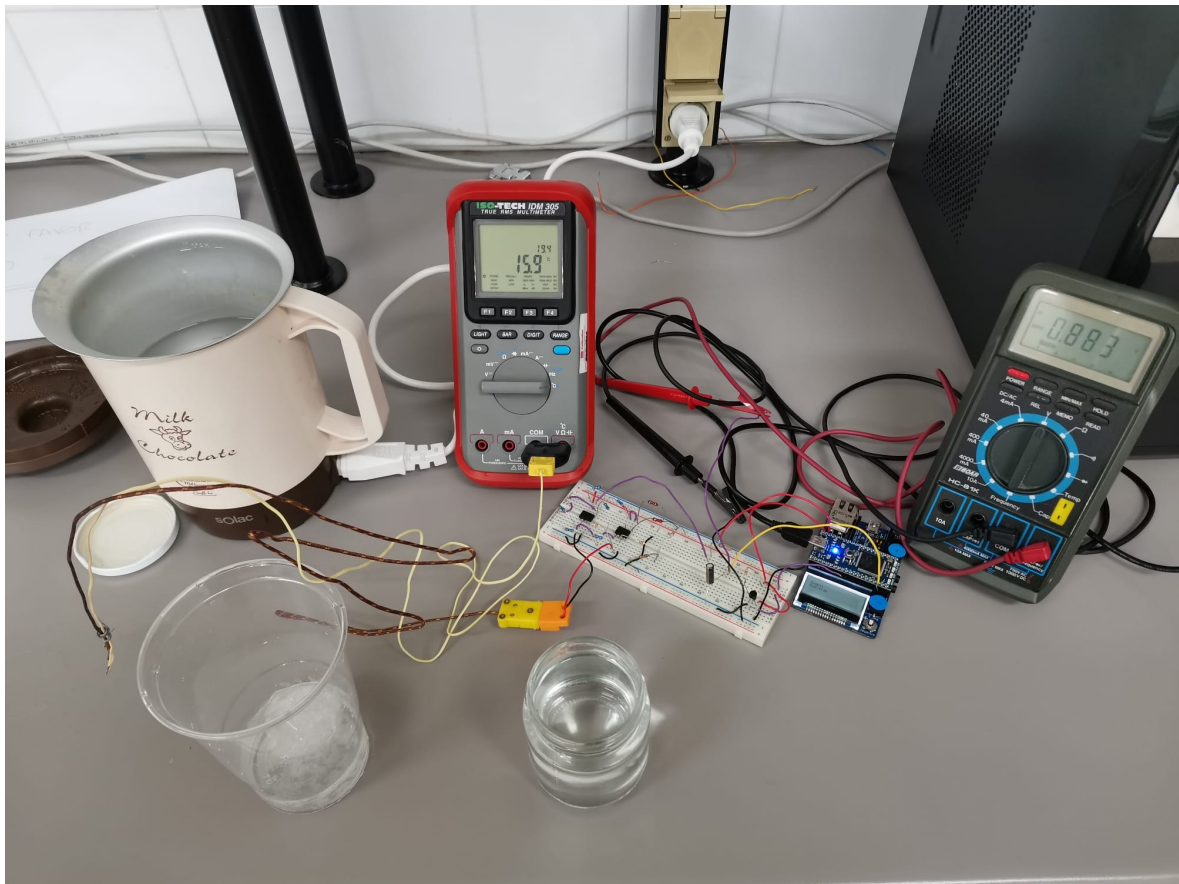


Medidor de temperatura digital (microcontrolador)

Aitor García Blanco, Inés Rodríguez Barquero, Rocío Díaz Somalo

2 Febrero 2021



Índice

1. Introducción	3
2. Termopar	3
3. Puente de Wheatstone	5
4. Amplificador de Instrumentación	6
5. Filtro de pasa baja	8
6. Programa en microcontrolador	9
7. Análisis laboratorio	14
7.1. Puente de Wheatstone	14
7.2. Amplificador de instrumentación	14
7.3. Montaje final del termómetro	16
8. Bibliografía	19

1. Introducción

En este proyecto queremos construir un medidor de temperatura digital a través del uso de un termopar que mida temperaturas entre -10°C y 120°C aunque, como explicaremos más adelante nuestro resultado final será un termómetro entre 2°C y 40°C .

Podemos dividir el proyecto en dos grandes bloques, la parte analógica y la parte digital. En primera instancia, se realizará el montaje de una serie de estructuras eléctricas, a partir de las cuales obtendremos una señal que tendremos que transformar haciendo uso de un microcontrolador.

Partiremos, inicialmente, del puente de Wheatstone para obtener una diferencia de potencial similar a la señal que nos proporcionará el termopar. Dicha señal, será muy pequeña por lo que, la amplificaremos mediante el uso de un amplificador de instrumentación, a cuya salida acoplaremos un filtro de pasa baja para disminuir el ruido de la señal.

Por otra parte, será necesario recurrir a la aplicación de Mbed para implementar mediante microcontrolador los datos obtenidos en el circuito.

2. Termopar

El termopar consiste en una unión de dos metales, que se conectan entre sí en sus extremos. En uno de los extremos encontramos el punto de medición, lo que se conoce como la junta caliente. Este punto de contacto puede ser o bien, enroscándose ambos filamentos o bien soldándose, como se muestra en la figura 1. Este último es el más utilizado ya que tiene una alta resistencia a las vibraciones.

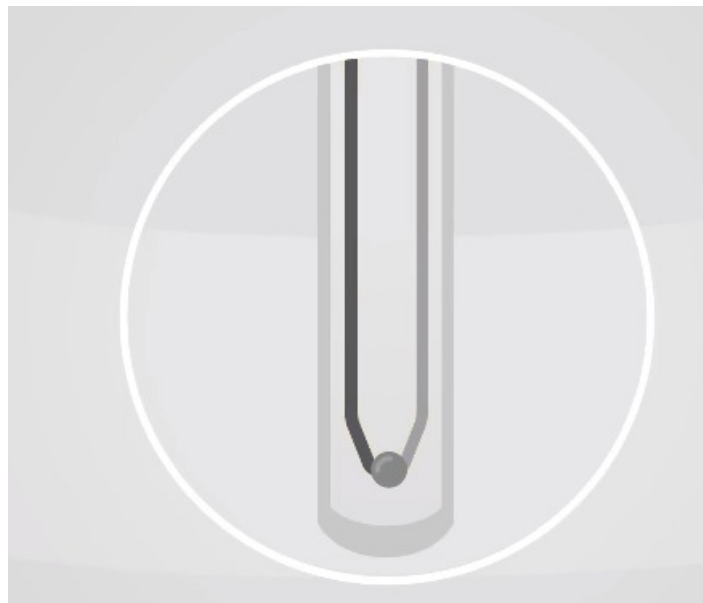


Figura 1: Punta soldada de un termopar.

La operación del termopar se basa en el efecto Seebeck. Este efecto consiste en el principio de que, si hay una unión entre dos metales diferentes, y los dos se mantienen a diferentes temperaturas, aparecerá una diferencia en el potencial eléctrico entre los dos metales.

Cuando la temperatura en el punto de medición aumenta o disminuye, la densidad de los electrones de los dos metales también cambia, este cambio de tensión se mide en los extremos de los cables. Un termopar nunca mide la temperatura absoluta, si no que mide la diferencia de temperatura entre el punto de medición, la llamada junta caliente, y el de conexión, la llamada junta fría. Por lo tanto, los termopares requieren la llamada compensación de la unión fría que, garantiza que la temperatura ambiente de los terminales de la unión fría no influya en el resultado de la medición. Su esquema se muestra en la figura 2.

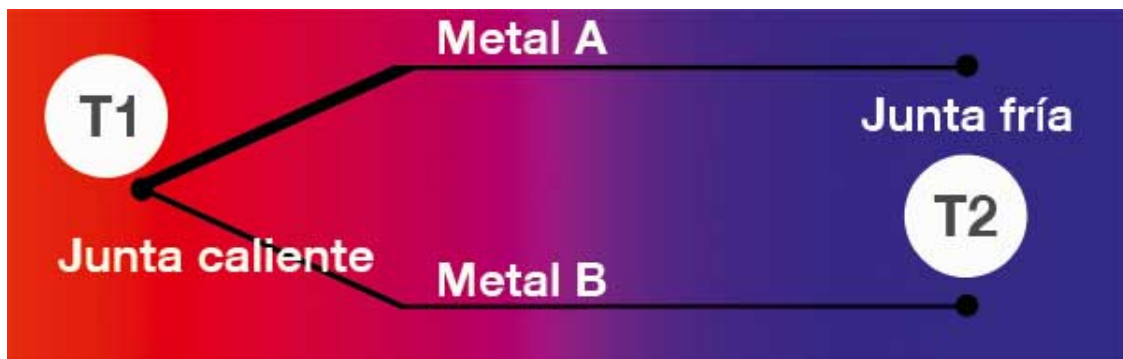


Figura 2: Esquema de un termopar.

La curva de temperatura del termopar, que relaciona la temperatura con la diferencia de potencial en sus terminales, varía según el tipo de termopar.

Para lograr tensiones térmicas lo mas elevadas posibles se emplean combinaciones especiales de materiales cuyas electro-negatividades individuales sean lo mas diferentes posibles.

En nuestro experimento, utilizaremos el termopar tipo K. El sensor tipo K consiste en la combinación de níquel-cromo y níquel-aluminio, siendo muy barato y popular.

Su rango de temperatura está entre $-200^{\circ}C$ y $1200^{\circ}C$, y su sensibilidad es de aproximadamente $41 \mu V/^{\circ}C$. Por lo tanto, la escala varía de $-6.4mV$ a $49mV$. Este tipo es ampliamente utilizado en actividades químicas y petroquímicas para mediciones de temperatura.

3. Puente de Wheatstone

Un puente de Wheatstone es un circuito eléctrico que consta de cuatro resistencias conectadas en forma de diamante unidas a una fuente de corriente V_{cc} y a una toma a tierra GND , tal y como se muestra en la figura 3.

Analizando el circuito tenemos que

$$V_1 = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

$$V_2 = V_{in} \frac{R_x}{R_3 + R_x} \quad (2)$$

Estableciendo que $R_1 = R_3 = R$ tenemos que la diferencia de potencial de salida del puente es de:

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{R_x}{R + R_x} - \frac{R_2}{R + R_2} \right) \quad (3)$$

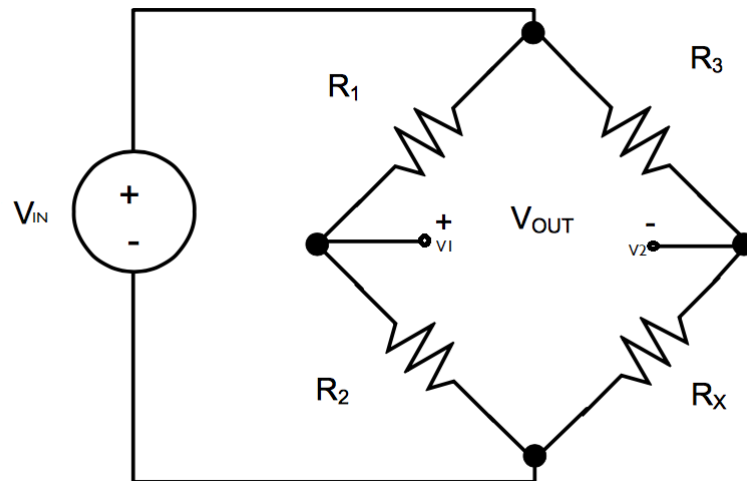


Figura 3: Esquema del puente de Wheatstone.

4. Amplificador de Instrumentación

El amplificador de instrumentación es un dispositivo electrónico que está constituido por amplificadores operacionales en modo de amplificador diferencial de ganancia controlada (restador).

Hemos elegido este tipo de amplificador principalmente debido a las ventajas que presenta que son: su alta impedancia de entrada y el control simplificado de la ganancia.

Las características principales son las siguientes:

1. Presentan una ganancia diferencial precisa y estable, generalmente en el rango de 1 a 1000.
2. Su ganancia diferencial es controlada mediante un único elemento analógico (R_{gain}).
3. Alta impedancia de entrada para que su ganancia no se vea afectada por la impedancia de la fuente de entrada.
4. Ganancia en modo común muy bajo respecto de la ganancia diferencial, esto es, debe ofrecer un rechazo al modo común muy alto en todo el rango de frecuencia en que opera.
5. Impedancia de salida muy baja para que su ganancia no se vea afectada por la carga que se conecta a su salida.
6. Un factor de ruido muy próximo a la unidad.
7. Nivel alto en la razón de rechazo al rizado a la fuente de alimentación.
8. Bajo nivel de la tensión de offset del amplificador.

La función del amplificador de instrumentación va a ser amplificar la señal de salida proporcionada por el puente de Wheatstone o el termopar.

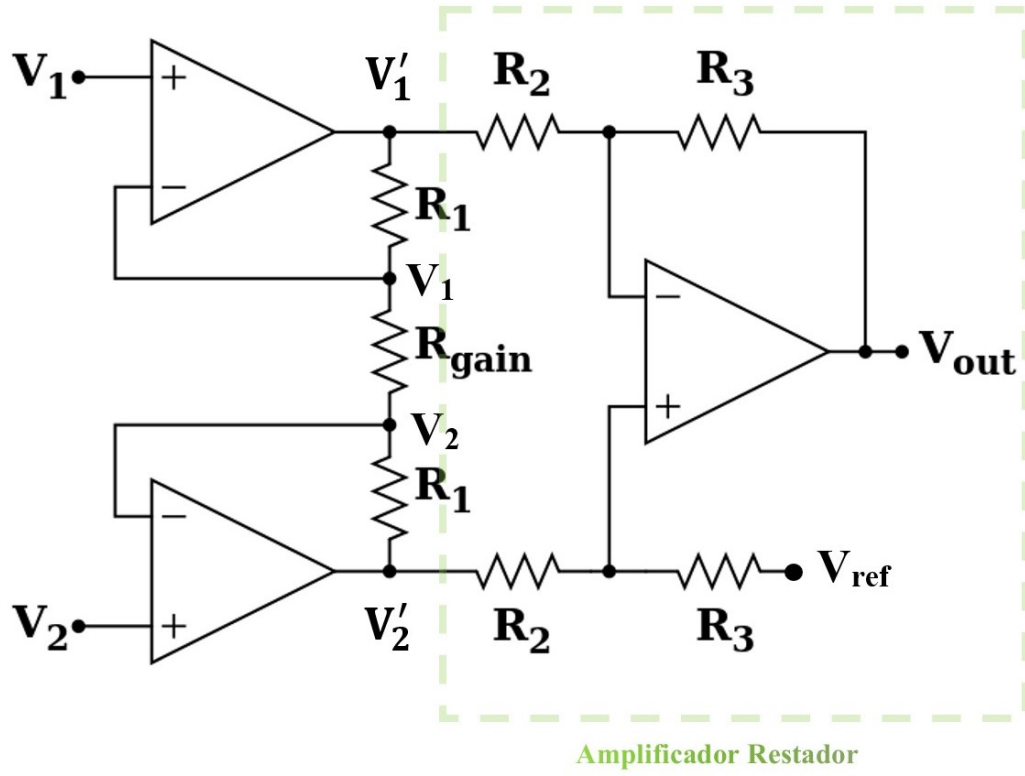


Figura 4: Esquema de un amplificador de instrumentación.

Analizando el circuito anterior, tenemos que:

$$\frac{V_1' - V_1}{R_1} = \frac{V_1 - V_2}{R_{gain}} = \frac{V_2' - V_2}{R_1} \quad (4)$$

de donde obtenemos

$$V_1' = \frac{(V_1 - V_2)R_1}{R_{gain}} + V_1 = \frac{1}{R_{gain}} [V_1(R_1 + R_{gain}) - V_2R_1] \quad (5)$$

$$V_2' = \frac{(V_1 - V_2)R_1}{R_{gain}} + V_2 = \frac{1}{R_1} [V_2(R_1 + R_{gain}) - V_1R_1] \quad (6)$$

que junto a la expresión del amplificador restador

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1}(V_2' - V_1') + V_{ref} \quad (7)$$

sustituyendo, se tiene que:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}} \right) (V_2 - V_1) + V_{ref} \quad (8)$$

Tanto para la V_{ref} como para el modo común del amplificador hemos empleado un divisor de tensión que toma la siguiente forma:

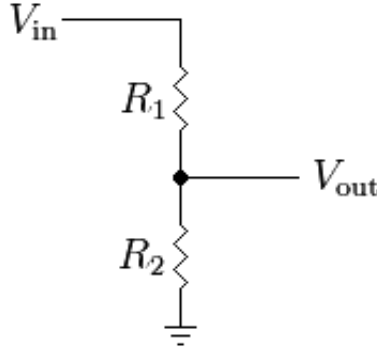


Figura 5: Esquema del divisor de tensión.

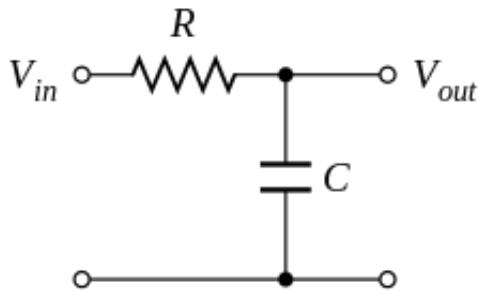
donde

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (9)$$

Para el modo común, empleamos una resistencia a la salida de V_{out} para limitar la intensidad que sale del divisor de tensión. Para la V_{ref} empleamos un amplificador de los circuitos integrados. Esto se debe a que el amplificador presenta una resistencia interna lo suficientemente elevada como para limitar la intensidad.

5. Filtro de pasa baja

Algo inherente a los sistemas reales es el ruido que las señales presentan. Por esto, la señal de salida del amplificador, va a presentar señales no deseadas que se mezclan con la señal a estudiar, es decir, va a presentar ruido. Para aminorar este efecto, vamos a introducir en el circuito un filtro.



El esquema de la figura 6 nos muestra un filtro de pasa baja. Utilizaremos este tipo de filtro ya que el rango de frecuencia de trabajo se sitúa entre los 5 y los 10 Hz.

Conectaremos dicho filtro a la señal de salida V_{out} del amplificador.

Figura 6: Esquema de un filtro de pasa baja.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (10)$$

Esta frecuencia de corte toma valor de 10 Hz, por lo que, obtenemos unos valores teóricos del condensador y la resistencia de $C = 8\mu F$ y $R = 2000\Omega$.

6. Programa en microcontrolador

Gracias a las medidas experimentales, podemos desarrollar una expresión lineal que nos de el valor de la temperatura a partir de un voltaje de entrada, esta será implementada en un pequeño programa en el microcontrolador. Dicha expresión es

$$T - T_{ref} = aV + b \quad (11)$$

Donde a y b vienen dadas por dichos resultados experimentales. La temperatura T es la que queremos obtener y T_{ref} es la temperatura de la junta fría del termopar.

En la implementación, tenemos una función (temperatura) que recoge seis valores de tensión de entrada y nos hace la mediana. Además, nos da el valor de la temperatura, empleando la expresión 11.

Como esta temperatura puede dar lugar a resultados imprecisos debido a variaciones en las condiciones experimentales, incluimos la opción de calibrar midiendo la temperatura en los extremos de la escala con dos interrupciones que activaremos con un joystick en la placa. Ajustaremos el valor de entrada en 0 y 100 grados centígrados, actualizando los coeficientes en la función temperatura.

El diagrama de estados es el siguiente:

- Estado 1: Imprimimos la temperatura.
- Estado 2: Calibrado a la mínima temperatura de calibración.
- Estado 3: Calibrado a la máxima temperatura de calibración.
- Estado 4: Mostrar T_{max} y T_{min} .

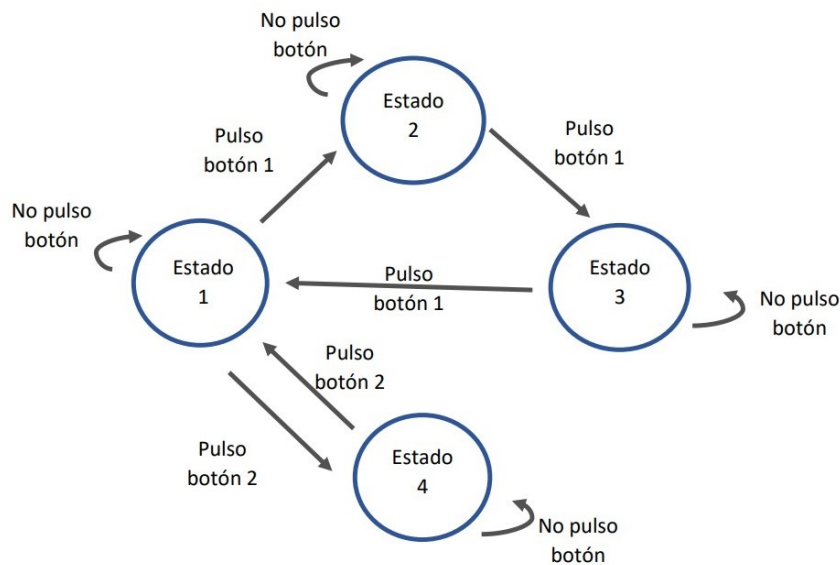


Figura 7: Diagrama de estados

El diagrama de flujo es:

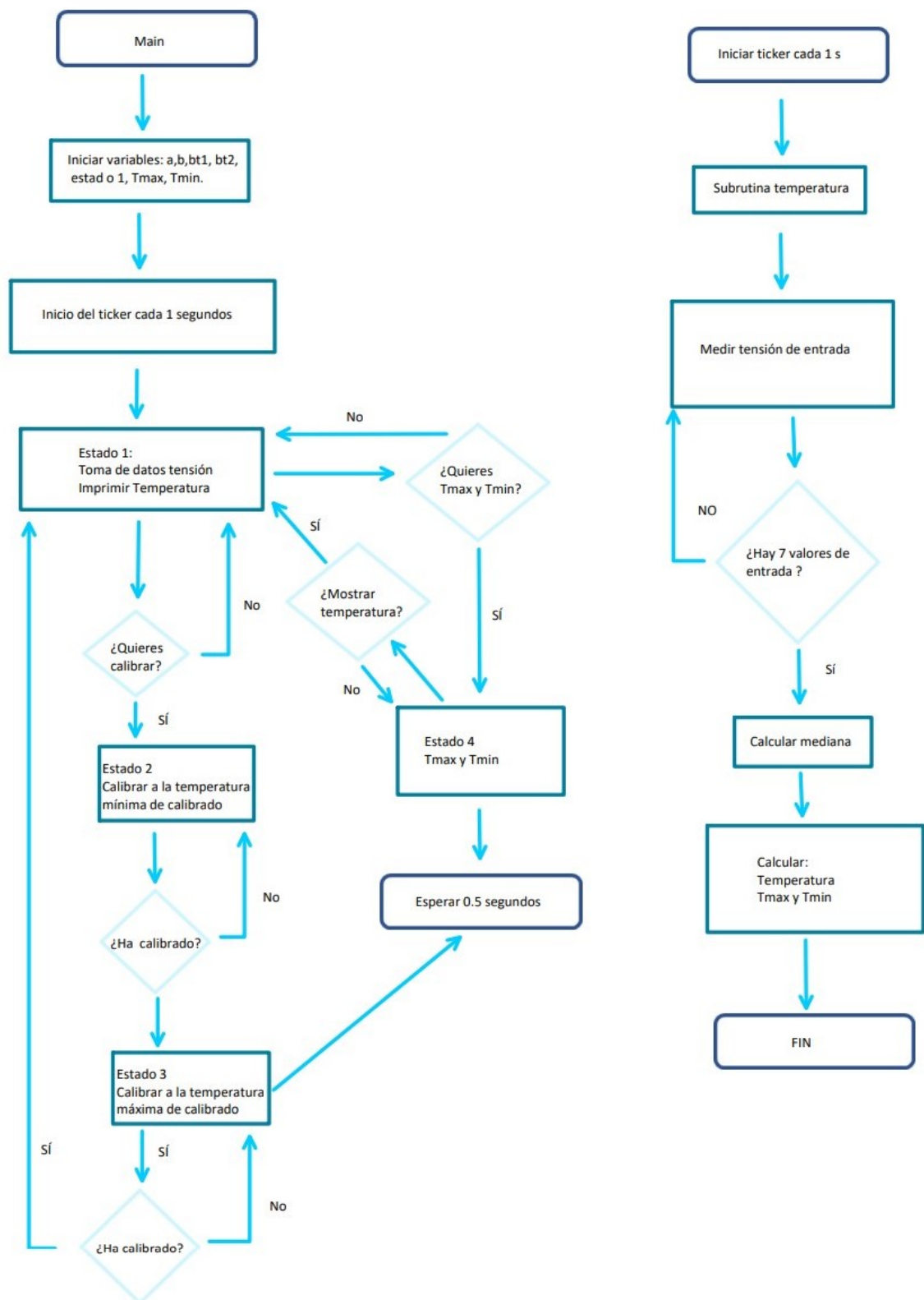


Figura 8: Diagrama de flujo

Código del microcontrolador:

```
#include "mbed.h"
#include "DebounceIn.h"
#include "DS1820.h"
#include "C12832.h"
#define calmax 40
#define calmin 2

C12832 lcd(p5, p7, p6, p8, p11);
DS1820 termoref(p9);
AnalogIn termov(p18);
DebounceIn btn1(p15);
DebounceIn btn2(p12);

bool oldbtn1;
bool oldbtn2;
bool bt1;
bool bt2;

float tvector[7];
float voltaje;
float temp;
float Tmax;
float Tmin;
float termor;
int i;
int j;
int x;
float a;
float b;
float paso;
float Vmax;
float Vmin;
int estado;
Ticker ticc;
Ticker tomart;
Ticker tic2;

void temperaturaref ()
{
    termor=termoref.temperature();
}

void temperatura ()
{
    // CONTINUA TOMA DE DATOS CON DESPLAZAMIENTO
    tvector[6]=3.3*termov.read();
    for (i=1; i<7; i++) {
        j=i-1;
        tvector[j]=tvector[i];
    }
    // ORDENAMOS EL VECTOR
    for (i = 0; i < (6); i++) {
        for (j = i + 1; j < 7; j++) {
            if (tvector[j] < tvector[i]) {
                paso = tvector[j];
                tvector[j] = tvector[i];
                tvector[i] = paso;
            }
        }
    }
}
```

```

    }
}
voltaje = tvector[3];
temp=((voltaje-b)/a)+termor;

//TEMPERATURA MAXIMA Y MINIMA
    if (temp>Tmax) {
        Tmax=temp;
    } else if (-19<temp && temp<Tmin) {
        Tmin=temp;
    }
}
int main ()
{
    ticc.attach(&temperaturaref,2); //TOMA TEMPERATURA DE REFERENCIA.
    tomart.attach(&temperatura,1);
    a=0.0214422840268792;
    b=0.968772722;
    bt1=false;
    bt2=false;
    estado=1;
    Tmax=-20.0;
    Tmin=120.0;

    while (1) {
        int ret=termoref.convertTemperature(true);

        if (btn1==1 && oldbtn1==false) {
            bt1=true; //arriba
        } else {
            bt1=false;
        }
        oldbtn1=btn1;
        if (btn2==1 && oldbtn2==false) {
            bt2=true;
        } else {
            bt2=false;
        }
        oldbtn2=btn2;

        switch (estado) {
            case 1:
                //TOMA DE DATOS DEL VOLTAJE
                if (btn2==1) {
                    estado=2;
                }
                if (btn1==1) {
                    estado=4;
                }
                lcd.cls();
                lcd.locate(0,0);
                lcd.printf("T=%.2f\n",temp);
                lcd.locate(0,9);    lcd.printf("Tref=%.2f\n",termor);
                printf("Tref=%.2f_\n",termor);
                printf("Volt=%.2f_\n",voltaje);
                break;
            case 2: //CALIBRAR A T=2

```

```

        lcd.cls();
        lcd.locate(0,0);
        lcd.printf("T=2_V= %.2f\n", voltaje);
        //CREAMOS V=aT+b
        if (btn2==1) {
            Vmin=voltaje;
            estado=3;
        }
        break;
    case 3: //CALIBRAR A T=40
        lcd.cls();
        lcd.locate(0,0);
        lcd.printf("T=40_V= %.2f\n", voltaje);
        if (btn2==1) {
            Vmax=voltaje;
            //CALCULAR A Y B
            a=Vmax/(calmax-calmin)-Vmin/(calmax-calmin);
            b=Vmax-a*(calmax-termor);
            estado=1;
        }
        break;
    case 4: //MODO TMAX Y TMIN
        lcd.cls();
        lcd.locate(0,0);
        lcd.printf("M= %.1f ,m= %.1f\n", Tmax, Tmin);
        if (btn1==1) {
            estado=1;
        }
        break;
    }
    wait(0.5);
}
}

```

7. Análisis laboratorio

En esta sección se realizará el análisis de los datos obtenidos tanto por simulación como experimentalmente. Se trabajará siguiendo las directrices teóricas vistas en los anteriores apartados para finalizar mostrando el termómetro resultante montado en el laboratorio.

7.1. Puente de Wheatstone

El objetivo es simular un termopar tipo K que permita obtener temperaturas entre $-10^{\circ}C$ y $120^{\circ}C$. Tomando en consideración que la temperatura ambiente puede oscilar entre los $10^{\circ}C$ y los $20^{\circ}C$, y ya que el voltaje dado por el termopar se produce en relación a este, se considera que la diferencia de temperatura en la que opera el termopar variará entre los $-30^{\circ}C$ y los $110^{\circ}C$. Consultando las tablas de referencia para el termopar tipo K, los voltajes correspondientes a la temperatura máxima y mínima fijadas son $V_{max} = 4,5mV$ y $V_{min} = -1,15mV$ respectivamente.

Para elegir las resistencias del puente de Wheatstone que permiten obtener estos valores, se emplea la expresión 3 aplicando una fuente de $5V$. Se fijan los valores de R_1 , R_2 y R_3 , permitiendo que la variación de R_x proporcione los voltajes deseados. Así, para lograr un modo común de $2V$, se emplea $R_1 = 1000\Omega$, $R_2 = 680\Omega$, $R_3 = 1000\Omega$, con lo que los límites de R_x resultan $R_{min} = 676,65\Omega$ y $R_{max} = 680,00\Omega$. Realizando una simulación del circuito en LTSpice se observa que, efectivamente, se barre el rango de voltaje deseado.

En el montaje experimental se utiliza un potenciómetro manual, que barre con precisión el rango especificado, en la posición de la resistencia R_x . Así, con ayuda de un multímetro, es posible generar desde $-1,15mV$ hasta $4,5mV$ de forma exacta.

La fuente V_{IN} del puente es de $5V$ debido a que experimentalmente, se elige emplear una única fuente para todas las necesidades. Esta fuente es la disponible en la placa MBED.

7.2. Amplificador de instrumentación

Gracias a la emulación del termopar, es posible continuar con la tarea de amplificación y constatar los resultados. Igualmente, se emplea la fuente de $5V$. Para realizar el circuito se ha utilizado los amplificadores operacionales TLV2462, que operan adecuadamente con el suministro de $5V$. Las resistencias del circuito de la figura 4, vienen determinadas por el uso de la ecuación 8 junto con los dos puntos fijados, el máximo y mínimo voltaje de entrada y salida. Para $V_{min} = -1,15mV$ se asigna una salida amplificada de $V_{out} = 0,5V$ y a $V_{max} = 4,5mV$ se le asigna de $V_{out} = 4,0V$. De esta forma quedan también determinadas la ganancia y el voltaje de referencia.

Debido a la necesidad de ajustarse a los elementos que se disponían en el laboratorio, se realizaron una serie de cambios en las resistencias. Con ello, la ganancia se vio reducida. Para lograr el voltaje de referencia a partir de la fuente de $5V$, se empleó un amplificador seguidor junto con el divisor de tensión. Las resistencias de divisor, son halladas por medio de la expresión 9. Sus valores, atendiendo a la figura 5 son

$R_2 = 820\Omega$ y $R_1 = 2200\Omega$. Finalmente, los valores de las resistencias del amplificador de la figura 4 fueron $R_1 = 22k\Omega$, $R_2 = 820\Omega$, $R_{gain} = 1k\Omega$, $R_3 = 10k\Omega$. El voltaje de referencia obtenido fue $V_{ref} = 1,375V$ y la ganancia $G = 546,58$.

Los datos obtenidos mediante la simulación del circuito en LTSpice, se muestran en la figura 9. Como puede observarse, la señal se satura en los voltajes más altos, por ello la ganancia obtenida era más baja que la teorizada, $G = 480,59$.

Siguiendo con el trabajo de laboratorio, se realizó el montaje del circuito y se obtuvieron los datos que se recogen en la figura 10. Igualmente se empleó una única fuente. En esta ocasión, la ganancia se vio aumentada respecto a la simulada $G = 563,561$, no se vieron signos de saturación. Debido a que el valor de la ganancia era mayor de lo deseado, se cambió la resistencia R_{gain} a un valor de $1k\Omega$.

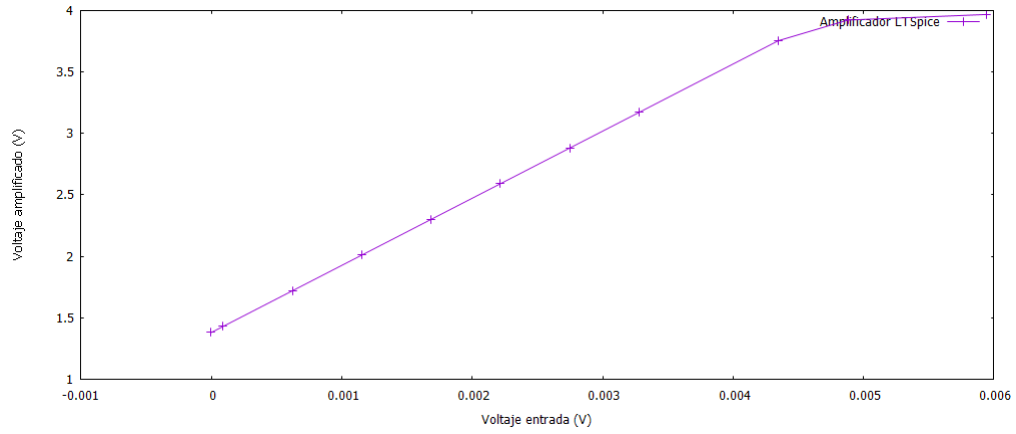


Figura 9: Gráfica para obtener la ganancia con los datos obtenidos del LTSpice.

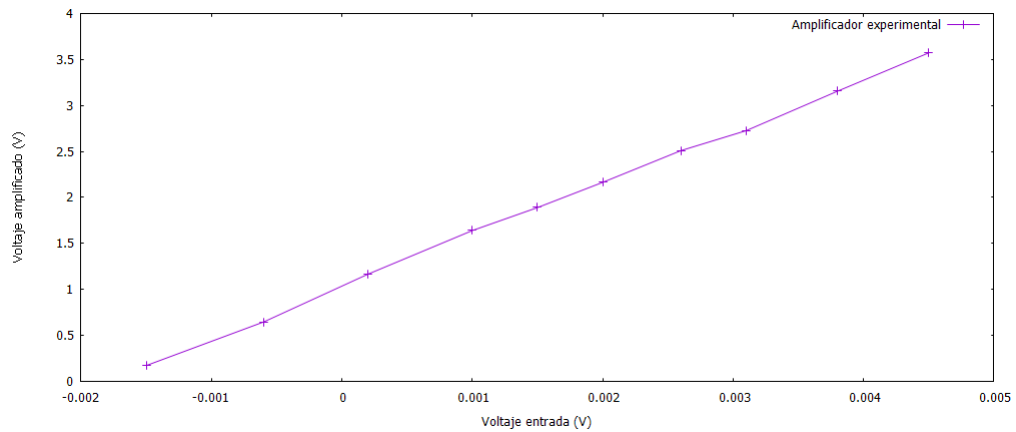


Figura 10: Gráfica para obtener la ganancia con los datos experimentales.

Debido al ruido encontrado mediante el osciloscopio, en la señal amplificada, se empleó el filtro detallado en la sección teórica. La ecuación que caracteriza la frecuencia de corte es la 10, su valor es de 10Hz , por lo que, obtenemos unos valores teóricos del condensador y la resistencia de $C = 8\mu\text{F}$ y $R = 2000\Omega$. Gracias a él, la señal de salida pasó de tener el ruido que se muestra en la figura 11, a ser una señal mucho más limpia, como se observa en la figura 12.

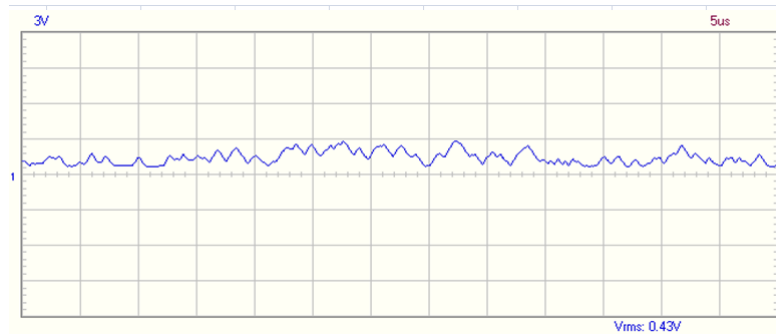


Figura 11: Señal de salida sin filtro.

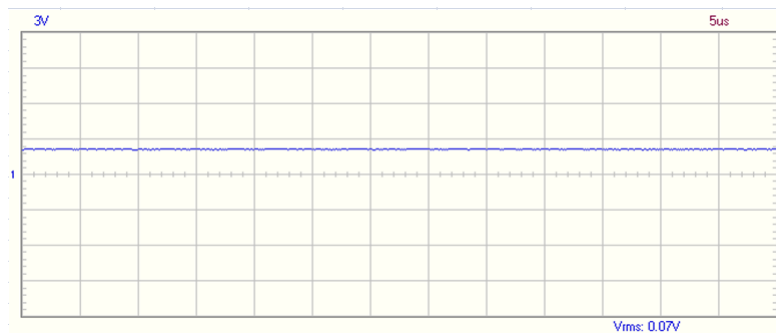


Figura 12: Señal de salida con filtro.

Con esto se concluye la parte analógica, pues se han obtenido unos resultados óptimos para avanzar a la parte digital.

7.3. Montaje final del termómetro

Previo al montaje experimental, cabe destacar que se empleó dos fuentes de 5V para emular el correcto funcionamiento del sistema. Para ello, se colocó un divisor de tensión a la entrada del amplificador aportando así, el modo común necesario. Una vez hecho esto, se reemplazó el puente de Wheatstone por el termopar, manteniendo el modo común a través del divisor ya mencionado.

Habiendo concluido así con el desarrollo de la parte analógica y digital, se realiza la unión de ambas, completando así el termómetro deseado. Para comprobar su correcto funcionamiento se dispuso de:

- Termómetro formado por un multímetro con termopar.
- Agua a temperatura ambiente.

- Calentador eléctrico de agua.
- Hielo.

Tras la instalación de los componentes, se procedió a calibrar el termómetro empleando el modo destinado a esta función. Los valores extremos de temperatura que se lograron fueron 2°C de mínima y 80°C de máxima. Así, en primer lugar, se introdujo el termopar del termómetro del proyecto en agua con hielo, hasta que el voltaje mínimo medido se estabilizó. Entonces se realizó el mismo procedimiento en el agua contenida en el calentador eléctrico, hasta lograr la tensión máxima.

Una vez calibrado, se procedió a comprobar la veracidad del resultado. Para ello, se comparó la temperatura dada por el modo de medición del termómetro, con la temperatura dada por el multímetro dispuesto. Empleando los recursos mencionados, se tomaron medidas barriendo todo el rango disponible, obteniéndose resultados iguales con los dos métodos para temperaturas cercanas al máximo y al mínimo, pero con diferencias de hasta más 10 grados en los puntos intermedios. Tratando de ver la raíz de tal problema, se estudió el multímetro empleado.

Se tomaron datos de temperatura dados por el multímetro y valores de voltaje dados por el amplificador del termómetro del proyecto con el fin de estudiar si su relación es lineal, tal y como es supuesto en el programa del termómetro del proyecto. Los resultados se muestran en la figura 13. Como puede apreciarse, no es posible ajustar un modelo lineal para todo el rango de temperaturas. Se retiran entonces, los datos para las temperaturas más altas. El nuevo análisis se muestra en la figura 14, donde puede verse que el ajuste lineal es preciso. En ambas gráficas se ha tenido en cuenta la temperatura de referencia.

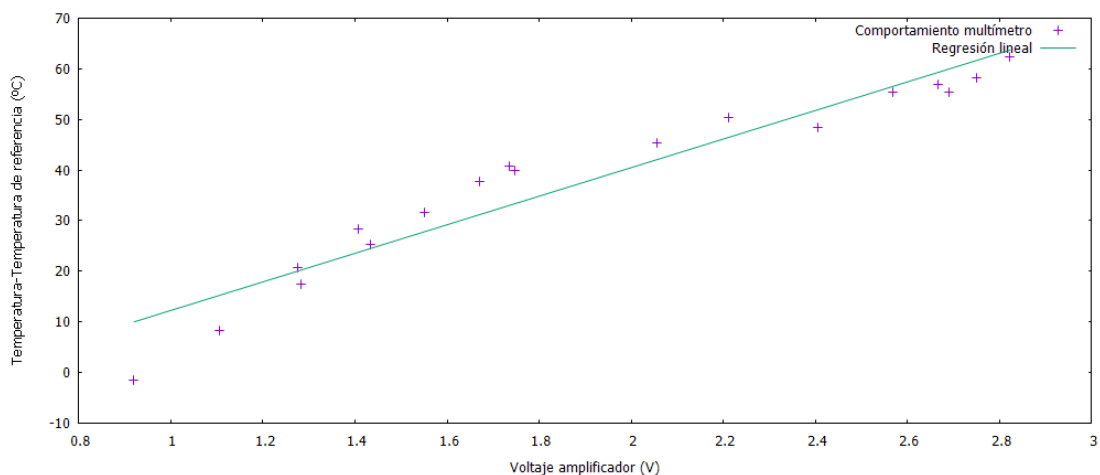


Figura 13: Gráfica experimental desde -10°C hasta 120°C .

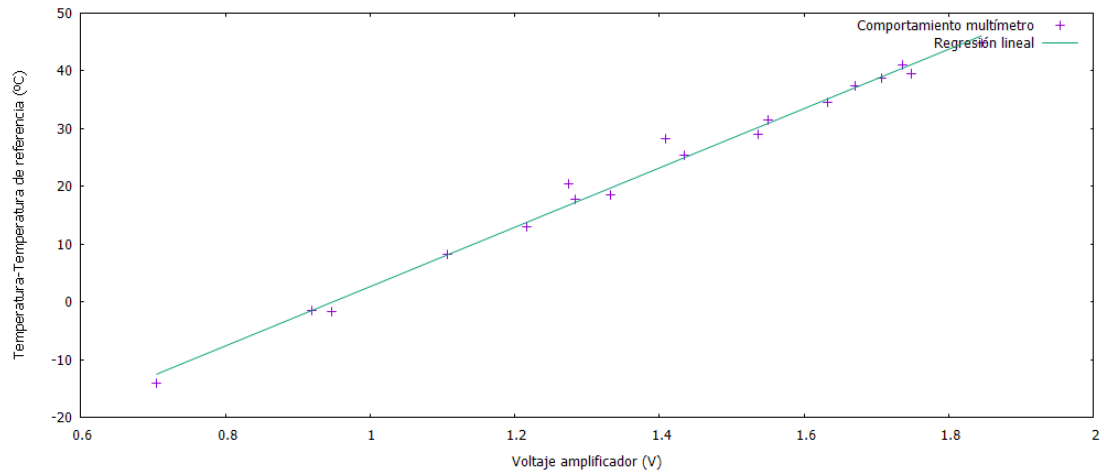


Figura 14: Gráfica experimental desde $2^{\circ}C$ hasta $40^{\circ}C$.

Debido a que el comportamiento lineal del multímetro se ha reducido respecto al supuesto, se procede a calibrar de nuevo el termómetro del proyecto, empleando como máxima temperatura $40^{\circ}C$ y manteniendo el mínimo de $2^{\circ}C$. Tras ello, se compara la temperatura dada por el modo de medición del termómetro con la del multímetro, resultando ambas prácticamente iguales en todo el mencionado intervalo.

8. Bibliografía

1. <https://amplificadores.info/amp-op/instrumentacion>
2. <https://youtu.be/1wwAQNECC9A>
3. <https://www.circuitos-electricos.com/termopar-que-es-y-como-funciona/>
4. <https://www.tc-sa.es/termopares-informacion/termopares-informacion-tecnica.html>
5. <https://www.digikey.es/es/articles/makers-engineers-get-to-know-instrumentation-amplifier-accurate-iot-data-capture>
6. <https://www.eetimes.com/basics-of-using-precision-instrumentation-amplifiers-in-single-supply-designs/>
7. <https://os.mbed.com/>
8. Hoja de características TLV2462.
<https://www.digikey.com/en/products/detail/texas-instruments/TLV2462CP/277537>
9. Hoja de características DS18S20.
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18S20.pdf>