

Jornadas de Automática

Nueva plataforma de control de temperatura de bajo coste para la educación en ingeniería de control

Rico-Azagra, J.^{a,*}, Gil-Martínez, M.^a, Nájera, S.^a

^aGrupo de Ingeniería de Control, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de la Rioja, Edificio Departamental - C/San José de Calasanz, 31, 26004, Logroño, España.

To cite this article: Rico-Azagra, J., Gil-Martínez, M., Nájera, S. 2024. New low-cost temperature control platform for control engineering education.

Jornadas de Automática, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10931>

Resumen

La formación en ingeniería de control precisa de prácticas de laboratorio, donde el uso de dispositivos miniaturizados portables favorece el aprendizaje autónomo y remoto a un bajo coste. Así, se presenta una versión mejorada de la plataforma educativa Temperature Control Lab. Modificándose los transistores de potencia, se prescinde del adaptador de alimentación externa y basta conectar el dispositivo directamente al puerto USB A del ordenador. Además, la reducción de masa del elemento de potencia rebaja a la mitad la constante de tiempo del sistema térmico, permitiendo una experimentación más ágil tanto para prácticas de identificación como de control realimentado. En este campo, el cambio a tecnología PNP de los transistores permite lazos anidados de corriente. Por último, se incorpora una referencia de tensión que reduce en un noventa por ciento el ruido de medida proveniente de la alimentación. El resultado final implica un importante abaratamiento de costes, simplicidad de fabricación, e incrementar la portabilidad y flexibilidad de uso del dispositivo.

Palabras clave: Educación en control con equipamiento de laboratorio, Control de procesos, Control realimentado

New low-cost temperature control platform for control engineering education

Abstract

Training in control engineering requires laboratory practice, where the use of portable, pocket-sized equipment favours autonomous and remote learning at low cost. In this context, an improved version of the Temperature Control Lab is presented. By modifying the power transistors, the charger is no longer required and the unit is simply connected directly to the USB A port of the computer. In addition, the reduced mass of the power element halves the time constant of the thermal system, allowing faster experiments for both identification and feedback control exercises. In this area, the switch to PNP transistor technology allows nested current loops. Finally, a voltage reference is incorporated to reduce the measurement noise from the power supply by ninety percent. The end result is significant cost savings, ease of manufacture and increased portability and flexibility of use.

Keywords: Control education using laboratory equipment, Process control, Output feedback control

1. Introducción

Los nuevos retos sociales y los avances tecnológicos plantean nuevas reflexiones sobre la enseñanza-aprendizaje del control automático (Rossiter et al., 2023). Surge la necesidad de adaptar el currículo, no solo a las nuevas demandas profesionales, sino también conforme a las nuevas habilidades digi-

tales de nuestros estudiantes. En la educación en ingeniería es importante proporcionar no sólo una sólida base teórica, sino también práctica (Bequette, 2019), que además puede contribuir a comprender conceptos complejos como los relacionados con el control automático (Rossiter et al., 2018). Es conveniente seleccionar aplicaciones motivadoras o hacer uso de

herramientas computacionales como MATLAB[®], que ofrecen un amplio catálogo de aplicaciones ejemplo, o utilidades de conectividad con hardware externo.

Algunos obstáculos para la inclusión de hardware en el currículo de ingeniería es el consumo de tiempo y espacio, así como el elevado coste de adquisición, sobre todo cuando las soluciones son *plug and play* (Quanser, 2020), y mantenimiento. Cabe mencionar, algunas soluciones de fácil fabricación y un coste ajustado (Pedroso and Batista, 2022; Rico-Azagra et al., 2021; Gallarta-Saenz et al., 2023; Ramírez Laboreo et al., 2024). El uso de laboratorios remotos (Unilabs, 2021) permite compartir recursos, pero puede plantear problemas de pérdida de conectividad. Como alternativa en un entorno digital se recurre a laboratorios virtuales (Heradio et al., 2016; Chacón et al., 2015), aunque con estos se pierde el carácter experimental y la adquisición de ciertas competencias prácticas, además de ser menos motivador para el estudiante.

Una opción sumamente interesante son los kits miniaturizados, conocidos también como laboratorios *take-home* o *pocket-size* (Docekal and Golembiovsky, 2018; Lerma et al., 2019; Rossiter et al., 2019; Sotelo et al., 2022; Juchem et al., 2020). Su portabilidad permite complementar la formación fuera del tiempo y el espacio de la clase presencial en un aula física, favoreciendo el auto-aprendizaje y la experimentación *ad-hoc*. Su bajo coste, permite la fabricación masiva para grupos numerosos de estudiantes, sin que la pérdida o la rotura conlleve una reposición costosa. Además, se trata de dispositivos muy fáciles de usar, y que pueden acompañarse de multitud de materiales web.

Así, uno de los dispositivos y proyectos de uso generalizado es TCLab, que consiste en un laboratorio de control de temperatura basado en Arduino. Los desarrolladores proveen un sitio web de código abierto (Hedengren, 2024) con diferentes módulos de laboratorio que refuerzan los temas principales sobre dinámica y control con código fuente en Python (cuadernos interactivos Jupyter) y Matlab (*live scripts* interactivos y Simulink). TCLab se utiliza no solo para la educación en control (Oliveira et al., 2022), sino también como *benchmark* de investigación y desarrollo de nuevos algoritmos de control (Park et al., 2020).

En (Rico-Azagra and Gil-Martínez, 2021) se presentó URLab como un rediseño del dispositivo TCLab. Con un menor tamaño, reducción de costes de componentes y una modernización del conexionado con el PC, se mejoró su uso y portabilidad. Además, la principal aportación fue el cambio de la resistencia de base de los transistores de potencia, que incrementó notablemente la ganancia estática del sistema (incremento de temperatura del transistor frente al incremento de la acción de control sobre este). Esto permitía un control de temperatura en lazo cerrado mucho más ágil, reduciéndose considerablemente los tiempos de experimentación de diferentes algoritmos de control.

El interés despertado por URLab, tanto en la Universidad de La Rioja como en otras universidades españolas, ha planteado nuevos aspectos de mejora para el desarrollo de una nueva versión, URLab2, presentada en este trabajo. No se incurrirá en cambios sustanciales de concepto y forma, con el fin de aprovechar todo el material didáctico existente, salvo en lo que refiere al modelo dinámico resultante. Los objetivos son la simplificación del *hardware*, la minimización del

ruido en las medidas de los sensores, la eliminación de la necesidad de emplear un adaptador ac/dc externo y la mejora del comportamiento dinámico del sistema. Se persigue optimizar el aprendizaje práctico de los estudiantes, proporcionando una herramienta más accesible y eficaz para la instrucción en control automático, además de mejorar su portabilidad y reducir su coste.

La trabajo se organiza como sigue. La Sección 2 enumera las principales deficiencias de los dispositivos predecesores, justifica el diseño del nuevo prototipo y describe sus ventajas. La Sección 3 ilustra su versatilidad en control automático mediante experimentos de identificación y control. La Sección 4 resume las principales conclusiones.

2. Diseño del dispositivo

2.1. Dispositivos predecesores

El nuevo dispositivo constituye una segunda revisión de la exitosa plataforma TCLab (Hedengren, 2024). El dispositivo original, mostrado en la Figura 1(a), consta de una placa de desarrollo Arduino[®] Leonardo y un *shield* en el que se disponen los componentes para emular el sistema térmico. En concreto, sobre el *shield* se ubican dos transistores NPN a los que se acoplan disipadores de calor con aletas y sendos sensores de temperatura TMP36. Además, un indicador LED avisa de sobre-temperatura en los transistores.

En Rico-Azagra and Gil-Martínez (2021) se presentó URLab, mostrado en la Figura 1(b), como una versión mejorada de la plataforma TCLab en los siguientes aspectos a destacar:

- Reducción significativa del tamaño del dispositivo, desarrollado en una sola placa de dimensión 25×52 (mm²), frente a los 70×52 (mm²) del dispositivo original, lo que conlleva además un abaratamiento del coste en materiales del 75 %.
- Conexión directa al PC a través de un conector macho USB A, eliminándose un cable de conexión.
- Modernización de la conexión de alimentación dc a tipo USB C, que posibilita el empleo de los adaptadores de corriente habituales en los dispositivos móviles.
- A nivel dinámico, aumento de la ganancia del sistema (incremento de temperatura / incremento actuación) en un 250 %, lo que permite experimentos de control en lazo cerrado más rápidos, y por tanto una experimentación más ágil.
- Reubicación de los sensores de temperatura TMP36, mejorando el contacto térmico con los transistores
- Nuevos luminosos que indican tanto la disipación de potencia como la sobretemperatura.

URLab ha sido empleada con éxito en varias asignaturas del currículo en control automático tanto en la Universidad de La Rioja, como en otras universidades dentro del ámbito nacional. Su uso masivo ha puesto de relieve los siguientes aspectos mejorables:

- Una constante de tiempo elevada, entorno a los $\tau = 120$ s, similar a la de TCLab, lo que ralentiza sobre todo los procesos de identificación en lazo abierto.

- La necesidad de alimentación externa, lo que supedita su uso a la proximidad de una toma de corriente y, por tanto, con un uso limitado en aulas. Además, precisa del uso del adaptador de corriente y su cable USB C.
- Las medidas de temperatura son significativamente ruidosas. Además, la potencia de dicho ruido depende del adaptador de corriente empleado, haciendo que los resultados no sean uniformes.



(a) Dispositivo TCLab



(b) Dispositivo URlab

Figura 1: Hardware de los dispositivos predecesores

2.2. Hardware del nuevo dispositivo

El nuevo dispositivo URlab2 albergará el mismo tipo de proceso, con el fin de compatibilizar el material didáctico existente, y abordará las mejoras antes mencionadas.

Así, la plataforma se alimentará directamente a través del puerto de conexión USB tipo A, por el que anteriormente solo se transmitían datos, evitándose ahora la necesidad de un adaptador de corriente dc y su cable. De esta forma no solo se mejora la portabilidad y flexibilidad de uso del dispositivo, sino que además se evitan las diferencias generadas por el empleo de adaptadores de corriente diferentes.

Esta mejora exige que el consumo total del nuevo dispositivo sea inferior a 2,5W, ya que el puerto USB 1.0 suministra hasta 0,5A. Así, respetando un margen amplio de seguridad, se fija en 0,5W el consumo máximo de cada transistor, con lo que el consumo total del dispositivo será inferior a 1,5W. Entre las diferentes alternativas para reducir el consumo, se opta por modificar la etapa de potencia, incorporando transistores con encapsulado TO92. Este tipo de transistor es de tamaño mucho más reducido que el actual TIP31C, consiguiéndose aumentos significativos en su temperatura con una disipación de potencia mucho menor.

Otra ventaja derivada del menor tamaño de los transistores es su menor masa, lo que reduce la constante de tiempo del sistema. Como demostración, considérense las siguientes ecua-

ciones diferenciales que modelan el comportamiento térmico:

$$mc_p \frac{dT_1(t)}{dt} = UA(T_a(t) - T(t)) + \epsilon\sigma A(T_a^4(t) - T_1^4(t)) + Q_1(t) - Q_{12}(t), \quad (1)$$

$$mc_p \frac{dT_2(t)}{dt} = UA(T_a(t) - T_2(t)) + \epsilon\sigma A(T_a^4(t) - T_2^4(t)) + Q_2(t) + Q_{12}(t), \quad (2)$$

$$Q_{12}(t) = U_s A_s (T_1(t) - T_2(t)) + \epsilon\sigma A_s (T_1^4(t) - T_2^4(t)), \quad (3)$$

donde m se corresponde con la masa de los transistores, c_p con el calor específico, A con la superficie de intercambio térmico con el ambiente, U con el coeficiente transferencia térmico total, σ con la emisividad, ϵ con la constante de Stefan-Boltzmann, T_a con la temperatura ambiente, T_i con la temperatura en el transistor $i = 1, 2$, Q_i con el calor disipado en el transistor i , Q_{12} con el calor intercambiado entre los dos transistores, A_s y U_s con el área de intercambio térmico y el coeficiente de transferencia entre los transistores. Si se desprecian los términos dependientes de la radiación y el intercambio térmico entre los transistores, la relación entre la temperatura del transistor y el calor disipado en el mismo puede modelarse en el dominio de la transformada- s de Laplace como

$$\frac{T_i(s)}{Q_i(s)} = \frac{k}{\tau s + 1}, \quad \tau = \frac{mc_p}{AU} \quad k = \frac{1}{AU}, \quad (4)$$

de donde se deriva que una menor masa m implica una menor constante de tiempo τ . En los análisis de la Sección 3 se identifica $\tau = 55$ s, que reduce en un 54.55 % la de los dispositivos predecesores.

Otra de las modificaciones consiste en el empleo de transistores de tipo PNP en lugar de NPN. Esta configuración permite dotar al sistema de resistencias *shunt* para medir la corriente de descarga en cada transistor. La nueva variable disponible, además de como verificación de la etapa de potencia, permitirá cerrar lazos de control anidados en cascada que realimentan la caída de tensión en la resistencia *shunt*.

Finalmente, queda por minorar el nivel de ruido en las medidas de temperatura. Su origen reside en que la conversión analógico-digital utiliza la tensión de alimentación como tensión de referencia en el convertidor. Esta sencilla solución plantea varios problemas. Por un lado, se desconoce con precisión el valor de dicha tensión, y por otro lado, cuando los transistores entran en conducción, el nivel de tensión baja debido al consumo de corriente, produciendo cambios en la tensión de referencia que se traducen en ruido de medida. Para eliminar este problema, mejorar la precisión de las medidas y reducir el nivel de ruido, se necesita una referencia de tensión precisa. Así, se empleará el generador de tensión programable TL431 para generar un voltaje de referencia estable de 2,5V. Esto no solo rebajará notablemente el ruido de medida, sino que además aumentará la resolución de la conversión analógico-digital con 10bits en el microcontrolador ATMEGA 328p. Así, al reducirse la tensión de referencia a la mitad, se duplica la sensibilidad del convertidor que pasa de 0,49 mV a 0,98 mV. Dado que la tensión de salida de los sensores de temperatura TMP36 esta determinada por

$$V_{TMP36}(t) = 0,5 + 0,01 \times T(t), \quad (5)$$

se obtiene que el sistema es capaz de detectar variaciones en la temperatura de 0,1°C. Con esta configuración la temperatura máxima alcanzable por el sensor es de 200 °C, para una tensión máxima que igualara la de referencia del convertidor. En cualquier caso, las protecciones incorporadas evitarán temperaturas por encima de los 80 °C.

En consonancia con todas las argumentaciones anteriores, se desarrolla un nuevo esquema eléctrico del dispositivo que se ilustra en la Figura 2. Las diferencias con el mostrado en (Rico-Azagra and Gil-Martínez, 2021) residen en la etapa de potencia y en la generación de la referencia estable analógica, mientras que el microcontrolador, los elementos de visualización de estado y el módulo encargado de la comunicación USB se mantienen con respecto a la versión anterior.

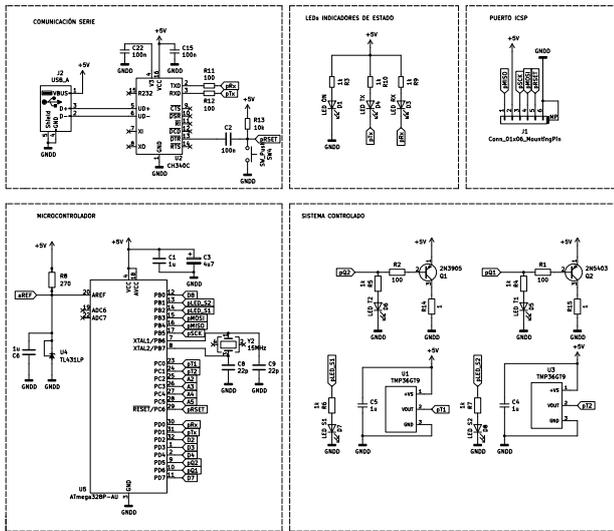
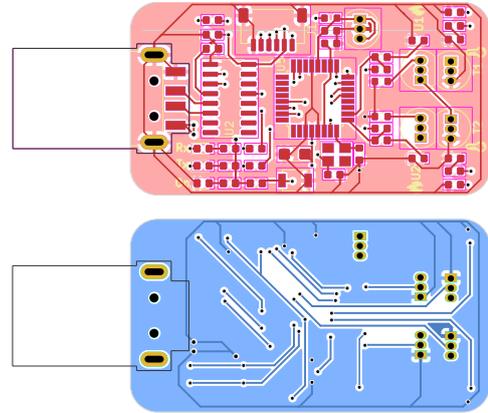


Figura 2: Esquema eléctrico del dispositivo desarrollado.

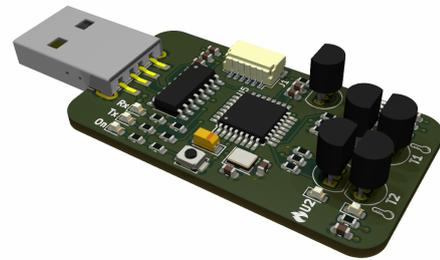
Finalmente se diseña el *layout* de la placa de circuito impreso que albergará el diseño electrónico anterior. Se toma como punto de partida la versión anterior del mismo, intentando mantener la ubicación de los componentes que son comunes a las dos versiones. La eliminación del puerto USB C y el empleo de transistores más pequeños reduce la longitud del dispositivo, desde 55 (mm) a 46,5 (mm) (excluyéndose de esta medida el conector USB). También cabe destacar el cambio del puerto de programación. En la nueva versión se emplea un conector JST SH de 1 (mm) de separación entre pines y con única orientación de conexión, lo que evita el conexiona-do erróneo del cable de programación. Además, la tecnología de montaje SMT (*Surface Mount Technology*) del conector simplifica el proceso de ensamblado, reduciendo el tiempo de montaje. El diseño final de la placa de circuito impreso lista para fabricación se muestra en la Figura 3(a) y el modelo 3D con el aspecto del dispositivo una vez ensamblados los componentes se ilustra en la Figura 3(b).

Cabe también reseñar el abaratamiento de costes por la reducción del tamaño de la placa, por el número y tipo de componentes (ver Tabla 1) y por la simplificación del montaje. Los nuevos transistores de potencia suponen una buena parte del ahorro, no solo por su precio en sí, sino porque se evitan los disipadores y su montaje, que necesariamente se realizaba de forma manual. No obstante, el mayor ahorro consiste en la

nueva alimentación, que no solo evita el conector, sino la necesidad de un adaptador de corriente (este no está incluido en la tabla de componentes). Considerando exclusivamente los componentes, la reducción de costes en URlab2 es del 20 %, aproximadamente, respecto a URlab.



(a) Layout de la PCB del dispositivo



(b) Modelo 3D del dispositivo final

Figura 3: Hardware del nuevo dispositivo

Tabla 1: Modificación de componentes

Componente	Acción	Coste
Conector USB c	Eliminado	1,00 €
Transistor TIP32C	Eliminado	2 × 0,35 €
Diodo B340	Eliminado	2 × 0,05 €
Disipadores y tornillería	Eliminado	2 × 0,25 €
Conector	Eliminado	0,10 €
Conector JST SH	Añadido	0,20 €
Resistencias y condensadores	Añadido	0,1 €
Regulador TL431	Añadido	0,03 €
Transistores 2N5403	Añadido	2 × 0,02 €
Total		2.03€

2.3. Software del nuevo dispositivo

La nueva versión incorpora cambios sustanciales a nivel de *software*. Los dispositivos predecesores, TClab y URlab, usan las herramientas de compatibilidad nativa que incorpora Matlab® para el control de dispositivos de la familia Arduino®. Su ventaja es la sencillez, ya que todo el desarrollo se realiza en la misma plataforma *software*. Como desventaja, el sistema está supeditado a que Matlab® siga manteniendo dicha compatibilidad. Así, actualmente se comercializan nuevos productos de la familia Arduino®, y Matlab® está comenzando a dejar de dar compatibilidad a las placas de desarrollo de

las primeras generaciones. En la actualidad, no existe soporte para la placa Arduino Nano (núcleo del dispositivo URlab) y los dispositivos URlab deben ser configurados empleando el soporte para las placas Arduino Pico 5V. En el momento que la compatibilidad para estos dispositivos deje de estar vigente en la *toolbox* de Matlab® los dispositivos URlab dejarán de poder emplearse del modo actual. Este mismo problema se extiende a la plataforma TClab, que demanda la compatibilidad con la placa de desarrollo Arduino Leonardo.

Como solución se va a emplear un *firmware* desarrollado en lenguaje Arduino®, que se comunica con Matlab-Simulink® mediante una comunicación serie. Esta nueva filosofía de trabajo permite: salvar los problemas de compatibilidad que puedan surgir en el futuro, emplear la referencia externa para el convertidor analógico digital (no disponible desde Matlab®), la optimización del código, y extender el uso del dispositivo en otras plataformas *software*. El único inconveniente es que los dispositivos deberán ser programados con el *firmware* desarrollado antes de su primer uso.

La Figura 4 muestra el aspecto del fichero Simulink® empleado para realizar el experimento de la Figura 7. El diagrama de bloques muestra la similitud del nuevo entorno con los anteriores. Dentro del bloque URlabv2 se ubican los bloques Simulink® para el envío/recepción de datos por el puerto serie. Se ha configurado la comunicación a 115200 (bps), empleando un tiempo de muestreo de $T_s = 0,1$ s. En cada ciclo de trabajo el dispositivo envía las dos temperaturas y recibe las dos acciones de control en forma de porcentaje. Internamente, y siempre que las temperaturas estén dentro del umbral permitido $T_i(t) < 80$ (°C), se activan los transistores de forma conveniente. Como puede comprobarse en esta nueva versión, los indicadores luminosos, las protecciones contra sobre-temperatura y la generación de las señales PWM para los transistores se realizan dentro del microcontrolador y no están accesibles al usuario.

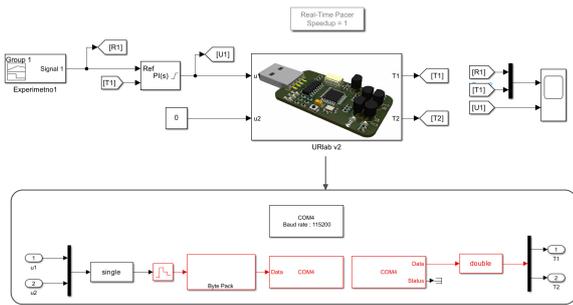


Figura 4: Fichero Simulink® empleado para controlar el sistema.

3. Comportamiento del dispositivo

Se analiza el nuevo dispositivo para su uso en control automático. En primer lugar, la Figura 5 muestra la temperatura $T_1(t)$ para un experimento de 50 (mm) en el que la acción de control $u_1(t)$ es modificada en forma de escalones. El primer aspecto destacable es que la respuesta presenta un comportamiento dinámico de primer orden sin retardo, que alcanza el tiempo de establecimiento en aproximadamente 200 s; esto permite realizar experimentos de identificación relativamente más cortos que para TClab y URlab. Además, la temperatura

incorpora muy poco ruido de medida, tal como se había proyectado. Se ha obtenido la desviación estándar de datos $T_1(t)$ capturados durante 100 s siendo $u_1 = 40$ % constante, resultando $\sigma = 0,072$ (°C), mientras que para URlab, trabajando en las mismas condiciones, se obtiene un $\sigma = 0,698$ (°C); por tanto, se produce una reducción de ruido de un 89.69 %.

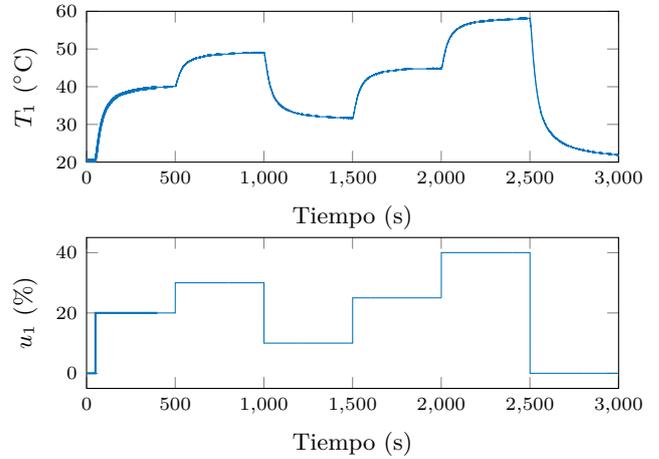


Figura 5: Experimento de identificación en lazo abierto.

Para una temperatura de trabajo próxima a los 40 (°C), se identifica el modelo dinámico

$$P_1(s) = \frac{T_1(s)}{u_1(s)} = \frac{0,87}{55s + 1} \tag{6}$$

que se valida con el sistema real en la Figura 6, verificándose su similitud en las proximidades del punto de operación, así como una relativa linealidad para el resto del rango.

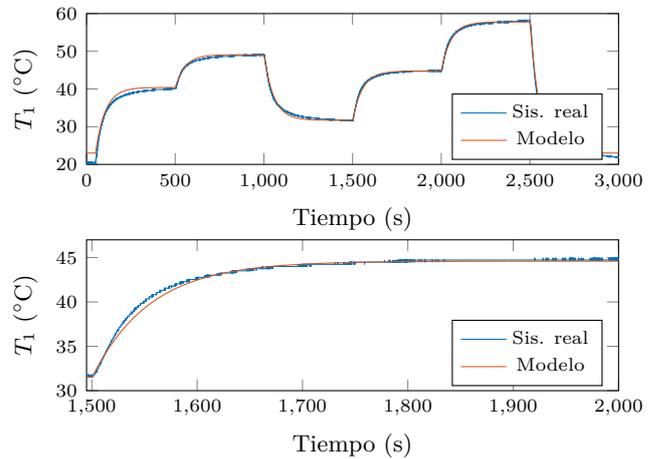


Figura 6: Validación del modelo de pequeña señal.

Dicho modelo lineal (6), contrasta con el obtenido para URlab

$$P(s) = \frac{T_1(s)}{u_1(s)} = \frac{1,4}{121s + 1} e^{-12s} \tag{7}$$

destacándose: la eliminación del retardo, que facilita el diseño de controladores en cursos de iniciación al control automático; y la reducción de la constante de tiempo en un 54,55 %, lo que agiliza enormemente los experimentos de identificación y control, pese a representar un sistema térmico.

Finalmente, la Figura 7 muestra un experimento de control en lazo cerrado, con un controlador de tipo PI

$$C(s) = 12 \left(1 + \frac{1}{10s} \right), \quad (8)$$

y pesos en la consigna ajustados con $b = 0$, como ejemplo sencillo para un curso de iniciación al control automático. Se observa como la temperatura T_1 no presenta error de seguimiento de r_{T_1} en régimen permanente. Además, ante cambios $r_{T_1}(t)$ de tipo escalón, $T_1(t)$ alcanza por primera vez el valor final en 18 s, y se mantiene dentro de una banda de error de ± 0.5 (°C) a los 37,5 s. Esto se logra sin saturar el actuador, para un incremento de temperatura estacionario de 15 (°C). La agilidad del nuevo proceso propiciará clases más dinámicas y con menor tiempo de espera entre las pruebas.

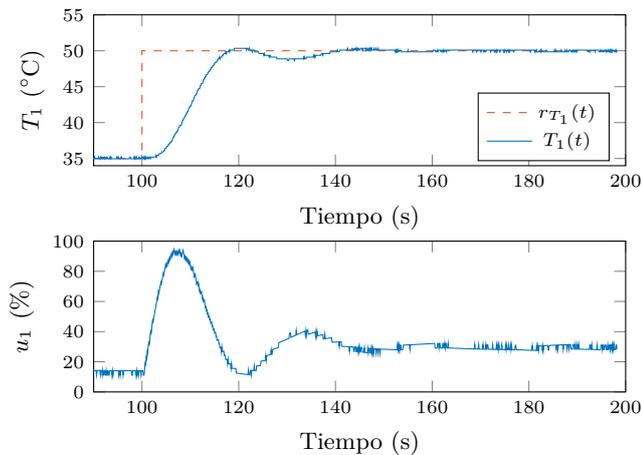


Figura 7: Control en lazo cerrado de la temperatura T_1 .

4. Conclusiones

Se ha desarrollado un nuevo dispositivo que presenta varias ventajas significativas frente a sus predecesores. Entre sus principales mejoras se encuentran la eliminación del empleo de un adaptador dc, que mejora su portabilidad, y la reducción de la constante de tiempo de la planta, permitiendo experimentos más rápidos y eficientes. Además, se ha logrado una notable minoración del ruido en las mediciones, lo que incrementa la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos. También se ha reducido el coste de fabricación y adquisición del dispositivo, haciéndolo más accesible para su implementación en diversos entornos educativos. Finalmente, las mejoras en el diseño hardware facilitan su montaje, tal que los usuarios desarrolladores puedan ensamblar y modificar el dispositivo con mayor facilidad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la Ayuda para la realización de Proyectos de Innovación Docente PID29, y a la Ayuda a Grupos de Investigación REGI 22/40, ambas provistas por la Universidad de La Rioja.

Referencias

Bequette, B., 2019. Process control practice and education: Past, present and future. *Computers and Chemical Engineering* 128, 538–556. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2019.06.011

- Chacón, J., Guinaldo, M., Sánchez, J., Dormido, S., 2015. A new generation of online laboratories for teaching automatic control. Vol. 48. pp. 140–145. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.11.227
- Dočekal, T., Golembiowski, M., 2018. Low cost laboratory plant for control system education. *IFAC-PapersOnLine* 51 (6), 289–294, 15th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems PDeS 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.168>
- Gallarta-Saenz, D., Rico-Azagra, J., Gil-Martínez, M., 2023. Learning enhancement of control engineering: A competition-based case. *IEEE Access* 11, 38240–38250. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3267966
- Hedengren, J., 2024. Temperature control lab kit. <https://apmonitor.com/pdc/index.php/Main/ArduinoTemperatureControl>, visitado 27.06.2024.
- Heradio, R., de la Torre, L., Dormido, S., 2016. Virtual and remote labs in control education: A survey. *Annual Reviews in Control* 42, 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.08.001>
- Juchem, J., Chevalier, A., Dekemele, K., Loccufier, M., 2020. Active learning in control education: a pocket-size pi(d) setup. *IFAC-PapersOnLine* 53 (2), 17276–17281, 21st IFAC World Congress. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1805>
- Lerma, E., Costa-Castelló, R., Griñó, R., Sanchis, C., 2019. Duino-based learning (dbl) in control engineering courses. Vol. 2019-September. pp. 798–803. DOI: 10.1109/ETFA.2019.8869451
- Oliveira, P. M., Vrančić, D., Huba, M., 2022. Control engineering and industrial automation education using out of the box approaches. In: *2022 20th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*. pp. 472–477. DOI: 10.1109/ICETA57911.2022.9974630
- Park, J., Martin, R. A., Kelly, J. D., Hedengren, J. D., 2020. Benchmark temperature microcontroller for process dynamics and control. *Computers & Chemical Engineering* 135, 106736. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106736>
- Pedroso, L., Batista, P., 2022. Reproducible low-cost flexible quadruple-tank process experimental setup for control educators, practitioners, and researchers. *Journal of Process Control* 118, 82–94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2022.08.010>
- Quanser, 2020. Control systems. <https://www.quanser.com/solution/control-systems/>, visitado 27.06.2024.
- Ramírez Laboreo, E., Bono Nuez, A., Montijano Muñoz, E., Sagüés Blázquez, C., jun. 2024. Una década de experiencias enseñando electrónica y control con un levitador magnético. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*. DOI: 10.4995/riai.2024.20971
- Rico-Azagra, J., Gil-Martínez, M., Rico, R., Nájera, S., Elvira, C., 2021. A benchmark for orientation control of a multicopter in a three degrees-of-freedom rotation structure. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 18 (3), 265–276. DOI: 10.4995/riai.2021.14356
- Rico-Azagra, J., Gil-Martínez, M., 2021. Rediseño de una plataforma de control de temperatura de bajo coste para la educación en ingeniería de control. In: *XLII Jornadas de Automática: libro de actas, Castellón, 1 a 3 de septiembre de 2021*. Universitat Jaume I, Castellón de la Plana, pp. 275–281. DOI: 10.17979/spudc.9788497498043.275
- Rossiter, J., Pasik-Duncan, B., Dormido, S., Vlacic, L., Jones, B., Murray, R., 2018. A survey of good practice in control education. *European Journal of Engineering Education* 43 (6), 801–823. DOI: 10.1080/03043797.2018.1428530
- Rossiter, J., Pope, S., Jones, B., Hedengren, J., 2019. Evaluation and demonstration of take home laboratory kit. Vol. 52. pp. 68–73. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.08.124
- Rossiter, J. A., Cassandras, C. G., Hespanha, J., Dormido, S., de la Torre, L., Ranade, G., Visioli, A., Hedengren, J., Murray, R. M., Antsaklis, P., Lamnabhi-Lagarigue, F., Parisini, T., 2023. Control education for societal-scale challenges: A community roadmap. *Annual Reviews in Control* 55, 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.03.007>
- Sotelo, D., Sotelo, C., Ramírez-Mendoza, R. A., López-Guajardo, E. A., Navarro-Duran, D., Niño-Juárez, E., Vargas-Martínez, A., 2022. Labtec@home: A cost-effective kit for online control engineering education. *Electronics* 11 (6). DOI: 10.3390/electronics11060907
- Unilabs, 2021. University network of interactive laboratories. <https://unilabs.dia.uned.es/>, visitado 27.06.2024.