

HORNO-NEVERA BASADO EN CÉLULAS PELTIER PARA EL ENSAYO TÉRMICO DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

Francisco Javier Meca Meca, José Antonio Jiménez Calvo

*Departamento de Electrónica
Escuela Politécnica Universidad de Alcalá*

RESUMEN

En este trabajo se plantea el desarrollo de un horno-nevera de reducido tamaño y bajo coste, basado en el uso de células Peltier, con el que se pueden conseguir temperaturas entre 0°C y 75°C. El horno está pensado como equipo de apoyo en laboratorios docentes de Electrónica, con una doble finalidad: ensayo térmico de dispositivos electrónicos y sistema real para el desarrollo de prácticas de control electrónico.

1. INTRODUCCIÓN

En muchas ocasiones, durante el desarrollo habitual de prácticas en los laboratorios de electrónica, resulta interesante que el alumno observe y cuantifique el efecto de las variaciones de la temperatura sobre el funcionamiento de dispositivos y/o circuitos electrónicos. Las opciones comerciales actuales pasan por el uso de cámaras de ensayo de precio elevado y prestaciones muy superiores a las necesarias habitualmente en la práctica docente, lo que limita el número de unidades disponibles en los laboratorios, y por lo tanto, el desarrollo de experimentos.

Con el fin de posibilitar una mayor presencia de estos sistemas en los laboratorios de electrónica, en este trabajo se describe el desarrollo de una nevera-horno de precio moderado, basada en el uso de dispositivos termoeléctricos [1], [2], [3], [4], comúnmente denominados *Células Peltier* (figura 1). Junto con su aplicación como cámara de ensayo térmico, se ha pensado que puede tener gran utilidad en laboratorios de Control Electrónico, puesto que representa un sistema real de interés para el desarrollo de prácticas.

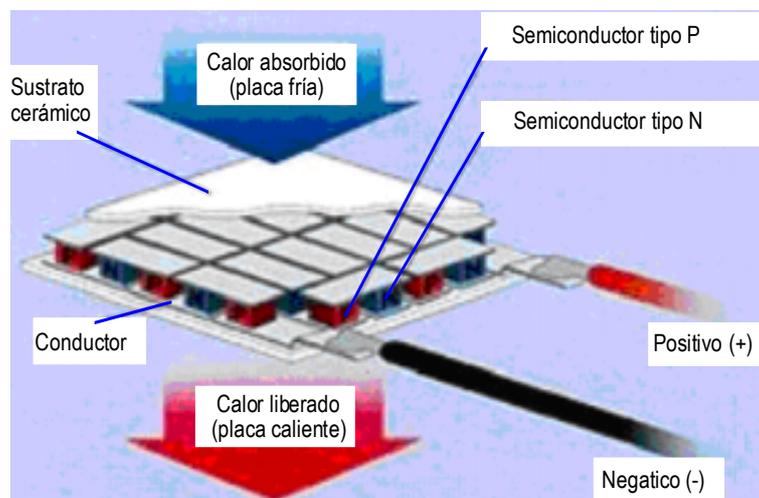


Figura 1. Célula Peltier.

En la figura 2 se muestra el esquema de funcionamiento de un sistema termoelectrico destinado al control de la temperatura interna de un habitaculo. En la figura 3 se presenta la disposicion detallada de los diferentes elementos que lo forman, donde ademàs es necesario incluir un ventilador sobre el disipador interno para facilitar el intercambio de calor entre este y el ambiente interno.

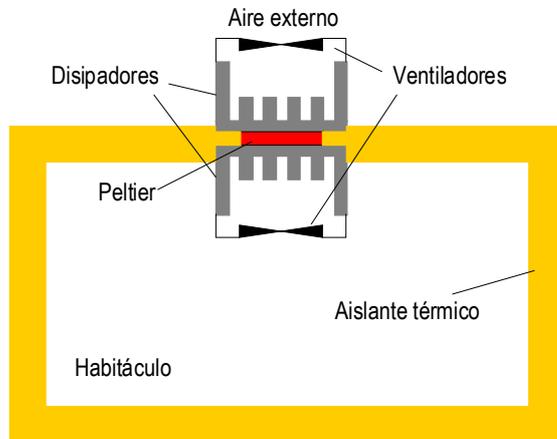


Figura 2. Sistema de intercambio aire-aire.

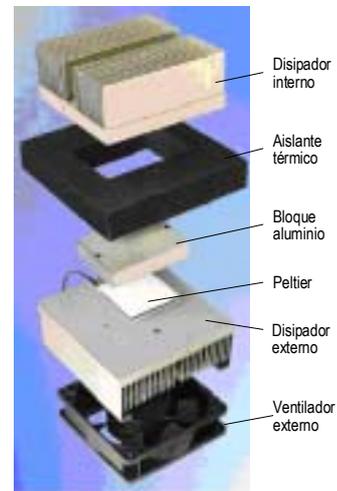


Figura 3. Elementos del sistema termoelectrico.

Una cèlula Peltier mueve energìa calorífica desde la placa fría a la placa caliente mediante el control de la energìa elèctrica proporcionada por una fuente de alimentaciòn. El sentido de movimiento de la energìa calorífica es marcado por la polaridad de la corriente elèctrica aplicada. Si sobre una placa se dispone un radiador con resistencia tèrmica nula con el aire externo de un habitaculo, la temperatura de dicha placa coincidirà con la del aire externo. Entonces, debido al efecto termoelectrico, la temperatura de la placa opuesta serà superior o inferior a la temperatura de ambiente, como consecuencia de la inyecciòn o extracciòn de calor producida por la corriente elèctrica aplicada. Para favorecer la inyecciòn o extracciòn de energìa, se debe asegurar una baja resistencia tèrmica de esta segunda placa con el aire del habitaculo, para lo que es necesario el uso de un disipador y un ventilador. En la figura 3 se observa la presencia de un bloque de aluminio en la placa interna del Peltier. Su finalidad es ampliar la separaciòn entre los dos disipadores, permitiendo asì una mayor espesor de aislante tèrmico, lo que se traduce en menores pèrdidas caloríficas.

Los dispositivos termoelectricos si bien presentan unas cualidades muy interesantes como elementos capaces de extraer o inyectar calor en un habitaculo (principalmente muy alta fiabilidad y facilidad de control), en su funcionamiento como extractor de calor proporcionan un rendimiento relativamente bajo y que es funciòn de la diferencia de temperatura entre sus dos placas. De forma aproximada se puede decir que el rendimiento màximo en los dispositivos comerciales no supera el 65% para una diferencia de temperatura entre placa fría y caliente de 0°C, y se reduce al aumentar dicha diferencia de temperatura, hasta alcanzar un rendimiento nulo para valores de unos 60-70°C. La siguiente ecuaciòn muestra la expresiòn aproximada de la potencia calorífica extraída por el Peltier, donde P_F es la potencia inyectada por la fuente de alimentaciòn en el Peltier, η_{MX} el rendimiento màximo en %, T_H la temperatura de la placa caliente, T_C la temperatura de la placa fría y $(T_H - T_C)_{MX}$ la diferencia de temperaturas entre placas para la que el rendimiento es nulo.

$$P(T_H - T_C) = P_F \frac{\eta_{MX}}{100} \left(1 - \frac{T_H - T_C}{(T_H - T_C)_{MX}}\right)$$

Como consecuencia de esta variación del rendimiento, conforme se desea conseguir en el interior del habitáculo temperaturas mas reducidas, la potencia que la célula Peltier es capaz de extraer disminuye (al aumentar la diferencia de temperaturas entre placas) y por el contrario, la potencia calorífica que se conduce por las paredes del habitáculo hacia el interior aumenta. Este hecho impone limitaciones muy importantes al uso de células Peltier en la refrigeración de habitáculos. Por el contrario, en las aplicaciones en las que se desea mantener la temperatura interna de un habitáculo (o de un dispositivo) en un valor próximo a la temperatura de ambiente, extrayendo la potencia calorífica generada por disipación térmica, las prestaciones de las células Peltier son óptimas, ya que ofrecen un rendimiento elevado.

En las aplicaciones en las que se desea incrementar la temperatura de un habitáculo por encima de la temperatura ambiente, el rendimiento de una célula Peltier es sensiblemente superior, ya que tanto la potencia extraída del ambiente, como la potencia disipada en la célula debido a la energía eléctrica suministrada por la alimentación, se introducen en el habitáculo.

Como hemos indicado anteriormente, la eficiencia de la célula Peltier se reduce al incrementarse la diferencia de temperatura entre sus dos placas. Por lo tanto, cuanto menor sea la resistencia térmica de los dos conjuntos de disipador-ventilador, menor diferencia de temperatura existirá entre placas de la célula y mayor será el rendimiento. En la práctica se debe alcanzar un compromiso entre tamaño del conjunto disipador-ventilador y rendimiento. En aplicaciones en las que este compromiso no arroja resultados satisfactorios es necesario recurrir a otros canales de transferencia térmica entre las placas del Peltier y el aire, como puede ser la refrigeración con líquido.

2. OBJETIVOS DE DISEÑO

Las características planteadas para el sistema son las siguientes:

- Dimensiones internas de la cámara 18x18cm de base y 15cm de altura. Esto resulta suficiente para el ensayo tanto de dispositivos como de pequeños circuitos o sistemas.
- Margen de temperaturas de ambiente entre 18°C y 28°C. Que cubre típicamente las temperaturas habituales de un laboratorio docente.
- Margen de temperatura ajustable dentro de la cámara entre 0°C y 75°C.
- Visualización de temperatura interna y temperatura de consigna.
- Control de la célula Peltier por PWM mediante puente en H. Lo que permite con una única alimentación proporcionar tanto tensiones positivas como negativas, según la necesidad de extraer o inyectar calor en la cámara.
- Posibilidad de abrir el lazo de control para ensayar diferentes circuitos y/o algoritmos de control. De esta manera la cámara se puede utilizar en prácticas de control electrónico.
- Protección de la célula Peltier mediante limitación tanto de tensión máxima como de corriente máxima.
- Indicación de modo de operación: calentando o enfriando.
- Indicación de estabilización del error en temperatura con una ventana de $\pm 2^\circ\text{C}$.

En cuanto al tiempo máximo permitido para alcanzar las temperaturas de consigna, no se deben imponer objetivos muy exigentes, debido al bajo rendimiento de la célula en ciertas condiciones de funcionamiento. De los estudios prácticos y teóricos realizados sobre este tema se deduce que al intentar acelerar la velocidad de respuesta de la cámara incrementando

la potencia del Peltier es necesario aumentar el tamaño de éste (en concreto de sus radiadores) lo que hace necesario aumentar el tamaño de la cámara. Por ello, el incremento de potencia no se traduce finalmente en un incremento significativo de velocidad.

3. ELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA TERMOELÉCTRICO.

La elección de la célula atiende a los siguientes requerimientos:

- Potencia suficiente para cumplir los objetivos de temperatura indicados en el apartado anterior. Para ello se parte de unas características del aislante térmico utilizado, que se indicarán posteriormente.
- Temperatura máxima permitida en placas de la célula compatible con la deducida en el análisis térmico del sistema. Dicha temperatura, en las células de propósito general, está limitada a unos 85°C, que como se indica posteriormente es inferior a la temperatura que se puede alcanzar bajo ciertas condiciones de funcionamiento, por lo que se deben utilizar células de alta temperatura.
- Sellado perimetral de la célula para evitar que posibles condensaciones internas produzcan un envejecimiento prematuro.

3.1. Cálculo de la potencia del Peltier.

Lo primero es calcular la potencia calorífica máxima que se conduce a través de las paredes del habitáculo de las dimensiones indicadas en el apartado 2. Para ello y supuesto un buen aislamiento térmico, se puede suponer que las temperaturas superficiales del aislamiento tanto en el interior como en el exterior, coinciden con las temperaturas del aire interno y externo, respectivamente. Esta aproximación proporciona un valor por exceso de potencia conducida. Supuesto un aislamiento de poliestireno rígido con 3cm de espesor (conductividad térmica 0.028 W/(m·K) a 300K), resulta una resistencia térmica del habitáculo de 6.22°C/W, por lo tanto:

- Calentando. Diferencia de temperatura máxima 57°C, potencia calorífica que se conduce hacia el exterior 9.16W.
- Enfriando. Diferencia de temperatura máxima 28°C, potencia calorífica que se conduce hacia el interior 4.5W.

La potencia disipada por el ventilador interno debe ser considerada para calcular las potencias caloríficas reales que debe extraer o inyectar el sistema. El ventilador utilizado disipa 2.5W, por lo que resulta:

- Potencia máxima que debe inyectar el sistema calentando: 6.66W.
- Potencia máxima que debe extraer el sistema enfriando: 7W.

En la práctica estas potencias serán superiores como consecuencia de las pérdidas producidas por la puerta del habitáculo y por el montaje de los elementos del Peltier. En cualquier caso, y atendiendo al mayor rendimiento del Peltier calentando, en el diseño basta con considerar el modo enfriamiento.

La diferencia de temperatura entre placas y en consecuencia el rendimiento del Peltier, es función de las resistencias térmicas de los conjuntos disipador-ventilador y de la introducida por el bloque de aluminio. Para los elementos empleados:

- Conjunto disipador-ventilador (el mismo para ambas placas): 0.18°C/W.
- Bloque de aluminio de espesor 25.4mm: 0.08°C/W.

- Láminas de grafito entre superficies para asegurar una buena conducción térmica: $0.054^{\circ}\text{C}/\text{W}$ en el lado de la placa interna del Peltier y $0.0148^{\circ}\text{C}/\text{W}$ en el lado de la placa externa.

Con todo ello, quedan las siguientes resistencias térmicas:

- Lado interno del sistema: $0.314^{\circ}\text{C}/\text{W}$.
- Lado externo del sistema: $0.195^{\circ}\text{C}/\text{W}$.

Con estos datos y supuesto un Peltier con rendimiento máximo del 55%, se pueden obtener las gráficas de la figura 4, que muestran la temperatura interna del habitáculo en función de la potencia suministrada por la fuente de alimentación al Peltier. Para este cálculo se ha supuesto una resistencia térmica del habitáculo de $5^{\circ}\text{C}/\text{W}$.

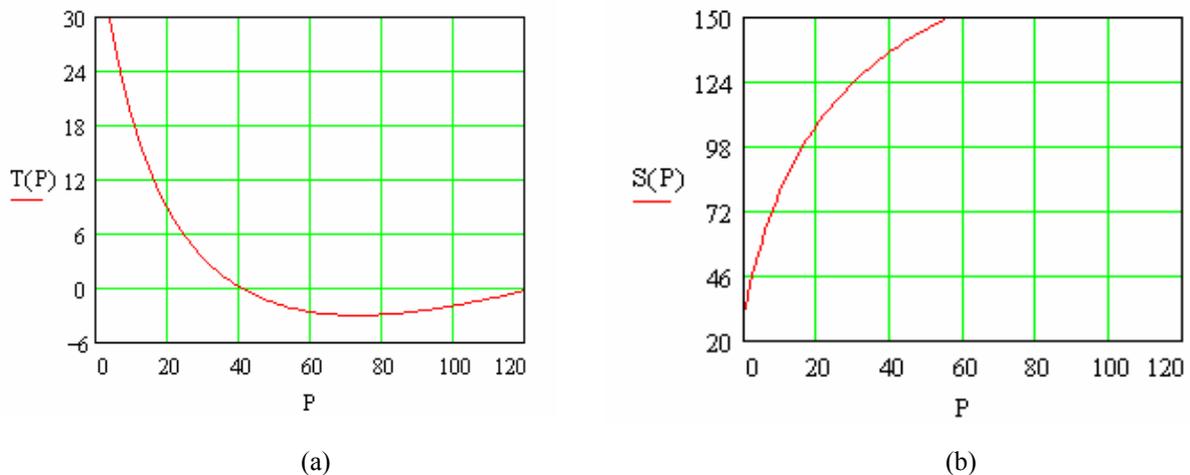


Figura 4. Temperatura interna del habitáculo en función de la potencia suministrada por la fuente de alimentación al Peltier: a) Enfriando supuesta una temperatura ambiente de 28°C , b) Calentando supuesta una temperatura ambiente de 18°C .

En la figura 4 se observa que la temperatura inferior se consigue con una potencia de la fuente de unos 75W . Si la potencia aplicada al Peltier es superior a este valor, se empeora el rendimiento total del sistema. Análogamente, con 9W calentando es suficiente para alcanzar una temperatura interna de 75°C . Se observa claramente la diferencia de eficiencia del sistema en los dos modos de funcionamiento.

Por otro lado, con el sistema calentando, se observa que la temperatura interna puede alcanzar valores muy elevados. Al respecto, se demuestra que una potencia de unos 8W puede generar una temperatura en la placa interna del Peltier de 85°C (para una temperatura del ambiente externo de 28°C), que es en el límite permitido por los Peltier de uso general. Además, durante el régimen térmico transitorio y debido a la baja capacidad térmica del Peltier, la temperatura de su placa caliente puede ser muy superior a su valor en régimen permanente. Con el fin de poder suministrar al Peltier una potencia superior a este límite se ha optado por utilizar un modelo de alta temperatura.

Finalmente, es interesante analizar la temperatura interna mínima que se puede alcanzar en la cámara, para diferentes potencias disipadas por el sistema bajo ensayo. En la figura 5 se muestran los resultados para $0, 2, 4, 6, 8$ y 10W (supuesto el ambiente externo a 28°C), donde P sigue siendo la potencia suministrada por la fuente de alimentación al Peltier.

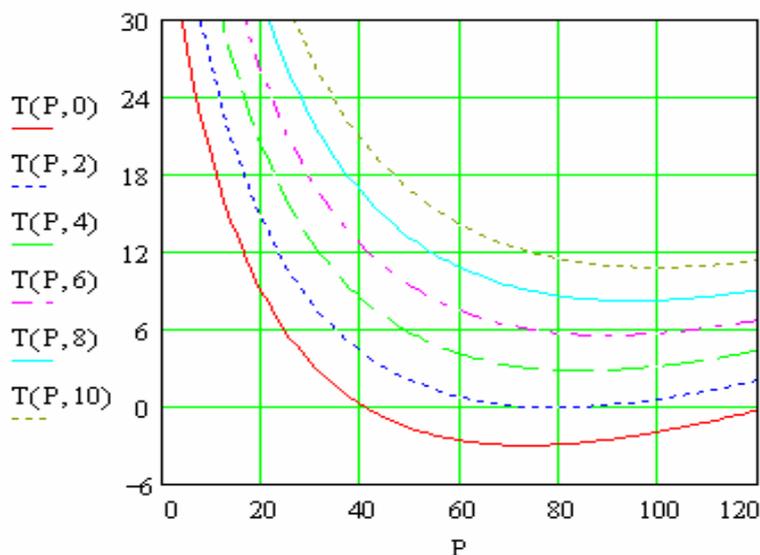


Figura 5. Temperatura interna del habitáculo en función de la potencia suministrada por la fuente de alimentación al Peltier, para potencias disipadas por el sistema bajo ensayo de 0, 2, 4, 6, 8 y 10W (modo refrigeración con temperatura ambiente 28°C).

3.2. Elementos del sistema termoeléctrico propuesto.

Para el prototipo se ha elegido el material de Melcor, que además proporciona en su página web [4] el precio de los diferentes elementos. Estos son:

- Célula Peltier: HT8-12-40. $V_{mx}=14.4V$, $I_{mx}=8.5 A$ y potencia máxima extraída $P_{mx}=72W$.
- Disipadores: HX8-202 en ambos lados. Dimensiones 102x102x32mm.
- Ventiladores: FAN202-12 en ambos lados. Dimensiones 92x92x32mm.
- Piezas para sujetar el ventilador al disipador: SD-202.
- Bloques de aluminio: SB-201 de 41x57x12.7mm. Se deben colocar dos para conseguir un espesor de 25.4mm.
- Láminas de grafito entre superficies: Interface Pads GRF 245-245.

Es interesante sustituir el ventilador interno por algún otro modelo comercial de mayor rendimiento (menor potencia disipada) y que presente un caudal mínimo de 45CFM. Igualmente, la temperatura interna máxima de la cámara está limitada por dicho ventilador, por lo que resulta recomendable usar un modelo de alta temperatura. Esto permitiría elevar la temperatura máxima de la cámara por encima de los 75°C, sin penalizar en exceso la vida media del ventilador.

El coste final de todos los elementos indicados es de unos 125\$, si bien el precio de compra en distribuidor puede ser entre un 30 y un 50% superior, según el elemento.

4. ELECTRÓNICA DEL SISTEMA DE CONTROL.

La complejidad de la electrónica de control depende del uso final del sistema. En este apartado se indican las características de un sistema básico, que puede ser modificado y/o ampliado según las necesidades. El diagrama de bloques se representa en la figura 6.

- Medida de temperatura. Se propone el uso de un RTD para conseguir una exactitud adecuada en la medida dentro del margen comprendido entre 0°C y 75°C. Este se ha polarizado a corriente constante con una conexión a 4 hilos.
- DAC consigna. Se ha utilizado un DAC de carga paralelo y 8bits, lo que proporciona una resolución de unos 0.3°C. El control del DAC se puede realizar simplemente mediante un potenciómetro de pulsos (o dos pulsadores) y un contador UP/DOWN.
- AI. Amplificador de instrumentación para obtener el error entre consigna y temperatura de la cámara.
- LTC1923. Representa un circuito integrado específico para el control de Peltier, con el que se puede controlar y limitar, fácilmente, la corriente y la tensión en extremos del Peltier. Proporciona señales PWM para el control de un puente en H. Otros dispositivos específicos para el control de un Peltier son, por ejemplo: ADN8830, MAX1978 y MAX8520.
- Puente en H. Formado por 4 MOSFET de potencia junto con los elementos de filtrado necesarios que aseguran un rizado reducido en la corriente del Peltier, evitando una merma en su eficiencia (es suficiente asegurar un rizado inferior al 10%). Los dispositivos controladores indicados anteriormente están pensados para puentes en H alimentados a 5V. Como en este caso es necesaria una tensión superior, se deben intercalar 4 drivers, cuyo tiempo de retardo sea lo suficientemente bajo para asegurar un funcionamiento correcto del puente en H.
- Peltier. Sería el sistema detallado en el apartado anterior. Con el fin de limitar la potencia máxima entregada al elemento en 100W, se debe diseñar el circuito del LTC1923 para que corte la modulación a una tensión de unos 13V y una corriente de 7.5 A.
- Alimentación. Para alimentar el puente en H no es necesario una tensión regulada, basta con asegurar la tensión suficiente para alcanzar 13V en el Peltier considerando la caída de tensión en los cables y pistas del circuito impreso, y en los elementos del puente en H (MOSFET e inductancias de filtrado). Para los elementos del puente en H se puede asumir, con los dispositivos adecuados, una resistencia máxima de unos 0.2Ω, lo que genera una pérdida máxima de 1.5V. Por lo tanto se debe utilizar un sistema de alimentación capaz de proporcionar una tensión mínima de unos 15V, para la corriente máxima consumida por el sistema. Esta corriente es del orden de 8.5 A, incluyendo, junto con el consumo del Peltier, 0.4 A para los ventiladores y 0.6 A para el resto de la electrónica.

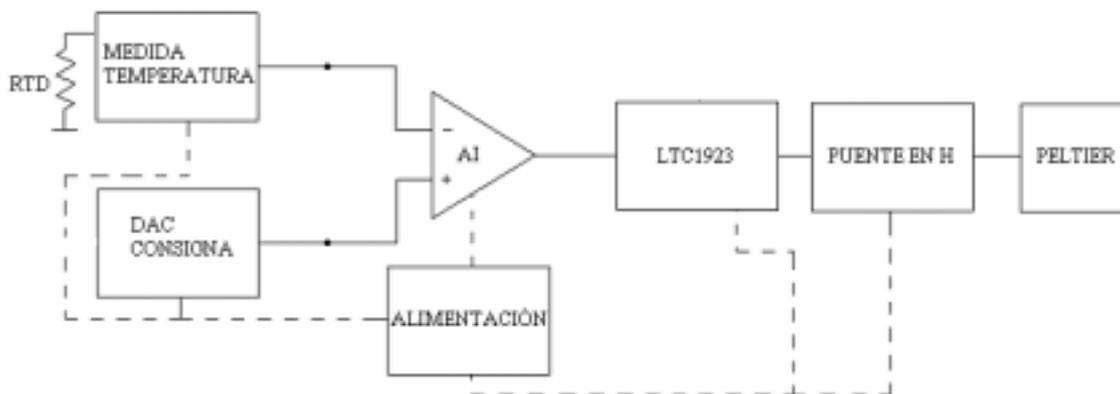


Figura 6. Diagrama de bloques de la electrónica de control.

Para visualizar tanto la temperatura interna como la de consigna se deben incluir en el sistema uno o dos voltímetros, con el factor de conversión tensión-temperatura adecuado. La implementación de estos dependerá de las características del sistema final.

Respecto al diagrama básico presentado en la figura 6, se considera aconsejable introducir un dispositivo microcontrolador que realice las siguientes tareas:

- Interface entre el elemento de control manual de consigna y el DAC de consigna.
- Control de una ADC de 8 bits para medir y presentar la temperatura interna y de consigna.
- Implementar algoritmos de control digital, manipulando la señal de salida del amplificador de error antes de enviarla al LTC1923. Esta opción resulta muy interesante para el desarrollo de prácticas de control. Al tratarse de un sistema lento (apartado 5) la carga computacional asociada a un control digital se puede realizar sin problemas mediante un micro-controlador de bajo coste.

Finalmente, se puede aprovechar el micro-controlador para programar desde un PC ciclos de temperatura mediante una comunicación serie.

5. RESULTADOS.

Los resultados indicados en este apartado corresponden a un prototipo preliminar de características inferiores a las propuestas en este trabajo. En concreto, presenta las siguientes diferencias:

- La potencia máxima absorbida de la fuente por el Peltier utilizado es de 50W, frente a los más de 75W propuestos.
- La resistencia térmica del conjunto disipador-ventilador interno es un 55% más alta.
- Utiliza pasta térmica convencional en las uniones del sistema térmico. El efecto de estas uniones, que en un principio se despreció, es muy importante. El uso de una pasta térmica convencional, aun aplicada correctamente, eleva la resistencia térmica en más de 0.12°C/W en el lado interno y 0.032°C/W en el externo, que resulta bastante significativo en aplicaciones termoeléctricas.

En conjunto, el incremento de la resistencia térmica del lado interno del sistema alcanza casi el 100% del valor propuesto en el apartado 3 y un 15% para el lado externo. Estos incrementos suponen un retroceso superior a 4°C en la temperatura mínima alcanzable dentro de la cámara.

En la figura 7 se muestra la evolución de la temperatura interna de la cámara para diferentes consignas (25 °C, 70°C, 5°C), para una temperatura de ambiente de 23°C. Se debe destacar:

- El sistema presenta baja estabilidad a temperaturas altas. Esto es debido a que sólo se utiliza término proporcional al error en el control de la temperatura. Ganancias de bucle inferiores, que evitaran la oscilación, producían un error demasiado elevado en régimen permanente cuando la cámara está en modo enfriamiento. Esto es debido a la variación en el rendimiento del Peltier con la diferencia de temperatura entre placas y con su modo de funcionamiento (calentando o enfriando). Lo habitual sería utilizar un controlador PID, pero al ser un sistema de alta alinealidad puede resultar muy interesante ensayar otros métodos de control.
- El tiempo necesario para enfriar es muy elevado, casi 30 minutos para pasar de 70°C a 5°C. Por el contrario el sistema es muy rápido calentando, ya que dispone de una potencia mucho más elevada.

- La temperatura mínima alcanzada está en el entorno de unos 2°C, pero el tiempo empleado para ello es próximo a 60 minutos.

En la figura 8 se representa otro ciclo de temperatura (25°C, 5°C, 70°C), donde se observa que en sólo 7 minutos el sistema es capaz de pasar de 5°C a 70°C.

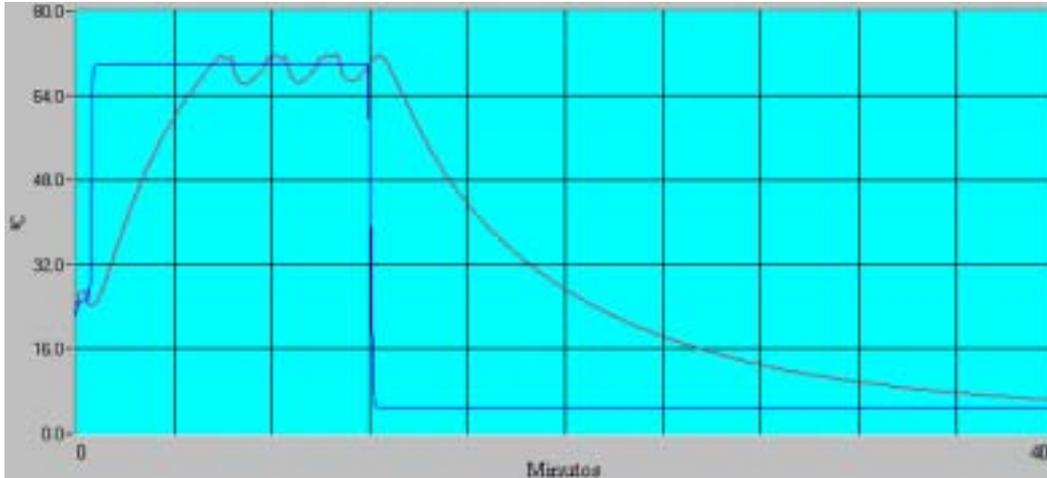


Figura 7. Resultado de un ciclo de temperatura en el prototipo (temperatura ambiente 23°C).

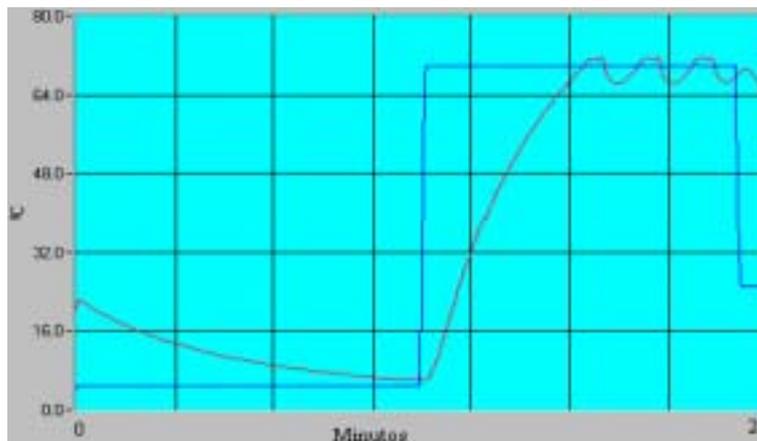


Figura 8. Resultado de un ciclo de temperatura en el prototipo (temperatura ambiente 23°C).

Como recomendaciones en la construcción de la cámara, se propone:

- Incrementar el espesor del aislamiento de las paredes hasta 4cm, salvo en la parte superior, puesto que supone una mayor complejidad de mecanizado, ya que el sistema termoeléctrico está preparado para un espesor de aislante de 3cm.
- Asegurar un buen sellado de las uniones del aislamiento mediante la incorporación de perfiles de poliestireno triangulares.
- Utilizar una doble junta elástica en el perímetro de cierre de la puerta.
- Prestar gran atención al montaje de los elementos del sistema termoeléctrico para evitar la formación de puentes térmicos.

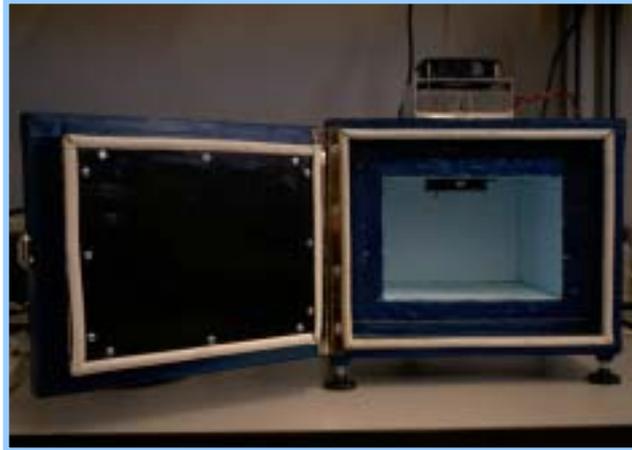


Figura 9. Fotografía del prototipo de cámara.

6. CONCLUSIONES.

El sistema propuesto puede resultar de gran interés para el desarrollo de experimentos en laboratorios de electrónica. Su capacidad para enfriar no es muy elevada, pero con las modificaciones planteadas es previsible una mejora substancial del rendimiento. En cualquier caso, para el desarrollo de prácticas, no es demasiado importante el poder alcanzar temperaturas internas especialmente reducidas.

El precio del sistema es bastante moderado, se estima en unos 340 euros mas el coste del habitáculo. Para una tirada de unas 100 unidades, el coste se puede reducir considerablemente (sobre todo el de fabricación del habitáculo), estimándose un precio total de unos 600-700 euros.

El precio de la nevera-horno, junto con la fiabilidad intrínseca de los sistemas termoeléctricos, la convierten en una opción muy atractiva, no sólo como equipo docente, sino también para su uso en laboratorios de investigación. En estos puede ser necesario realizar ensayos térmicos rápidos y habituales, que detecten problemas de derivas o sobrecalentamiento en prototipos electrónicos, la disponibilidad in-situ de la nevera-horno evita el traslado de todo el sistema bajo ensayo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] www.marlow.com
- [2] www.ferrotec.com/usa
- [3] www.quick-cool-heattransfer.com
- [4] www.melcor.com

Agradecimientos.

Este trabajo se ha podido realizar gracias a la financiación del proyecto SILPAR (DPI 2003-5067) por parte del MCYT.