

Rediseño de una plataforma de control de temperatura de bajo coste para la educación en ingeniería de control

Javier Rico-Azagra, Montserrat Gil-Martínez
{javier.rico, montse.gil}@unirioja.es

Grupo de Investigación en Ingeniería de Control, Universidad de La Rioja

Resumen

Se presenta el diseño y fabricación de una versión mejorada de la plataforma docente de bajo coste Temperature Control Laboratory (TCLab), para la instrucción y el auto-aprendizaje del control automático. Un menor coste de fabricación-adquisición, un menor tamaño y volumen, y las mejoras en el interface de conexión con el PC, facilitan el uso y la portabilidad del dispositivo. La mejora lograda en el comportamiento dinámico resulta especialmente útil en sistemas térmicos para acortar el tiempo de los experimentos. El nuevo desarrollo forma parte de un proyecto de innovación docente de la Universidad de La Rioja, y se distribuye de forma libre para que pueda ser fabricado y modificado por cualquier usuario.

Palabras clave: Educación, Control de procesos, Bajo coste, Práctica de control.

1. Introducción

En la docencia relacionada con el control automático existe una brecha entre la teoría y la práctica [1], que dificulta la comprensión y asimilación de conceptos. Las asignaturas de esta rama del conocimiento estudian mediante formalismos matemáticos el comportamiento dinámico de diferentes sistemas físicos, independientemente de la tecnología concreta empleada en los mismos. Esta abstracción reporta indudables beneficios para los ingenieros de control, sin embargo, supone un problema en las etapas formativas del estudiante, advirtiéndose carencias para después trasladar los conceptos estudiados a un sistema real concreto.

Para paliar estos inconvenientes, tradicionalmente se han empleado maquetas, que representan procesos reales a escala de laboratorio. Sobre estos dispositivos se desarrollan prácticas que mejoran la asimilación de conocimientos y favorecen la adquisición de competencias [5, 12]. Sin embargo, las maquetas comerciales presentan un elevado coste económico, sobre todo en las soluciones *plug and play* [11]. Además, la crisis sanitaria actual ha puesto en evidencia la dependencia del laboratorio

en el que se encuentran instalados los equipos, generando numerosos problemas cuando la docencia debe impartirse de forma no presencial o cuando el aforo de los laboratorios debe reducirse.

Una alternativa es su incorporación en laboratorios remotos [14] o su sustitución por laboratorios virtuales [7, 2]. En este último caso, las estrategias del control se implementan sobre un *software* que representa fielmente el comportamiento del proceso, evitando muchos de los problemas citados. Sin embargo, esta solución dista mucho de ser ideal. La motivación del alumno disminuye, dado que sigue sin trasladar los conceptos estudiados a un sistema real. Además, un simulador impide adquirir competencias relacionadas con la adquisición y el procesamiento de señales, fundamentales en la profesión del ingeniero de control.

Por todos estos motivos, otra tendencia actual son las soluciones de bajo coste y tamaño reducido, que el estudiante pueda transportar y emplear en diferentes lugares [13, 4, 8]. Un ejemplo, es el dispositivo TCLab (Temperature Control Lab) [6]. Este persigue controlar temperaturas, enfocando el problema como simple-entrada simple salida (SISO) o como múltiple-entrada múltiple-salida (MIMO), utilizando un dispositivo de tamaño y coste reducidos (Figura 1), que ha dado lugar a un gran número de recursos docentes para la instrucción en control automático [9, 10, 3].

En este marco, el presente trabajo presenta un rediseño de la plataforma TCLab, adaptándola a las necesidades de las asignaturas impartidas en la Universidad de La Rioja y que posteriormente se pretende utilizar en materias de control impartidas por la Universidad de Almería (Grupo de Automática, Robótica y Mecatrónica). En concreto, el nuevo diseño presenta un menor tamaño, un menor coste de adquisición y un sistema diferente de conexionado con el PC. Además de las mejoras anteriores, cambios en la disposición de los sensores y en la potencia disipada en los transistores permiten obtener dinámicas más rápidas, que facilitan el desarrollo de las prácticas de laboratorio.

La exposición del trabajo se organiza en tres secciones. En la segunda sección se analizan los pro-

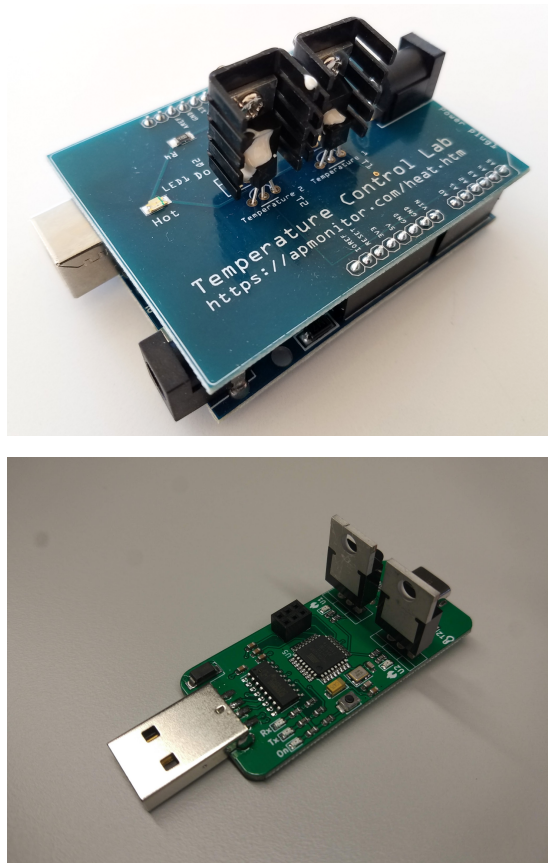


Figura 1: (arriba) Dispositivo TCLab, (abajo) Prototipo presentado en el trabajo.

blemas del dispositivo TCLab y se muestra el diseño del nuevo dispositivo. La tercera sección muestra la fabricación de los primeros prototipos ensamblados.

2. Diseño del dispositivo

2.1. Análisis del dispositivo TCLab

Como muestra la Figura 1, la plataforma TCLab está compuesta por una placa de desarrollo Arduino[®] Leonardo y un *shield* en el que se encuentran los componentes sobre los que se realiza el control. En concreto, este *shield* incorpora dos transistores NPN dotados de unos disipadores de calor con aletas y dos sensores de temperatura TMP36. Además, el *shield* incorpora un indicador LED que advierte al usuario si la temperatura de los transistores es elevada.

A primera vista puede comprobarse como la arquitectura empleada para desarrollar el sistema embebido no es eficiente, dado que el *shield* incorpora un escaso número de componentes y la placa de desarrollo Arduino[®] Leonardo se encuentra sobredimensionada para el número de entradas/salidas

que intervienen en el control¹. Este tipo de montaje incrementa el tamaño y el coste del desarrollo de forma innecesaria, dado que deben adquirirse dos placas de circuito impreso para construir un dispositivo.

Otro punto de mejora se observa en el sistema de conexión del dispositivo. Para ejecutar un ensayo, la plataforma debe conectarse de forma simultánea al ordenador (PC) y a la fuente de alimentación que suministra la energía a los transistores. Para realizar las conexiones se emplea un cable USB que conecta el dispositivo al PC y un cable con conector *Jack* para la fuente de energía. Este montaje incrementa de forma innecesaria los cables a emplear, incrementado los costes, el espacio necesario para ubicar la plataforma y las probabilidades de fallo en los diferentes cables.

Por último, los sensores se encuentran ligeramente separados de los transistores, y orientados de forma que la cara plana de los sensores no está enfrentada con los transistores. Esta disposición dificulta la transferencia de calor entre los dos componentes, que en este caso se realiza principalmente por conducción a través de la resina epoxi, dando lugar a un comportamiento dinámico que en la práctica se traduce en un retardo en la medida.

2.2. Diseño del *hardware* del dispositivo

Se plantea como objetivo el diseño de un nuevo dispositivo que implemente el mismo tipo de proceso a controlar, sea compatible con el material didáctico actual, y solvante algunas de las desventajas de la plataforma TCLab descritas en la Sección 2.1.

Para solucionar el primer problema antes descrito, se opta por integrar el nuevo diseño en una única PCB, evitando el empleo de un *shield* externo. Esta nueva arquitectura permite reducir el tamaño del dispositivo, pasando de unas dimensiones de 70×52 mm a sólo 25×52 mm. La reducción del tamaño inicial en un tercio tiene varias ventajas asociadas: un menor coste de fabricación y un menor consumo de materiales, lo que reporta un diseño más ecológico; y finalmente, resulta un dispositivo de mas fácil transporte y almacenaje.

Después de analizar diferentes opciones, se ha realizado un diseño *ad-hoc* basado en el microcontrolador ATmega 328p-AU[®]. Este presenta las mismas características técnicas que el microcontrolador ATmega32u4[®], empleado en la placa de prototipos Arduino[®] Leonardo. Por lo tanto, las prestaciones y compatibilidad entre los dos dis-

¹Téngase en cuenta que la plataforma de desarrollo Arduino[®] Leonardo incorpora componentes que no se emplean en esta aplicación.

positivos se mantiene. La diferencia principal entre ambos radica en que el ATmega 32u4[®] incorpora un enlace USB nativo. Esta desventaja se soluciona incorporando en el diseño un driver CH340-C para hacer de enlace entre el puerto USB y el micro-controlador.

Además, se incorpora en el diseño un conector macho de tipo USB A, que permite acoplar el dispositivo directamente al PC, eliminando la necesidad (y el coste) de un cable adicional; la conexión directa ha sido posible gracias a la reducción de volumen y peso. Como en el dispositivo TCLab, este enlace USB será empleado para alimentar la lógica de control y para realizar la transferencia de datos. Como innovación, los transistores pueden alimentarse desde el puerto USB A, aunque no se recomienda hacerlo por esta vía, excepto para pequeñas pruebas, ya que los puertos del PC no ofrecen la corriente de salida suficiente, reduciéndose la capacidad de generación de calor de los transistores y, además, se comprueba un aumento del ruido en la medida de los sensores.

Para la alimentación se ha optado por un puerto USB C hembra, en lugar de un puerto *Jack*, con el fin de que los usuarios puedan utilizar los cables y cargadores que hoy día son los más habituales en la electrónica de consumo (fundamentalmente en los *smartphone*).

Para mejorar la transferencia de calor entre los transistores y los sensores de temperatura, se han orientado estos últimos de forma que su cara plana incida directamente sobre el transistor. Con esta medida se consigue un mejor contacto térmico, que en la práctica se traduce en una reducción del tiempo de retardo para apreciar un crecimiento de la temperatura; TCLab presenta retardos de 15-20 segundos que se reducen a 5-10 segundos en el nuevo dispositivo.

Por último, se ha optado por incrementar el número de indicadores luminosos del dispositivo. Además de los indicadores propios que muestran el estado *On* y de la comunicación (*Rx*, *Tx*), se han incluido dos indicadores LED para vigilar si los transistores superan una cierta temperatura y otros dos indicadores LED cuya intensidad luminosa es proporcional a la acción de control inyectada en los transistores.

Teniendo en cuenta todas las premisas anteriores, el esquema eléctrico del dispositivo se ilustra en la Figura 2.

2.3. Ajuste de la potencia disipada en los transistores

El ajuste de la potencia disipada en los transistores determina en gran medida el comportamiento

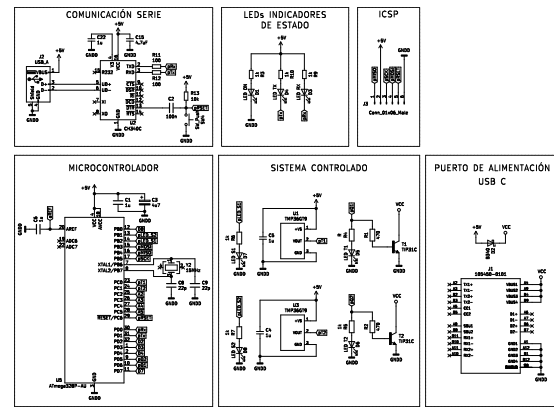


Figura 2: Esquema eléctrico del dispositivo desarrollado.

del sistema. Por lo tanto, su elección es fundamental para una respuesta dinámica adecuada.

Los transistores empleados en el sistema de control corresponden con el modelo TIP31CG, comercializado por On Semiconductor[®]. Dado que estos se encuentran conectados en modo emisor común, la potencia disipada por cada transistor esta determinada por

$$Q_{i=1,2}(t) = \frac{u_{i=1,2}(t)}{100R_b} \times 5 \times (1 + h_{fe}), \quad (1)$$

siendo $Q_{i=1,2}$ la potencia en vatios disipada por cada transistor, $u_{i=1,2}$ las acciones de control en porcentaje y R_b la resistencia (ohmios) de base empleada para excitar los transistores (R1 y R2 en el esquema de la Figura 2), y h_{fe} es la ganancia de corriente directa del transistor.

La ecuación (1) muestra como la potencia disipada por los transistores depende directamente de la resistencia de base. Por lo tanto, empleando una resistencia de base menor puede lograrse que el transistor disipe más potencia, y finalmente alcance una mayor temperatura.

Para determinar cual es el valor más adecuado, se realiza el experimento de la Figura 3. En el puede observarse el comportamiento que presenta la plataforma TCLab y el sistema desarrollado, empleando en este diferentes valores de resistencia de base: 470Ω, 1kΩ, 1k5Ω y 1k8Ω. A la vista de los resultados, con $R_b=470\Omega$ se alcanzan valores de temperatura cercanos a los 100 °C si u_1 se mantiene en el 80 %, superándose este valor de temperatura cuando la acción de control toma el 100 %. Estas temperaturas pueden resultar peligrosas para la integridad del dispositivo y pueden causar lesiones a los usuarios o el entorno. Desde este punto de vista, parece adecuado optar por resistencias a partir de 1kΩ y hasta 1k8Ω, valor con el que se igualarían las temperaturas del dispositivo TCLab. Sin embargo, debe tenerse en cuenta

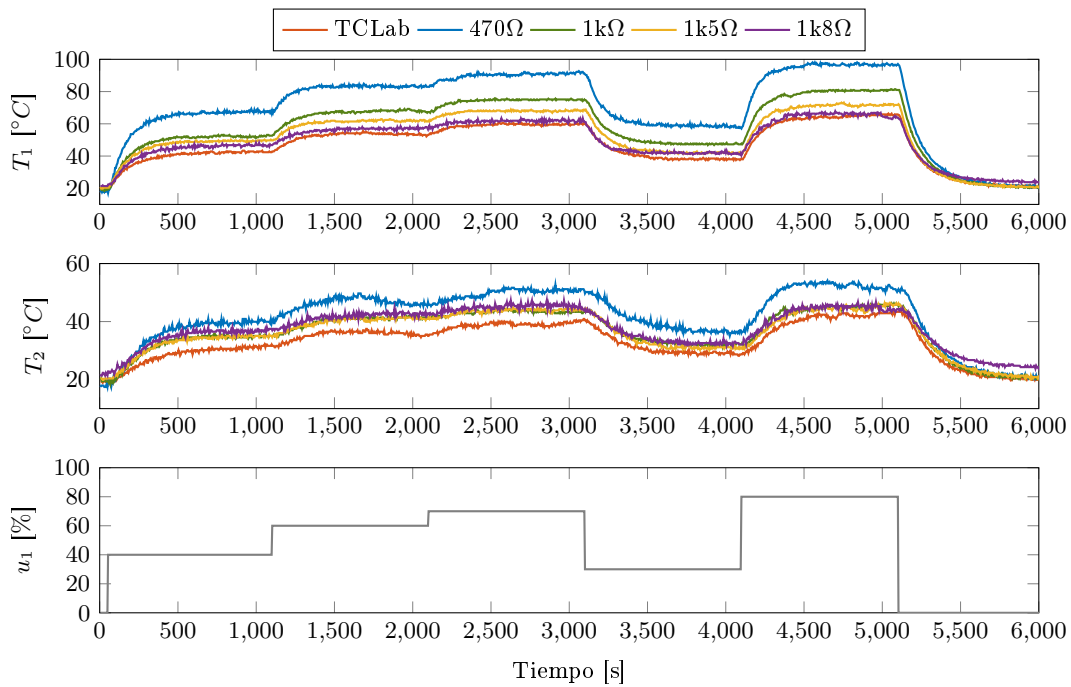


Figura 3: Comparativa para distintas resistencias de base y acciones de control.

que la ganancia (salida/entrada) del sistema condicionará el control automático de temperatura, como se justifica a continuación.

Si se analizan las ganancias de régimen permanente de la función de transferencia T_1/u_1 en el penúltimo tramo, puede comprobarse como esta aumenta cuando la resistencia decrece. En concreto, se obtienen ganancias ($^{\circ}\text{C}/\%$) de 0.586 para $1\text{k}\Omega$, de 0.596 par $1\text{k}5\Omega$ y de 0.665 para $1\text{k}8\Omega$. Con el fin de adoptar una solución de compromiso entre que la temperatura del dispositivo no alcance valores perniciosos para los materiales y a la vez conseguir la mayor ganancia posible, debe seleccionarse un valor comprendido entre $1\text{k}\Omega$ y $1\text{k}5\Omega$. La Figura 4 muestra cómo con estos valores las temperaturas que se alcanzan, si se mantiene la acción de control u_1 al 100 %, no superan los 100°C .

De acuerdo a toda la argumentación anterior, la elección de la resistencia de $1\text{k}5\Omega$ es la más adecuada bajo el criterio de evitar que se alcancen temperaturas por encima de los 85°C y manteniendo la ganancia del sistema original de valor aproximado $0.6 (^{\circ}\text{C}/\%)$.

Por otro lado, una mayor ganancia del sistema a controlar permitirá alcanzar las temperaturas objetivo en tiempos más pequeños. Para validar esta idea, se realiza un experimento de control en lazo cerrado sobre la plataforma TCLab y sobre el nuevo dispositivo con una resistencia de base de 470Ω . Para cerrar el lazo de control se emplea el

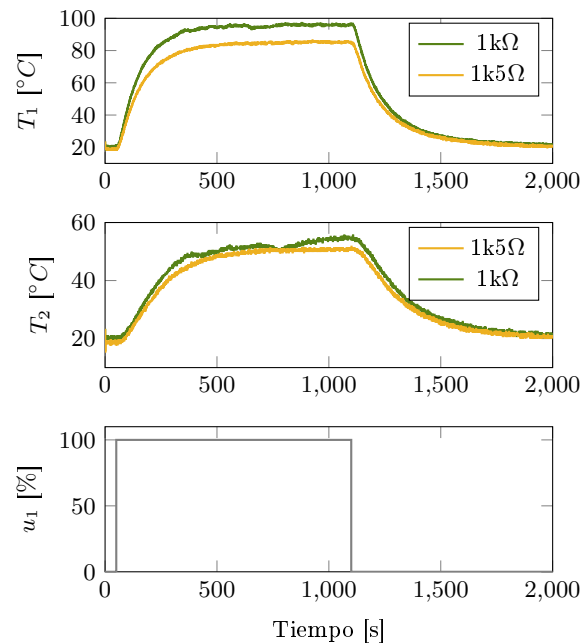


Figura 4: Temperaturas máximas obtenidas empleando resistencias de base $1\text{k}\Omega$ y $1\text{k}5\Omega$.

controlador PI

$$c(s) = \frac{1}{40} \times \frac{1 + 91s}{s}, \quad (2)$$

provisto de un mecanismo anti-wind-up integral de tipo *clamping*. Los resultados mostrados en la Figura 5 verifican la conclusión anterior. En concreto, y pese a que se aprovecha un 10 % menos

el rango de control máximo, se alcanza por primera vez la temperatura de referencia 122 segundos antes con el nuevo desarrollo, lo que hace que el tiempo de subida sea 0.4 veces inferior. Esta reducción de tiempo permite realizar un número mayor de ensayos en cada práctica de laboratorio, aspecto fundamental para un adecuado desarrollo de las sesiones prácticas.

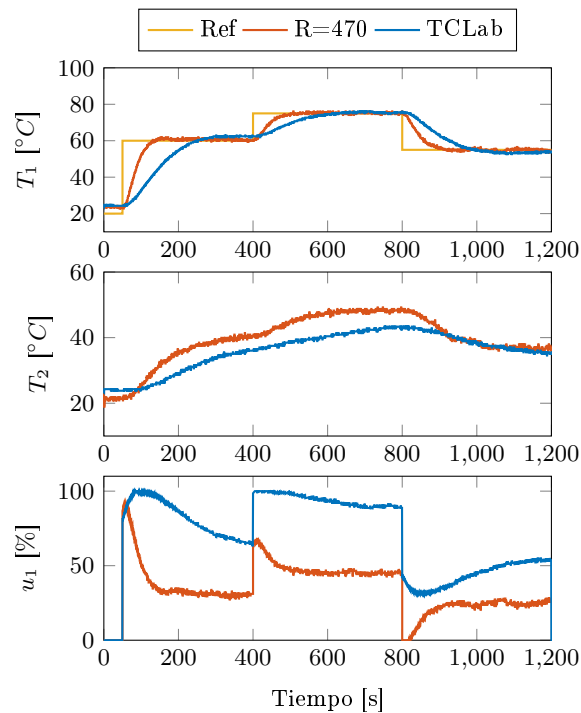


Figura 5: Experimento de control con controlador PI. Comparativa con resistencia de 470kΩ vs TCLab.

Teniendo en cuenta los estudios anteriores, la decisión final de diseño debe valorar el empleo de resistencias de 1k5Ω o 470Ω como resistencias de base en los transistores:

- La resistencia de 1k5Ω garantiza que para actuaciones mantenidas en sus valores máximos (100%), los elementos calefactores no sobrepasan los 85 grados Celsius. La contrapartida es que la ganancia del sistema controlado se reduce a la mitad y el tiempo mínimo de control es el doble o mayor, en comparación con el obtenido con resistencias de 470Ω. En comparación con el dispositivo TCLab, empleando un diseño de control adecuado, y haciendo uso de todo el rango de control (100%), se necesitan 200 segundos para alcanzar por primera vez la temperatura de referencia, y más de 600 segundos para observar el régimen permanente.
- La resistencia de 470Ω aumenta considerable-

mente la ganancia del sistema controlado, lo que permite reducir el tiempo de control a la mitad. Con un diseño de control adecuado, y haciendo uso de un 90% del rango de control, se necesitan 90 segundos para alcanzar por primera vez la temperatura de referencia, y en 200 segundos es posible visualizar el régimen permanente. Este es un aspecto muy valorable a la hora de realizar prácticas de laboratorio, en las que el tiempo es un recurso muy valioso. La contrapartida a este beneficio es que se alcanzan temperaturas perniciosas (por encima de los 100 grados Celsius) si la actuación se mantiene en su valor máximo.

Para compaginar seguridad y rapidez, se puede optar por el dispositivo *hardware* más agresivo ($R_b=470\Omega$) incorporando una limitación *software* tal que cuando la temperatura supera un valor máximo, por ejemplo, 80°C la señal de control (ciclo de trabajo del transistor) bascula al 0%. Para asegurar que el usuario no manipule de forma inconveniente este valor (y evitar responsabilidades), las funciones de control para el micro-controlador, libres y accesibles en la versión TCLab, son encriptadas en formato *p-code*. La Figura 6 muestra un experimento donde se prueba la efectividad de esta restricción. En este caso se ha limitado la temperatura máxima a 50 °C.

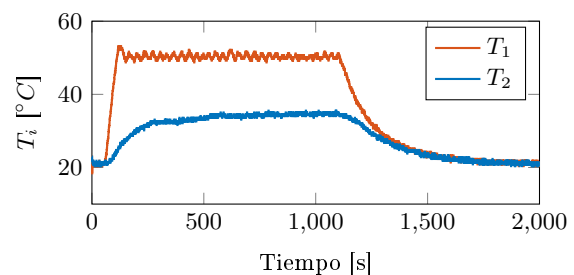


Figura 6: Resultados experimentales con limitación *software* de la temperatura.

3. Fabricación de los prototipos

Una vez validado el diseño del dispositivo, se inicia el proceso de fabricación. En esta ocasión se ha desarrollado la placa PCB (*Printed Circuit Board*) empleando *KiCAD*[®], *software* gratuito que se adapta perfectamente a las especificaciones del diseño.

Para reducir el tamaño del dispositivo se ha optado por emplear principalmente componentes discretos de tamaño 0603, con un largo de $1,55 \pm 0,05$ mm y ancho de $0,85 \pm 0,05$ mm. Este tamaño es el más pequeño que permite un ensamblado de componentes de forma manual sin la necesidad de

adquirir equipamiento específico. El diseño final del dispositivo se muestra en la Figura 7, donde puede observarse en la parte superior el ruteado de las pistas y en la parte inferior el montaje 3D del dispositivo.

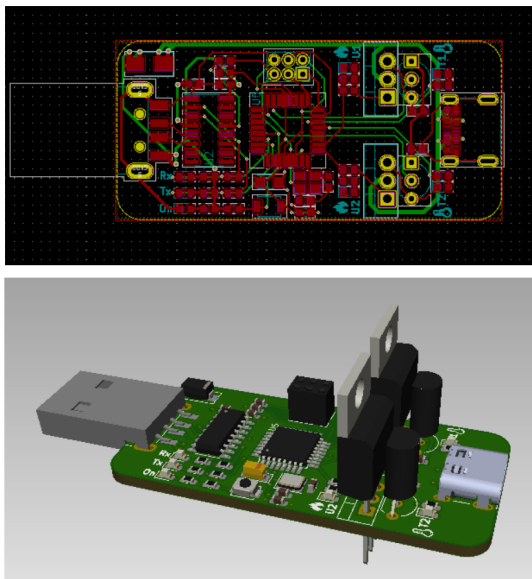


Figura 7: Diseño final del dispositivo.

Las primeras treinta unidades del dispositivo se han ensamblado manualmente en los laboratorios de la Universidad de La Rioja. Para abaratar costes y simplificar el proceso de fabricación de los prototipos, se ha optado por fabricar las placa de circuito impreso panelizadas en una matriz 2×4, tal como se observa en la Figura 8.

Para el soldado de los componentes de montaje superficial se emplea un procedimiento manual que consiste en aplicar estaño en pasta mediante un *stencil*². Posteriormente, los componentes se sitúan en su posición de forma manual y se hornean siguiendo un perfil de temperaturas definido por el fabricante del estaño para que este se funda y los componentes queden adheridos en la posición adecuada.

Una vez finalizado el procedimiento anterior, se sueldan manualmente los componentes THT (*Through-Hole Technology*), en este caso los transistores, los sensores de temperatura, el bornero del puerto ICSP y el conector USB A.

Por último, para que los dispositivos sean funcionales debe programarse en el micro-controlador el *bootloader* empleado por el ecosistema Arduino®. Para realizar esta tarea se emplea una placa de prototipos Arduino® que se conecta al puerto

²Lamina de acero con perforaciones para depositar el estaño en los puntos adecuados. Ver la imagen de la esquina superior izquierda de la Figura 8.

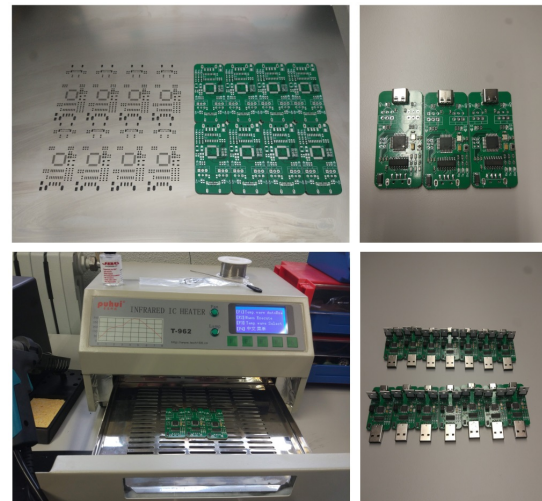


Figura 8: Imágenes obtenidas durante el proceso de ensamblado de los prototipos.

ICSP del dispositivo. Este proceso de programación se realiza en pocos segundos.

Para mejorar el proceso de fabricación se están desarrollando los archivos necesarios para el montaje automatizado de los componentes SMT (*Surface-Mount Technology*). Estos ficheros, junto con el resto de materiales del proyecto se harán públicos próximamente empleando un repositorio en la plataforma GitHub.

Agradecimientos

Los autores agradecen la ayuda de la Universidad de La Rioja a través de la Ayuda para realización de Proyectos de Innovación Docente PID48.

English summary

Redesign of a low-cost temperature control platform for control engineering education

Abstract

The work presents the design and manufacture of an update of the low-cost teaching platform Temperature Control Lab (TCLab) for self-learning and instruction on automatic control. A lower acquisition cost, smaller size, and improvements in the interface of connection with the PC facilitate the use and portability of the device. Beyond that, an improved dynamic behaviour is especially useful in thermal systems to shorten the time of the experi-

ments. The new development is part of a teaching innovation project at the University of La Rioja, and is freely distributed so that it can be manufactured and modified by any user.

Keywords: Education, Process Control, Low-cost, Testbed

Referencias

- [1] B.W. Bequette. Process control practice and education: Past, present and future. *Computers and Chemical Engineering*, 128:538–556, 2019.
- [2] J. Chacón, M. Guinaldo, J. Sánchez, and S. Dormido. A new generation of online laboratories for teaching automatic control. volume 48, pages 140–145, 2015.
- [3] P.B. de Moura Oliveira, J.D. Hedengren, and J. Boaventura-Cunha. Bridging theory to practice: Feedforward and cascade control with tclab arduino kit. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 695 LNEE:23–32, 2021.
- [4] Tomas Docekal and Matej Golembiovsky. Low cost laboratory plant for control system education. *IFAC-PapersOnLine*, 51(6):289–294, 2018. 15th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems PDeS 2018.
- [5] M. Gil-Martínez and J. Rico. A course on MIMO time delay process control from practice. In *2009 IEEE Conference on Emerging Technologies Factory Automation*, pages 1–8, 2009.
- [6] J.D. Hedengren. Temperature control lab kit. <http://apmonitor.com/heat.html>, 2020. Visitado 25.06.2021.
- [7] Ruben Heradio, Luis de la Torre, and Sebastian Dormido. Virtual and remote labs in control education: A survey. *Annual Reviews in Control*, 42:1–10, 2016.
- [8] E. Lerma, R. Costa-Castelló, R. Griñó, and C. Sanchis. Duino-based learning (dbl) in control engineering courses. volume 2019-September, pages 798–803, 2019.
- [9] Paulo Moura Oliveira and John D. Hedengren. An apmonitor temperature lab pid control experiment for undergraduate students. In *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pages 790–797, 2019.
- [10] Junho Park, R. Abraham Martin, Jeffrey D. Kelly, and John D. Hedengren. Benchmark temperature microcontroller for process dynamics and control. *Computers & Chemical Engineering*, 135:106736, 2020.
- [11] Quanser. Control systems. <https://www.quanser.com/solution/control-systems/>, 2020. Visitado 25.06.2021.
- [12] J.A. Rossiter, B. Pasik-Duncan, S. Dormido, L. Vlacic, B. Jones, and R. Murray. A survey of good practice in control education. *European Journal of Engineering Education*, 43(6):801–823, 2018.
- [13] J.A. Rossiter, S.A. Pope, B.L. Jones, and J.D. Hedengren. Evaluation and demonstration of take home laboratory kit. volume 52, pages 68–73, 2019.
- [14] Unilabs. University network of interactive laboratories. <https://unilabs.dia.uned.es/>, 2021. Visitado 25.06.2021.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).