

Caja adiabática diseñada para minimizar el puente térmico de un sistema termoeléctrico

Adiabatic box designed to minimize the thermal bridge of a thermoelectrical system

César Martín-Gómez (*), Kattalin Del Valle de Lersundi (**), Amaia Zuazua Ros (*), Marina Vidaurre-Arbizu (*), José Antonio Sacristán-Fernández (*), María Ibañez-Puy (***)

RESUMEN

Los autores del artículo trabajan en la integración de la termoelectricidad en fachadas desde el año 2009. El objeto de este artículo es revisar las posibilidades que esta tecnología ofrece para su incorporación como sistema de climatización de edificios, centrándose en la descripción y análisis del comportamiento del último prototipo realizado dentro de un proyecto de investigación. Para ello, se describen los criterios de diseño y los componentes necesarios para su montaje, aspectos en los que ha tenido especial importancia la reducción del puente térmico respecto a prototipos anteriores. Se explica la metodología experimental seguida, los ensayos realizados, y se analizan críticamente los resultados. Las conclusiones plantean mejoras y recomendaciones para implementar en futuros desarrollos.

Palabras clave: Peltier; calefacción; prototipo; puente térmico; arquitectura.

ABSTRACT

The authors of the article work on the integration of thermoelectricity in facades since 2009. The purpose of this article is to review the possibilities that this technology offers for its incorporation as a building air conditioning system, focusing on the description and analysis of the behaviour of the last prototype made within a research project. For this, the design criteria and the necessary components for its assembly are described, in this aspect the reduction of the thermal bridge with respect to previous prototypes has been especially important. The experimental methodology followed, and the tests performed are explained, critically analysing the results. The conclusions raise improvements and recommendations to implement in future developments.

Keywords: Peltier; heating; prototype; thermal bridge; architecture.

(* Dr/a. Arquitecto/a. Investigador/a y Profesor/a. Departamento de Construcción, Instalaciones y Estructuras, Universidad de Navarra, Pamplona (España).

(**) Arquitecta. Investigadora. Departamento de Construcción, Instalaciones y Estructuras, Universidad de Navarra, Pamplona (España).

(***) Dra. Ingeniera de Edificación. Responsable I+D. ACR Grupo, Pamplona (España).

Persona de contacto/Corresponding author: azuazua@unav.es (A. Zuazua-Ros)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0150-1686> (C. Martín-Gómez); <http://orcid.org/0000-0001-8535-5895> (K. Del Valle de Lersundi); <http://orcid.org/0000-0002-3065-1993> (A. Zuazua-Ros); <http://orcid.org/0000-0002-9041-9782> (M. Vidaurre-Arbizu); <http://orcid.org/0000-0002-8844-2895> (J.A. Sacristán-Fernández); <http://orcid.org/0000-0002-2642-5088> (M. Ibañez-Puy)

Cómo citar este artículo/Citation: César Martín-Gómez, Kattalin Del Valle de Lersundi, Amaia Zuazua Ros, Marina Vidaurre-Arbizu, José Antonio Sacristán-Fernández, María Ibañez-Puy (2021). Caja adiabática diseñada para minimizar el puente térmico de un sistema termoeléctrico. *Informes de la Construcción*, 73(562): e386. <https://doi.org/10.3989/ic.74303>

Copyright: © 2021 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 18/09/2019
Aceptado/Accepted: 05/06/2020
Publicado on-line/Published on-line: 10/06/2021

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La reducción del consumo energético en la edificación y el incremento de la utilización de fuentes de energía renovables son aspectos claves para garantizar la mejora de la sostenibilidad y la calidad de la vida asociadas a la edificación. De hecho, según el Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente, los edificios son responsables de más del 40% del consumo energético mundial. Además, próximamente, se publicará la ley de transición energética en España cuyo principal objetivo es la evolución hacia un modelo de desarrollo bajo en carbono y resiliente al cambio climático. En este contexto, la utilización de la termoelectricidad representa una alternativa para la climatización de los edificios de consumo casi nulo que ha de ser valorada en su importancia, pues es una tecnología que elimina la utilización de fluidos refrigerantes.

La termoelectricidad es la parte de la física que trata los fenómenos de producción de energía eléctrica por la acción del calor (efecto Seebeck) y viceversa (efecto Peltier). Este último consiste en que al hacer circular una corriente eléctrica a través de la unión de dos tipos diferentes de materiales semiconductores se produce una transferencia de calor entre ellas, de manera que, una unión se enfría y la otra se calienta. Si se cambia el sentido de la corriente eléctrica se cambia, también, la dirección de la transmisión de calor. De este modo, las células Peltier pueden utilizarse como bombas de calor.

La mayor parte de las aplicaciones de esta tecnología se encuentran en la industria del automóvil o aeroespacial, donde, basándose en el efecto Seebeck, utilizan el calor residual de sus procesos productivos para generar electricidad. Por su parte, el efecto Peltier es utilizado en pequeños dispositivos microelectrónicos, sondas espaciales, energía solar, ropa militar, etc (1-3)... como mecanismo de enfriamiento. Sin embargo, estas aplicaciones se centran en dispositivos a pequeña escala. De hecho, a pesar de su potencial, el uso de la termoelectricidad para la climatización de edificios es un área poco desarrollada todavía (4).

La utilización de la termoelectricidad como sistema de climatización de edificios presenta numerosas ventajas:

- Las células Peltier tienen una vida útil larga sin que se vea afectado su rendimiento (5), lo que supone unos costes de mantenimiento bajos.
- Es posible disponer de una única instalación para calentar y para refrigerar, evitando el uso de líquidos refrigerantes (6).
- Por otro lado, como las células funcionan con corriente continua su alimentación mediante células fotovoltaicas se puede realizar de forma sencilla.
- Las características físicas de las células Peltier facilitan la integración de estas en la fachada y, de este modo, es posible disponer de un sistema descentralizado y eliminar las instalaciones auxiliares necesarias en cualquier otro sistema de climatización.

Sin embargo, la integración de las células Peltier en la fachada supone un reto importante, puesto que el sistema deja de ser únicamente una máquina para convertirse, también, en

un componente más de la fachada que debe, por tanto, cumplir con todas las exigencias propias de cualquier componente de la envolvente de un edificio (7).

Aunque la incorporación de la termoelectricidad en los edificios puede considerarse que está todavía lejos del mercado (8), el número de investigaciones desarrolladas sobre su uso ha aumentado en los últimos años (9). A pesar de que entre estas investigaciones se encuentran desarrollos de sistemas de climatización termoeléctricos no integrados, es decir, diseñados exclusivamente como ‘máquinas’ para climatizar, la gran mayoría proponen sistemas integrados en diferentes elementos constructivos. Así, las investigaciones que han sido publicadas ofrecen principalmente tres opciones de integración: en ventanas, en fachada o en cubierta/techo (9). En su mayoría, los resultados de estas investigaciones se centran en el análisis del rendimiento del sistema (5) y en su comportamiento energético frente a otras soluciones convencionales (10).

Son pocas las investigaciones que analizan los factores que afectan la integración de la termoelectricidad en un edificio desde el punto de vista de la construcción. Puede señalarse como curiosidad que en la revista ‘Informes de la Construcción’, editada desde 1948, si se busca en su página web las palabras clave “Peltier” o “termoelectricidad”, no existen registros al respecto. Es más, en los artículos publicados a nivel internacional apenas aparecen conceptos como las pérdidas de calor a través de los elementos constructivos, la durabilidad, el comportamiento acústico, la estética o el comportamiento frente al fuego. Sin embargo, se trata de parámetros imprescindibles para que el sistema se comporte correctamente como elemento constructivo.

Los autores del presente artículo han desarrollado una línea de investigación relacionada con sistemas para la climatización de edificios, donde el diseño, caracterización y análisis de sistemas termoeléctricos integrados en fachada ha tenido un papel protagonista con el diseño de varios prototipos.

Así, en 2009 se diseñó y construyó un primer prototipo de una unidad de calefacción y refrigeración termoeléctrica para su uso en edificios residenciales (11), de la que se obtuvo una patente (12). Por su parte, el segundo prototipo, realizado en 2014, se centró en la integración del sistema termoeléctrico como un componente más de una fachada ventilada (13). En ambos casos, se tratan de prototipos realizados a escala real y testados en condiciones ambientales exteriores (Figura 1).

Antes de afrontar la construcción del tercer prototipo, los investigadores ejecutaron un prototipo a escala, denominado *Adiabatic BOX*, para analizar, en condiciones de laboratorio, por un lado, la relación entre la temperatura de las caras de las células y la temperatura ambiente interior y, por otro, las limitaciones del módulo termoeléctrico como componente de una fachada (14) (Figura 1).

Los resultados de aquellas investigaciones, junto con la experiencia de otros autores (15-16), indican que la principal debilidad del sistema, en lo que se refiere a su integración en fachadas, se encuentra en resolver el puente térmico que las propias células Peltier generan cuando no están funcionando.

Como se explica en este estudio, es necesario disponer el elemento termoeléctrico junto con sendos disipadores de calor que

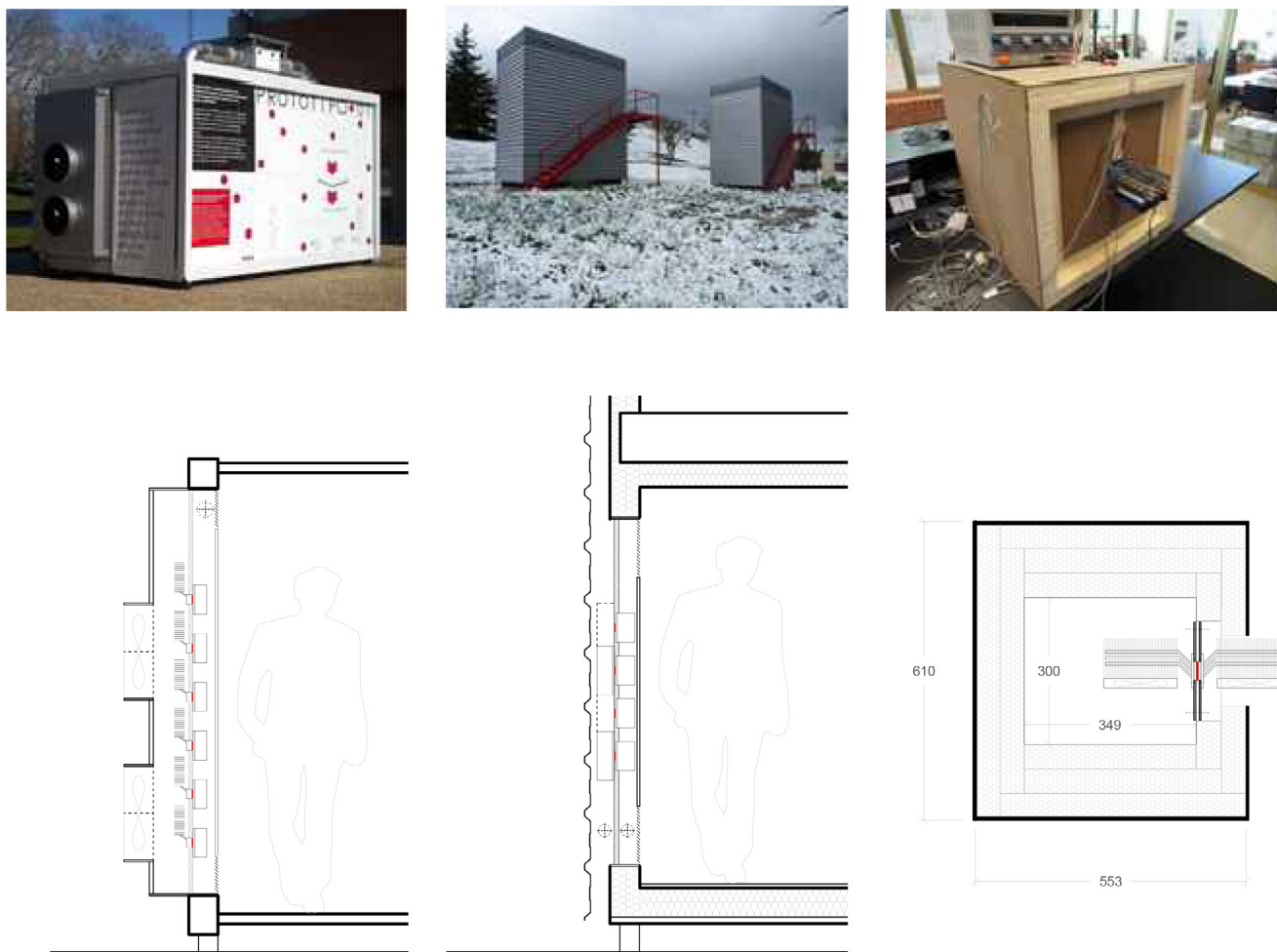


Figura 1. Imágenes y secciones constructivas de los prototipos desarrollados anteriormente desde el Departamento de Construcción, Instalaciones y Estructuras de la Universidad de Navarra.

permitan la captación y disipación de calor entre el ambiente interior y el exterior. Sin embargo, la disposición de estos elementos en fachada, normalmente metálicos y por tanto con mayor conductividad térmica, supone romper con la continuidad de todos los materiales que componen la fachada, especialmente la capa de aislamiento, generando un puente térmico.

Tras estos antecedentes, el objeto del artículo es analizar el comportamiento de una caja adiabática (denominada de aquí en adelante caja adiabática v.2, Figura 2), cuyo diseño se focalizó en minimizar el puente térmico que genera la integración del módulo termoelectrico en la fachada. Además, este prototipo a escala constituye la base de diseño de un prototipo a escala real que actualmente se encuentra en fase de montaje.

CAJA ADIABÁTICA V.2: COMPONENTES Y CRITERIOS DE ENSAMBLAJE

Aunque generalmente el montaje no se considera en la optimización de los sistemas termoelectricos, se ha demostrado que es un aspecto a tener en cuenta, ya que deteriora el rendimiento del sistema termoelectrico.

Diseño y componentes

Las principales diferencias entre esta caja adiabática v.2 y el prototipo precedente *Adiabatic BOX* son dos. Por una parte,

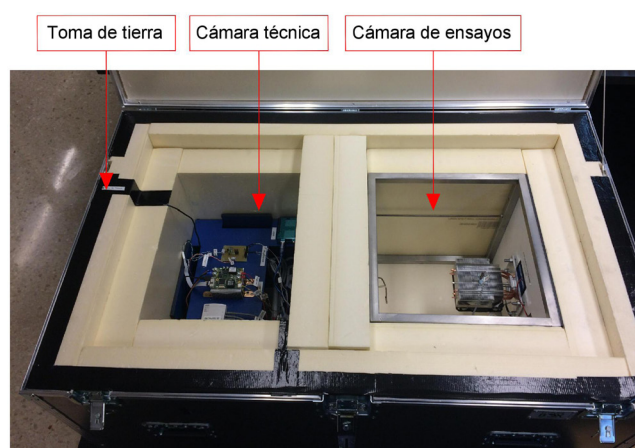


Figura 2. Interior de la caja adiabática v.2. Todos los componentes del experimento se agrupan en un único contenedor, pues era uno de los requerimientos logísticos para el envío del segundo prototipo a la Base Antártica 'Gabriel de Castilla'.

este segundo prototipo 'portátil' está pensado para hacer ensayos en ambiente exterior con temperatura variable, lo que supone que todos los dispositivos de control a excepción del ordenador portátil deben estar en el interior de la caja. Esto lleva a la segunda diferencia, pues mientras la *Adiabatic BOX* solo disponía de una cámara, la caja adiabática v.2 está dividida en dos compartimentos: una cámara técnica, donde es-

tán colocados todos los dispositivos y una cámara de ensayos, donde se llevan a cabo las pruebas de temperatura (Figura 3).

Es necesario señalar que estas diferencias en la configuración de este segundo prototipo a escala se han planteado porque una caja adiabática idéntica a la descrita en este artículo fue enviada a la base española en la Antártida 'Gabriel de Castilla', para evaluar la validez del sistema constructivo en un entorno agresivo de bajas temperaturas, atmósfera salina y viento con alta carga de arena de origen volcánico, que afecta directamente a la durabilidad de los elementos constructivos. Tales condicionantes sin duda alguna ayudaron a plantear la robustez del sistema constructivo que aquí se describe.

La Figura 3 resume la información de la caja adiabática v.2. Por un lado, se muestran las dimensiones tanto de la caja como de los compartimentos interiores, acompañado de dos imágenes de estos. En la parte inferior, se ha incluido un esquema de las conexiones de los elementos electrónicos empleados para el funcionamiento del sistema termoelectrico y la motorización de los ensayos.

Las dimensiones totales de la caja adiabática v.2 son 755 mm de lado, 1485 mm de ancho y 755 mm de alto, de estas la cámara técnica ocupa 325 mm x 410 mm x 415 mm, por tanto, dejando una cámara de ensayos de 400 mm x 410 mm x 415 mm (Figura 3).

El cerramiento exterior de la caja está compuesto por un tablero de fibra de densidad media (DM) de 10mm acabado con una lámina de aluminio de 1mm. El aislamiento interior consta, en la parte inferior, de doble panel de 80 mm de poliestireno extruido (XPS), y en la parte superior, adherido a la tapa de la caja, doble panel de 50mm de XPS. Además, para poder asegurar las condiciones térmicas adecuadas de ambas cámaras, cada una lleva su propia tapa de XPS de 50mm de espesor. Esto permite abrir y cerrar la caja con una alteración mínima de los ambientes interiores protegiéndolas de las infiltraciones. Los paneles XPS no llevan ningún tipo de adhesivo entre sí, ya que el propio diseño de ensamblaje garantiza su correcta posición y rigidez.

Para evitar deformaciones en el volumen de la cámara de ensayos, se ha diseñado una estructura de perfiles de acero inoxidable de 20/20mm. Así mismo, esta estructura lleva integrada un panel fenólico en el lateral con un agujero de 70x120 mm en el centro, donde va situado el sistema de sujeción de la célula Peltier. Este panel funciona como superficie rígida para las tuercas de los pernos.

Por otra parte, en la cámara técnica se ha provisto de una estructura de 10mm de DM, que organiza los dispositivos y sirve de superficie para atornillarlos. Por último, para minimizar las infiltraciones, se ha sellado todo el perímetro de la apertura con cinta.

En cuanto al sistema de control y monitorización, los componentes utilizados se colocan en la cámara técnica, a excepción de los sensores. El sistema de control utilizado se basa en una tarjeta TEC-1090-HV Controller, desarrollada por Meerstetter Engineering GmbH. Esta tarjeta, conectada a una fuente de alimentación de 24 V, recibe los datos de las temperaturas de las caras de la célula Peltier a través de dos sondas planas NTC Thermistor 103 JT-025. La tarjeta TEC, a su vez, ali-

menta a la célula Peltier, pudiendo controlar desde aquí tanto el voltaje como la temperatura de la cara interior deseada de la célula Peltier.

Los ventiladores instalados junto con los disipadores se alimentan de otra fuente de alimentación independiente de 12V y, a través de un transistor, se controlan desde la tarjeta TEC Controller. El ventilador exterior, debido a las condiciones ambientales a las que se expone, tiene una protección IP68.

Para la recogida de datos ajenos al sistema termoelectrico, como son las temperaturas de ambiente interior de la caja y exterior, así como las temperaturas de los disipadores, se utiliza un registrador de datos HOBO U12-006. Las cuatro sondas utilizadas para medir estos parámetros son del tipo PT-100. Elementos tales como las fuentes de alimentación, HOBO y TEC pueden observarse en su posición definitiva en la fotografía de la izquierda (Figura 3). El ventilador bajo el disipador metálico se observa en la imagen de la derecha. El detalle de colocación de las sondas se realiza en el subcapítulo 3.2.

Tanto la TEC como el HOBO se conectan a un hub USB para así simplificar la conexión exterior y que sea un único cable USB el que se conecte al ordenador exterior. Así, las únicas conexiones que salen de la caja son el cable de alimentación eléctrica y la conexión de datos por USB. El paso de ambos cables a través del cerramiento de la caja se ha hecho a través de un pasatubos sellado. Para proteger el dispositivo exterior (ventilador, disipador y sondas) se ha montado una celosía electrosoldada de acero, atornillada a la caja en el perímetro lateral, que garantiza la seguridad del dispositivo frente a posibles impactos en el transporte y sobre el terreno expuesto.

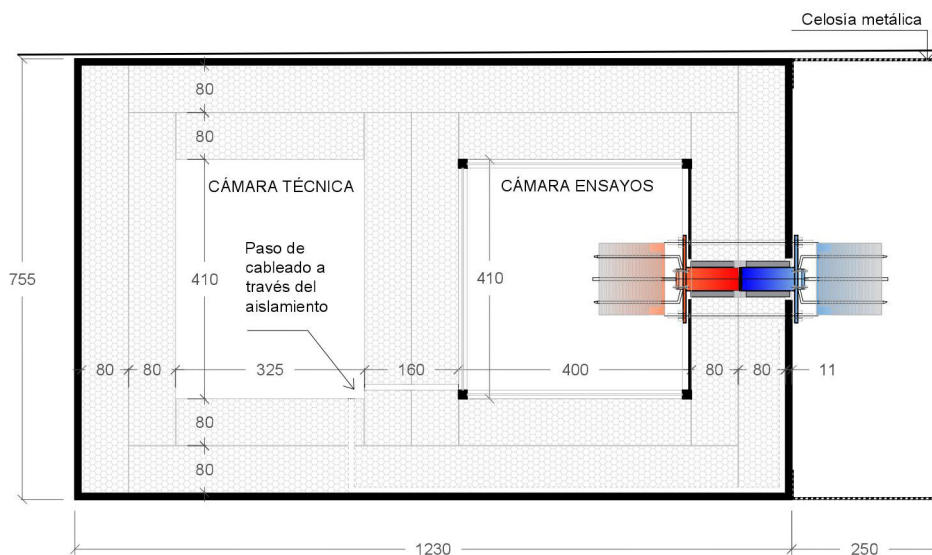
Reducción del puente térmico en la integración del sistema termoelectrico

Atendiendo a experiencias anteriores, el rendimiento del sistema termoelectrico está marcado por el puente térmico que genera la integración de los diferentes componentes en la fachada. La incorporación de todo el equipo termoelectrico (célula Peltier y disipadores) supone una discontinuidad en el aislamiento de la fachada y por tanto un punto con diferente mayor conductividad térmica.

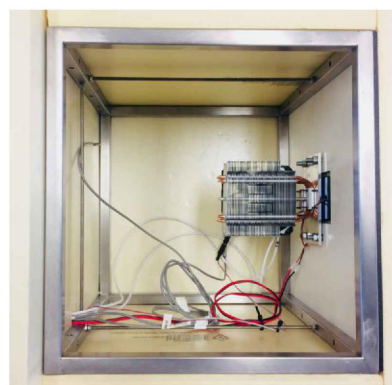
En el caso que nos ocupa, el objetivo del diseño del sistema de transmisión de calor de la célula Peltier es reducir el puente térmico respecto a los diseños anteriores cuando el sistema está apagado. Lo lógico sería tratar de reducir el puente térmico tratando de introducir aislamiento entre ambos disipadores, pero aumentar esta distancia implicaría aumentar la distancia entre disipador y células y, por tanto, reducir el rendimiento de la transferencia de calor célula-disipador.

Para ello se han construido unas piezas de aluminio macizo (aleación 5083) en forma de T (Figura 4) que cumplen con las siguientes funciones:

- Sujeción en la parte central de la célula Peltier a través de la presión ejercida por los pernos que atraviesa el cerramiento.
- Transmitir por conducción el calor generado por las caras de la célula hasta los disipadores.



CÁMARA TÉCNICA



CÁMARA DE ENSAYOS

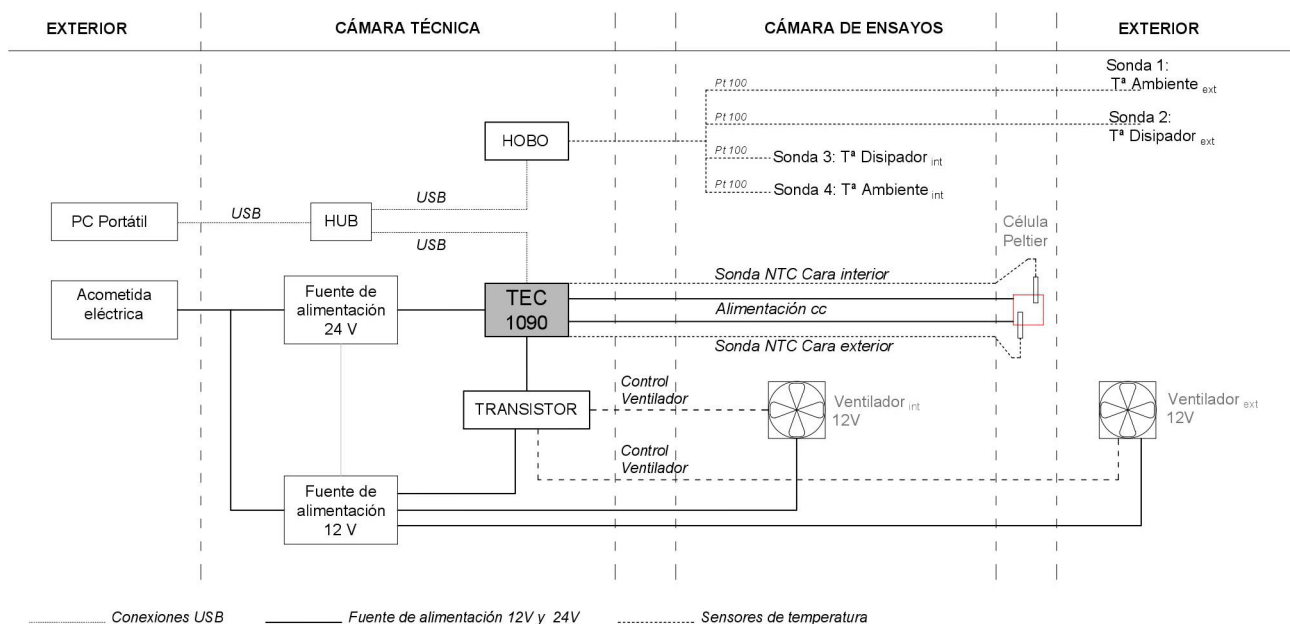


Figura 3. Dimensiones de la caja adiabática (arriba), así como de las cámaras técnica y de ensayos, imagen de ambas (centro) y esquema unifilar del cableado del conjunto (abajo).

- Conformar la estructura a la que se atornillan los disipadores.

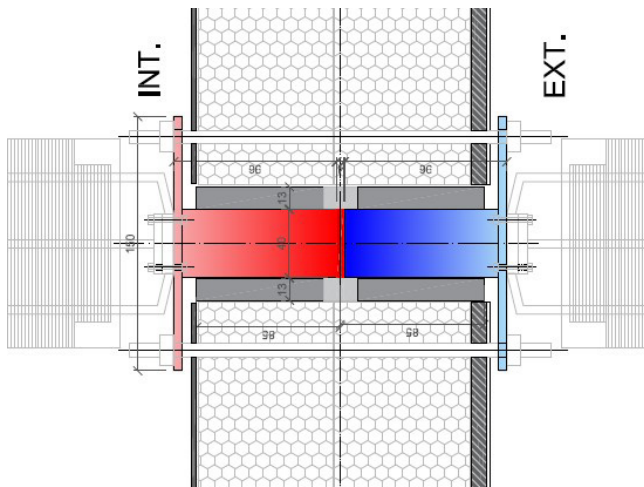


Figura 4. Detalle del sistema de sujeción de la célula Peltier y los disipadores a través de los perfiles de aluminio.

Para la elección del tipo de aleación de aluminio, dado que el prototipo está pensado para hacer ensayos en el exterior, se ha optado por la aleación 5083 (conductividad térmica de 117 W/mK) que proporciona una alta resistencia a la corrosión. Rodeando los perfiles de aluminio, se ha montado unas piezas de DM y que, a través de las perforaciones que tienen, sirven para hacer llegar los cables eléctricos y los dos sensores NTC desde el interior de la caja hasta la célula Peltier que queda sujeta entre ambos perfiles de aluminio, en el centro del espesor del cerramiento. La función principal de estas piezas de DM con baja conductividad térmica es evitar el contacto directo entre los paneles aislantes de poliestireno y los perfiles de aluminio (ver Figura 5).

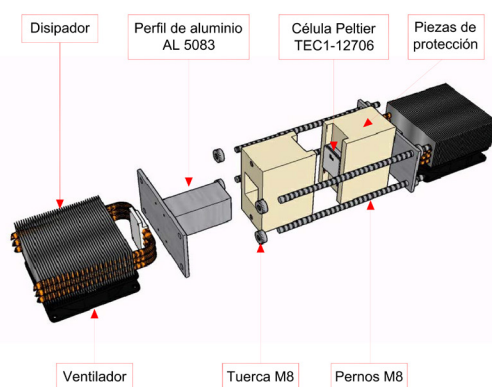


Figura 5. Ensamblaje del sistema de transmisión de calor de la célula Peltier, perfiles de aluminio y disipadores.

Además, es importante tener en cuenta que para que el sistema funcione correctamente el montaje debe incorporar materiales termoconductores que contrarresten las imperfecciones microscópicas de las superficies de contacto. También es importante aplicar presión en el montaje (16). Las mediciones han demostrado que cada módulo debe tener su propio ajuste de tornillería y presión, sucediendo que los ensambla-

jes que comparten sistema de sujeción con tornillos pueden causar contacto solo en algunas partes del módulo. Sin embargo, el uso de tornillos conlleva como desventaja que los propios tornillos en sí, generan un puente térmico y parte del calor producido se pierde a través de ellos (16).

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para los ensayos que se presentan en este artículo, la caja adiabática v.2 se ha instalado en una sala de ambiente controlado para testarla en condiciones constantes, en este caso a temperatura ambiente (T_{amb}) de 15°C. Así, los ensayos se realizan bajo dicha condición con diferentes temperaturas objetivo de la cara interior de la célula Peltier ($T_{int,obj}$) (20°C, 25°C, 30°C y 35°C).

En cuanto a los datos recogidos, se analizan las temperaturas y consumos durante los ensayos del prototipo para ver qué los factores del diseño constructivo que pueden afectar el comportamiento de este. Además de estos datos en ambiente controlado, una caja ejecutada con los mismos sistemas y componentes se envió a la Base Antártica Gabriel de Castilla, donde se testó a temperaturas más bajas (17).

Datos iniciales

Respecto al efecto termoelectrónico, las ecuaciones [1] y [2] representan el calor a disipar por unidad de tiempo por la célula Peltier estando tanto en modo refrigeración como en modo calefacción (18). En cuanto al comportamiento de una célula Peltier, estas ecuaciones reúnen tres fenómenos que tienen lugar en la célula: el efecto Seebeck, el efecto Joule y la transferencia de calor de la propia célula. La T_{int} es la temperatura de la cara de la célula Peltier donde se disipa el calor y T_{ext} es la temperatura de la cara donde se absorbe el calor.

$$[1] \dot{Q}_h = S_m \cdot I \cdot T_{int} + 1/2 \cdot R_m \cdot I^2 - K_m \cdot (T_{int} - T_{ext})$$

$$[2] \dot{Q}_c = S_m \cdot I \cdot T_{int} - 1/2 \cdot R_m \cdot I^2 - K_m \cdot (T_{int} - T_{ext})$$

$$[3] S_m = \frac{V_{max}}{T_{ho}}$$

$$[4] R_m = \frac{(T_{ho} - \Delta T_{max}) \cdot V_{max}}{T_{ho} \cdot I_{max}}$$

$$[5] K_m = \frac{(T_{ho} - \Delta T_{max}) \cdot V_{max} \cdot I_{max}}{2 \cdot T_{ho} \cdot \Delta T_{max}}$$

$$[6] \dot{W}_e = I \cdot V$$

$$[7] COP = \frac{Q}{\dot{W}}$$

ΔT_{max} Máxima diferencia de temperaturas entre las caras de la célula Peltier proporcionada por el fabricante

I Corriente [A]

K_m Conductancia térmica de la célula Peltier [WK⁻¹]

\dot{Q}_h Calor disipado por unidad de tiempo en modo calefacción [W]

\dot{Q}_c Calor disipado por unidad de tiempo en modo refrigeración [W]

R_m Resistencia eléctrica de la célula Peltier [Ω]

S_m	Coefficiente Seebeck [VK^{-1}]
T_{ho}	Temperatura de la cara caliente proporcionada por el fabricante [$^{\circ}C$]
T_{int}	Temperatura de la cara interior de la célula Peltier [$^{\circ}C$]
T_{ext}	Temperatura de la cara exterior de la célula Peltier [$^{\circ}C$]
V	Voltaje [V]
V_{max}	Voltaje máximo de las especificaciones del fabricante [V]
\dot{W}_e	Consumo eléctrico [W]

En este caso, se instala una célula Peltier TEC-12706, de la cual se consideran unos valores constantes del coeficiente de Seebeck (S_m) de 0.0508 V/K, de la conductancia térmica (K_m) de 0.5808 W/K y una resistencia (R_m) de 1.98 Ω , parámetros que se obtienen de las especificaciones del fabricante (ver Tabla 1) y que se calculan con las ecuaciones [3], [4] y [5]. En cuanto al consumo eléctrico, la potencia consumida se calcula mediante la ecuación [6], y con esto, finalmente se obtiene el COP (*Coefficient of Performance*) de la célula Peltier, que se expresa en la ecuación [7].

Tabla 1. Características de los componentes.

Componente	Especificación	Valor
Célula termoelectrica TEC-12706	T cara caliente	298 K
	Q_{max}	50 W
	ΔT_{max}	66 K
	I_{max}	6.4 A
	V_{max}	14.4 V
	Resistencia	1.98 Ω
Ventilador exterior	Dimensiones (mm)	120 x 120 x 38
	Flujo de aire	99 CFM
	Grado de protección	IP68
	Tensión nominal	12 V
Ventilador interior	Dimensiones (mm)	120 x120 x 25
	Flujo de aire	60.7 CFM
	Tensión nominal	

Configuración de los ensayos

Los ensayos relacionan la temperatura de la cara interior de la célula con la temperatura ambiente interior de la caja adiabática, y permiten evaluar el tiempo transcurrido durante dicha transferencia de calor y los consumos eléctricos asociados. Se recogen datos cada minuto y se ensaya en modo de calefacción. Debido al contacto directo que se debe asegurar entre las caras de la célula Peltier y los disipadores de aluminio, estos sensores deben de resistir la presión del contacto. Para asegurar el contacto entre los elementos se utiliza pasta térmica. En la Figura 6 se observa la colocación de las sondas NTC que miden la temperatura de ambas caras de la célula Peltier.

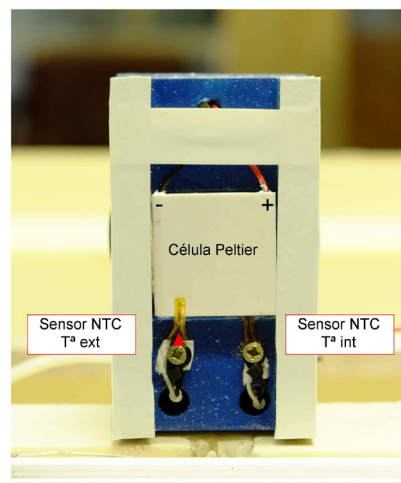


Figura 6. Sensores NTC en ambas caras de la célula Peltier.

Se define la temperatura de consigna ($T_{int,obj}$), como la temperatura que debe alcanzar la cara interna de la Peltier (T_{int}). Así, la tarjeta de control regula la intensidad y voltaje necesarios para alcanzar las condiciones definidas. En este caso se utiliza el software TEC Controller Software v.3.00 y todos los datos quedan registrados. En paralelo, se registran tanto las temperaturas de los disipadores ($T_{dis,in}$ y $T_{dis,out}$) como la temperatura del interior de la caja (T_{caja}) y la temperatura ambiente exterior (T_{amb}), a través del registrador de datos HOBO U12-006.

De la experiencia previa con la *Adiabatic BOX* se confirmó la necesidad de un protocolo de accionamiento de los ventiladores (14). Los ventiladores favorecen la disipación de calor, que a su vez mejora el comportamiento de la célula. Por lo tanto, los ventiladores entran en funcionamiento una vez los disipadores alcanzan las temperaturas de consigna. Además, al no haber convección natural dentro de la caja, es necesario activar los ventiladores para disipar el calor interior. Los detalles de los ventiladores se describen en la Tabla 1.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO

El análisis del comportamiento de la caja adiabática v.2 se presenta desde dos puntos de vista: temperaturas alcanzadas y consumos asociados. Como se ha comentado anteriormente, los ensayos se realizan con una T_{amb} de 15 $^{\circ}C$, y temperaturas de consigna de la cara interior de la Peltier de 20, 25, 30 y 35 $^{\circ}C$. Las gráficas que se muestran en las Figuras 7-10 corresponden a cada escenario ensayado.

Por un lado, en la parte superior se presentan las temperaturas objeto y por otro, en la parte inferior, la corriente y el COP durante el ensayo. La línea discontinua negra muestra la $T_{int,obj}$ en cada caso, y la línea roja la T_{int} de la cara de la Peltier. En cuanto a la duración de cada ensayo, esta ha variado según el alcance de la temperatura ambiente interior de la caja (T_{caja}).

Como se puede ver en todos los casos, la T_{int} se alcanza en pocos minutos en la cara interior de la célula Peltier y se mantiene constante. Sin embargo, la temperatura interior de la cámara de ensayo (la línea verde continua, T_{caja}) no siempre se acerca a la de la cara de la Peltier. En los cuatro ensayos se

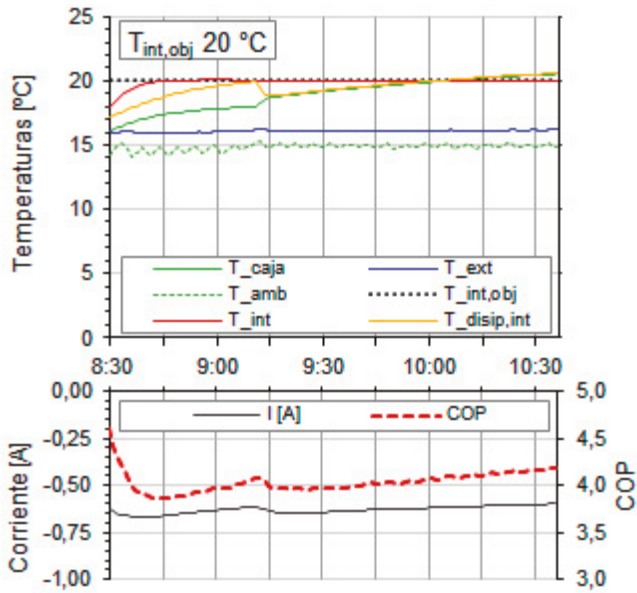


Figura 7. Ensayo temperatura objetivo de la cara interna de la célula a 20°C.

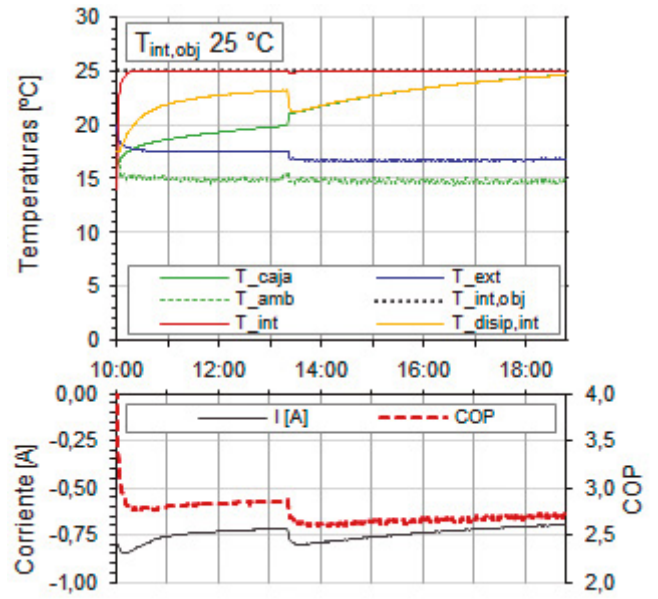


Figura 8. Ensayo temperatura objetivo de la cara interna de la célula a 25°C.

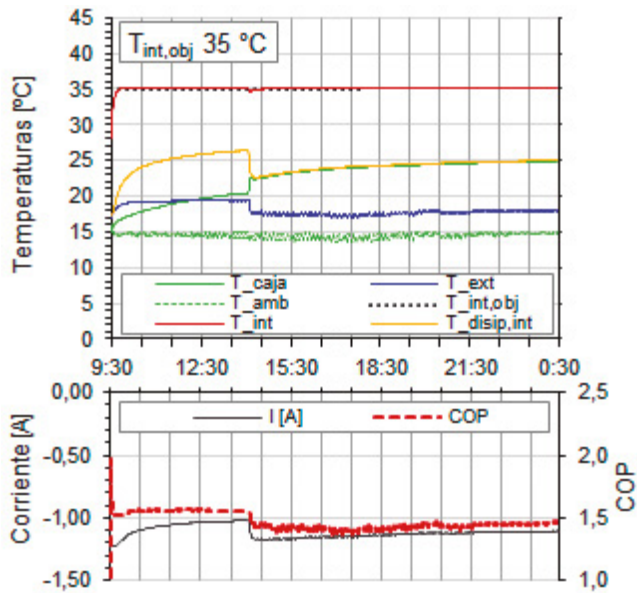


Figura 9. Ensayo temperatura objetivo de la cara interna de la célula a 30°C.

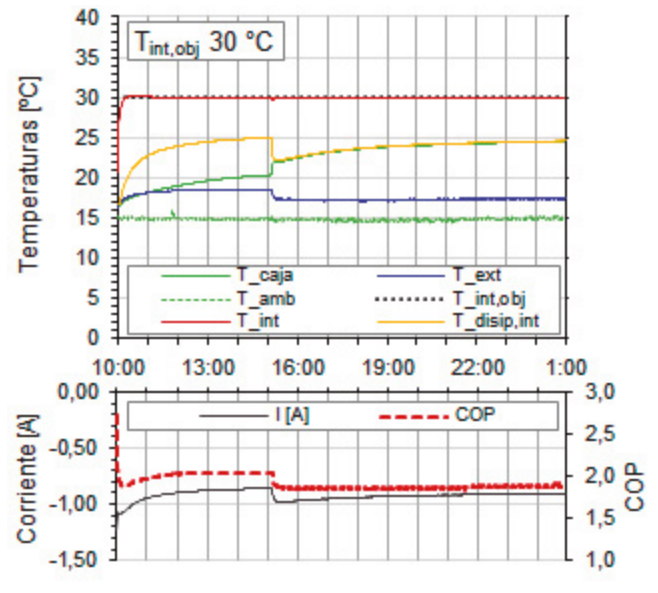


Figura 10. Ensayo temperatura objetivo de la cara interna de la célula a 35°C.

Tabla 2. Datos del estado del sistema recogidos al final de cada ensayo.

$T_{int,obj}$	Voltaje (V)	Corriente(A)	T_{caja}	ΔT	Q (W)	W_e (W)	COP
20	-2,68	-0,60	20,51	3,82	6,71	1,60	4,19
25	-3,17	-0,69	24,65	8,15	6,00	2,20	2,73
30	-4,18	-0,91	24,48	12,62	7,12	3,79	1,88
35	-5,15	-1,11	24,87	17,01	8,33	5,71	1,46

aprecia un salto en las tendencias, sobre todo en las temperaturas del disipador interior ($T_{disip,int}$) y de la caja. Este cambio se da al encender los ventiladores, que se activan cuando la $T_{disip,int}$ se acerca a la T_{int} de la célula Peltier. Así, el movimiento de aire forzado que se genera facilita el intercambio de calor en el interior y, por tanto, la T_{caja} aumenta. A su vez, la corriente aumenta puntualmente dado que al aumentar la disipación de calor la T_{int} disminuye ligeramente, por consi-

guiente, el COP también disminuye. Una vez encendidos los ventiladores, la T_{caja} y la $T_{disip,int}$ son prácticamente iguales.

En el caso del primer ensayo, $T_{int,obj}$ 20 °C (Figura 7), el disipador interior alcanza la T_{int} de la cara de la célula en menos de una hora, sin embargo, en el segundo ensayo (Figura 8), transcurridas las tres horas todavía no ha llegado, y lo mismo ocurre en el tercer y cuarto ensayo (Figura 9 y Figura 10). En

los dos últimos ensayos, tras 12 horas de ensayo, la tendencia de la T_{int} se estabiliza y se mantiene horizontal, razón por la que se considera el final del ensayo. En ambos casos, no supera los 25 °C.

Dado que originalmente la termoelectricidad se ha utilizado para refrigerar, la corriente se considera positiva en modo refrigeración. En este caso, al trabajar en modo calefacción, la intensidad aportada se muestra en negativo. En cuanto al consumo eléctrico, como se observa en todos los casos, la intensidad disminuye en cuanto la T_{int} alcanza la $T_{int,obj}$. A su vez, a mayor salto térmico entre el ambiente exterior y la temperatura objetivo interior, mayor es la intensidad necesaria para alcanzar dicha temperatura.

En cuanto a la eficiencia de la célula, el COP en todos los ensayos muestra el punto más alto antes de encender los ventiladores sucediendo que en ese momento todavía no se ha dado el intercambio de calor en el interior de la cámara de ensayo. En la Tabla 2 se recogen los datos registrados al final de cada ensayo. La diferencia de temperaturas entre las caras de la célula aumenta conforme la temperatura objetivo exigida aumenta, y por consiguiente el consumo eléctrico (W_e) es mayor. De esta forma, y dado que el calor disipado en el interior no aumenta en el mismo orden, el COP disminuye.

En comparación con los resultados obtenidos en *Adiabatic BOX* (14), en los casos de 20 y 25, el COP es mayor en estos segundos ensayos (4.16 y 2.73 frente a 2.7 y 1.9). Esto puede ser debido a la mejora del funcionamiento del sistema de control, punto este que los investigadores tendrán que confirmar en los siguientes prototipos. Sin embargo, el tiempo en alcanzar la temperatura objetivo es mayor en este caso. Una de las razones por la que dicho tiempo es mayor es el perfil de aluminio integrado en el diseño que se ha creado para la reducción del puente térmico, que genera una mayor resistencia a la hora de transferir el calor tanto al interior como del exterior.

CONCLUSIONES

Este artículo presenta la solución de diseño constructivo integrado de una célula Peltier en un cerramiento para una caja adiabática y su comportamiento térmico. El objetivo del diseño constructivo ha sido disminuir el puente térmico generado en la integración de sistemas termoelectricos en fachada respecto a experiencias anteriores.

En cuanto al comportamiento térmico, la cámara de ensayo interior alcanza la temperatura objetivo en dos de los ensayos, pero se mantiene a 25 °C en los ensayos donde se requiere mayor temperatura. Esto se puede deber a diversos factores tales como el mayor salto térmico con el exterior a mayores temperaturas interiores, y por tanto mayor pérdida de calor de la propia caja o la resistencia ofrecida por el elemento de aluminio. Dicho elemento se presenta como una primera solución para la disminución de puente térmico, sin embargo, se evidencia que aún requiere de desarrollos adicionales de cara a disminuir la inercia térmica que el propio sistema genera.

En lo que se refiere al COP, este varía entre 1.46 y 4.19, por lo que mejora respecto a resultados anteriores (14), principalmente por la regulación de la intensidad una vez alcanzada la temperatura objetivo de la cara interior de la célula. El control del sistema se basa en la cara interior de la célula Peltier. En este caso, y dado el tiempo necesario para alcanzar la temperatura de la caja deseada, en el futuro se probarán otras variables como condición inicial tales como la temperatura interior de la caja o la corriente.

Varias son las mejoras que el equipo de investigadores entiende necesarias en el futuro:

1. Reducir el tiempo de transferencia de calor, aspecto este ligado por otra parte a la configuración de los componentes para reducir el puente térmico.
2. Ejecutar el conjunto con los disipadores integrados, mejorando así el montaje y asegurando la presión adecuada sobre las dos caras de la célula Peltier.
3. Es necesario controlar los consumos de los elementos auxiliares, principalmente de los ventiladores. La implementación de un sistema de control de velocidad de los ventiladores contribuiría a una mejor eficiencia.
4. Por último, para futuras aplicaciones, hay que tener en cuenta que el valor del coeficiente de conductividad térmica de la aleación de aluminio puede ser un dato primordial, ya que, si se cuenta con una aleación con una alta conductividad térmica, cuando el módulo esté apagado también creará lógicamente mayor puente térmico entre ambas caras del cerramiento. Sin embargo, cuando el módulo esté encendido, el sistema será más eficiente, ya que el calor generado por la célula Peltier será transmitido más rápido desde la célula Peltier a través del perfil del aluminio hasta el disipador.

Es importante destacar que este prototipo a escala constituye la base de diseño de un prototipo a escala real que se encuentra en fase de montaje. Como reflexión adicional, cabe mencionar que el Código Técnico de la Edificación no recoge estas soluciones de fachada activa, lo cual puede desalentar el desarrollo de tecnologías innovadoras, especialmente a empresas del sector de la edificación.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto está subvencionado en el marco de la convocatoria "ayudas para la realización de proyectos de I+D del año 2018" del Gobierno de Navarra Departamento de Desarrollo Económico y cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), número 0011-1365-2018-000211. A su vez, los autores quieren mostrar su agradecimiento a las empresas Metaldeco S.L., Jacar Logística S.L., y a Juan Carlos Sánchez y Luis Fernando Urrea de la Universidad de Navarra. A los responsables del Ejército de Tierra para la Campaña Antártica 2018-2019 en la Base Antártica Española 'Gabriel de Castilla'.

REFERENCIAS / REFERENCES

- (1) Huang, H.-S., Weng, Y.-C., Chang, Y.-W., Chen, S.-L., & Ke, M.-T. (2010). Thermoelectric water-cooling device applied to electronic equipment. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(2), 140–146.
- (2) Donaldson, P. (2015). Batteries, fuel cells, and alternative energy sources for military vehicles. *Zeitschriftenaufsatz*.
- (3) Yang, J., & Stabler, F. R. (2009). Automotive Applications of Thermoelectric Materials. *Journal of Electronic Materials*, 38(7), 1245–1251. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-009-0680-z>
- (4) Riffat, S., & Ma, X. (2003). Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(8), 913–935.
- (5) Hamid Elsheikh, M., Shnawah, D. A., Sabri, M. F. M., Said, S. B. M., Haji Hassan, M., Ali Bashir, M. B., & Mohamad, M. (2014a). A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 337–355.
- (6) Cold case – the future of refrigerant gas. (2017). *CIBSE Journal*, 2017.
- (7) IEA SHC Task 41 Solar energy and Architecture. (2014). *Solar Energy Systems in Architecture, Integration Criteria and Guidelines*.
- (8) Gayner, C., & Kar, K. K. (2016). Recent advances in thermoelectric materials. *Progress in Materials Science*, 83, 330–382.
- (9) Zuazua-Ros, A., Martín-Gómez, C., Ibañez-Puy, E., Vidaurre-Arbizu, M., & Gelbstein, Y. (2019a). Investigation of the thermoelectric potential for heating, cooling and ventilation in buildings: Characterization options and applications. *Renewable Energy*, 131, 229–239.
- (10) Riffat, S. ., & Qiu, G. (2004). Comparative investigation of thermoelectric air-conditioners versus vapour compression and absorption air-conditioners. *Applied Thermal Engineering*, 24(14–15), 1979–1993.
- (11) Martín-Gómez, C., Ibañez-Puy, M., Bermejo-Busto, J., Sacristán Fernández, J. A., Carlos Ramos, J., & Rivas, A. (2016). Thermoelectric cooling heating unit prototype. *Building Services Engineering Research & Technology*, 37(4), 431–449.
- (12) Martín-Gómez, C. (2011). Módulo prefabricado de fachada para climatización de espacios habitables mediante climatización termoeléctrica. 201101142.
- (13) Ibañez-Puy, M., Bermejo-Busto, J., Martín-Gómez, C., Vidaurre-Arbizu, M., & Sacristán-Fernández, J. A. (2017). Thermoelectric cooling heating unit performance under real conditions. *Applied Energy*, 200, 303–314.
- (14) Ibañez-Puy, E., Martín-Gómez, C., Bermejo-Busto, J., & Zuazua-Ros, A. (2018b). Thermal and energy performance assessment of a thermoelectric heat pump integrated in an adiabatic box. *Applied Energy*, 228, 681–688.
- (15) Aksamija, A., Aksamija, Z., Counihan, C., Brown, D., & Upadhyaya, M. (2019). Experimental Study of Operating Conditions and Integration of Thermoelectric Materials in Facade Systems. *Frontiers in Energy Research*, 7, 6.
- (16) Araiz, M., Catalan, L., Herrero, O., Pérez, G., & Rodríguez, A. (2018). The importance of the assembly in thermoelectric generators. *Bringing Thermoelectricity into Reality*.
- (17) Martín-Gómez, C., Del Valle de Lersundi, K., Zuazua-Ros, A., Sacristán, J.A., Ibañez-Puy, M. & Pereda López, J.J. (2019) Desarrollo constructivo de un prototipo de fachada termoeléctrica ubicado en la Base Antártica Gabriel de Castilla. *VII Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad*, San Fernando, Cádiz.
- (18) Zhang, H. Y., Mui, Y. C. & Tarin, M. (2010). Analysis of thermoelectric cooler performance for high power electronic packages. *Applied Thermal Engineering*, 30, 561–568.