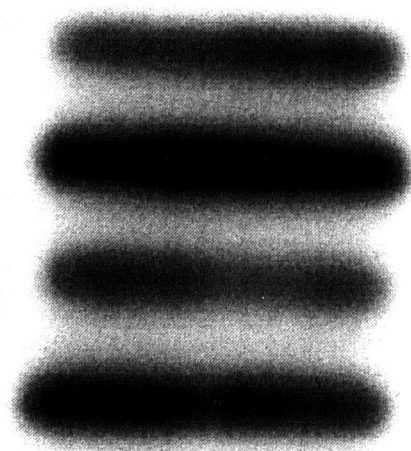


Modelo a imanen termográfica de un PTA



# PARAMENTO TRANSPARENTE ACTIVO (PTA) EN APLICACIONES DE CLIMATIZACIÓN

Antonio Arenas Alonso / Francisco Luis Pagola de las Heras / Rafael Palacios Hielscher / Ramón Rodríguez Pecharromán / Jorge Vázquez Arias

*El presente trabajo presenta los estudios teóricos y experimentales realizados hasta el presente sobre un sistema de bombeo de calor denominado Paramento Transparente Activo (PTA) sistema pensado para su uso entre otras en aplicaciones de climatización a través de los espacios acristalados en vivienda y locales, sustituyendo total o parcialmente las actuales cristalerías por los sistemas PTA, los cuales además de mantener una suficiente visibilidad y transparencia a su través, realizarán la función de bombeo de calor en cualquier dirección (desde dentro hacia afuera o al revés).*

El paramento transparente activo (PTA) consiste fundamentalmente en dos vidrios con cámara intermedia, en la cual se incorporan elementos Peltier. Éstos ocupan una pequeña parte de su volumen, y se encargan de bombear calor de uno al otro vidrio, realizando así el calentamiento de uno y el enfriamiento del otro, pudiendo cambiar el sentido del flujo de calor al conmutar la polaridad de la corriente eléctrica que se ha de aplicar. Su principal uso, como tal paramento transparente, es reemplazar a los actuales vidrios utilizados en todo o parte de las actuales ventanas y grandes superficies acristaladas, sirviendo como sistema de climatización (calefacción y refrigeración) en sustitución de los actuales con conductos y fluidos. Esta aplicación del efecto Peltier está patentada por la Universidad Pontificia Comillas de Madrid.

El presente trabajo describe los fundamentos y la estructura básica de un PTA y muestra los resultados de los trabajos teóricos así como algunos resultados experimentales cualitativos realizados en los laboratorios de la ETS de Ingeniería-ICAI de la U.P. Comillas con diversos prototipos construidos y ensayados.

## DESCRIPCIÓN DE UN PTA

Con este nombre y siglas nominamos 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 soluciones desde el punto de vista térmico al ser alimentado con energía eléctrica. Así, puede ser aislante total o bombear calor en cual-

quiera 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).

Se trata pues, de una bomba de calor eléctrica incorporada en el paramento que permite mantener un elevado nivel de transparencia utilizando una geometría equivalente en disposición y dimensiones a las de los vidrios con cámara de gas 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.

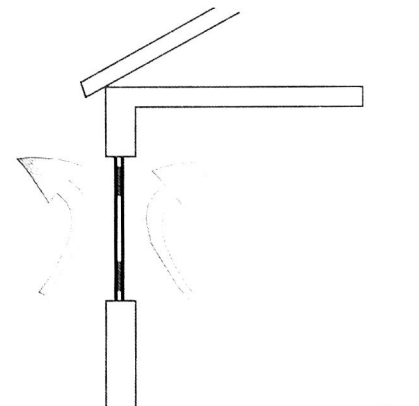


Fig. 1. Esquema de aplicación de un PTA

Esta aplicación del efecto Peltier está patentada por la Universidad Pontificia Comillas de Madrid en la mayor parte de los países de la Unión Europea y en Estados Unidos y se encuentra en fase de investigación sobre prototipos de laboratorio, en los que se ha verificado su funcionamiento e iniciado estudios de optimización.

## 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<sup>1</sup>. Ambos efectos tienen lugar en la unión de dos materiales de distintas propiedades termoeléctricas:

El efecto Seebeck como generador termoeléctrico (Fig. 2), generando electricidad a partir del flujo de calor entre dos cuerpos a distintas temperaturas, utilizado actualmente y desde hace mucho tiempo para medir temperaturas en los aparatos conocidos con el nombre técnico de termopares, pero con mucho menor desarrollo en las aplicaciones de generación de electricidad. [1]

$$\alpha_{ab} = \frac{dE_{ab}}{dT} = \alpha_b - \alpha_a$$

El efecto Peltier como bomba de calor (Fig. 3) 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. [2]

$$\dot{Q}_P = IT(\alpha_b - \alpha_a)$$

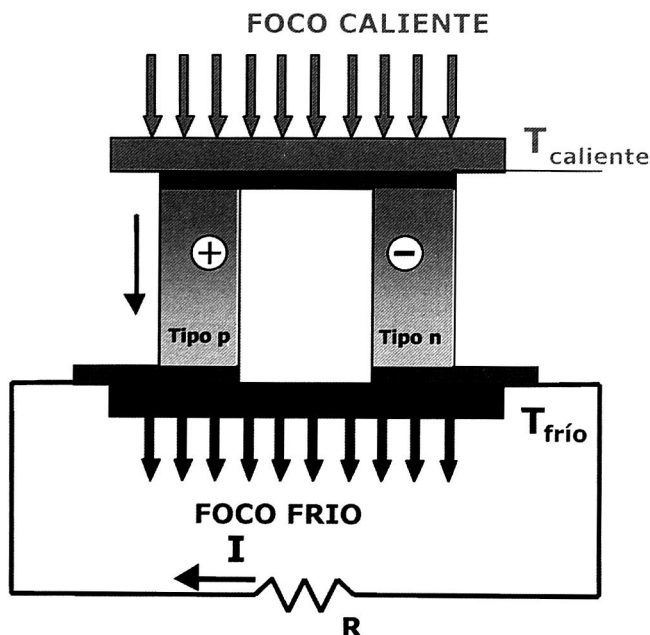


Fig. 2. Efecto Seebeck en un par termoeléctrico

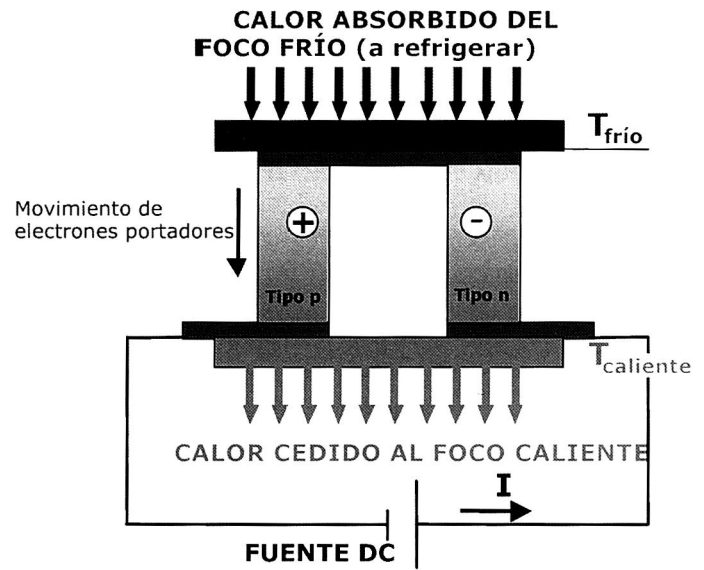


Fig. 3. Efecto Peltier en un par termoeléctrico

## BOMBA DE CALOR TERMOELÉCTRICA

Considerando el par termoeléctrico p – n (Fig. 3) y aplicando la Ec. [2] al lado  $T_{frío}$  la potencia calorífica absorbida por la corriente eléctrica I al pasar del material n al material p, será: [3]

$$\dot{Q}_{Pf} = IT_{frío}(\alpha_{pf} - \alpha_{nf})$$

Considerando el lado  $T_{caliente}$ , la potencia calorífica cedida por la corriente eléctrica I al pasar del material p al material n, será: [4]

$$\dot{Q}_{Pc} = IT_{caliente}(\alpha_{nc} - \alpha_{pc})$$

Ahora bien, además del efecto Peltier representado por la Ecs. [3] y [4], 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,  $\lambda(T_{cal} - T_{frío})$ ), 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: [5]

$$\dot{Q}_F = IT_f(\alpha_p - \alpha_n) - \frac{1}{2}RI^2 - \lambda(T_c - T_f)$$

De igual forma, la potencia calorífica cedida al exterior en el lado caliente será: [6]

$$\dot{Q}_C = IT_c(\alpha_n - \alpha_p) + \frac{1}{2}RI^2 - \lambda(T_c - T_f)$$

La potencia eléctrica consumida en el proceso de bombeo de calor, siendo V la diferencia de potencial entre los extremos del par, será: [7]

$$W = I \cdot V$$

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: [8] y [9]

$$\dot{Q}_C - \dot{Q}_F = W$$

$$y$$

$$V = \Delta T \alpha_{pn} + RI$$

Así la eficiencia de los procesos será medida como en los sistemas convencionales de bomba de calor y refrigeración.

Como bomba de calor (lado caliente), Cop (Coefficient of performance): [10]

$$C_{op} = \frac{Q_C}{W}$$

Como sistema de refrigeración (lado frío), eficiencia frigorífica: [11]

$$\varepsilon_f = \frac{Q_F}{W}$$

Resultando, también que: [12]

$$C_{op} = \varepsilon_f + 1$$

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 ( $Q_F$ ) en torno a los 30 W con una diferencia de temperaturas entre sus caras exteriores de alrededor de 30°C.

## MODELO EXPERIMENTAL DE PTA

La figura 4 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.

Las cadenas al ser opacas hacen opaco el paramento en esas franjas, manteniendo la transparencia de los vidrios en las zonas entre cadenas.

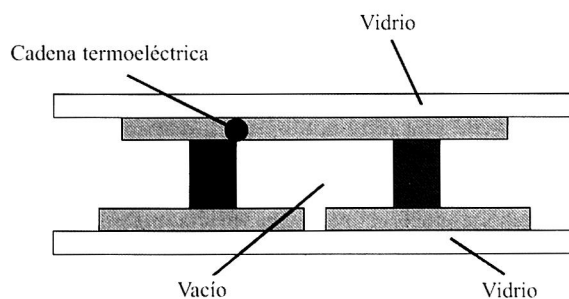


Fig. 5. Detalle constructivo de una parte de cadena de PTA. Modelo con vacío

El espacio entre vidrios podrá ser enrarecido con un cierto nivel de vacío según se aprecia en el detalle de la figura 5, lo que favorece la eficiencia del sistema.

Otra disposición constructiva, también patentada, pero menos ensayada, es la reflejada en la figura 6, en la cual las cadenas termoeléctricas están embebidas en material transparente.

La figura 7 muestra la disposición de una de las cuatro cadenas que configuran el modelo mostrado en la figura 4. Tanto en esta última como en la figura 3 se puede apreciar que la cantidad de material termoeléctrico es muy reducida si se compara con la superficie total del paramento termoeléctrico.

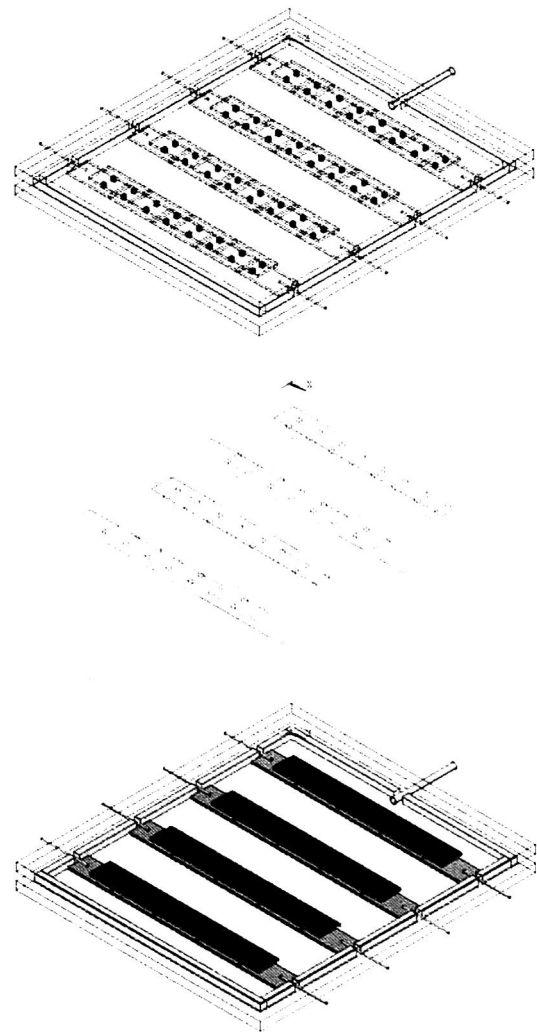


Fig. 4. Prototipo experimental de PTA

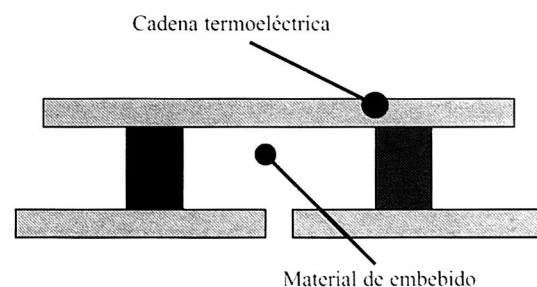


Fig. 6. Detalle constructivo de una parte de cadena de PTA. Modelo embebido

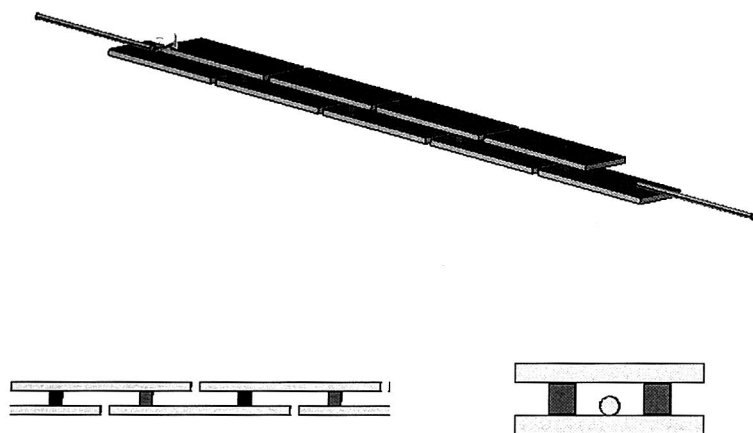


Fig. 7. Detalle constructivo de una de las cadenas utilizadas en los prototipos

## ALIMENTACIÓN Y CONTROL DEL PTA

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 paramount, 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 termoelectrico 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 termoelectricos hasta la fecha trabajan con eficiencias menores a las de los sistemas de compresión tradicionales.

## ESTUDIOS TEÓRICOS DE MODELOS PTA

### Estudio analítico de una cadena termoelectrica

Tomando como base el modelo desarrollado por Arenas<sup>2</sup> (Fig. 6) se ha implementado un modelo en Matlab que permite estudiar las cadenas termoelectricas a emplear en el paramount transparente.

Es éste un modelo iterativo en el que se realiza una primera simulación con propiedades constantes del material termoelectrico que permite obtener una primera aproximación de las temperaturas en las caras fría y caliente de los TE. Debido a que el paramount transparente suele tener una conductividad térmica bastante baja, el salto térmico entre las caras exteriores del paramount puede ser mucho más bajo que el salto térmico entre caras de los termoelementos (el modelo incluye el vidrio encima y debajo de la cadena termoelectrica, ver figura 8). El modelo tiene en cuenta la influencia de la resistencia eléctrica de contacto en las soldaduras de los termoelementos a los puentes eléctricos, y la resistencia térmica introducida por las soldaduras y también en la unión entre los puentes eléctricos y el paramount transparente. También permite considerar la transmisión de calor por efecto Fourier entre el lado caliente y el frío de la cadena a través del termoelemento, tanto en el caso de que exista un determinado material aislante térmico en el interior de la cadena como si existe aire en su interior. Este

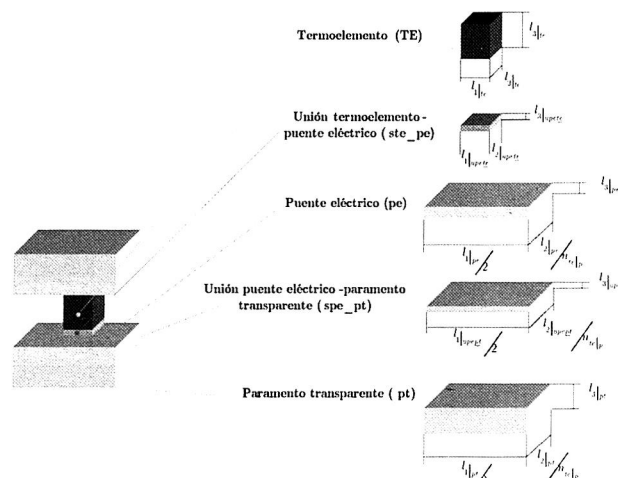


Fig. 8. Modelo físico utilizado en la simulación con Matlab

aspecto es fundamental ya que la superficie libre en el interior de las cadenas termoelectricas es muy grande con respecto a la ocupada por los materiales termoelectricos y en caso de existir aire puede ser relevante las pérdidas por convección generadas por él. Por tanto el modelo permite analizar la influencia del aire en el interior de las cadenas, y el efecto de su sellado y de diversos niveles de vacío.

Es posible fijar dos tipos de condiciones de contorno en el modelo: temperaturas en ambas caras del modelo; o un coeficiente convectivo en cada una de ellas y temperaturas para ambos ambientes (lado frío y caliente). El primer caso permite estudiar con exactitud el comportamiento de las cadenas para diferentes saltos térmicos, y es una situación más reproducible de cara a realizar ensayos experimentales. Con el segundo caso se puede llevar a cabo un estudio cualitativo de la influencia de los coeficientes convectivos en el comportamiento de la cadena.

A modo de ejemplo y teniendo en cuenta que el nivel de confort en la climatización de una vivienda se sitúa entre 23 y 24°C con un 45-50% de humedad relativa, se muestran en las figuras 9 y 10 los resultados obtenidos para una cadena termoelectrica del paramount fijando la temperatura en la cara fría en 15°C, prácticamente 10°C por debajo del nivel de confort ya que al fijarse la temperatura en la cara fría del modelo no se está considerando la resistencia convectiva entre el ambiente y el paramount. Se ha simulado el comportamiento de la misma para diferentes intensidades y saltos térmicos siempre bajo el supuesto que el hueco interior entre los puentes eléctricos del lado frío y caliente es adiabático.

De las gráficas anteriores se ve que la potencia frigorífica máxima para una cadena termoelectrica de 16 termoelementos (16 TE) trabajando con saltos térmicos de entre 20 y 30°C oscilaría entre 1,4 W y 1,1 W aproximadamente, obteniéndose dichos valores con intensidades eléctricas del orden de 9,5 a 10 A (4,75-5,0 A por TE).

La potencia frigorífica máxima  $\Delta T = 0$  que se podría obtener con una cadena de este tipo sería ligeramente superior a 1,9 W. Cualitativamente también se aprecia el desplazamiento del punto de máxima potencia frigorífica con la intensidad a medida que aumenta el salto térmico debido a la variación de las propiedades termoelectricas de los termoelementos. Las intensidades para las que dicha potencia es máxima marcan el límite superior de la intensidad para ese salto térmico, valores superiores de dicha variable implicarían un punto de trabajo ineficiente de la misma.

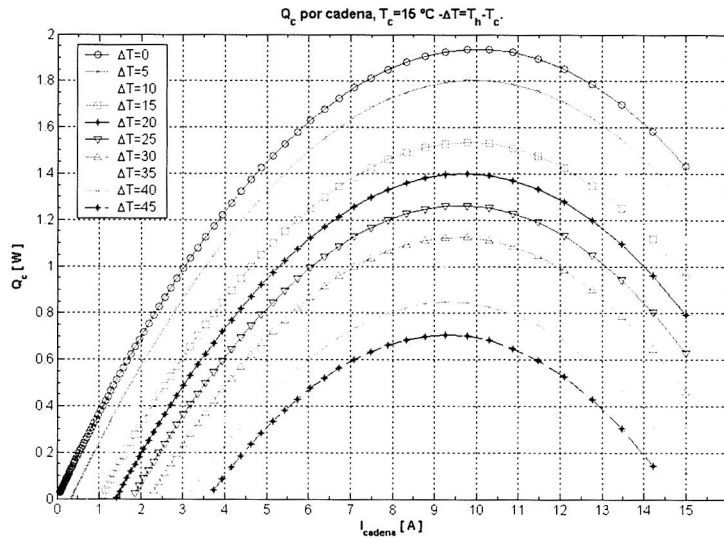


Fig. 9. Potencia frigorífica de una cadena constituida por 16 termoelementos (8 pares).  $T_c = 15^\circ\text{C}$ .  $\Delta T = T_h - T_c$

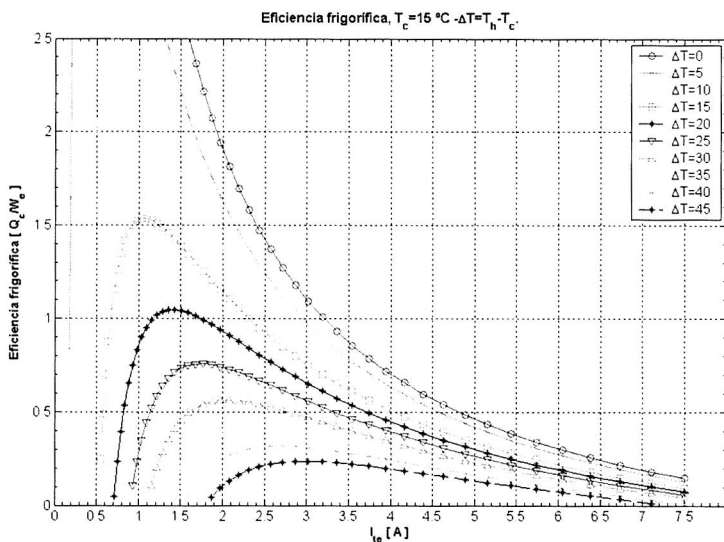


Fig. 10. Eficiencia frigorífica de una cadena constituida por 16 termoelementos (8 pares)  
 $T_{c|pt} = 15^\circ\text{C}$ .  $\Delta T = T_{h|pt} - T_{c|pt}$

Ahora bien, para los puntos de máxima potencia frigorífica, la eficiencia frigorífica de la cadena (Fig.10) es bastante baja si se compara con sus valores máximos para ese mismo salto térmico, aunque se debe subrayar que la eficiencia máxima se obtiene para valores de potencia frigorífica demasiado bajos. También se observa que a medida que aumenta el salto térmico entre caras, la diferencia entre la eficiencia máxima y la obtenida trabajando bajo la consideración de potencia frigorífica máxima es menor. Para saltos térmicos entre caras superiores a  $20^\circ\text{C}$ , la eficiencia no es superior a la unidad prácticamente en ningún punto de trabajo.

Con este mismo modelo se han analizado otros aspectos térmicos del paramento transparente como son las influencia del vacío en el interior del paramento, el valor de la conductividad térmica del paramento transparente, la esbeltez de los termoelementos, o el estudio de la cadena aplicando coeficientes convectivos entre las caras del paramento y los ambientes. Al tratarse de un artículo divulgativo, se ha preferido no incluir los resultados de estos estudios.

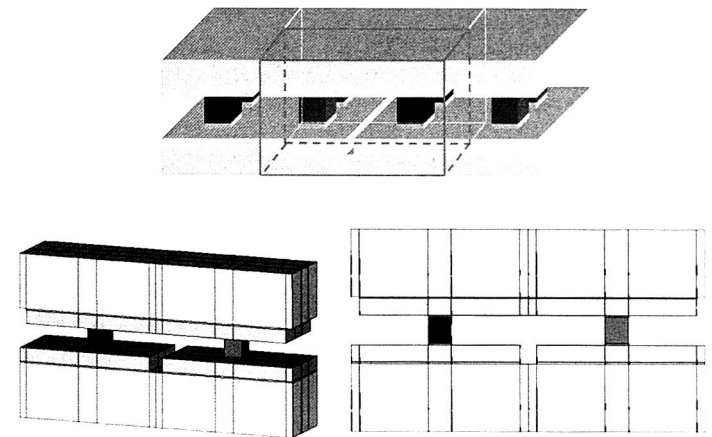


Fig. 11. Representación geométrica del modelo analizando en Ansys, por simetría solamente se estudia el comportamiento de la mitad de la cadena

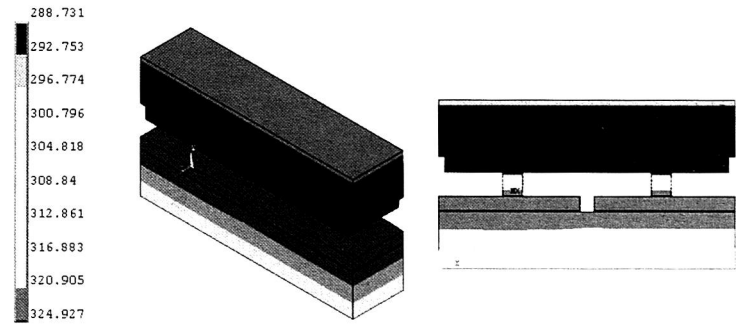


Fig. 12. Distribución de temperaturas en la cadena termoelectrica,  $I = 7\text{ A}$ ,  $T_{c|pt} = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_{h|pt} = 40^\circ\text{C}$

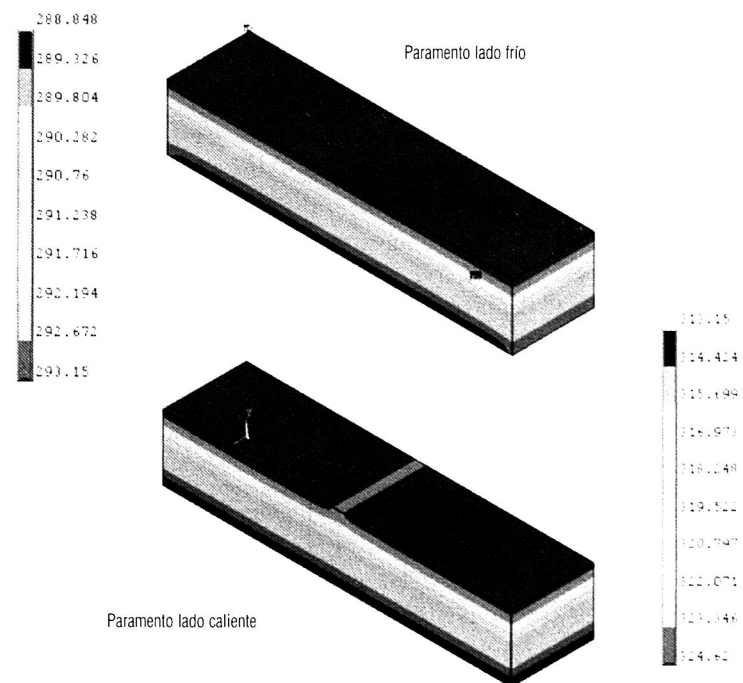


Fig. 13. Distribución de temperaturas en el paramento transparente desde el lado frío hasta el lado caliente,  $I = 7\text{ A}$ ,  $T_{c|pt} = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_{h|pt} = 40^\circ\text{C}$

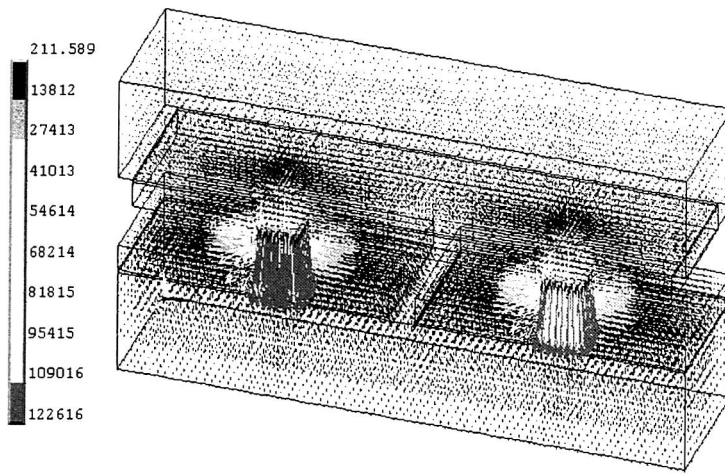


Fig. 14. Distribución del flujo térmico [W/m<sup>2</sup>] en la cadena termoelectrica  
I = 7 A, T<sub>c|pt</sub> = 20°C, T<sub>h|pt</sub> = 40°C

#### Estudio de una cadena termoelectrica mediante elementos finitos

Utilizando un modelo en 3D basado en el planteado por Vázquez implementado a partir del modelo desarrollado por Arenas para un caso 2D, se ha analizado el comportamiento de una cadena termoelectrica bajo las mismas condiciones de trabajo que en el modelo analítico explicado en el apartado anterior. Con respecto al modelo analítico de las cadenas, este modelo presenta varias ventajas. Por un lado se elimina la simplificación de flujos térmico y eléctrico unidimensionales en cada uno de los componentes de las cadenas, que aunque es bastante correcta introduce un error, y por otro se considera que tanto la conductividad térmica como la resistividad eléctrica de los termoelementos son función de la temperatura, no como en el modelo analítico en el que era necesario promediar sus valores.

A modo de ejemplo se muestran en las figuras 11-14 el modelo geométrico y los resultados obtenidos para una intensidad eléctrica de 7 A por TE y temperaturas en el lado frío y caliente del paramento transparente de 20°C y 40°C respectivamente. El modelo simula la mitad de la cadena al existir un plano de simetría.

Comparación entre los resultados de los estudios con el modelo analítico y con elementos finitos

En las figuras 15 y 16 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 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<sub>h|pt</sub> - T<sub>c|pt</sub> = 40°C - 20°C = 20°C) permanece constante.

#### Estudio del comportamiento de una cadena termoelectrica en el interior del paramento transparente

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

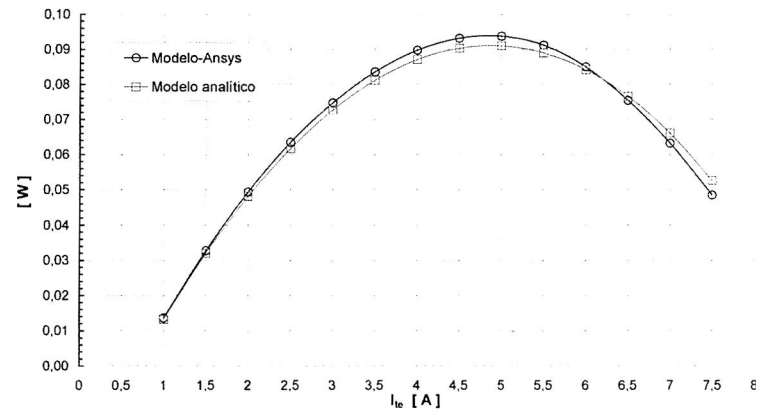


Fig. 15. Comparativa de la potencia frigorifica obtenida en una cadena termoelectrica entre los modelos analítico y de elementos finitos (Ansys) I = 7 A, T<sub>c|pt</sub> = 20°C, T<sub>h|pt</sub> = 40°C

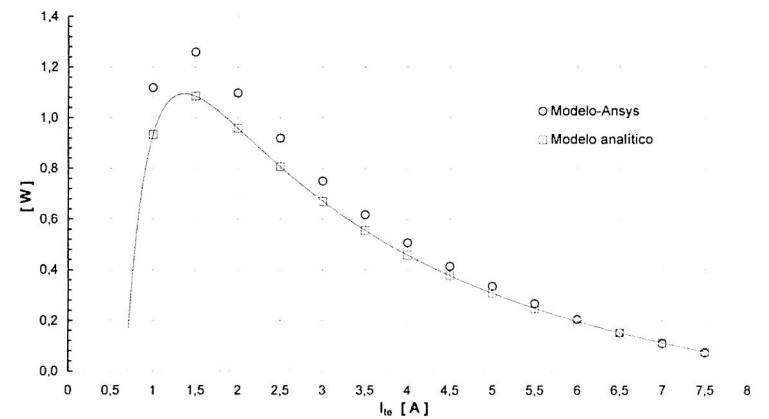


Fig. 16. Comparativa de la eficiencia frigorifica obtenida en una cadena termoelectrica entre los modelos analítico y de elementos finitos (Ansys), I = 7 A, T<sub>c|pt</sub> = 20°C, T<sub>h|pt</sub> = 40°C

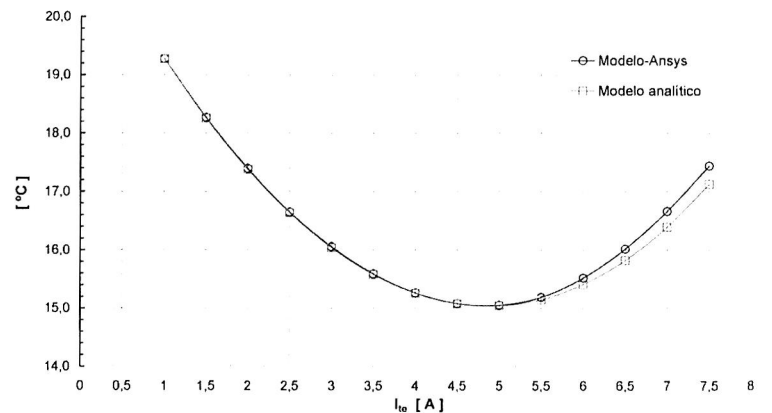


Fig. 17. Comparativa de la temperatura en la cara fría de los termoelementos entre los modelos analítico y de elementos finitos (Ansys), I = 7 A, T<sub>c|pt</sub> = 20°C, T<sub>h|pt</sub> = 40°C

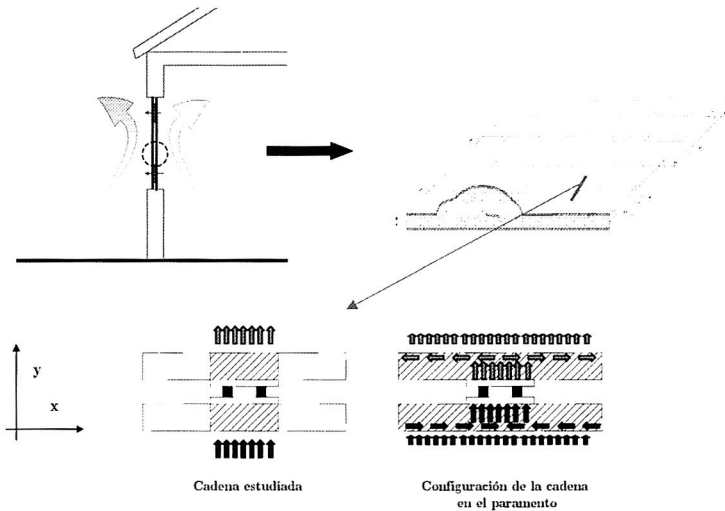


Fig. 18. Configuración real de una cadena termoeléctrica dentro del paramento activo transparente

- 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 18.

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 19.

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. 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  $50 \text{ W/m}^2\text{K}$  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  $22^\circ\text{C}$  y en el lado caliente de  $36^\circ\text{C}$ . A modo de ejemplo se presentan algunas gráficas de los resultados obtenidos (Figs. 20 y 21).

#### Potencial teórico de la aplicación

De cara a tener una estimación razonable de la capacidad de refrigeración del paramento transparente se han realizado simulaciones de su comportamiento para diferentes intensidades supo-

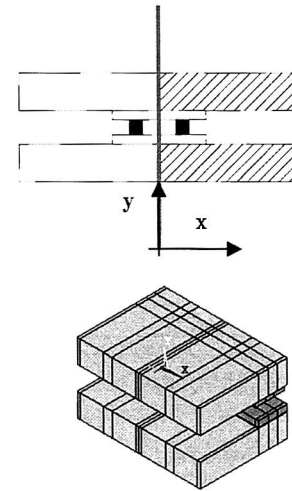
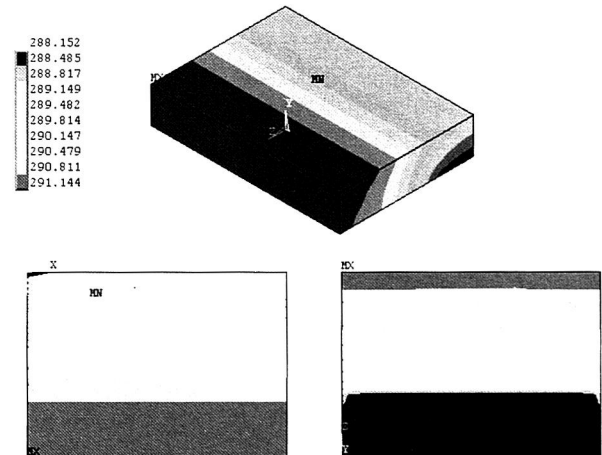
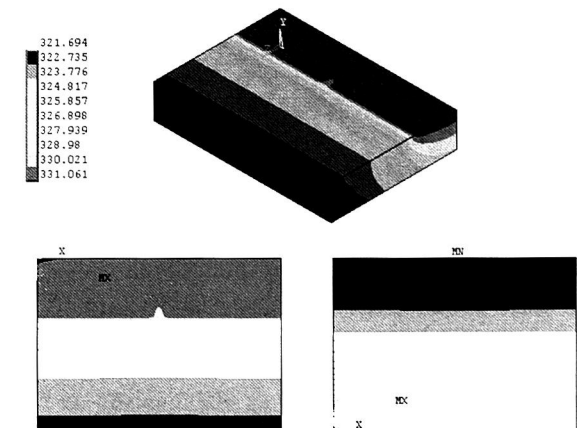


Fig. 19. Modelo simulado mediante Ansys


Fig. 20. Mapa térmico del vidrio en el lado frío,  $h_c = h_h = 50 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{amb|c} = 22^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 14^\circ\text{C}$ ,  $I_{cadena} = 5 \text{ A}$ 

Fig. 21. Mapa térmico del vidrio en el lado caliente,  $h_c = h_h = 50 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{amb|c} = 36^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 14^\circ\text{C}$ ,  $I_{cadena} = 5 \text{ A}$

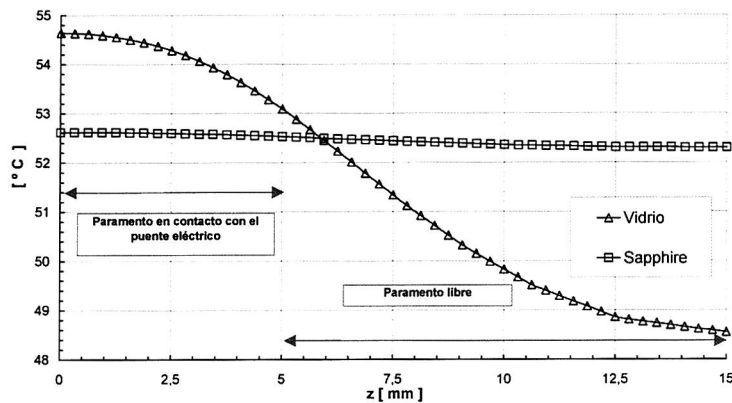


Fig. 22. Distribución de temperaturas a lo largo del eje  $z$ , cara exterior del paramento lado caliente ( $y = 11,93$  mm,  $x = 5,150$  mm),  $h_c = h_h = 50$  W/m<sup>2</sup>,  $T_{amb|c} = 22^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 14^\circ\text{C}$ ,  $I_{cadena} = 5$  A

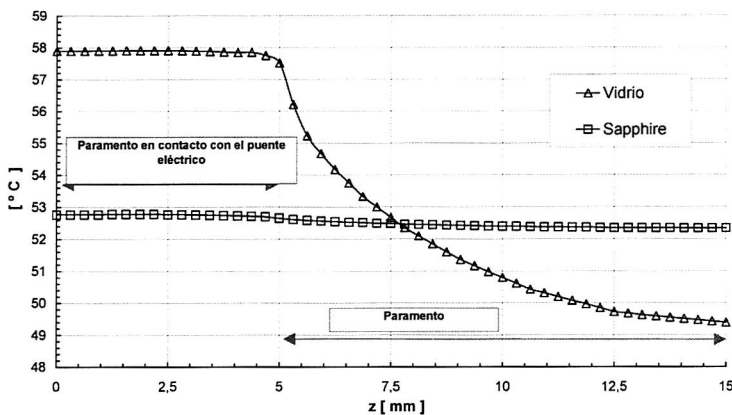


Fig. 23. Distribución de temperaturas a lo largo del eje  $z$ , cara interior del paramento lado caliente ( $y = 11,93$  mm,  $x = 5,150$  mm),  $h_c = h_h = 50$  W/m<sup>2</sup>,  $T_{amb|c} = 22^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 14^\circ\text{C}$ ,  $I_{cadena} = 5$  A

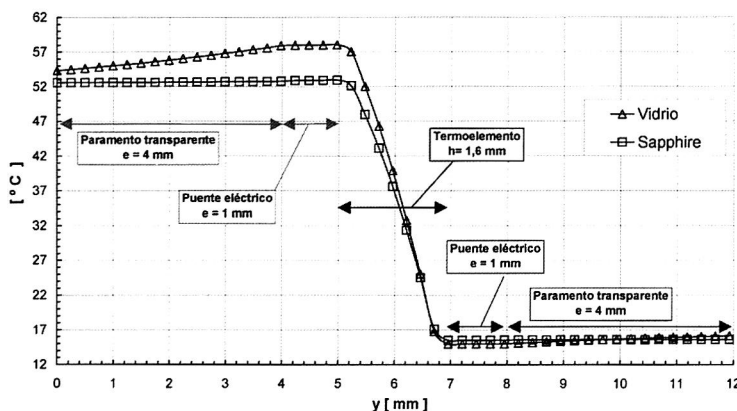


Fig. 24. Distribución de temperaturas a lo largo del eje  $y$ , ( $z = 2,4$  mm,  $x = 5,150$  mm)  
 $h_c = h_h = 50$  W/m<sup>2</sup>,  $T_{amb|c} = 22^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 14^\circ\text{C}$ ,  $I_{cadena} = 5$  A

niendo como paramentos transparente el vidrio (conductividad térmica 0,5 W/mK) y el Sapphire (conductividad térmica 40 W/mK). La idea de trabajar con las propiedades térmicas de este material es poder establecer un límite superior del potencial frigorífico del paramento, ya que su utilización no es viable desde un punto de vista comercial. Sin embargo si podría ser bastante útil la aplicación de películas transparentes en los cristales que consigan en parte una mejor distribución del flujo térmico en toda la superficie

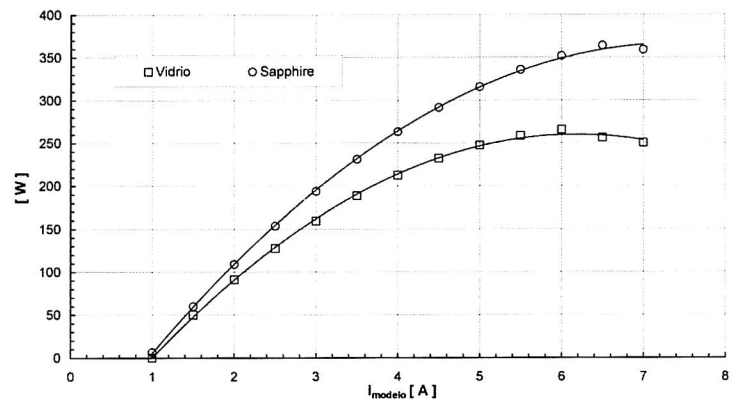


Fig. 25. Potencia frigorífica extrapolada a una superficie de 1 m<sup>2</sup> de PTA,  $h_c = h_h = 50$  W/m<sup>2</sup>,  $T_{amb|c} = 22^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 14^\circ\text{C}$ ,  $I_{cadena} = 5$  A

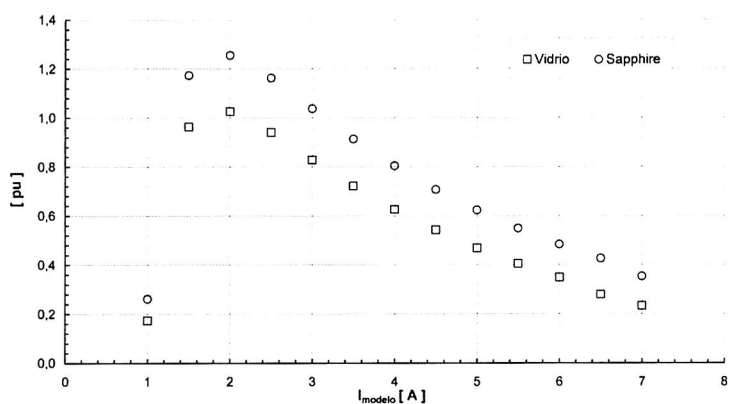


Fig. 26. Eficiencia frigorífica,  $h_c = h_h = 50$  W/m<sup>2</sup>,  $T_{amb|c} = 22^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 14^\circ\text{C}$ ,  $I_{cadena} = 5$  A

del paramento transparente, y por tanto el punto de trabajo real del paramento se encontraría entre las dos líneas representadas en gráficas siguientes (Figs. 22 y 24).

En los gráficos siguientes (Figs. 25 y 26) se puede ver que la potencia frigorífica máxima teórica en una superficie de 1 m<sup>2</sup> de paramento transparente en el que se emplee vidrio sería de 250 W/m<sup>2</sup> y de 350 W/m<sup>2</sup> para el caso de utilizar Sapphire. Sin embargo la eficiencia del paramento en este punto de trabajo es demasiado baja como para considerarlo como un punto útil de funcionamiento. Sería más apropiado trabajar con intensidades eléctricas cercanas al punto de máxima eficiencia, así por ejemplo con una intensidad de 3 A por cadena se obtendrían para el vidrio potencias frigoríficas del orden de 150 W con una eficiencia por encima de 0,8. Estos resultados podrían ser mejorados si se consigue trabajar con capas de material conductor térmico que permitan una mejor distribución del flujo térmico en la superficie del paramento.

Se puede observar en las gráficas en las que se muestra la temperatura en las caras fría y caliente del termoelemento, que para un rango de intensidades próximo a 3 A, el salto térmico en el termoelemento es razonable con temperaturas en la cara caliente cercanas a 45°C y temperaturas en la fría del orden de 17,5°C.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tras los estudios teóricos con modelos matemáticos, se ha pasado a la realización de ensayos con diversos modelos experimenta-

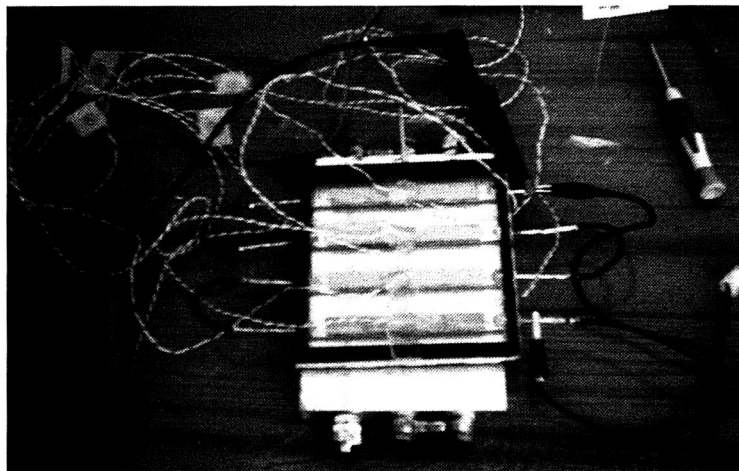


Fig. 27. Esquema de instalación de medida sobre uno de los modelos de PTA

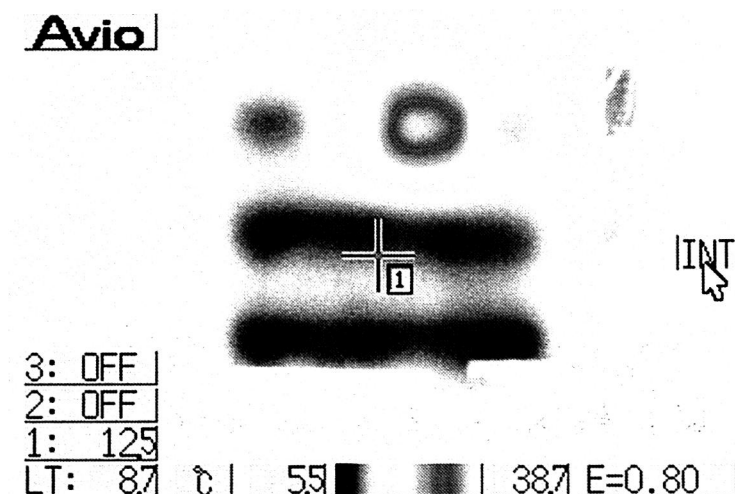


Fig. 28. Imagen termográfica de un modelo de PTA. I = 4,5 A

les contruidos tal como se ha indicado anteriormente (Fig. 4). 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 (Figs. 27 y 28) se muestran una de las instalaciones de ensayo y resultados obtenidos en la realización de un mapa de temperaturas con una cámara termográfica.

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 de dos de las tres cadenas conectadas (zonas azules) y una anomalía en la primera de las cadenas. Se observa una zona roja con núcleo blanco y aureola amarilla que corresponde al funcionamiento anómalo de alguno de los termoelementos allí ubicados, en los cuales se produce generación de calor y por tanto altas temperaturas en la superficie exterior del vidrio.

Según indica la imagen de forma cualitativa a través de las escalas de colores, las temperaturas en la superficie del PTA estaría entre los 5,5°C y los 38,7°C. El índice señalado como 1 y situado en el borde de la segunda cadena nos marca una temperatura de 12,5°C, temperatura que se puede aproximar a la existente en la zona entre cadenas, zona que corresponde a la mayor superficie de vidrio del PTA. 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.

## 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 cristaleras 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 elementos 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.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arenas, A., "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.1999
- Goldsmid, H. J., "Design and construction of modules", Electronic Refrigeration, Pion (London, UK, 1986), pp. 168-197.
- Nolas, G. S., et al. "Review of Established Materials and Devices". Thermoelectrics. Basic Principles and New Materials Developments, Springer (Australia, 2001), pp. 111-176.
- Semeniuk, V. "Thermoelectric Cooler as a Component of Electro-Optic Device: System Approach", 19th International Conference on Thermoelectrics, Cardiff, UK, 2000, pp. 289-295.
- Uemura, K. I "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, 1999, pp. 701-712.
- Vázquez, J., et al. "An Active Thermal Wall based on Thermoelectricity", 6th European Workshop on Thermoelectrics, Freiburg, Germany, 2001, pp. 70-77.
- Williams, S. G. K., et al. "Improved Thermoelectric Modules for Electrical Power Generation Using Low Temperature Waste Heat", 5th European Workshop on Thermoelectrics, Pardubice, Czech Republic, 1999, pp. 93-98.