

PRÁCTICA N°2

Acondicionamiento de señales

Objetivos

- Hacer una aproximación a dos tipos de circuitos muy usuales para el acondicionamiento de señales provenientes de un sensor
- Comprender las diferencias, ventajas y desventajas de dos circuitos para el acondicionamiento de señales de un sensor de temperatura
- Construir un circuito de acondicionamiento de señal para un sensor de temperatura tipo PT100, con el propósito de tener los datos en formato digital.

Teoría

Muchas aplicaciones implican medidas ambientales o estructurales mediante sensores, como es el caso de la temperatura y las vibraciones. Estos sensores, a su vez, requieren el acondicionamiento de las señales antes de que un dispositivo de adquisición de datos pueda medir con eficacia y precisión la señal. El acondicionamiento de señal es uno de los componentes más importantes de un sistema de adquisición de datos; ya que, sin la optimización de las señales del mundo real para el digitalizador que se esté utilizando, no se puede confiar en la exactitud de la medida.

Las necesidades de acondicionamiento de las señales varían ampliamente dependiendo de la funcionalidad del sensor, por lo que ningún instrumento puede proporcionar todo tipo de acondicionamiento para todos los sensores. Por ejemplo, los termopares producen señales de muy baja tensión, lo cual requiere linealización, amplificación y filtrado, mientras que las galgas extensiométricas y acelerómetros necesitan excitación. Otras señales pueden no necesitar ninguna de ellas, sino que se basan en gran medida en el aislamiento de alta tensión. La clave para lograr un exitoso sistema de acondicionamiento de señales es entender los circuitos que son necesarios para garantizar una medida precisa cualquiera que sea la combinación de canales.

La siguiente lista ofrece tipos comunes de acondicionamiento de señales, sus funcionalidades, y ejemplos de cuando se necesitan:

Amplificación

Los amplificadores incrementan el nivel de tensión para lograr una mejor adaptación al rango del convertidor analógico-digital (ADC), incrementando así la resolución de la medida y la sensibilidad. Además, la localización de los acondicionadores de señal externos más cerca de la fuente de la señal o del transductor, mejora la relación de la señal con respecto al ruido de la medida, mediante el incremento del nivel de la tensión antes de que se vea afectada por el ruido ambiental. Los sensores típicos que requieren de amplificación son los termopares y los medidores de deformaciones.

Atenuación

La atenuación, que es lo contrario que la amplificación, se necesita cuando las tensiones que se van a digitalizar están fuera del rango del ADC. Esta forma de acondicionamiento de la señal disminuye la amplitud de la señal de entrada de modo que la señal acondicionada quede dentro del rango de tensión del ADC. La atenuación es típicamente necesaria cuando se miden tensiones de más de 10 V.

Filtrado

Los filtros rechazan el ruido no deseado dentro de un determinado rango de frecuencias. A menudo, los filtros paso-bajo se utilizan para bloquear el ruido de las medidas eléctricas, tales como el procedente de los 50/60 Hz de la red eléctrica. Otro uso común del filtrado es evitar el "aliasing" de las señales de alta frecuencia. Esto se puede hacer mediante el uso de un filtro "anti-aliasing" que atenúan las señales por encima de la frecuencia de Nyquist. Los filtros anti-alias son un tipo de filtro paso-bajo que se caracteriza por tener una banda de paso plana y una caída rápida. Debido a que las medidas de los acelerómetros y de los micrófonos se analizan comúnmente en el dominio de la frecuencia, los filtros anti-aliasing son ideales para aplicaciones de sonido y vibración.

Aislamiento

Señales de tensión que están bastante fuera del rango del digitalizador pueden dañar al sistema de medida y al operador. Por esa razón, se requiere generalmente el aislamiento junto con la atenuación para proteger al sistema y al usuario de las tensiones peligrosas o de los picos de tensión. El aislamiento también puede ser necesario cuando el sensor está en un plano de tierra diferente del sensor de medida, tal como ocurre con un termopar montado en un motor.

Excitación

Se requiere una excitación en muchos tipos de transductores. Por ejemplo, las galgas extensiométricas, los acelerómetros, los termistores y las RTDs requieren tensiones externas o corriente de excitación. Las medidas de RTDs y de termistores se hacen con una fuente de corriente que convierte la variación de la resistencia en una tensión medible. Los acelerómetros tienen a menudo un amplificador integrado, que requiere una corriente de excitación proporcionada por el dispositivo de medida. Las galgas extensiométricas, que son dispositivos de muy baja resistencia, se utilizan típicamente en una configuración de puente de Wheatstone con una fuente de excitación de tensión.

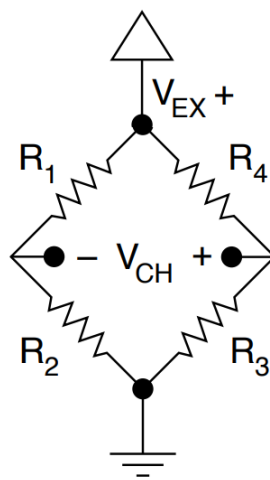


Figura 1. Excitación suministrada a un puente de Wheatstone¹

Linealización

La linealización es necesaria cuando los sensores producen señales de tensión que no están linealmente relacionados con las medidas físicas. La linealización, que consiste en el proceso de interpretación de la señal del sensor, se puede implementar mediante el acondicionamiento de la señal o por medio de software. Un termopar es el clásico ejemplo de un sensor que requiere linealización.

Compensación de la unión fría

Para obtener medidas precisas del termopar se requiere la compensación de la unión fría (CJC: Cold-Junction Compensation). Los termopares miden la temperatura como la diferencia de tensión entre dos metales diferentes. En base a este concepto, se genera otra tensión en la conexión entre el termopar y el terminal de un dispositivo de

¹ Imagen tomada de:

http://ftp.ni.com/evaluation/signal_conditioning/23807_Engineer_s_guide_to_signal_conditioning_Spanish_localisation_HR.pdf

adquisición de datos. La compensación de la unión fría mejora la precisión de la medida proporcionando la temperatura de esta unión y aplicando la corrección apropiada.

Sensores de temperatura

Los sensores más comunes que se utilizan para medir la temperatura son los termopares, RTDs (*resistance temperature detector*) y termistores. Estos sensores normalmente proporcionan una tensión de salida de bajo nivel dentro del rango de los milivoltios. La salida de estos sensores es demasiado baja para que los dispositivos de medida con un gran rango de entrada puedan medir con precisión. Por ejemplo, un rango de señal típica de un termopar es de ± 80 mV. Si se dispone de un digitalizador de 16 bits con un rango de ± 10 V, se está utilizando solo el 0,8 por ciento del rango dinámico del ADC. Para resolver este problema, se debe utilizar un amplificador que incremente el nivel de la señal de salida para que coincida con el rango dinámico del ADC.

Como se comentó previamente, los termistores, RTDs y termopares dan salida a señales que son a menudo muy cercanas a 0V; por lo tanto, la compensación de los errores del dispositivo de medida puede ser un factor importante dentro de la precisión global. El error de "offset" es la desviación de la temperatura medida en relación a la temperatura de referencia. Muchos dispositivos cuentan con una función de auto-cero incorporada que mide automáticamente dicho offset antes de adquirir los datos de la temperatura interna y compensan ese error en el dispositivo de medida. Si el dispositivo de medida no soporta la función de auto-cero, hay que asegurarse de que el dispositivo se calibra con regularidad y se utiliza el documento de especificaciones para identificar cómo el error de offset afecta a la precisión global.

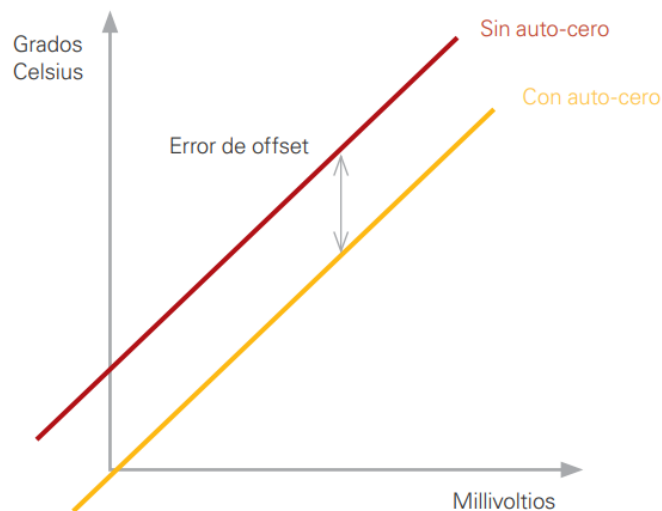


Figura 2. La función de auto-cero compensa el error de offset del dispositivo de medida ²

Detectores de temperatura resistivos

Los RDT son instrumentos que proporcionan lecturas de temperatura altamente precisas: los RTD industriales simples utilizados en un proceso de fabricación tienen una precisión de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, mientras que los termómetros de resistencia estándar de platino (SPRT) tienen una precisión de $\pm 0.0001^{\circ}\text{C}$.

Cerca de la temperatura ambiente, la resistividad de los metales típicamente aumenta a medida que aumenta la temperatura, mientras que la resistividad de los semiconductores típicamente disminuye a medida que aumenta la temperatura.

Como consecuencia, la resistencia de los cables, resistencias y otros componentes a menudo cambia con la temperatura. Este efecto puede no ser deseado, causando un mal funcionamiento en los circuitos electrónicos a temperaturas extremas. En algunos casos, sin embargo, el efecto es explotado. Cuando un componente usa la dependencia de la resistencia con la temperatura, este se denomina termómetro de resistencia o termistor. (Un termómetro de resistencia está hecho de metal, generalmente platino, mientras que un termistor está hecho de cerámica o polímero).

Los termómetros y los termistores de resistencia generalmente se usan de dos maneras. Primero, se pueden usar como termómetros: al medir la resistencia, se puede inferir la temperatura del ambiente. En segundo lugar, pueden usarse aprovechando el efecto Joule (también llamado autocalentamiento): si una gran corriente pasa a través de la resistencia, la temperatura de la resistencia aumenta y, por lo tanto, su resistencia cambia. Luego, estos componentes se pueden usar en una como protección de circuitos, similar a los fusibles, o para retroalimentación en circuitos, entre otros. En general, el autocalentamiento puede convertir una resistencia en un elemento de circuito no lineal con histéresis.

Si la temperatura T no varía demasiado, se puede usar una aproximación lineal:

$$R_x = R_0(1 + (\alpha * T)) \quad (1)$$

² Imagen tomada de:

http://ftp.ni.com/evaluation/signal_conditioning/23807_Engineer_s_guide_to_signal_conditioning_Spanish_localisation_HR.pdf

En donde α es el coeficiente de temperatura, T es la temperatura y R_0 es la resistencia del metal a 0°C . El parámetro α es obtenido empíricamente a partir de datos de medida experimentales.

De la ecuación 1 del cambio de resistencia con la temperatura, despejando la temperatura se obtiene:

$$T = \frac{\frac{R_x}{R_0} - 1}{\alpha} \quad (2)$$

La parte sensible de un RTD, llamado *elemento*, es una bobina de alambre de alta pureza y diámetro pequeño, generalmente construida de platino, cobre o níquel. Este tipo de configuración se llama elemento de cuerda enrollada.

Un modo de operación común es: un instrumento de medida aplica una corriente constante a través del RTD. A medida que la temperatura cambia, la resistencia cambia y se mide el cambio correspondiente en el voltaje. Esta medida luego se convierte a valores de temperatura en un controlador. Las ecuaciones de ajuste de curva se usan para definir esta relación resistencia vs. temperatura. El RTD se puede usar para determinar cualquier temperatura a partir de su resistencia medida.

Resistencia en los metales

Ya sea que un elemento de RTD esté construido de platino, cobre o níquel, cada tipo de metal tiene una sensibilidad, precisión y rango de temperatura diferentes. La sensibilidad se define como la cantidad de cambio de resistencia del sensor por grado de cambio de temperatura. La Figura 3 muestra la sensibilidad para los metales más comunes utilizados para construir RTD.

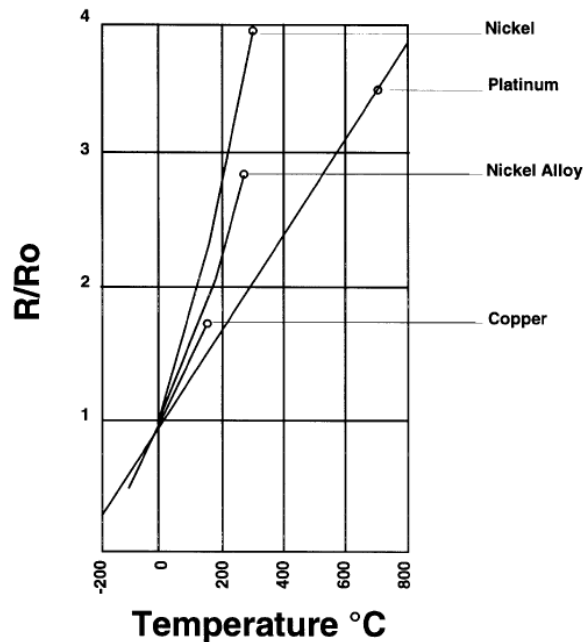


Figura 3. De los metales comunes, el níquel tiene la sensibilidad más alta.³

El platino, un metal noble, tiene la relación resistencia-temperatura más estable en el rango de temperatura más grande -184.44°C a 648.88°C . Los elementos de níquel tienen un rango de temperatura limitado debido a que la cantidad de cambio en la resistencia por grado de cambio en la temperatura se vuelve poco lineal a temperaturas superiores a 300°C (572°F). El cobre tiene una relación de resistencia a la temperatura muy lineal, sin embargo, este se oxida a temperaturas moderadas y no se puede usar a más de 150°C .

El platino es el mejor metal para elementos de RTD por tres razones. Sigue una relación de resistencia-temperatura muy lineal; sigue su relación de resistencia a la temperatura de una manera altamente repetible en su rango de temperatura; y tiene el rango de temperatura más amplio entre los metales utilizados para hacer RTD. El platino no es el metal más sensible; sin embargo, es el metal que ofrece la mejor estabilidad a largo plazo.

³ Imagen tomada de: Webster, J. G. (1998). *The measurement, instrumentation and sensors handbook*. CRC press.

Materiales

- Sistema Arduino Mega
- Sensor PT100
- Termómetro analógico
- Plancha de calentamiento
- Beaker pequeño
- Agua
- Potenciómetro 10k Ω
- Leds
- Cables para conexión
- Cable de alimentación/comunicación USB
- Protoboard
- 4 amplificadores UA741
- 2 potenciómetros de 5k Ω
- 2 resistencias de 10k Ω
- 2 resistencias de 3.3k Ω
- 2 resistencias de 100 Ω
- 2 resistencias de 47k Ω
- 2 resistencias de 8.2k Ω
- 2 resistencias de 3.9k Ω
- 2 resistencias de 560 Ω
- 4 resistencias de 22 Ω

Procedimiento

Sensor de temperatura

1. Lea y comprenda la teoría adjunta en el presente documento.
2. Conecte o encienda el cautín con el propósito generar el calor necesario para realizar las pruebas de la práctica.
3. Tome el sensor PT100 y mida su resistencia (entre terminal rojo y cualquier azul). Según la tabla del anexo ¿a qué temperatura se encuentra según esa resistencia? _____°C
4. Verifique que, al someter el sensor a una excitación calórica, la resistencia cambia (puede hacerlo calentándolo con sus manos o con el cautín). Recuerde que el tiempo de respuesta del sensor es muy bajo.
5. Monte en la protoboard el siguiente esquema y mida los voltajes entre (Vcc+ y VGND), (Vcc- y VGND), (Vcc+ y Vcc-) y repórtelos:

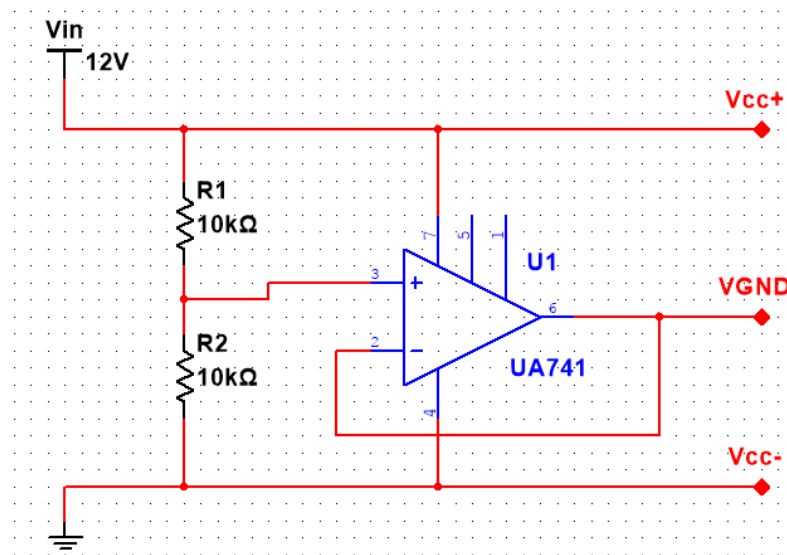


Figura 4: Esquema eléctrico para un divisor de voltaje con tierra aislada.

6. Luego realice el siguiente divisor de voltaje y mida la caída de voltaje en el sensor a temperatura ambiente (mida entre V_{b+} y V_{GND}). $V_{b+} = \text{---}V$

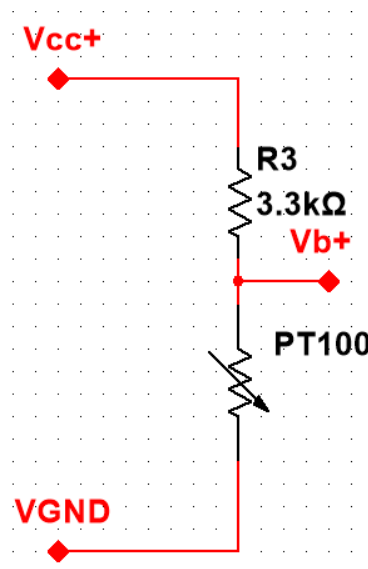


Figura 5: Esquema eléctrico para un divisor de voltaje con la PT100.

Luego someta a calor el sensor con el cautín o con las manos y observe el cambio en el voltaje medido.

Recuerde que la corriente que circula por el sensor debe ser pequeña para evitar calentamientos de esta por efecto Joule, es por esta razón que R_3 debe tener un

valor elevado, de esta forma si la resistencia del sensor varía entre 100Ω - 138.5Ω , la corriente mínima y máxima que circula por el sensor sería:

$$I_{min} = \frac{V}{R_{min}} = \frac{6V}{3.4k\Omega + 100\Omega} = \frac{6V}{3.4000k\Omega} = 1.76 \text{ mA}$$

$$I_{max} = \frac{V}{R_{max}} = \frac{6V}{3.4k\Omega + 138.5\Omega} = \frac{6V}{3.4385k\Omega} = 1.74 \text{ mA}$$

Suponiendo que se va a medir temperaturas entre 0°C y 100°C , el rango de voltajes medidos en el sensor serían:

$$V_{min} = V_{cc+} * \frac{R_{0^{\circ}\text{C}}}{R_3 + R_{0^{\circ}\text{C}}} = 6V * \frac{100\Omega}{3.3k\Omega + 100\Omega} = 0.176 \text{ V}$$
$$V_{max} = V_{cc+} * \frac{R_{100^{\circ}\text{C}}}{R_3 + R_{100^{\circ}\text{C}}} = 6V * \frac{138.5\Omega}{3.3k\Omega + 138.5\Omega} = 0.242 \text{ V}$$

Con esto se tiene un rango de voltaje $\Delta V = 0.242V - 0.176V \approx 65\text{mV}$ y con un offset de $0.176V$. Ya que en el laboratorio no se tendrán temperaturas por debajo de 0°C , este offset disminuirá la sensibilidad al amplificar el voltaje.

Por ejemplo, al conectar al Arduino cuya entrada analógica es de máximo $5V$, para obtener estos $5V$ a la máxima temperatura (100°C), el voltaje de salida ($0.242V$) tendría que multiplicarse por un factor de amplificación A tal que:

$$5V = A * 0.242V \rightarrow A = \frac{5V}{0.242V} = 20.661$$

Y si se multiplica el mínimo voltaje por este factor se obtiene:

$$V = A * 0.176V = 3.988V$$

Por lo que no se aprovecharía toda la resolución del Arduino.

Es por esto que es necesario quitar ese offset por medio de un puente de Wheatstone.

7. Realice el montaje en la protoboard del segundo divisor de voltaje como se muestra en la figura a continuación para completar el puente de Wheatstone.

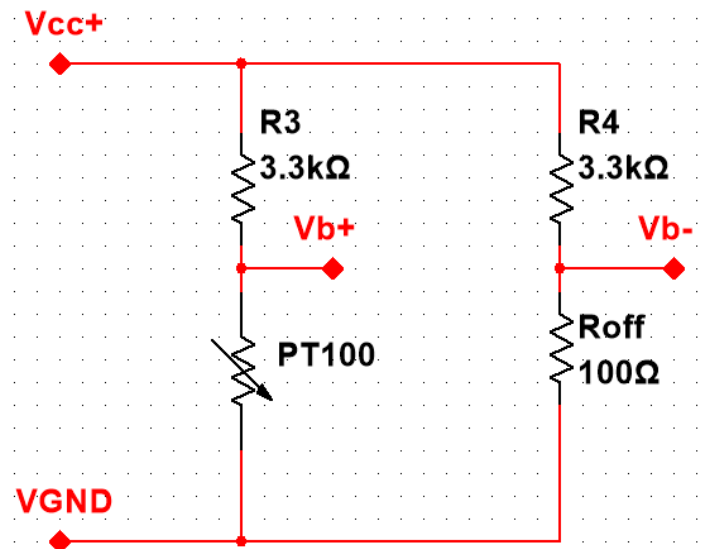


Figura 6: Puente de Wheatstone para el sensor PT100.

La salida del segundo divisor de voltaje (V_{b-}) será restada a la salida del primer divisor de voltaje (V_{b+}) usando un amplificador diferencial más tarde. La fórmula de la salida del puente es simplemente dos divisores de voltaje:

$$(V_{b+} - V_{b-}) = V_{cc+} \left(\frac{R_{PT100}}{R_3 + R_{PT100}} - \frac{R_{off}}{R_4 + R_{off}} \right)$$

Con esto, cuando la temperatura sea 0°C ($R_{PT100} = 100\Omega$) y la diferencia de voltajes es $0V$:

$$6V \left(\frac{100\Omega}{3.3k\Omega + 100\Omega} - \frac{100\Omega}{3.3k\Omega + 100\Omega} \right) = 0V$$

Por otro lado, cuando la temperatura sea 100°C ($R_{PT100} = 138.5\Omega$) la diferencia de voltaje será:

$$6V \left(\frac{138.5\Omega}{3.3k\Omega + 138.5\Omega} - \frac{100\Omega}{3.3k\Omega + 100\Omega} \right) = 65mV$$

Note entonces que se eliminó el offset, y que si quisiera un sensor de temperatura para calibrar se podría reemplazar la resistencia de 100Ω por un potenciómetro y así poder calibrar el cero del sistema.

8. Realice el montaje de un amplificador diferencial como el que se muestra:

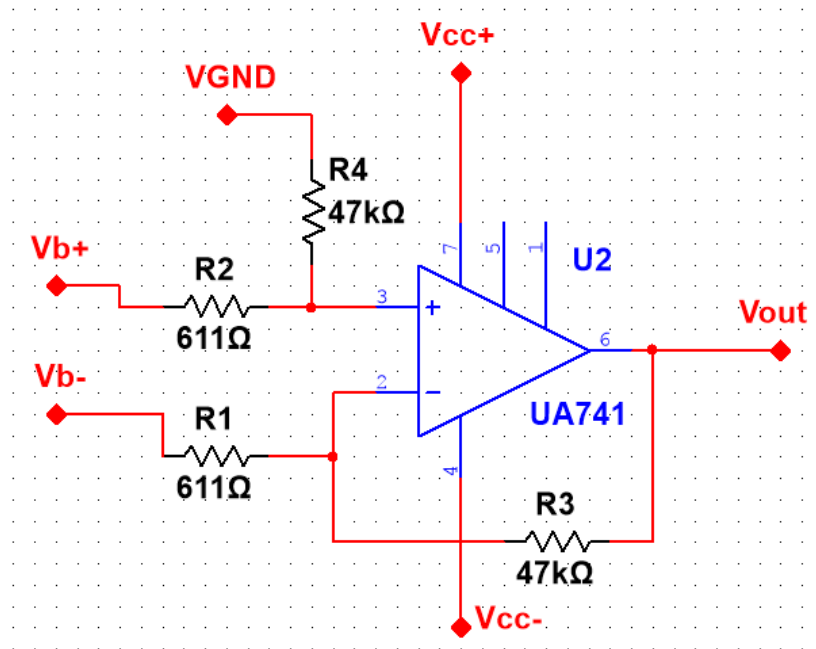


Figura 7: Amplificador diferencial.

Recuerde que la formula general del amplificador diferencial es:

$$V_{out} = V_{b+} \left(\frac{(R_3 + R_1)R_4}{(R_4 + R_2)R_1} \right) - V_{b-} \left(\frac{R_3}{R_1} \right)$$

Pero en el esquema se muestra que $R_3 = R_4$ y $R_1 = R_2$, por lo que la formula se simplifica a:

$$V_{out} = V_{b+} \left(\frac{R_4}{R_2} \right) - V_{b-} \left(\frac{R_4}{R_2} \right) = \left(\frac{R_4}{R_2} \right) (V_{b+} - V_{b-})$$

Por lo que si se dejara fijo un valor para R_4 y R_3 $47k\Omega$, el valor que deben tener R_2 y R_1 debe ser tal que la salida máxima sea 5V para conectar a la entrada analógica del Arduino. De esta forma

$$5V = \left(\frac{47k\Omega}{R_2} \right) (65mV) \rightarrow R_2 = 611\Omega$$

Y esto explica los valores dados en el esquema. Ya que no hay resistencias comerciales con ese valor, **un valor aproximado se puede conseguir conectando en serie una resistencia de 560Ω y dos de 22Ω .**

9. Verifique que la salida del amplificador tiene valores coherentes midiendo entre V_{out} y V_{GND} . ¿Cuál es el voltaje de salida a temperatura ambiente?

10. Con esto ya se tendría la amplificación finalizada, sin embargo, este amplificador presenta dos inconvenientes: El primero es que si se desea cambiar la amplificación se deben cambiar dos resistencias, lo más conveniente es reemplazarlas por potenciómetros para tener ganancia variable pero, esto conlleva a tener que sincronizarlos lo cual es muy poco práctico. El segundo es el efecto de carga que tienen las dos resistencias en las entradas inversoras y no inversoras del amplificador.

Para resolver estos dos problemas, entonces es necesario hacer el montaje de un amplificador de instrumentación como el que se muestra en la figura usando otros dos amplificadores.

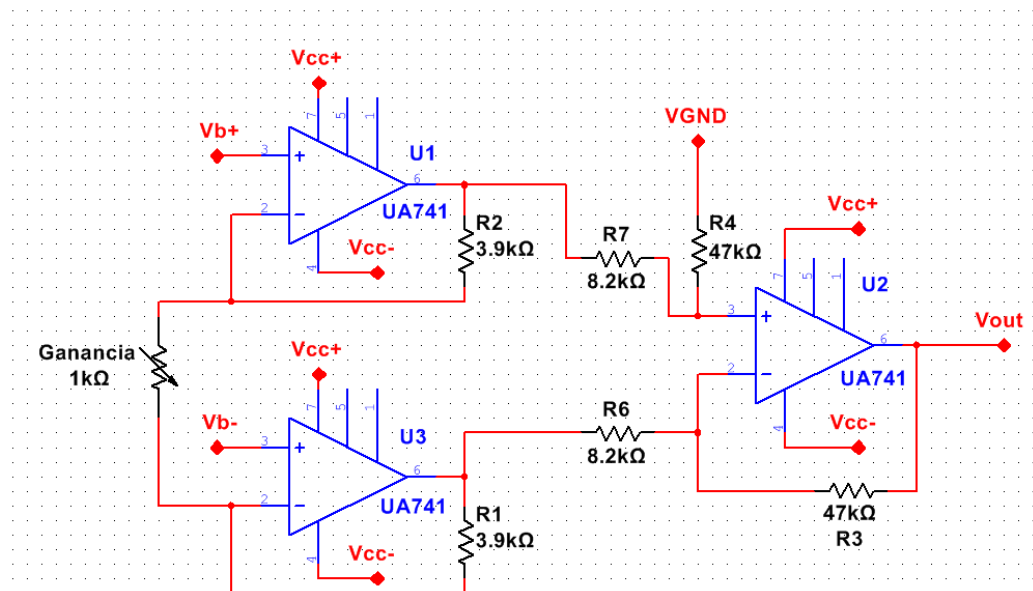


Figura 8: Amplificador de instrumentación.

11. Verifique que la salida del amplificador tiene valores coherentes midiendo entre V_{out} y V_{GND} . ¿Cuál es el voltaje de salida a temperatura ambiente?
12. Ya que se tiene la señal acondicionada, se procede a calibrar el sensor, para esto llene con agua el beaker pequeño, encienda la plancha de calentamiento, sitúe el beaker sobre la plancha y deje calentar el agua por un tiempo. Mientras el agua se calienta, conecte la salida del amplificador a la entrada analógica A_0 de la tarjeta Arduino y V_{GND} a la tierra del Arduino (**tenga cuidado con este paso ya que podría dañar el Arduino si lo conecta a -6V**) y proceda a cargar el siguiente programa:

```
//Descargue la libreria Timer.h, puede ser de aca:
//http://www.doctormonk.com/search?q=timer
#include "Timer.h"
```

```
// Define Variables
float V;
float temp;
float Rx;

// Variables para convertir voltaje a resistencia
float C = 79.489;
float slope = 14.187;

// Variables para convertir Resistencia a temperatura
float R0 = 100.0;
float alpha = 0.00385; //suponemos alfa del platino

int vin = A0; // vin es el pin analogico A0

Timer t; // Define Timer object

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(vin, INPUT);
  t.every(100, takeReading); // Lee cada 100ms
}

void loop() {
  t.update(); // Actualiza Timer
}

void takeReading(){
  // convertir bits a voltaje
  V = (analogRead(vin)/1023.0)*5.0;
  // voltaje a resistencia
  Rx = V*slope+C; //y=mx+c
  // Resistencia a temperatura
  temp= (Rx/R0-1.0)/alpha; // usa Rx = R0(1+alpha*T)
  Serial.println(temp); //para medir el voltaje cambie "temp" por "V"
}
```

13. El propósito es hallar la recta del sensor para calcular su resistencia a un voltaje determinado y luego usar la ecuación que se obtiene de la regresión para obtener la temperatura en un punto. Para esto, se deben tomar dos puntos y por medio de la ecuación de la recta hallar la resistencia (R_{PT100}) a cualquier voltaje (V_{out}):

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) + y_1$$

Donde la pendiente es $m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ y el intercepto sería $C = mx_1 + y_1$, en este caso quedaría de la forma

$$R_{PT100} = \frac{R_{t2} - R_{t1}}{V_{t2} - V_{t1}}(V_{out} - V_{t1}) + R_{t1}$$

Donde R_t y V_t representan puntos de la recta.

Tome dos puntos a diferente temperatura, uno a *temperatura ambiente*, para esto deje reposar el sensor para que se estabilice y sitúelo lejos de fuentes de calor, luego lea el voltaje del programa en Arduino y luego apague o desconecte rápidamente el sensor sin tocarlo y mida la resistencia. Para el siguiente punto,

cuando tenga el agua a temperatura máxima introduzca el sensor, déjelo estabilizar y tome de nuevo los datos.

14. Usando estos datos halle la pendiente, el intercepto, introdúzcalos en el programa de Arduino y verifique que haya quedado bien calibrado.

$$m = \frac{\Omega}{V} \quad C = \Omega$$

15. Deje que el agua se caliente hasta 50°C aproximadamente y tome datos del valor de temperatura mientras esta aumenta, tanto en el monitor serial como en el termómetro (por lo menos 10 datos).

Informe

- Entregue el presente informe con los datos obtenidos
- Junto al documento envíe un video editado en formato MP4, donde conste los participantes de la prueba, y los diferentes montajes realizados.

Bibliografía

- National Instruments. (2015). Guía de acondicionamiento de señales para ingenieros. [En línea] ftp://ftp.ni.com/evaluation/signal_conditioning/23807_Engineer_s_guide_to_signal_conditioning_Spanish_localisation_HR.pdf
- Roboroblog. (2016). MEASURING TEMPERATURE FROM PT100 USING ARDUINO. [En línea] <http://www.instructables.com/id/Reading-Temperature-From-PT100-Using-Arduino/>
- Webster, J. G. (1998). *The measurement, instrumentation and sensors handbook*. CRC press.
- Wikipedia. (2018). Electrical resistance and conductance [En línea] https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistance_and_conductance