

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UN PARAMENTO TRANSPARENTE ACTIVO TERMOELÉCTRICO (PTA)

Rafael Palacios – Rafael.Palacios @ iit.upcomillas.es
Antonio Arenas Alonso – arenas @ upcomillas.es
Jorge Vázquez Árias – Jorge.Vazquez @ iit.upcomillas.es
Francisco Luis Pagola de las Heras – pagola @ dea.icae.upcomillas.es
Ramón Rodríguez Pecharromán – ramon @ dea.icae.upcomillas.es
Universidad Pontificia Comillas de Madrid. ETS de Ingeniería – ICAI.
Alberto Aguilera 23, E-28015 Madrid, SPAIN

***Resumen.** El Paramento Transparente Activo (PTA) es un sistema de bombeo de calor por efecto Peltier pensado para climatización en edificación. Es instalado en las ventanas de un habitáculo en sustitución de los actuales vidrios, a los que reemplaza con una mínima reducción de transparencia, pudiendo bombear calor en cualquier dirección, de dentro hacia fuera y al revés, en orden a conseguir la temperatura deseada del habitáculo.*

Las principales ventajas sobre las tecnologías actuales de climatización son: simplicidad del control electrónico y ausencia de fluidos, conductos y máquinas. Es esperanzador su uso en aplicaciones domésticas y principalmente allí donde los equipos convencionales plantean problemas (edificios históricos, estéticos, dificultades operativas, tamaño, etc...). El sistema está patentado en España, U.E. y USA y su desarrollo está siendo realizado por un grupo de investigación de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid.

En este artículo se presentan los resultados simulados y experimentales de un pequeño prototipo construido y ensayado en nuestros laboratorios. El artículo también resume las dificultades más importantes encontradas durante el desarrollo del prototipo.

***Abstract.** The Active Thermal Wall based on thermoelectricity (ATW) is a heat pump system that uses Peltier effect. Classic windows (or glass walls) can be replaced by ATW for acclimatization in buildings. With a minimal reduction in glass transparency, ATW can pump heat in any direction (from inside to outside or vice versa) in order to attain the desired room temperature.*

The main advantages over other conditioning technologies are: simple electronic control, and absence of fluids, pipes and pumps. Hence its use is very promising in domestic applications and mainly where installation of conventional equipment is problematic (historic building, esthetic, technical difficulties, size restriction,...).

The system is patented in Spain, E.U., and U.S.A. and it is currently being developed by a research group at the University Pontificia Comillas in Madrid, Spain. In this paper, the simulated and experimental results of a small prototype, built and tested in our laboratories, are presented. The article also summarizes the most relevant difficulties found by the research team during the development of the prototype.

Keywords: Thermoelectricity applications, Peltier effect, heat pump, active window.

1. INTRODUCCION

La necesidad actual de incorporar sistemas de climatización en todas edificaciones, tanto en nueva construcción como en remodelaciones, nos ha llevado a desarrollar un sistema en el cual se insertan elementos termoeléctricos dentro de paramentos, que pueden ser transparentes. El paramento transparente activo (PTA, o bien ATW de *active thermal wall*) PTA es una solución constructiva que manteniendo su condición de paramento, es decir separación entre dos recintos o entre un recinto y el ambiente exterior, permite un elevado nivel de transparencia y diversas condiciones de funcionamiento desde el punto de vista térmico al ser alimentado con energía eléctrica. Así, puede ser aislante total o bombear calor en una cualquiera de sus dos direcciones, desde un recinto al otro o al ambiente exterior y desde el segundo o el ambiente exterior al primero (fig. 1).

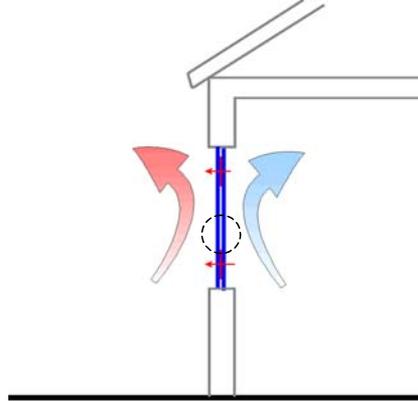


Figura 1. Esquema de aplicación de un PTA

Constructivamente se trata de una bomba de calor eléctrica incorporada entre dos placas de vidrio que permite mantener un elevado nivel de transparencia utilizando una geometría equivalente en disposición y dimensiones a las de los vidrios con cámara tipo “climalit”. La tecnología empleada para el bombeo de calor es la llamada tecnología termoeléctrica o de efecto Peltier, la cual no utiliza fluidos, ni conductos ni compresor u otros elementos móviles, sino únicamente la energía eléctrica.

1.1. Fenómenos termoeléctricos

Bajo este nombre se agrupan tres efectos físicamente acoplados que llevan los nombres de sus respectivos descubridores, éstos son efecto Seebeck (1821), efecto Peltier (inverso a aquél, 1834) y efecto Thomson (Lord Kelvin, 1855)

De estos tres fenómenos, físicamente acoplados, únicamente los efectos Peltier y Seebeck han encontrado aplicaciones industriales, y únicamente en los últimos 50 años sus aplicaciones han experimentado un avance relativamente importante gracias al descubrimiento de algunos materiales semiconductores con buenas propiedades termoeléctricas. Ambos efectos tienen lugar en la unión de dos materiales de distintas propiedades termoeléctricas, y es el efecto Peltier el que aplicamos en el sistema desarrollado.

El efecto Peltier se presenta como una auténtica bomba de calor (fig. 2) que transvasa calor desde un foco fuente hasta otro sumidero aunque éste tenga mayor temperatura que el primero. Está siendo usado principalmente en aplicaciones de refrigeración de pequeña potencia.

$$\dot{Q}_P = IT(\alpha_b - \alpha_a) \quad [1]$$

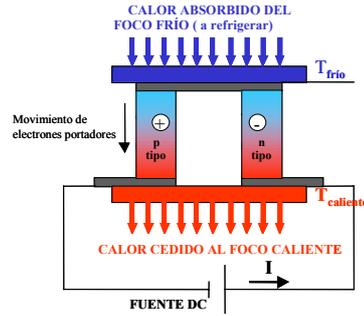


Figura 2. Efecto Peltier en un par termoeléctrico

1.2. Bomba de Calor termoeléctrica

Considerando el par termoeléctrico p-n (fig. 2) y aplicando la Ec. [1] al lado de menor temperatura, T_f , la potencia calorífica absorbida por la corriente eléctrica I al pasar del material **n** al material **p**, será:

$$\dot{Q}_{Pf} = IT_f (\alpha_{pf} - \alpha_{nf}) \quad [2]$$

Considerando el lado de mayor temperatura, T_c , la potencia calorífica cedida por la corriente eléctrica I al pasar del material **p** al material **n**, será:

$$\dot{Q}_{Pc} = IT_c (\alpha_{nc} - \alpha_{pc}) \quad [3]$$

Ahora bien, además del efecto Peltier representado por la Ecs. [2] y [3], en cada uno de los dos elementos de un par termoeléctrico están presentes los efectos de generación de calor al paso de la corriente eléctrica (Joule, RI^2) y de transmisión de calor entre sus extremos a distinta temperatura (Fourier, $\lambda(T_c - T_f)$), por lo que la potencia calorífica que del **exterior** se toma en el lado frío, considerando los coeficientes Seebeck de los materiales a una temperatura intermedia ($\alpha_{pf} \approx \alpha_{pc} \approx \alpha_p$ y $\alpha_{nf} \approx \alpha_{nc} \approx \alpha_n$), será:

$$\dot{Q}_f = IT_f (\alpha_p - \alpha_n) - \frac{1}{2} RI^2 - \lambda(T_c - T_f) \quad [4]$$

De igual forma, la potencia calorífica cedida al **exterior** en el lado caliente será:

$$\dot{Q}_c = IT_c (\alpha_p - \alpha_n) + \frac{1}{2} RI^2 - \lambda(T_c - T_f) \quad [5]$$

La potencia eléctrica consumida en el proceso de bombeo de calor, siendo V la diferencia de potencial entre los extremos del par, será:

$$W = I \cdot V \quad [6]$$

De acuerdo con el primer principio de la termodinámica, no considerando otros intercambios de calor entre el par y el medio que los producidos en sus focos caliente y frío, tendremos que

$$\dot{Q}_c - \dot{Q}_f = W \quad \text{y} \quad V = \Delta T \alpha_{pn} + RI \quad [7]$$

donde $\alpha_{pn} = \alpha_p - \alpha_n$. Así la eficiencia de los procesos será medida como en los sistemas convencionales de bomba de calor y refrigeración.

Como bomba de calor (efecto útil en del lado caliente), **Cop** (Coeficient of perfomance):

$$\text{Cop} = \frac{\dot{Q}_C}{W} \quad [8]$$

Como sistema de refrigeración (efecto útil en el lado frío), eficiencia frigorífica, ε_f :

$$\varepsilon_f = \frac{\dot{Q}_F}{W} \quad \text{y} \quad \text{Cop} = \varepsilon_f + 1 \quad [9]$$

Actualmente se comercializan elementos Peltier agregados en pequeñas placas o pastillas que integran hasta varios cientos de pares como el reflejado en la figura 2. Sus dimensiones pueden no ser superiores a 40 x 40 x 4 mm y alimentados a 12 voltios pueden bombear desde el lado frío (\dot{Q}_f) en torno a los 30 W con una diferencia de temperaturas entre sus caras exteriores de alrededor de 30 °C.

2. MODELO EXPERIMENTAL DE PTA

Se ha diseñado y construido un pequeño prototipo con objeto de evaluar su funcionamiento de manera que los resultados puedan ser extrapolados a sistemas comerciales de mayores dimensiones. Se describe a continuación el prototipo y el sistema de alimentación que se le ha aplicado.

2.1. Descripción del prototipo

La figura 3 muestra un croquis de los modelos experimentales construidos en el Laboratorio de Termoelectricidad de la ETS de Ingeniería – ICAI, de dimensiones 105 mm x 120 mm y 12 mm de espesor. El prototipo presenta cuatro cadenas transversales de 10 mm de ancho atrapadas entre dos vidrios planos de 4 mm de espesor.

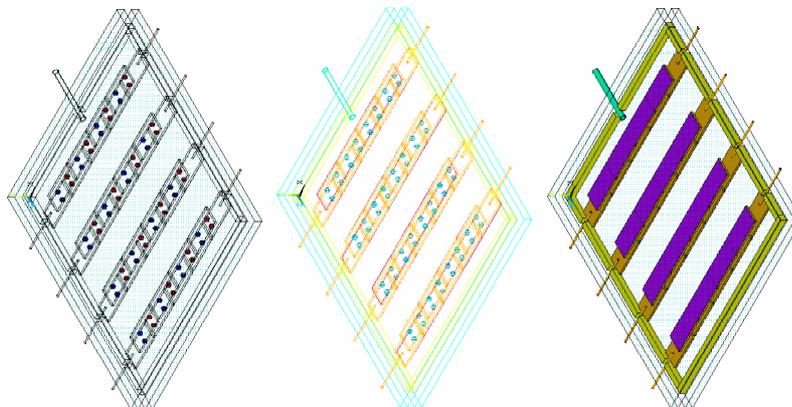


Figura 3. Prototipo experimental de PTA

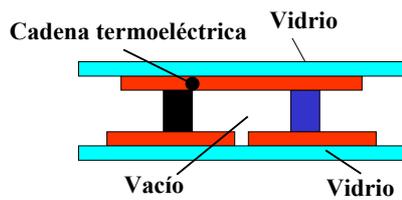


Figura 4. Detalle constructivo de una parte de cadena de PTA. Modelo con vacío

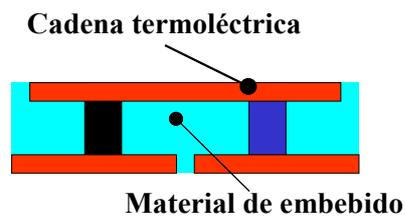


Figura 5. Detalle constructivo de una parte de cadena de PTA. Modelo embebido

Las cadenas al ser opacas hacen opaco el paramento en esas franjas, manteniendo la transparencia de los vidrios en las zonas entre cadenas. El espacio entre vidrios podrá ser enrarecido con un cierto nivel de vacío según se aprecia en el detalle de la figura 4, lo que favorece la eficiencia del sistema.

Otra disposición constructiva, también patentada, pero menos ensayada, es la reflejada en la figura 5, en la cual las cadenas termoeléctricas están embebidas en material transparente.

La figura 6 muestra la disposición de una de las cuatro cadenas que configuran el modelo mostrado en la figura 3. En esta última figura se puede apreciar que la cantidad de material termoeléctrico es muy reducida si se compara con la superficie total del paramento termoeléctrico.

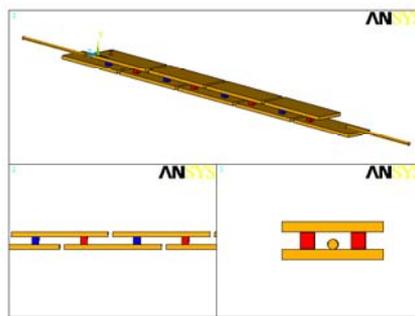


Figura 6. Detalle constructivo de una de las cadenas utilizadas en los prototipos

2.2. Sistema de alimentación y control

El PTA se alimenta con energía eléctrica (cc a tensiones de unos pocos voltios) gobernada por un equipo de control y suministrada por una fuente de alimentación. Este equipo determinará en cada momento la corriente eléctrica que se debe suministrar al paramento, dependiendo de la consigna de temperatura establecida y las temperaturas a ambos lados del mismo. La alta no linealidad de los materiales hace que el rendimiento del sistema sea muy sensible a las condiciones de operación. Por tanto, la misión del sistema de control es hacer funcionar siempre al sistema termoeléctrico en condiciones cercanas a su punto de trabajo óptimo para un determinado salto térmico y unas determinadas condiciones de carga térmica. Esta consideración es fundamental si se tiene en cuenta que los equipos termoeléctricos hasta la fecha trabajan con eficiencias menores a las de los sistemas de compresión de vapor tradicionales

3. RESULTADOS

El prototipo ha sido analizado tanto desde el punto de vista numérico como desde el punto de vista experimental. La validación de los modelos matemáticos a través de los ensayos experimentales, darán garantías de fiabilidad de los resultados que se puedan extrapolar para otros sistemas de mayores dimensiones y que incluso trabajen en condiciones algo diferentes a las de los ensayos.

3.1. Resultados obtenidos por simulación numérica

Se han realizado análisis mediante métodos analíticos puros y mediante simulaciones numéricas de elementos finitos. Los modelos analíticos tienen en cuenta que el sistema físico está formado por material termoeléctrico (pellets), vidrio, y varios elementos intermedios de soldadura, puente eléctrico y unión al vidrio. El modelo analítico se ha resuelto fundamentalmente con la herramienta matemática Matlab. Para el estudio con elementos finitos se ha utilizado la herramienta comercial ANSYS

En las figuras 7 y 8 se muestran los valores de las potencias frigoríficas y eficiencias frigoríficas para distintas intensidades eléctricas calculadas por elementos finitos y se muestra también las diferencias en estos parámetros con los cálculos realizados con el modelo analítico. De igual forma se analizan (figura 9) los resultados obtenidos con ambos métodos de cálculo para la temperatura en la cara fría de los termoelementos al variar la intensidad eléctrica. Nótese que la diferencia de temperaturas entre las caras exteriores de los vidrios ($T_{h|pt} - T_{c|pt} = 40\text{ °C} - 20\text{ °C} = 20\text{ °C}$) permanece constante.

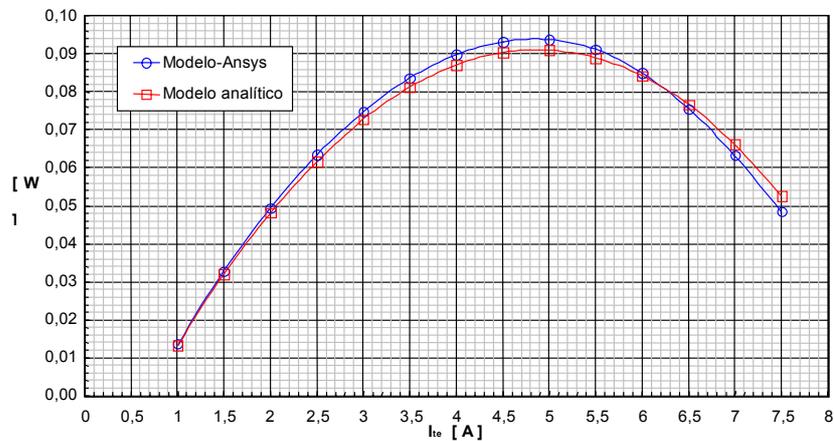


Figura 7. Potencia frigorífica obtenida en una cadena termoeléctrica para los modelos analítico y de elementos finitos (Ansys). $I = 7\text{ A}$, $T_{c|pt} = 20\text{ °C}$, $T_{h|pt} = 40\text{ °C}$.

Analizando los resultados que se obtienen en una cadena termoeléctrica cuando se trabaja con coeficientes convectivos se deduce que es necesario aumentar la capacidad de disipación de las cadenas termoeléctricas. Existirían dos opciones:

➤ Aumentar el coeficiente convectivo, sin embargo se ha comprobado con fórmulas empíricas que trabajar con coeficientes de convección superiores a $70\text{ W/m}^2\text{K}$ con consumos razonables de energía puede ser complejo.

➤ Aumentar la superficie de disipación de calor en ambos lados. Si se distribuyen las cadenas termoeléctricas a lo largo de la superficie del paramento de forma que exista un espacio entre las mismas, las zonas de dichos paramentos que no están en contacto con las cadenas mejoran la transmisión de calor en ambos lados, en mayor o menor medida dependiendo de la conductividad térmica del paramento transparente en la dirección paralela a las caras de las cadenas termoeléctricas, tal y como se muestra en la figura 10.

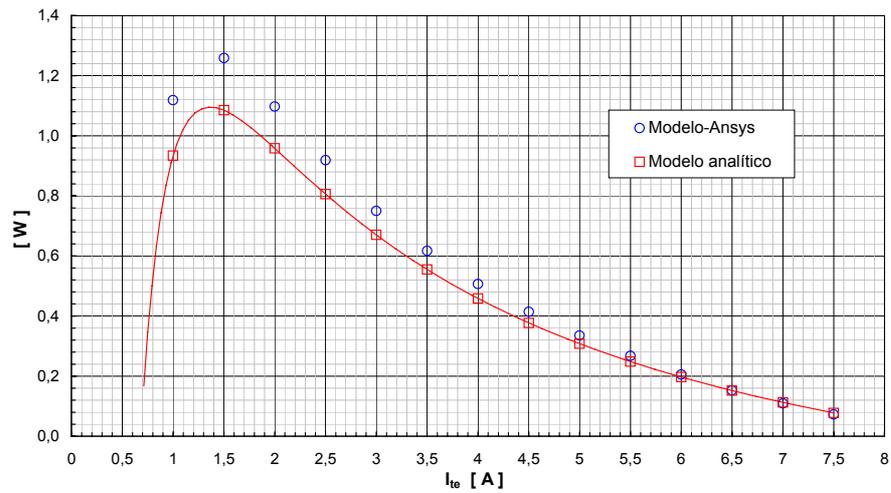


Figura 8. Eficiencia frigorífica obtenida en una cadena termoeléctrica para los modelos analítico y de elementos finitos (Ansys), $I = 7$ A, $T_{c|pt} = 20$ °C, $T_{h|pt} = 40$ °C

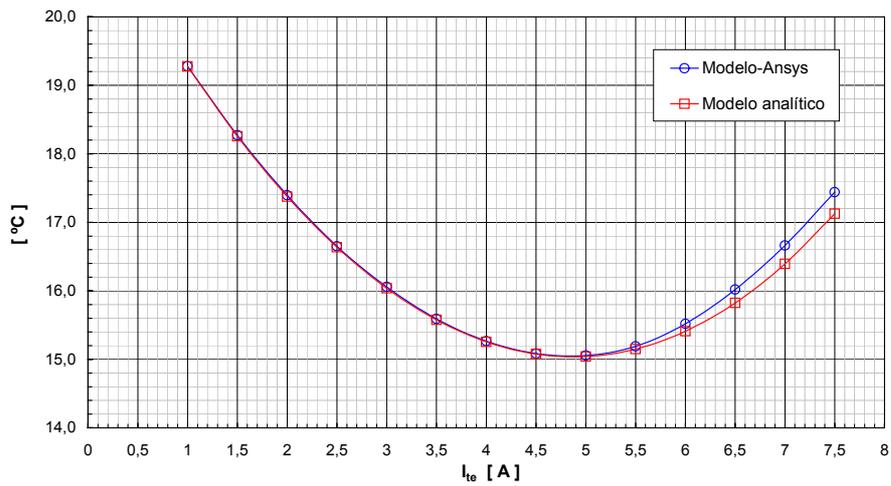


Figura 9. Temperatura en la cara fría de los termoelementos entre los modelos analítico y de elementos finitos (Ansys), $I = 7$ A, $T_{c|pt} = 20$ °C, $T_{h|pt} = 40$ °C

El estudio del comportamiento de una cadena termoeléctrica en el interior del paramento termoeléctrico mediante un modelo analítico como el comentado en el apartado anterior sería erróneo, ya que en este caso la temperatura del paramento según el eje x no se puede considerar uniforme, como se muestra en el croquis de la figura 11.

De cara a tener un orden de magnitud de los resultados que se pueden obtener en una cadena incluyendo el área correspondiente del paramento que no está en contacto con ella, se han realizado simulaciones con las subrutinas programadas en Ansys considerando dicho material.

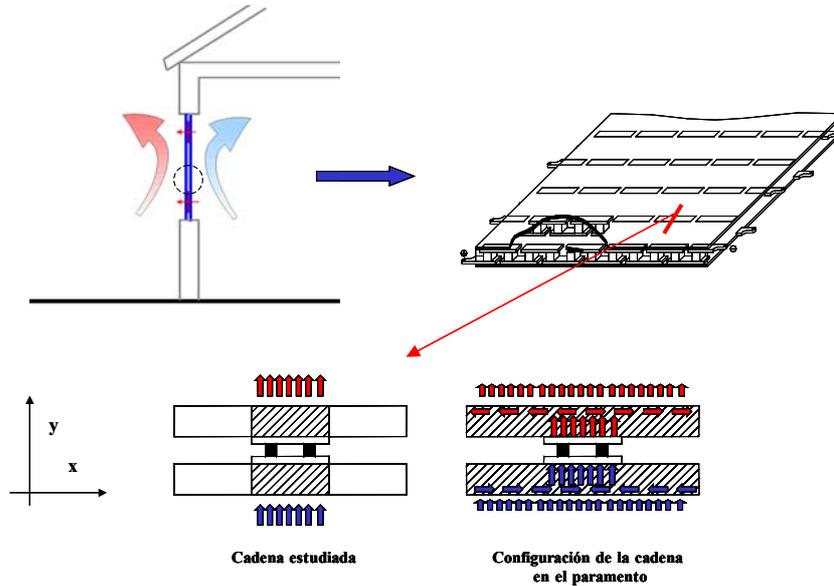


Figura 10. Configuración real de una cadena termoeléctrica dentro del paramento activo transparente

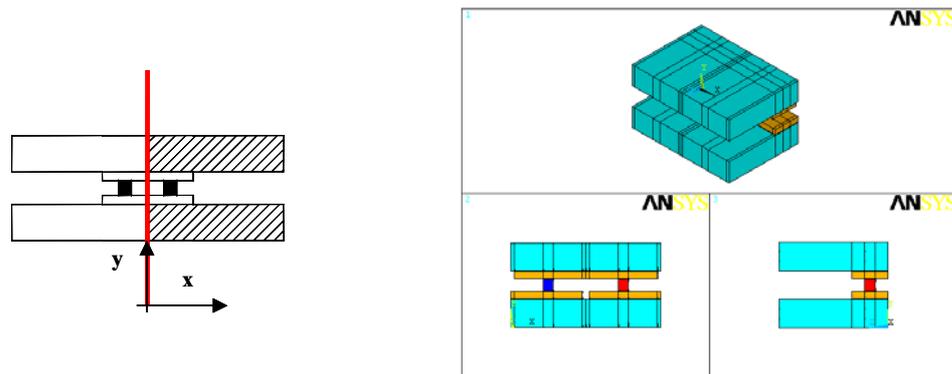


Figura 11. Modelo simulado mediante Ansys

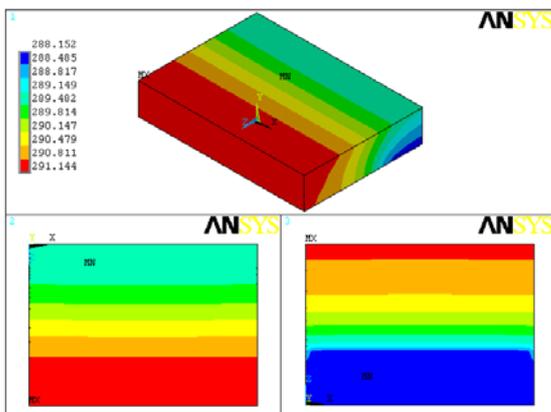


Figura 12. Mapa térmico del vidrio en el lado frío, $h_c = h_h = 50 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{amb}|\text{c}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T = 14 \text{ }^\circ\text{C}$, $I_{\text{cadena}} = 5 \text{ A}$

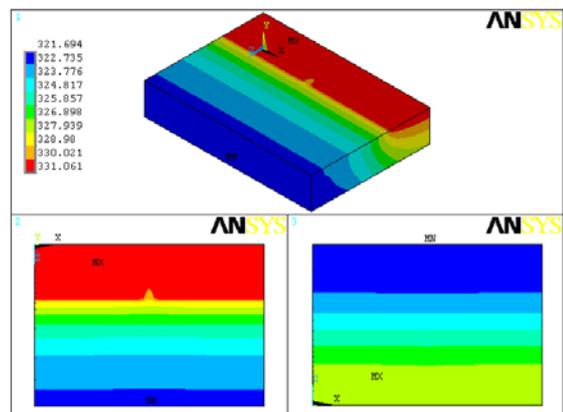


Figura 13. Mapa térmico del vidrio en el lado caliente, $h_c = h_h = 50 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{amb}|\text{h}} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T = 14 \text{ }^\circ\text{C}$, $I_{\text{cadena}} = 5 \text{ A}$

Se han utilizado las mismas dimensiones y propiedades termoeléctricas de los semiconductores que las empleadas en el apartado anterior, y se ha supuesto que dos tercios del paramento activo termoeléctrico son transparentes al igual que en el prototipo construido, es decir, como la anchura de una cadena son 10 mm, a ambos lados de la misma existen otros 10 mm de vidrio u otro material transparente que representan la zona de influencia de la misma.

La resolución del modelo se ha llevado a cabo suponiendo un coeficiente de convección de 50 W/m²K constante en ambos lados del paramento, y al igual que en el caso anterior el modelo es simétrico según el eje y pudiéndose analizar la mitad del mismo. La temperatura ambiente en el lado frío es de 22 °C y en el lado caliente de 36 °C. A modo de ejemplo se presentan algunas gráficas de los resultados obtenidos (fig. 12-13).

3.2. Resultados Experimentales

Tras los estudios teóricos con modelos matemáticos, se ha pasado a la realización de ensayos con diversos modelos experimentales construidos tal como se ha indicado anteriormente (fig. 3). Esta fase de estudios experimentales aún no se ha finalizado y se prevé que dure bastante tiempo, por lo que los resultados mostrados a continuación han de tomarse como bastante provisionales.

En las siguientes figuras (fig. 14-15) se muestran una de las instalaciones de ensayo y resultados obtenidos en la realización de un mapa de temperaturas con una cámara termográfica.

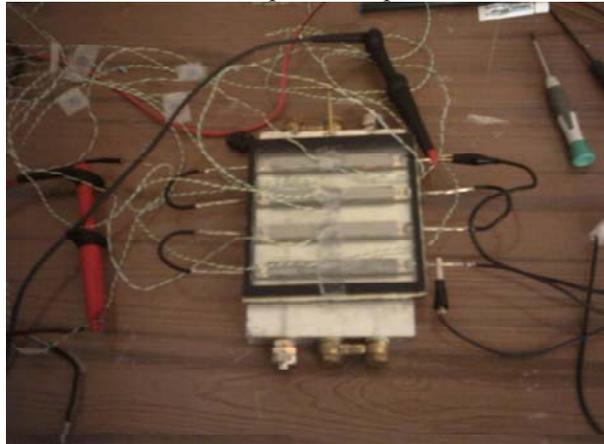


Figura 14. Esquema de instalación de medida sobre uno de los modelos de PTA

La imagen termográfica nos muestra la superficie exterior (el vidrio es opaco a la visión con este tipo de cámaras) del lado frío del PTA. En ella se observa el funcionamiento correcto aunque de las cuatro cadenas (zonas azules). Se observa unas líneas amarillas correspondientes a los cables de alimentación de la energía eléctrica.

Según indica la imagen de forma cualitativa a través de las escalas de colores, las temperaturas en la superficie del PTA estaría entre los 9,4 °C y los 17 °C. La mayor de estas temperaturas (17°C) corresponde a la superficie del vidrio transparente en la que no hay cadenas termoeléctricas y la menor de ellas (9,4°C), a la superficie del vidrio que resulta opaca por estar situada encima de las cadenas termoeléctricas. Las diferencias entre unas y otras cadenas se debe a diversos fenómenos, en los cuales no es ajeno el carácter artesanal que tiene la construcción de las cadenas en nuestro laboratorio. El ensayo se ha realizado con una intensidad de 4,5 Amperios y con la cara caliente de nuestro PTA apoyada sobre una placa de aluminio a temperatura de 25 °C.

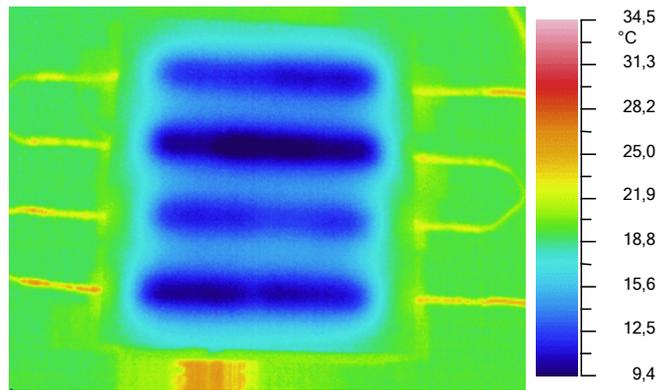


Figura 15. Imagen termográfica de un modelo de PTA. $I = 4,5 \text{ A}$

4. CONCLUSIONES

Los estudios realizados con los modelos matemáticos, los primeros ensayos experimentales realizados, el potencial de las herramientas disponibles y la experiencia en el campo de la termoelectricidad nos llevan a esperar resultados muy prometedores desde el punto de vista de la aplicación del PTA a la climatización de espacios utilizando las numerosas ventanas y cristalerías existentes.

Las grandes ventajas de la tecnología empleada (facilidad de regulación y control, el reducido tamaño de los elementos activos, la ausencia de partes móviles y de fluidos y conductos, entre otras) son elementos estimuladores para continuar con las investigaciones necesarias para conseguir que el Paramento Transparente Activo alcance el nivel de madurez necesario para disponer de prototipos precompetitivos en un plazo no muy largo de tiempo. No obstante en esta fase de aproximación al desarrollo de productos comerciales es necesaria la participación de empresas del sector, que nos aporten a la universidad el apoyo imprescindible para llegar a desarrollos realmente útiles para la sociedad.

5. REFERENCIAS

Arenas, A., 1999, "Determinación de Nuevos Criterios que Permitan la Optimización de Parámetros de Diseño de una Bomba de Calor por Efecto Peltier". Departamento de Ingeniería Mecánica. Madrid, Universidad Pontificia Comillas.

Goldsmid, H. J., 1986, "Design and construction of modules," *Electronic Refrigeration*, Pion (London, UK), pp. 168-197.

Nolas, G. S., et al. 2001, "Review of Established Materials and Devices" *Thermoelectrics. Basic Principles and New Materials Developments*, Springer (Australia), pp. 111-176.

Semeniuk, V., 2000, "Thermoelectric Cooler as a Component of Electro-Optic Device: System Approach" 19th International Conference on Thermoelectrics, Cardiff, UK, pp. 289-295.

Uemura, K. I., 1999, "Construction and Application of Peltier Modules. Part 1. Construction of Peltier Module" 9th Cimtec-World Forum on New Materials. Symposium VII-Innovative Materials in Advanced Energy Technologies, pp. 701-712.

Vázquez, J., et al., 2001, "An Active Thermal Wall based on Thermoelectricity" 6th European Workshop on Thermoelectrics, Freiburg, Germany, pp. 70-77.

Williams, S. G. K., et al., 1999, "Improved Thermoelectric Modules for Electrical Power Generation Using Low Temperature Waste Heat" 5th European Workshop on Thermoelectrics, Pardubice, Czech Republic, pp. 93-98.