

Un enfoque multidisciplinar para los laboratorios de Electrónica y Automática

Carlos Platero Dueñas; Luis Castedo Cepeda; Manuel Ferre Pérez; Carlos Vicente Peña
Departamento de Física Aplicada e Ingeniería de Sistemas
Universidad Politécnica de Madrid
C/ Ronda de Valencia, 3 – 28012 Madrid
cplatero@fais.upm.es; 91 336 68 86; 91 336 77 09

1. Resumen

La formación de estudiantes en ingeniería con perfil en Electrónica Industrial debería de contar con una buena dosis de interacción entre los campos de la Electrónica y la Automática. En este sentido, el departamento de Física Aplicada e Ingeniería de Sistema de la EUITI de la Universidad Politécnica de Madrid, trata de compaginar, en un proceso de síntesis, la combinación de ambos campos de la ciencia en el desarrollo curricular de los alumnos de la EUITI con dicha titulación. Bajo esta perspectiva, se están diseñando un conjunto de prácticas multidisciplinarias, donde se combinan los saberes de la Electrónica, la Automática y la Informática Industrial. Con tal propósito, se ha diseñado una maqueta didáctica en torno al control de las células Peltier. La regulación de temperatura sobre célula Peltier, permite abordar temas básicos del control clásico y moderno, tales como: identificación de sistemas, linealización, análisis temporal, diseño de reguladores continuos y discretos, modelos de variable de estado, observadores y control óptimo. Si bien el sistema desarrollado se presta sobre todo al estudio de la Automática, también es posible su aprovechamiento para la enseñanza de la Electrónica, puesto que muestra la aplicación práctica de varios montajes y componentes típicos de la Electrónica de Instrumentación y de Potencia. Entre ellos podemos encontrar: circuitos para el acondicionamiento de señales, amplificadores de aislamiento, amplificadores lineales de potencia y fuentes conmutadas. Por último, el desarrollo de librerías en C++ para la adquisición de señales en DMA y su visualización en entornos Windows NT4/9X junto con el proceso físico mencionado, permite elaborar prácticas de programación en tiempo real para estas plataformas.

Abstract

A new didactic approach have been developed. The system controls the cold face temperature of a Peltier cell. To accomplish for this target, it is necessary to integrate the knowledge of the fields of Industrial Electronic, Control and Computer Sciences. Under the philosophy to give links among the specialities subjects of Electronic Engineer, the Department of Applied Physics and System Engineering of Politechnical University of Madrid has participated during the last year in the construction of this platform. The temperature control with Peltier cells allows to use different techniques such as classic control and modern control. Basic topics are handled: Identification systems, transfer function, time response, root locus design, discrete time models, descriptor state-space model and pole placement. By the other way, the system has electronic specifications and the students can observe the implementation of the "black boxes" in standard equipment from Power Electronics and Instrumentation. Power linear amplifier, signal acquisition board, galvanic isolation board and interface board have been generated. Finally, a static library in C++ had been implemented for NT operating system. The software object hides the acquisition system and it is capable to manage DMA transfer and under petition. The goal is to elaborate real time practices.

2. Introducción

Uno de los inconvenientes clásicos del desarrollo docente de las asignaturas de Automática es el uso de la función de transferencia (FDT), donde los sistemas físicos se representan por medio de cajas negras y sus comportamiento dinámico se modelan mediante las FDTs. Si bien este planteamiento no se discute, por razones obvias, no es menos verdad que, muchas veces, el alumno pierde las nociones físicas al aplicar las técnicas de análisis y diseño de la teoría del Control. Además, el enfrentamiento del estudiante ante sistemas físicos reales, le hace plantearse conceptos típicos de la ingeniería, tales como: la instrumentación, la validación de las hipótesis y las aproximaciones ingenieriles, tan empleadas en el trabajo de campo y tan desestimadas en las clases de teoría o en los problemas de simulación con ordenador.

Sin duda alguna, la llegada de programas como MATLAB, SCILAB o CC han vitalizado enormemente la didáctica de la Automática, sobre todo, en el laboratorio y como herramienta de estudio personal. Sin embargo, las habilidades anteriormente citadas sobre el trabajo de campo, obviamente no son resueltas con estos *softwares*. El éxito del laboratorio nace de la combinación del trabajo de simulación acompañado con su puesta en práctica. Por tanto, se requiere de una maqueta de entrenamiento que sea capaz de ilustrar los conceptos básicos del control, que pueda integrar los conceptos de la especialidad (en este caso de Electrónica Industrial), que interfase con los programas de simulación y que además sea representativa de la problemática industrial actual. Esta sinergia puede ser encontrada en el control de temperatura de una célula Peltier. Experiencias en esta dirección ya han sido apuntadas por otras escuelas[1][2].

El control de la temperatura por medio de una célula Peltier tiene grandes ventajas. Primero, representa uno de los problemas típicos del control industrial. Segundo, su comportamiento dinámico permite emplear tanto técnicas de Control clásico como de Control moderno. Tercero, se requiere de la actuación tanto de la Electrónica de Potencia como de la Instrumentación Electrónica. Cuarto, se puede plantear el problema de programación en tiempo real. Quinto, los procesos de calentamiento y enfriamiento tienen una corta duración temporal, pudiéndose realizar varios experimentos en una jornada de prácticas. Sexto, se pone al alumno ante una de las tecnologías con mayor pujanza en los procesos de refrigeración. Séptimo, se emplean conceptos de la Termoelectricidad y de la Transmisión de Calor. Y octavo, y último, el diseño de una maqueta de control sobre una célula Peltier es relativamente barato.

3. El comportamiento de las células Peltier

Si bien el efecto Peltier es conocido desde 1834, su aplicación práctica necesitó del desarrollo de los semiconductores, pues éstos representan ser buenos conductores de la electricidad pero pobres conductores del calor. La circulación de una corriente eléctrica por dos materiales semiconductores de diferente densidad de electrones libres, produce que se libere o se absorba energía. La transferencia de energía tiene lugar en forma de flujo calorífico entre las dos caras de los semiconductores (ver figura 1)[3].

El enfriamiento termoeléctrico empezó a ser factible a partir de los estudios de Telkes en los años 30 y de Lofee

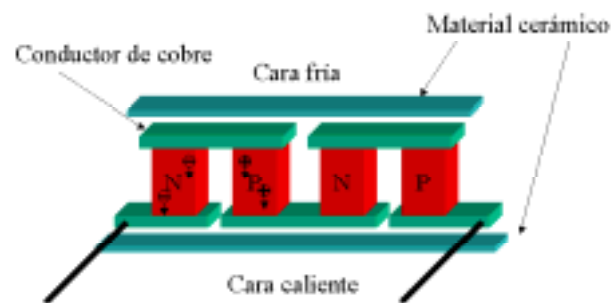


Fig. 1 - Elemento termoeléctrico de una célula Peltier

en 1956. Los nuevos materiales semiconductores irrumpían en la escena produciendo rendimiento mucho más altos. Telkes utilizó pares o soldaduras de PbS y ZnSb y Loffee descubrió el uso de PbTe y PbSe [4]. Actualmente, se emplea el bismuto-teluro fundamentalmente como el material semiconductor, fuertemente dopado para crear un exceso (tipo-n) o una deficiencia (tipo-p) de electrones.

3.1. Modelo dinámico de comportamiento de las células Peltier

Al atravesar la corriente eléctrica sobre una célula Peltier, se producirán varios efectos termoelectricos y de la transmisión de calor. De un lado, el propio efecto Peltier, esto es, se absorberá energía de la cara fría y se conducirá hasta la cara caliente, esto se debe a que al hacer pasar una corriente continua sobre los dos semiconductores con diferentes densidades de electrones libres provocará una diferencia de temperatura. Pero a su vez, también se producirá el efecto Thomson, a consecuencia de la circulación de la corriente sobre los propios semiconductores con temperaturas no uniformes. Mientras y desde la transmisión del calor, habrá un efecto de conductividad térmico junto a un almacenamiento de energía calorífica expresado como la diferencia de temperatura entre la cara fría y la caliente. Además y desde el punto de vista eléctrico, la energía eléctrica entregada a la célula, se transformará, en parte, en efecto Peltier, generándose la diferencia de temperatura entre caras, pero también se producirá el efecto Joule como consecuencia de la oposición de la célula al paso de la corriente.

Chávez et al[5] han expresado el comportamiento dinámico del sistema como:

$$Q_C = P_e(t) + \alpha T_f I - \frac{1}{2} I^2 R + \frac{1}{2} \tau I (T_C - T_F) - \frac{(T_C - T_F)}{R_{TH}}$$

$$Q_F = -\alpha T_f I + \frac{1}{2} I^2 R - \frac{1}{2} \tau I (T_C - T_F) + \frac{(T_C - T_F)}{R_{TH}}$$

Ec. 1 - Modelo de los flujos caloríficos entregados y absorbidos

donde:

- Q_C y Q_F son los flujos caloríficos entregados y absorbidos por las caras calientes y frías respectivamente.
- α es el coeficiente de Seebeck; dependiente de la temperatura entre las caras.
- T_C y T_F son las temperaturas de las caras caliente y fría.
- I es la corriente continua por la Peltier.
- R es el valor de resistencia eléctrica que ofrece la célula ante el paso de la corriente. Este parámetro depende de la temperatura media entre caras.
- τ es el coeficiente de Thomson; también depende de la temperatura media entre caras.
- R_{TH} es el valor de resistencia térmica que explica el efecto de conductividad térmica entre las dos caras de la célula y depende de la temperatura.

Expresiones que reflejan cómo la energía eléctrica dada a la célula Peltier ha sido transformada en una diferencia de temperatura, acompañado por los efectos Thomson y Joule más los debidos a la propia transmisión de calor. Sin embargo, los fabricantes de las células Peltier empleadas, en sus expresiones matemáticas, desprecian el efecto Thomson y sólo consideran el flujo de calor absorbido, quedándoles la expresión reducida a[6]:

$$Q_F = -\alpha T_f I + \frac{1}{2} I^2 R + \frac{(T_C - T_F)}{R_{TH}}$$

Ec. 2 - Modelo simplificado de MELCOR

Una mayor simplificación del modelo podría conseguirse si se considera prácticamente constante la temperatura en la cara caliente, el coeficiente de Seebeck, la resistencia eléctrica y la resistencia térmica de la célula. Dichas suposiciones han sido verificadas experimentalmente. De un lado, la utilización de un disipador con baja resistencia térmica y apoyado con convección forzada garantiza una temperatura en la cara caliente casi idéntica a la ambiente. Por otro lado, MELCOR proporciona modelos de hasta segundo orden sobre la variación del coeficiente de Seebeck, la resistividad eléctrica y la conductividad térmica en función de la temperatura media [6]:

$$\begin{aligned}\alpha(T) &= \alpha_0 + \alpha_1 T_m + \alpha_2 T_m^2 \quad [V/^{\circ}K] \\ \rho(T) &= \rho_0 + \rho_1 T_m + \rho_2 T_m^2 \quad [\Omega cm] \\ k(T) &= k_0 + k_1 T_m + k_2 T_m^2 \quad [W/^{\circ}Kcm] \\ T_m &= \frac{T_C + T_F}{2} \quad [^{\circ}K]\end{aligned}$$

Ec. 3 - Modelo de segundo orden del coeficiente de Seebeck, resistividad eléctrica y conductividad térmica.

siendo ρ la resistividad eléctrica, k la conductividad térmica y $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \rho_0, \rho_1, \rho_2, k_0, k_1$ y k_2 son constantes definidas por el fabricante. Los modelos fueron empleados en la simulación para determinar su dependencia con la temperatura. Al emplear un rango dinámico de diferencias de temperatura por debajo de 25 K, tanto el coeficiente de Seebeck como la resistividad y la conductividad térmica se pueden considerar casi constantes. Por este motivo, se empleará a partir de estos momentos el subíndice m en los anteriores parámetros, para indicar que es el valor medio esperado dentro del rango dinámico del experimento.

Estas simplificaciones conducen a poder emplear la siguiente ecuación diferencial, apoyada en el circuito térmico representado en la figura 2:

$$\begin{aligned}-C_{THm} \frac{d\Delta T}{dt} &= -\alpha_m \Delta T I + I^2 R_m + \frac{\Delta T}{R_{THm}} \\ \Delta T &= (T_C - T_F) = (T_{amb} - T_F)\end{aligned}$$

Ec. 4 - Modelo simplificado de una célula Peltier

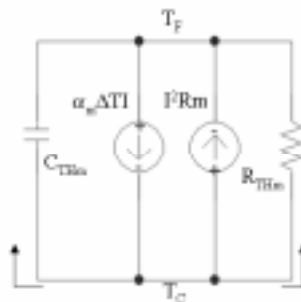


Fig. 2 - Circuito térmico equivalente de la célula Peltier

Del que habrá que hacer varias indicaciones. En primer lugar, el flujo calorífico absorbido es representado por una capacidad térmica, C_{THm} , colocada entre ambas caras y que posteriormente representará junto con la resistencia térmica, R_{THm} , el polo dominante del sistema. En segundo lugar, el efecto Joule es considerado como el flujo calorífico que va desde la cara caliente a la cara fría, simplificando el fenómeno al considerar que sólo va en dirección de T_{amb} a T_F .

Por otra parte, y desde el punto de vista eléctrico y atendiendo a las simplificaciones anteriores, la potencia eléctrica entregada a la célula Peltier se puede modelar según:

$$P_e = RI^2 + \alpha\Delta TI$$

Ec. 5 - Balance de potencia eléctrica entre efecto Peltier y Joule

El primer término representará la potencia entregada en forma de efecto Joule y el segundo representará la potencia absorbida de la cara fría hacia la caliente por efecto Peltier. La figura 3 representa su modelo en circuito eléctrico equivalente.

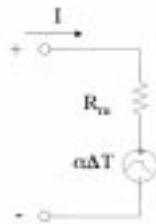


Fig. 3 - Circuito eléctrico equivalente

4. Maqueta didáctica para el control de temperatura de células Peltier

Se han diseñado tanto soporte físico como lógico para el control de la temperatura de la cara fría de una célula Peltier. A continuación se muestran las características tanto del *hardware* como del *software* que se han desarrollado para el cumplimiento de los objetivos anteriormente enunciados, esto es, integrar tanto el trabajo experimental como el de simulación en un proceso típico industrial.

4.1. Soporte físico para la maqueta

Con el propósito de controlar la temperatura de fría de una célula Peltier se han construido cuatro etapas distintas: etapa de potencia, tarjeta de acondicionamiento de la temperatura, observador de la potencia eléctrica dada a la Peltier y etapa de aislamiento galvánico. Sus características son seguidamente comentadas.

4.1.1. Etapa de potencia

La potencia calorífica extraída a través de la cara fría de una célula Peltier es, para un determinado salto térmico, proporcional a la corriente que atraviesa la célula (Ec. 4). Por este motivo, se ha considerado esta magnitud como la más conveniente para gobernarla. Para ello se ha desarrollado una etapa de potencia que se comporta como un amplificador de transconductancia de 100 mS.

Dicho amplificador es capaz de suministrar a la carga una corriente nominal de ± 1 A, aunque puede llegar hasta los 2 A. Para reducir las necesidades de material de laboratorio, la etapa se alimenta con una tensión única de 12 V. Por tratarse de una fuente de corriente, se haya protegida intrínsecamente frente a cortocircuitos. También está protegida contra el calentamiento excesivo de sus semiconductores.

La etapa se ha realizado con dos amplificadores operacionales de potencia L165, de SGS-Thomson, que constituyen el núcleo del amplificador lineal de transconductancia. Estos integrados pueden suministrar hasta 3 A de corriente de salida y se hayan protegidos frente a cortocircuitos y calentamientos excesivos. Los amplificadores están conectados en puente para permitir que la corriente fluya en cualquier sentido a pesar de la alimentación con tensión única.

El control de la etapa se ejerce por medio de una tensión entre ± 10 V aplicada entre el terminal de entrada y masa.

4.1.2. Etapa de acondicionamiento

La temperatura de la cara fría de la célula Peltier se mide con la ayuda de un integrado LM35, de National Semiconductor, capaz de medir temperaturas desde -55 °C hasta 150 °C. La medida se obtiene a través de una salida de baja impedancia cuya tensión en milivoltios es igual a la temperatura en °C multiplicada por diez. La señal obtenida por el sensor pasa luego por los tres bloques que constituyen la etapa de acondicionamiento.

El primer bloque cumple las funciones de amplificador de error y filtro paso-bajo de 1^{er} orden. Por medio de una resistencia ajustable multivuelta, es posible aplicar una señal de referencia en un rango equivalente a ± 110 °C. La salida del amplificador es de 100 mV/K y su frecuencia de corte es de 10 Hz. Se ha limitado la banda pasante para disminuir el nivel de ruido presente en la señal.

El segundo bloque es un amplificador de ganancia entre $\times 1$ y $\times 10$. A su salida puede obtenerse una señal de hasta 1 V/K.

El tercer bloque es un limitador. Posee dos rangos de salida que pueden seleccionarse con la ayuda de un puente situado sobre la tarjeta. El primer rango abarca ± 5 V y, el segundo, entre 0 V y 10 V.

Para la realización de la etapa se han empleado un amplificador operacional cuádruple LM324 y una referencia de precisión LM385-2.5, ambos de National Semiconductor, compensados en temperatura.

4.1.3. Observador

Para realizar el control por variables de estado es necesario inferir el valor de estas variables a través de variables accesibles del sistema. En este caso, las variables accesibles son la diferencia de potencial entre los extremos de la célula Peltier y la corriente que la atraviesa. Dadas las características de la Etapa de Potencia, la Peltier es una carga flotante y es necesario el uso de etapas diferenciales para realizar la medida de estas magnitudes.

Tanto para la medida de la diferencia de potencial, como para la de la corriente, se ha empleado un diseño con un amplificador de instrumentación de precisión en la sección de entrada, un INA114 de Burr-Brown, y un amplificador operacional de precisión en la sección de salida, un OP-177 de Analog Devices. Esta configuración permite obtener el rango en modo común y la ganancia necesarios. La tensión se mide directamente en los terminales de la célula Peltier y la corriente, indirectamente, a través de un *shunt* de 100 m Ω en serie con la célula. La ganancia de la sección de medida de tensión es de 2 V/V y la transresistencia de la sección de medida de la corriente es de 10 V/A.

La tarjeta del observador se conecta en serie entre la tarjeta de la etapa de potencia y la célula Peltier. Se alimenta con tensión simétrica de ± 12 V.

4.1.4. Etapa de aislamiento

No hay que olvidar que éste es un equipo de prácticas, y que va a ser manejado por personas que tienen una experiencia limitada en el uso de equipos electrónicos. Los elementos más caros de este sistema, también los más delicados, son la tarjeta de adquisición y el ordenador personal. Con el fin de protegerlos, se ha desarrollado una tarjeta que aísla galvánicamente estos elementos del resto del sistema. No es necesario conectar ninguna alimentación en el lado correspondiente al PC y la conexión con la tarjeta de adquisición se realiza por medio de un conector polarizado, con lo que se evitan los accidentes derivados de una conexión incorrecta.

El diseño se basa en un amplificador de aislamiento de Burr-Brown: el ISO124. Este integrado consta de dos secciones aisladas. En la sección de entrada se digitaliza la señal con una frecuencia de muestreo de 500 kHz.

Desde allí se transmite digitalmente, a través de una barrera capacitiva de 2 pF, a la sección de salida, donde se le restituye su carácter analógico.

La alimentación en el lado del PC se ha resuelto con una fuente aislada NMH1215D, de Newport Components. Esta fuente genera las tensiones simétricas necesarias a partir de la tensión de alimentación positiva del lado de la Peltier.

La tarjeta de aislamiento consta de seis entradas y dos salidas; estas últimas pueden combinarse en una única salida a través de un circuito restador. Se alimenta con tensión simétrica de ± 12 V.

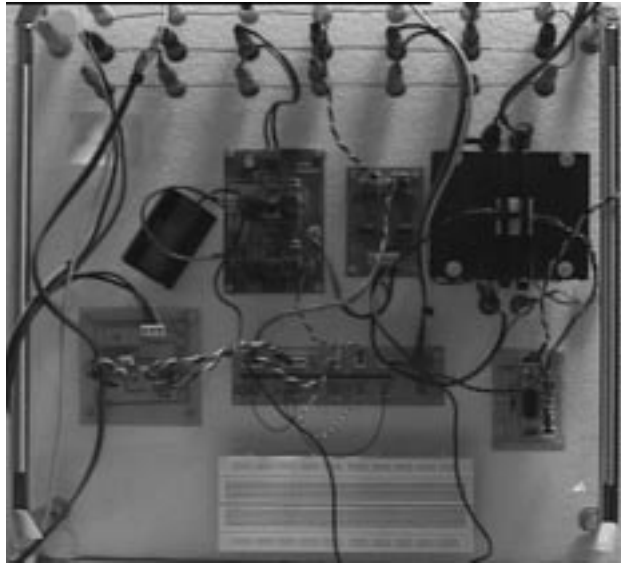


Fig. 4 - Montaje HW del equipo didáctico

4.2. Características del soporte lógico desarrollado

A propósito de poder mejorar el rendimiento del alumno y poder cubrir los aspectos del Control discreto e interacción con la simulación, se han diseñado un conjunto de aplicaciones sobre entorno *Windows NT*. Haciendo uso de la tarjeta de adquisición PCLAB812PG y del *software* desarrollado se permite monitorizar y controlar la maqueta de la célula Peltier. Tal y como fue comentado en el anterior apartado es posible muestrear la tensión y la corriente Peltier junto con la tensión de acondicionamiento. Por otro lado, empleando los convertidores digitales/analógicos de la PCLAB se pueden ejecutar algoritmos del control digital directo.

Otro de los objetivos marcados fue que el conjunto de piezas *software* deberían de mantener una filosofía de facilidad de comunicación con el MATLAB, y más concretamente, con los '*toolboxes*' de identificación de sistemas y de control.

Además, se han elaborado librerías estáticas de C++ para el control sencillo sobre la PCLAB, lo que permitirá emplearlas en las prácticas de Informática Industrial sobre el control de procesos en tiempo real.

Las características de las aplicaciones realizadas se podrían resumir en:

- Adquisición mono canal en DMA hasta con una frecuencia de muestreo de 30 kHz.
- FFT de la secuencia adquirida mediante DMA.

- Adquisición multicanal de hasta seis canales bajo petición, con un periodo de muestro mínimo de 10 ms.
- Identificación SISO (*Single Input Single Output*) y MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) de la célula Peltier.
- Monitorización de la evolución de la célula Peltier.
- Control en cadena abierta sobre la célula Peltier, pudiéndose generar una señal de entrada del tipo escalón.
- Control en cadena cerrada sobre la célula Peltier utilizando una $R(z)$ de orden 2.
- Control por realimentación de variable de estado

5. Función de transferencia y modelo de variable de estado del sistema de control de la temperatura fría.

Partiendo de las ecuaciones descritas en Ec.4-5 y teniendo en cuenta la estructura *hardware* diseñada, se tendrá que:

$$C_{THm} \frac{d\Delta T}{dt} + \frac{\Delta T}{R_{THm}} = \alpha_m \Delta T I - I^2 R_m$$

$$I = A_1 u_{CP}$$

$$u_{ACOND} = A_2 \Delta T$$

Ec. 6- Modelo de comportamiento dinámico del sistema de control de temperatura

Evidenciando la necesidad de aplicar un proceso de linealización; de forma que alrededor de un punto de reposo, el modelo del sistema quedará aplicando transformadas de Laplace:

$$G_1(s) = \frac{\Delta T(s)}{I(s)} = \frac{(\alpha_m [\Delta T]_0 - 2R_m [I]_0)}{\left(C_{THm} s + \left(\frac{1}{R_{THm}} + [\alpha_m I]_0 \right) \right)} = \frac{A_3}{1 + T_s s}$$

$$G_2(s) = \frac{I(s)}{u_{CP}(s)} = A_1$$

$$G_3(s) = \frac{u_{ACOND}(s)}{\Delta T(s)} = A_2$$

Ec. 7 - Linealización del sistema

Y cuyo diagrama de bloques estará definido por:

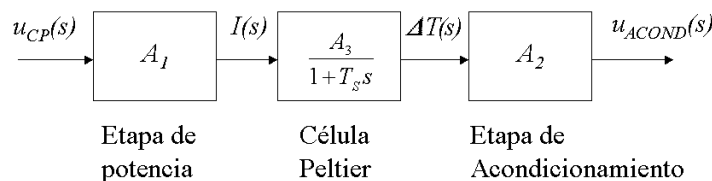


Fig. 5 - Diagrama de bloques mediante FDT del sistema de control de temperatura

Si se pretende tener un modelo basado en variables de estado, éste puede ser planteado de dimensión dos. Las variables de estado serían la diferencia de temperatura, ΔT , y la potencia eléctrica entregada a la célula, P_e . Experimentalmente se ha observado que el efecto Joule puede despreciarse y que la potencia instantánea entregada a la Peltier sigue un comportamiento dinámico de primer orden. El modelo propuesto será de la forma:

$$\begin{pmatrix} \frac{d\Delta T}{dt} \\ \frac{dP_e}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{R_{THm} C_{THm}} & \frac{1}{C_{THm}} \\ 0 & -\frac{1}{T_p} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T \\ P_e \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{K_p}{T_p} \end{pmatrix} u_{CP}$$

$$u_{ACOND} = (A_2 \quad 0) \begin{pmatrix} \Delta T \\ P_e \end{pmatrix}$$

Ec. 8 - Modelo de variable de estado

Este modelo ha sido verificado experimentalmente.

6. Experimentos del sistema aplicando la teoría clásica de Control

Son múltiples las prácticas que pueden ser realizadas con el equipo que se acaba de describir. Para comentar los más relevantes y siguiendo con la línea más habitual de desarrollo del temario de Control clásico, se tendrá:

6.1. Modelización

Con la primera práctica el alumno se presenta ante varios problemas: primero el reconocimiento de las diferentes etapas que caracterizan al sistema, en segundo lugar, ajustar los rangos dinámicos de las diferentes señales para un funcionamiento correcto del sistema, presentándoles el problema de no linealidades, y, por último, obtener las funciones de transferencia de cada una de las etapas. Para ello el alumno se apoyará de un lado con la instrumentación electrónica y de otro con los modelos matemáticos dados. Esta tarea experimental permitirá tratar con los símiles térmico-eléctrico, la linealización de las ecuaciones diferenciales y los métodos de mínimos cuadrados para la estimación de los parámetros característicos de la FDT del sistema.

6.2. Identificación SISO

Un modelo más exacto del conjunto puede ser definido mediante técnicas ARX[7]. Para ello se definirá una señal binaria aleatoria a través del *toolbox* de identificación de sistemas y posteriormente esta señal será la entrada a la maqueta Peltier. La señal de tensión de acondicionamiento será guardada con formato MATLAB. Con dicho experimento, el alumnos podrá abrir el GUI (*Graphical User Interface*) del anterior *toolbox* y determinar un modelo paramétrico que sea capaz de explicar el comportamiento de la célula[8]. Los conceptos de modelos ARX, correlación cruzada, muestras de entrenamiento y de test, se harán familiar en el alumno; aprendiendo una de las técnicas de identificación de sistemas más empleadas. El resultado es la obtención de una nueva FDT que esta vez será de segundo orden, permitiendo observar la mejora del modelo respecto a la práctica anterior.

6.3. Análisis temporal y Lugar de las Raíces

A partir del modelo conseguido anteriormente, correspondiente a un sistema sobreamortiguado, la implementación de un amplificador diferencial como amplificador de error, permitirá observar el comportamiento del conjunto ante cambios de la ganancia del amplificador. Éste será montado por el alumno en una *protoboard*, de manera que, dada la facilidad para cambiar el valor de las resistencias, podrá variar la

ganancia estática de la cadena abierta. El alumno comparará entonces la respuesta de la simulación con los datos obtenidos experimentalmente, profundizando en las técnicas del Lugar de Raíces.

6.4. Diseño de reguladores continuos

Por la misma razón que fue abordada en la anterior práctica, resulta sencillo la modificación del lugar de raíces del sistema mediante la implementación de nuevo *hardware*. Utilizando la *protoboard* se pueden montar nuevos reguladores analógicos. Habiendo dos intereses, de un lado el refuerzo en las técnicas del lugar de raíces al ubicar nuevos polos y ceros en la cadena abierta y de otro, que el alumno asocie los circuitos de la Electrónica Industrial, como son las estructuras físicas de los reguladores analógicos PD, PI y PID, en los diagramas de bloques de los reguladores puestos en cascada.

6.5. Sistemas muestreados y reguladores discretos

A esta altura del curso, a los alumnos les resulta familiar la arquitectura de los sistemas muestreados, pues han estado empleando en las anteriores prácticas las prestaciones del software desarrollado. La utilización del PC como osciloscopio digital le habrá permitido comparar la naturaleza distinta entre las señales analógicas y las secuencias representadas en el programa. Además, las prácticas en cadena abierta con la célula Peltier les mostraron la posibilidad de actuar sobre el sistema. Por tanto, ya les resultará sencillo entender el sentido de los reguladores discretos. Se empieza con la discretización de los anteriores reguladores analógicos mediante las transformadas bilineales y seguidamente se emplean las técnicas de Síntesis Directa. El programa tiene la posibilidad de implementar un regulador de orden 2.

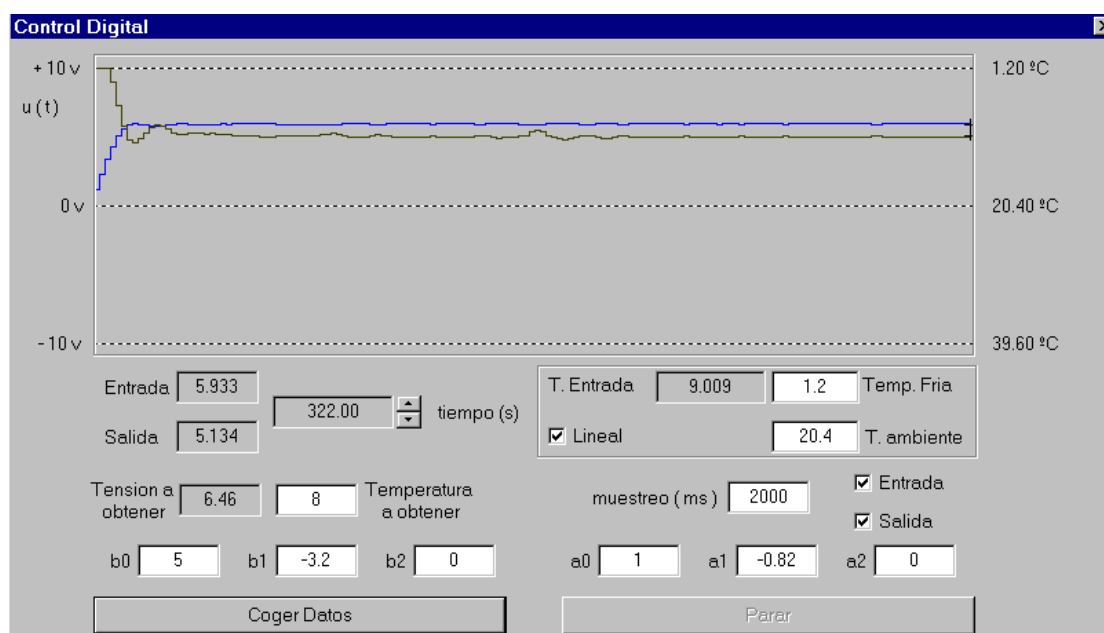


Fig. 6 - Cuadro de diálogo del control digital sobre la Peltier

7. Experimentos del sistema aplicando la teoría moderna de Control

En primer lugar se tiene un modelo de variable de estado que ha sido verificado experimentalmente, cuyas expresiones fueron dadas por la Ec. 8, y que servirán de punto de partida. En estos momentos, se tienen preparadas dos prácticas: Identificación del modelo de variable de estado y control por realimentación de estado.

7.1. Identificación de los parámetros del modelo

Para poder conocer los parámetros del modelo se han empleado las técnicas de estimación de parámetros cruzados[9]. El paquete elaborado permite registrar implícitamente las dos variables de estado, la potencia eléctrica dada a la Peltier y la temperatura de la cara fría. En ese sentido, se justifica la construcción del observador, no sólo para medir la tensión y corriente de la célula en las anteriores prácticas, sino también para poder hacer control moderno. Esta vez, ante una excitación binaria aleatoria se guardará las variables de estado, para luego estimarla mediante las funciones realizadas a propósito en el MATLAB.

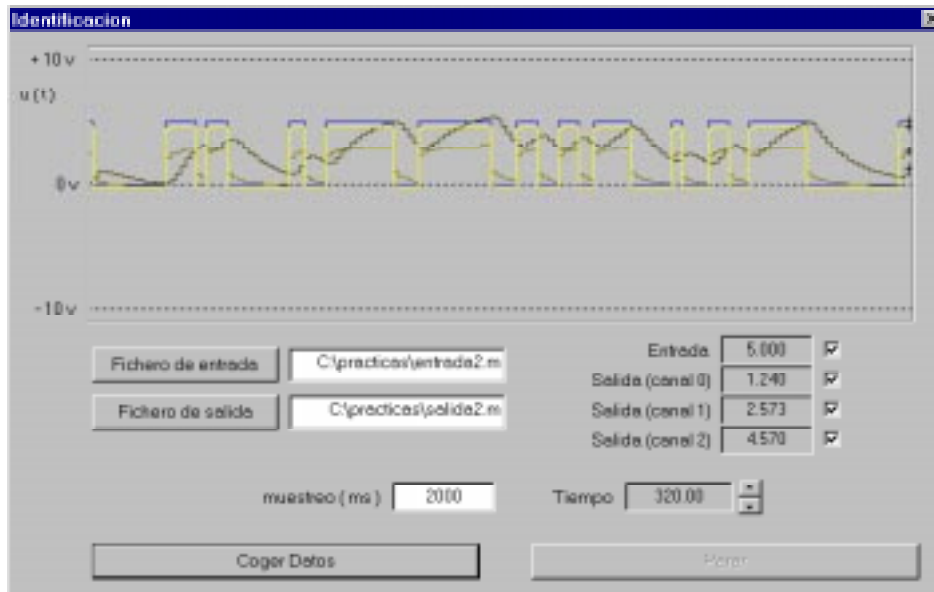


Fig. 7 - Identificación MIMO de la célula Peltier

7.2. Control por realimentación de estado

La posibilidad de tener accesible las variables de estado permite presentar el control por la realimentación por variable de estado. A tal efecto, el alumno podrá variar las dos ganancias estáticas asociadas a las variables de estado. Una vez presentada la formulación de Ackerman, se observará que la ubicación de los polos resultará válido en el sentido de que el modelo del sistema siga siendo válido. En teoría, se pueden colocar los polos en cualquier lugar; en la práctica, esto resulta falso, ya que aparecen las no linealidades a poco que se exijan mejoras sustanciales en las prestaciones dinámicas del sistema.

8. Conclusiones y futuros trabajos

Se ha presentado una maqueta didáctica para el control de temperatura de las células Peltier. Éstas se presentan ideales para el trabajo de laboratorio, pues tienen un comportamiento relativamente sencillo de modelar e implican la interacción de los saberes de la Automática, la Electrónica y la Informática Industrial. Además, es representativa de los procesos típicos industriales y permite reforzar de forma secundaria los conceptos de Termoelectricidad y de la Transmisión de Calor.

El artículo presenta un novedoso modelo de variable de estado del comportamiento de temperatura de la cara fría de la célula Peltier, a parte de mostrar los modelos más utilizados para explicar su dinámica. A partir de esta concepción, se han diseñado las estructura *hardware* y *software* necesarias. El conjunto total es capaz de cubrir, en combinación con la simulación, las prácticas fundamentales de la teoría clásica de Control y de introducción a la teoría moderna.

De cara al futuro se seguirá trabajando en la elaboración de nuevas prácticas de Control moderno, basadas en los filtros de Kalman y en el control óptimo. Desde el punto de vista electrónico, se está trabajando en el diseño de una fuente conmutada a cuatro cuadrantes, capaz de aprovechar también el efecto Seebeck, que permita emplear la Peltier también como generador termoeléctrico.

9. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad Politécnica de Madrid dentro de la convocatoria de *Proyectos de Innovación para la Mejora de la Calidad de la Enseñanza*.

10. Referencias bibliográficas

- [1] García, E., Valera, A., “Sistema de control de temperatura de una célula Peltier”, Jornadas de Automática, 1998, pp. 43-48.
- [2] Germán, “Introducción a la termoelectricidad ”, <http://inopia.upc.es/AIT/german/libro/>, 2000
- [3] Sears, F., Zemansky, M.W., “Física General”, pp 573-580, Aguilar, 1981.
- [4] Domínguez, M., “Basic Ideas on Peltier Effect”, Rev. Termoelectricidad, Vol 1, Num. 3, pp 23-29, 1994.
- [5]Chávez, J.A., Ortega, J.A., Turó, Salazar, J., García, M.J., “Circuito eléctrico equivalente de una célula termoeléctrica Peltier”, Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación, Pamplona 15-18, septiembre 1998.
- [6] MELCOR, “Device Performance Formulae”, <http://www.melcor.com/formula.htm>,2000
- [7] Ollero, A., “Control por computador. Descripción interna y diseño óptimo”, Marcombo, pp 227-270, 1991.
- [8] Ljung, L., “System Identification Toolbox”, The MathWorks, Inc., 1998.
- [9] Ljung, L. Glad, T., “Modeling of Dinamic Systems”, Pretince Hall, 1994.