

# Diseño y desarrollo de registradores de temperatura multicanal, de bajo coste, para experiencias de laboratorio de alumnos

## Memoria final del proyecto iD2018/077

F. L. Román Hernández<sup>1</sup> y M. N. Antón Iglesias<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física Aplicada, Escuela Politécnica Superior de Zamora

<sup>2</sup> Departamento de Construcción y Agronomía, Escuela Politécnica Superior de Zamora

### Introducción y objetivo

La elaboración de prácticas de laboratorio por parte de los alumnos de las titulaciones de ciencias e ingeniería es una parte esencial del aprendizaje de un gran número de asignaturas, ya que permiten afianzar los conocimientos teóricos impartidos en el aula. En muchas ocasiones estas prácticas tienen como objetivo la demostración de un fenómeno físico y para llevar a cabo dicha demostración se dispone de aparatos que, en muchas ocasiones, exceden en complejidad al fenómeno que se pretende estudiar. En principio esto puede no ser un gran problema, porque parte del conocimiento que se pretende enseñar en las clases prácticas, consiste en el manejo de dichos instrumentos de medida, independientemente de lo complejo que pueda resultar su diseño o fabricación. No obstante, existen algunas experiencias que resultan tan dependientes de los instrumentos de medida que se convierten en experimentos muy cerrados, de manera que el alumno participa como un mero espectador de la práctica y termina teniendo un papel pasivo en la elaboración del trabajo del laboratorio. En este sentido, resultaría muy conveniente mostrar al alumno cómo la medida de cualquier observable en un experimento constituye, por sí misma, un problema práctico a resolver en el laboratorio.

La medida de la temperatura y su registro dependiente del tiempo es un problema de interés en la mayoría de los laboratorios de alumnos de multitud de titulaciones de ciencias e ingeniería. No es inusual encontrar en muchos laboratorios de asignaturas básicas o troncales, experimentos en los que la medida de la temperatura, o su registro con el tiempo, es un paso importante a tener en cuenta para la elaboración correcta de alguna práctica. Más aún, en laboratorios específicos de titulaciones de ciencias y/o ingeniería el control y medida de la temperatura es de crucial importancia.

El presente proyecto de innovación docente se enmarca dentro de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales y pretende el diseño sencillo y asequible de un registrador de temperaturas para su uso en algunos de los laboratorios específicos de la titulación (Ciencia e Ingeniería de Materiales y Termodinámica e Ingeniería Térmica). En estos laboratorios se realizan multitud de ensayos destinados a la determinación de

propiedades físicas de materiales cerámicos, metálicos e incluso líquidos y gases; en los que la medida y registro de la temperatura respecto del tiempo resulta crítica para la correcta realización de dichos ensayos. Para dicha medida se dispone de aparatos comerciales, normalmente de precio alto y de difícil reposición en caso de avería. Por este motivo sería muy interesante dotar a dichos laboratorios de un sistema de medida y registro sencillo, de bajo precio y versátil, que pudiera ser realizado por los alumnos sin perjuicio de que sea fiable.

Desde hace ya algunos años han surgido en el mercado microcontroladores electrónicos que permiten acercar a nivel de usuario final el uso de sensores de muy diversa índole (temperatura, presión, aceleración, etc...). Estos dispositivos hacen uso del llamado hardware y software libre y acercan al usuario, de manera muy sencilla, al uso de dispositivos electrónicos sin necesidad de tener conocimientos específicos de electrónica. Su programación resulta también muy sencilla ya que es similar al lenguaje ANSI C. Más aún, su uso está tan extendido que se pueden encontrar kits de montaje sencillo, que salvan la complejidad inherente al diseño electrónico y dejan para el usuario únicamente el problema de programarlos conforme a sus necesidades. Este tipo de dispositivos se ha acercado tanto al nivel del usuario final, que su diseño y su programación, es parte ya de algunas experiencias en los últimos años de la enseñanza media y el bachillerato. Además, en general, la adaptación de los dispositivos externos al microcontrolador está muy bien documentada en la red y se dispone de una amplia documentación de su uso a todos los niveles. Por lo tanto resultaría muy adecuado incluir en los laboratorios de alumnos de ciencias e ingeniería, alguna referencia a estos dispositivos ya que durante la titulación adquieren, en asignaturas específicas de instrumentación, el conocimiento para su correcto uso. En este sentido el proyecto propuesto resulta ser una experiencia transversal de algunos laboratorios del grado en Ingeniería de Materiales.

Es necesario remarcar que no se desea profundizar en la electrónica de estos dispositivos, lo cual desbordaría el propósito del proyecto, sino acercar el uso y la programación de éstos a los alumnos para que puedan elaborar sus propios instrumentos de medida. Por consiguiente, se desea realizar un diseño sencillo, accesible desde el punto de vista económico, haciendo uso de parte del material de laboratorio del que se dispone y con una pequeña aportación solicitada. El dispositivo deberá ser capaz de registrar la temperatura en cuatro canales de forma simultánea, presentar los resultados de dichas medidas de la temperatura en una pantalla y registrar en una tarjeta de memoria las lecturas de los termopares frente al tiempo.

El objetivo de este proyecto de innovación docente será el de proponer a los alumnos la construcción de un dispositivo de medida y registro de la temperatura haciendo uso de un microcontrolador como los del proyecto Arduino y de módulos de amplificación específicos para termopares de tipo K, que serán controlados desde dicho dispositivo. El dispositivo construido podrá ser usado en cualquier laboratorio en el que se tenga necesidad de medida de la temperatura, y más específicamente en los laboratorios de “Comportamiento Térmico de los Materiales”, “Obtención y Selección de Materiales” y

“Transformaciones de Fase”; todas ellas pertenecientes a la titulación de Ingeniería de Materiales. Una de las premisas principales para el desarrollo del objetivo será que el coste de su elaboración sea pequeño, sin que ello suponga detrimento en la calidad de la medida.

## Material empleado

Para llevar a cabo el objetivo indicado en la introducción se solicita una pequeña partida económica para la adquisición de cierto material necesario para la realización práctica. No obstante, también se usa diverso material del que ya disponen los laboratorios de las asignaturas “Transformaciones de Fase” y “Obtención y Selección de Materiales”, ambas correspondientes al Grado de Ingeniería de Materiales y al doble Grado en Ingeniería Mecánica y de Materiales. Este material se usará principalmente para el correcto calibrado de las lecturas de temperatura finales con el dispositivo construido

El material necesario para la elaboración del dispositivo se describe a continuación:

- Placa Arduino nano o similar, basado en microcontrolador ATMEL. Se elige la placa Arduino “nano” por ser de pequeño tamaño. Además es una de las más extendidas y existen multitud de ejemplos y usos que pueden ser consultados en internet. Esta placa permite realizar programas de hasta 32 kB de memoria, lo cual será suficiente para el objetivo que se persigue.



Figura 1. Placa Arduino Nano.

- Un ordenador portátil con sistema operativo Linux Ubuntu 18.04. Se opta por un ordenador fuera de uso por ser obsoleto, ya disponible, pero que permite utilizar el entorno de programación de la placa de manera sencilla.

- Pantalla TFT de 2.4” con 256 colores. La placa controlará este display para mostrar la temperatura que registre cada canal conteniendo un termopar de tipo K y otras informaciones relevantes. La placa de la pantalla lleva incluido un puerto para alojar tarjetas de memoria SD, que serán utilizadas para el registro de los datos.

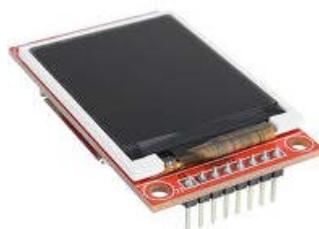


Figura 2. Display TFT de 2.4” con lector de tarjeta SD.

- Conversor de niveles lógicos bidireccional. La comunicación con la placa Arduino debe realizarse a 5V, pero los dispositivos que conectaremos, el display, lector de tarjetas y los módulos de amplificación de termopares de tipo K está diseñados para comunicarse a 3.3 V.

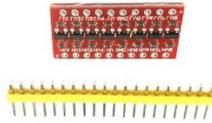


Figura 3. Conversor bidireccional de niveles lógicos.

- Módulos de amplificación para termopares de tipo K. Los módulos elegidos están basados en el circuito integrado max31855 y son capaces de dar lecturas desde  $-200^{\circ}\text{C}$  hasta  $1100^{\circ}\text{C}$ . El módulo simula la soldadura fría del termopar y tiene una resolución de  $0.25^{\circ}\text{C}$ , más que suficiente para la mayor parte de las aplicaciones en un laboratorio de alumnos.

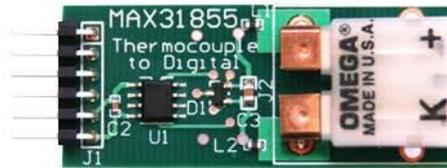


Figura 4. Módulo amplificador de termopar tipo K.

Se ha encontrado que en algunas plataformas de venta de internet se ofertan módulos similares usando el mismo circuito integrado (c.i.) MAX31855, que están montadas sobre placas diseñadas para el c.i. MAX6675. Estas placas conectan a tierra el polo negativo del termopar, cosa que resulta correcta en el c.i. MAX6675, pero no en el MAX31855 que está diseñado para evitar esta conexión. Como consecuencia, puede dar la sensación de que el módulo está averiado, o no funciona.

- Termopares de tipo K con conector miniatura. Estos termopares son de uso extendido y resultan de muy bajo coste y consiste en la unión de dos hilos de aleaciones diferentes. Uno de ellos corresponde a la aleación cromel (Cr-Ni) y el otro hilo está construido con la aleación alumel (Cr-Al). La medida de la temperatura está basada en el efecto Seebeck, según el cual se produce una diferencia de potencial cuando dos uniones de las aleaciones se encuentran a distinta temperatura.

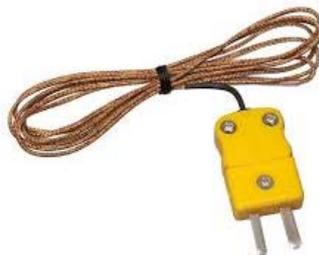


Figura 5. Termopar tipo K con conector miniatura.

- Diverso material para soporte, soldador, estaño para soldadura eléctrica, placa de pruebas, cables de conexión, tarjeta SD para registro de datos, placa perforada para el montaje final, fuente de alimentación y otro pequeño material necesario para el montaje.

## Montaje del dispositivo

Con el material descrito y las especificaciones indicadas por cada fabricante hemos montado el dispositivo inicial sobre placa de pruebas con un doble objetivo. Por un lado, poder rectificar *in situ* los errores posibles de conexión y cableado y por otro lado poder desarrollar el programa sobre el entorno integrado (IDE). Los esquemas de conexión de los distintos dispositivos son de dominio público y se encuentran fácilmente en internet.

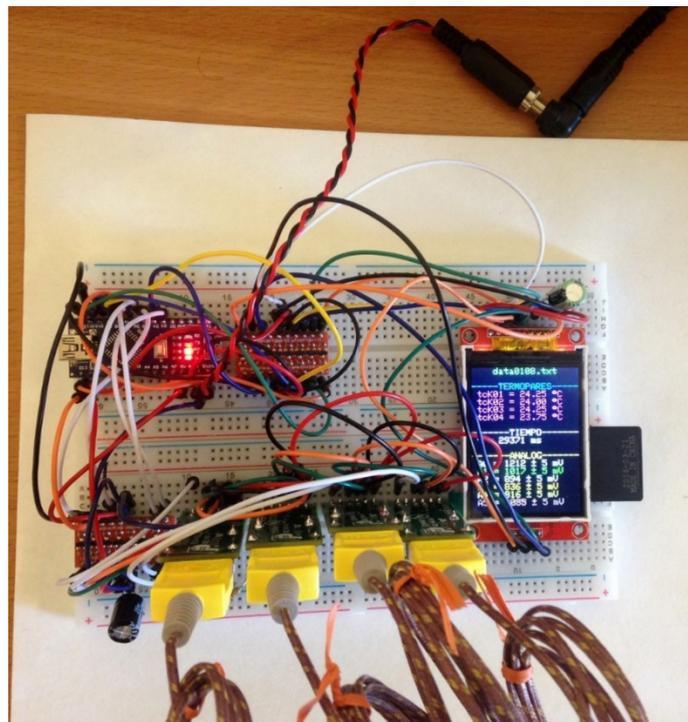


Figura 6. Dispositivo final montado sobre placa de pruebas y correctamente cableado.

El aspecto del dispositivo una vez montado sobre placa de pruebas es el que muestra la figura 6, donde se puede observar la placa compatible Arduino y cómo el cableado de los puertos digitales de la placa van hacia los conversores de niveles lógicos para, desde allí, conectar con el display/registrador de datos con tarjeta SD y hacia los módulos de amplificación de la señal de los termopares. Conectados a los módulos de amplificación se pueden encontrar los cuatro termopares. En la pantalla se observa la lectura de la temperatura que están registrando los termopares así como el tiempo transcurrido en milisegundos desde que comenzó el registro de datos. También se muestra en la primera línea el nombre del fichero donde se están almacenando las lecturas de la temperatura, a razón de una lectura por segundo. En la parte inferior de la pantalla se muestra la lectura en mV de los puertos analógicos de la placa Arduino. Se observa también que la alimentación eléctrica del dispositivo se hace mediante un transformador externo, que

permite usar el registrador de temperaturas de forma independiente al puerto USB utilizado para programar el microcontrolador.

Este dispositivo es capaz de almacenar la temperatura registrada por los cuatro termopares y por los seis puertos analógicos simultáneamente con una frecuencia de un segundo entre registros. Aunque los puertos analógicos del microcontrolador no están en uso en este trabajo, se ha dejado programado el microcontrolador para poder hacer uso de sensores de temperatura NTC a partir de su conexión mediante puente de Wheatstone. Este parte de trabajo queda abierta para su futura elaboración.

El programa realizado para la gestión de todos los elementos está disponible bajo demanda para toda la comunidad educativa y omitimos el listado del código para favorecer la claridad del informe. El programa fue realizado y transferido al microcontrolador mediante el entorno integrado IDE. La figura 7 muestra el entorno integrado con un fragmento de código para la presente aplicación.



```
tft_SD_03_sensor_mio Arduino 1.8.3
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
tft_SD_03_sensor_mio

#include "SPI.h"
#include "SD.h"
#include "stdio.h"
#include "stdlib.h"
#include "Adafruit_GFX.h"
#include "Adafruit_ILI9341.h"
#include "Adafruit_MAX31855.h"

// For the Adafruit shield, these are the default.
#define TFT_DC 9
#define TFT_CS 10

Adafruit_ILI9341 tft = Adafruit_ILI9341(TFT_CS, TFT_DC);

int AA0 = 0, AA1 = 1, AA2 = 2, AA3 = 3, AA4 = 4, AA5 = 5;
double A0_old, A0_new, A1_old, A1_new, A2_old, A2_new;
double A3_old, A3_new, A4_old, A4_new, A5_old, A5_new;

#define MAXDO 12
#define MAXCLK 13

#define MAXCS00 3
#define MAXCS01 7
#define MAXCS02 6
#define MAXCS03 5
#define MAXCS04 4

//Adafruit_MAX31855 tck01(MAXCLK, MAXCS, MAXDO);
Adafruit_MAX31855 tck00(MAXCS00);
Adafruit_MAX31855 tck01(MAXCS01);
Adafruit_MAX31855 tck02(MAXCS02);
Adafruit_MAX31855 tck03(MAXCS03);
Adafruit_MAX31855 tck04(MAXCS04);
double tempC01_old, tempC01_new, tempC02_old, tempC02_new;
double tempC03_old, tempC03_new, tempC04_old, tempC04_new;

unsigned long int tims_old, tims_new;

int newl = 17;
int LINE_TPK = 2, LINE_TIM = 8, LINE_ANG = 11;

#define SD_CS 2

File myFile;
char NOMBRE[13];

Arduino Nano, ATmega328P (Old Bootloader) en /dev/ttyUSB0
```

Figura 7. Entorno integrado para la programación de la placa Arduino con un fragmento del programa realizado para el control de los termopares, display y registro en tarjeta SD.

Una vez que se ha garantizado que sobre la placa prototipo el dispositivo funciona correctamente y que el programa no tiene errores se pasa a su montaje definitivo. Para ello se ha optado por un montaje consistente en una placa perforada sobre la que se han adaptado unos zócalos de montaje de todos los elementos clave del circuito, para que si en un futuro hubiera que reemplazarlos no hiciera falta desoldar. La placa final se ha cubierto con metacrilato para que pueda verse la elaboración del circuito y, además, se ha añadido un botón de reset que permite comenzar el registro en un nuevo archivo.

El registro de temperaturas se ha programado para que comience desde el mismo momento en que se conecta el aparato y se realiza en formato de texto en un fichero cuyo nombre indica el display en la primera línea. El nombre del archivo donde se registra la temperatura y el tiempo es de la forma "dataXXXX.dat" en donde el valor XXXX corresponde a un número entre 0000 y 9999. Cuando el registrador arranca lee el contenido de la tarjeta para después crear y abrir el primer archivo cuyo número XXXX no exista. Si no hubiese tarjeta de memoria, el dispositivo funciona igual, en este caso simplemente mostrando en la pantalla la temperatura de cada canal. En la figura 8 puede verse el resultado final. En esta figura se observa que se está registrando la temperatura de los cuatro canales en el archivo data0036.txt.

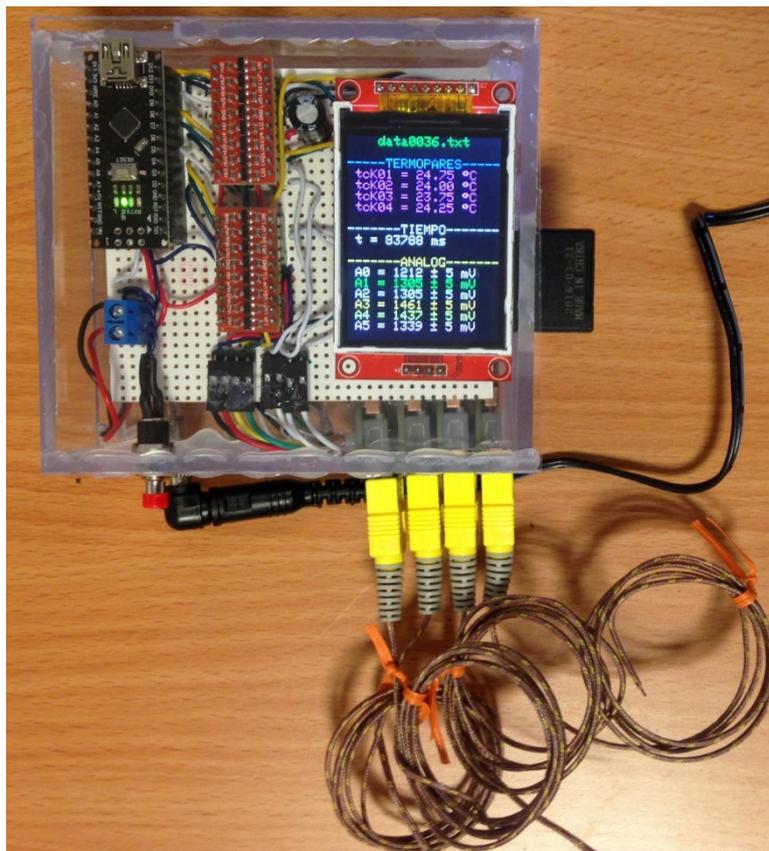


Figura 8. El dispositivo construido en su estado final. Los componentes se han montado sobre zócalos para ser fácilmente reemplazados en caso de avería.

## Calibrado

Pese a que la construcción del dispositivo es la parte más costosa en tiempo, no podemos olvidar que el objetivo final no sólo es registrar los valores obtenidos con los termopares, sino también, y no menos importante, que las lecturas ofrecidas por los termopares sean fiables al menos dentro del intervalo de error de escala que da el fabricante. Para conseguirlo se usarán dos procedimientos conjuntos. El primero de ellos es el uso de puntos fijos para el calibrado de escalas de temperatura. En particular nosotros usamos el punto de hielo a la presión atmosférica ( $0.00^{\circ}\text{C}$ ) y el punto de fusión del estaño a esa misma presión ( $231.928^{\circ}\text{C}$ ). El punto de hielo no es usado por el Comité de Pesas y Medidas en la elaboración de la escala internacional de temperaturas ITS-90, sin embargo se aproxima frecuentemente al punto triple del agua, que si es utilizado. Por otra parte el punto de fusión del estaño si es uno de los puntos fijos usados por la ITS-90. Ambos puntos están bien contrastados y resultan más que suficientes teniendo en cuenta el error de escala inherente a nuestro dispositivo ( $e_a=0.25^{\circ}\text{C}$ ). El segundo procedimiento, una vez calibrados los puntos fijos, consiste en la comparación en un intervalo de temperaturas de las lecturas ofrecidas por el dispositivo construido con las registradas por algún termómetro contrastado de los que existen en el laboratorio.

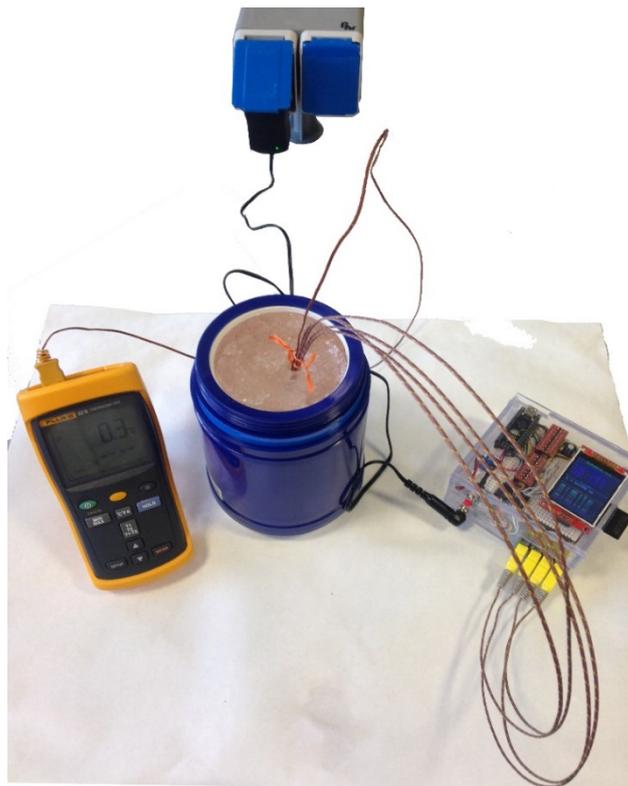


Figura 9. Calibrado del dispositivo en el punto de hielo.

La comparación de las lecturas con los dos puntos fijos seleccionados permitirán introducir en el código del programa una corrección de carácter lineal y, una vez realizada esa corrección, la comparación de las nuevas lecturas con las realizadas con el termómetro comercial, nos indicará si la corrección debería tener algún término no lineal añadido.

Para el calibrado con el punto de hielo, se prepara en vaso Dewar una mezcla de agua destilada congelada y agua destilada y se introducen los termopares durante unos 15 minutos, registrando su curva de enfriamiento. Se observa en todos los casos que el tramo constante de temperatura fluctúa alrededor del valor  $0.00\text{ }^{\circ}\text{C}$  con un intervalo dentro del error de escala por lo que se concluye que este punto fijo está bien calibrado.

En la figura 9. Se muestra el dispositivo usado para el calibrado con el punto de hielo. Puede observarse el vaso Dewar conteniendo una mezcla de hielo y agua destilada así como el dispositivo construido con los cuatro termopares sumergidos en la mezcla. De igual manera la figura 10 muestra el dispositivo con los termopares en el sistema de punto fijo de fusión del estaño

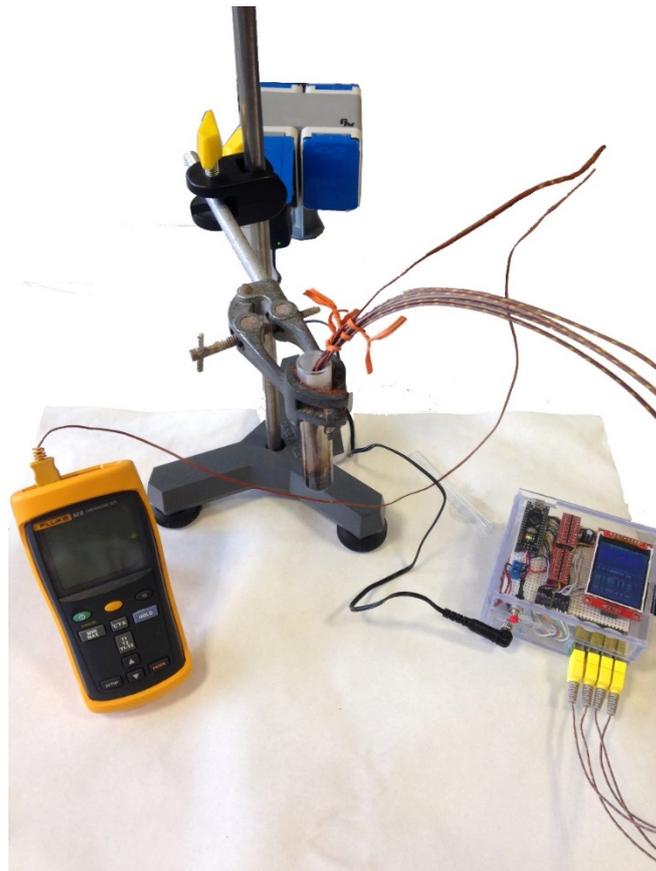


Figura 10. Calibrado del dispositivo en el punto de fusión del estaño.

De igual forma a como ocurrió con el punto de hielo, la temperatura de fusión del estaño ofrecida por el dispositivo se encuentra dentro del margen de error de escala del aparato. Estos resultados sugieren que los módulos de amplificación del termopar con compensación de soldadura fría son componentes bien diseñados y están suficientemente bien calibrados como para poder ser usados directamente. No obstante, el deterioro de algún contacto eléctrico u otras razones pueden alterar las lecturas ofrecidas por el termopar en un futuro, por lo que se mantiene en la programación del microcontrolador la posibilidad de realizar un calibrado posterior con dos puntos fijos.

## Conclusiones

En este proyecto se ha propuesto la elaboración de un registrador de temperaturas de cuatro canales basado en microcontrolador Arduino Nano y módulos MAX31855 para el uso de termopares de tipo K. El trabajo ha sido planteado para su desarrollo en los laboratorios de alumnos de las siguientes asignaturas de la titulación del Grado en Ingeniería de Materiales: “Comportamiento Térmico de los Materiales”, “Obtención y Selección de Materiales” y “Transformaciones de Fase”.

El dispositivo elaborado es capaz de medir la temperatura de cuatro canales de termopares de tipo K simultáneamente y a razón de una lectura por segundo. Dichas lecturas son mostradas en una pequeña pantalla TFT y registradas en una tarjeta SD. Es, por lo tanto, un dispositivo de uso universal en cualquier laboratorio en el que se necesite la medida y registro de la temperatura con el tiempo y de forma simultánea en cuatro sensores.

La elaboración del dispositivo está basada en placas con microcontrolador Arduino capaces de ser programadas para el control de todo tipo de sensores. Los componentes usados para el desarrollo son de fácil acceso y su adquisición una pequeña cantidad de dinero. Son, por tanto, muy accesibles económicamente e ideales para su incorporación en laboratorios. Además del desarrollo del dispositivo, su correcta conexión, y su programación, ha resultado de gran interés su calibrado para alcanzar la adecuada precisión de la medida. La realización del calibrado ha puesto de manifiesto la dificultad inherente a la medida de la temperatura y a la coincidencia de la medida con la escala internacional de temperaturas. Por otro lado la programación del microcontrolador se ha dejado abierta para la incorporación futura de sensores de temperatura basados en termistores NTC.

El desarrollo del dispositivo ha tenido lugar durante las sesiones de laboratorio de las asignaturas mencionadas en ambos cuatrimestres. El trabajo correspondiente a la elaboración y calibrado del dispositivo no debe plantearse como una práctica cerrada cuya elaboración debe realizarse en un número de sesiones bien determinado. Por el contrario, resulta muy adecuado proponerlo al comienzo del calendario de prácticas, sin otra restricción de tiempo que no sea la que impone el propio calendario académico. Además el trabajo se realiza de forma complementaria y compatible con otras sesiones de laboratorio y trabajo individual.

La facilidad con la que se pueden incorporar sensores a las placas de tipo Arduino, junto con accesibilidad de su programación abre la posibilidad de ofrecer a los alumnos la opción de construir sus propios dispositivos de medida para ser utilizados en las prácticas de laboratorio.

*F. L. Román y M. N. Antón desean agradecer la financiación aportada por la Universidad de Salamanca para la realización del presente proyecto de innovación docente.*