated solar water storage. *Journal of Façade Design and Engineering*, [S.l.], v. 6, n. 2, p. 009–020, June 2018. ISSN 2213–3038. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.2.2048>.
- [11] Munari Probst, M.C. & Roecker, C. (editors). (2012). *Solar Energy Systems in Architecture – integration criteria and guidelines*. IEA SHC Task 41, Subtask A
- [12] Elguezabal, P., Lopez, A., Blanco, J.M., Chica, J.A., Parametric assessment of a building active façade by means of a combined metallic sandwich panel with an unglazed solar collector. *MATEC Web Conf.* 282 02046 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928202046>
- [13] Boudjabeur S. et al. Building Active Steel Skin. (BASSE). (2019) Grant Agreement nº: RFSR-CT-2013 - 00026. Final Report. ISBN 978-92-79-94133-7. ISSN 1831-9424. DOI: <https://doi.org/10.2777/767032>. <https://publications.europa.eu/en/web/general-publications/publications>. (26/09/2019)
- [14] O'Hegarty, R., Kinnane, O., McCormack, S., Parametric investigation of concrete solar collectors for façade integration, *Sol. Energy*. 153 (2017) 396–413. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2017.05.092>
- [15] Garay-Martinez, R., Arregi-Goikolea, B., Bonnami, P., Raji, S., Lopez, J. (2017). Concept, development and thermal characterization of an unglazed solar thermal collector for façade integration. *DYNA*, 92(4). 466–472. DOI: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.6036/8108>
- [16] Gunjo, D.G., Mahanta, P., Robi, P.S. (2017) CFD and experimental investigation of flat plate solar water heating system under steady state condition, *Renew. Energy*. 106 (2017) 24–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2016.12.041>.
- [17] Ayompe, L.M., Duffy, A., McCormack, S.J., Conlon, M., Validated TRNSYS model for forced circulation solar water heating systems with flat plate and heat pipe evacuated tube collectors, *Appl. Therm. Eng.* 31 (2011) 1536–1542. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2011.01.046>.
- [18] Rodríguez-Hidalgo, M.C., Rodríguez-Aumente, P.A., Lecuona, A., Gutiérrez-Urueta, G.L., Ventas, R., Flat plate thermal solar collector efficiency: Transient behavior under working conditions. Part I: Model description and experimental validation, *Appl. Therm. Eng.* 31 (2011) 2394–2404. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2011.04.003>.
- [19] Kumar, S., Sharma, V.B., Kandpal, T.C., Mullick, S.C., Wind induced heat losses from outer cover of solar collectors, *Renew. Energy*. 10 (1997) 613–616. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(96\)00031-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(96)00031-6).
- [20] Brandl, D.; Schober, H.; Hochenauer, C., (2018). Analysis of Heating Effects and Deformations for a STAF Panel with a Coupled CFD and FEM Simulation Method. *Journal of Façade Design & Engineering*, 6(3), 116–131. <https://doi.org/10.7480/jfde.2018.3.256>.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo técnico y humano proporcionado por IZO-SGI SGIker de la UPV/EHU y el Gobierno Vasco, a través de IT781-13 y 1314-19 y los grupos de investigación de la UPV/EHU a través de PES17/25. Asimismo, se agradece a Tecnalia Research & Innovation por apoyar esta investigación a través del acuerdo de cooperación (PT10516) con la UPV/EHU. Los autores también quieren agradecer a todas aquellas empresas e investigadores participantes en el proyecto BASSE por su compromiso con dicha investigación. El proyecto BASSE recibió financiación de la Unión Europea, a través del Programa de RFCS Fondo de Investigación para el acero y el carbón. (BASSE, contrato no RFSR-CT-2013-00026).

## NOMENCLATURA

A	Anemómetro	q	Potencia calorífica específica (W/m <sup>2</sup> )
ASF	Fachada solar activa	q <sub>irad</sub>	Calor absorbido por radiación (W/m <sup>2</sup> )
CFD	Fluido Dinámica Computacional	q <sub>conv</sub>	Calor emitido por radiación (W/m <sup>2</sup> )
C <sub>p</sub>	Capacidad calorífica específica (J/kg °C)	RES	Fuentes de energía renovable
D <sub>in</sub>	Diámetro interior del tubo (mm)	SIMPLE	Método Semi Implícito para Ecuaciones relacionadas con la Presión
D <sub>e</sub>	Profundidad del tubo (mm)	T <sub>amb</sub>	Temperatura ambiente (°C)
ACS	Agua caliente sanitaria	T <sub>in</sub>	Temperatura de entrada del fluido (°C)
e	Espesor (mm)	T <sub>out</sub>	Temperatura de salida del fluido (°C)
FM	Caudalímetro	T <sub>s</sub>	Temperatura de la superficie del absorbedor(°C)
h	Coefficiente de convección (W/m <sup>2</sup> K).	U	Velocidad del viento (m/s)
HVAC	Sistema de Climatización y Ventilación	ΔT	Salto térmico- capacidad de transferencia de calor (°C)
I <sub>sol</sub>	Radiación solar (W/m <sup>2</sup> )	σ	Constante de Stefan-Boltzmann (5.68 10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
λ	Conductividad térmica (W/m <sup>2</sup> K)	α	Absortividad (-)
ṁ	Flujo másico (kg/s)		
NZEB	Edificios de Consumo Energético Casi Nulo		
P	Piranómetro		
PMAE	Predicción del Error Medio Absoluto (%)	i	Subíndices
Q	Potencia térmica (W)	s	Relativo al aislamiento
		p	Relativo a la chapa
		ext	Relativo al tubo
			Relativo al aire exterior