

MEDICIÓN DE TEMPERATURA: SENSORES TERMOELÉCTRICOS

RESUMEN

En este documento se describen diferentes formas de medición de temperatura utilizando varios tipos de sensores: termopar (termocupla tipo J, hierro-constantán), el circuito integrado LM35 y termistores NTC y PTC. Las señales provenientes de cada uno de los sensores fueron acondicionadas utilizando el circuito integrado AD595, capturadas por medio de una tarjeta de adquisición de datos y procesadas mediante un software creado bajo MATLAB.

PALABRAS CLAVES: Temperatura, medición, sensores, termopares, termistores, acondicionamiento, adquisición, MATLAB.

ABSTRACT

This document describes different ways of temperature measurement using several types of sensors: thermocouple type J, Iron Vs Copper-Nickel integrated circuit LM35, thermistors NTC and PTC. The signals come from each one of the sensors used and they were conditioned using the AD595 integrated circuit and captured using a card of acquisition of signals, then they were processed through software created with MATLAB.

KEYWORDS: Temperature, measurement, sensors, thermocouple, thermistors, conditioning, acquisition, MATLAB.

EDWIN JHOVANY ALZATE RODRÍGUEZ

Químico Industrial.
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira.
jhovalz@utp.edu.co

JOSE WILLIAM MONTES OCAMPO

Ingeniero Mecánico
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira.
wizac@utp.edu.co

CARLOS ARMANDO SILVA ORTEGA

Ingeniero Mecánico
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira.
silva53@utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los sensores electrónicos han ayudado a medir con mayor exactitud las magnitudes físicas; no se puede hablar de los sensores sin sus acondicionadores de señal, ya que normalmente entregan señales muy pequeñas y es muy importante equilibrar sus características, con las del circuito que le permiten adquirir, acondicionar, procesar y actuar con las señales. Probablemente sea la temperatura el parámetro físico más común que se mide en una aplicación electrónica, incluso en muchos casos en que el parámetro de interés no es la temperatura, ésta se ha de medir para incluir indirectamente su efecto en la medida deseada.

2. SENSORES DE TEMPERATURA CON TERMOPARES

Un termopar es un dispositivo para la medición de la temperatura, basado en efectos termoeléctricos. Es un circuito formado por dos conductores de metales diferentes o aleaciones de metales diferentes, unidos en sus extremos y entre cuyas uniones existe una diferencia de temperatura, que origina una fuerza electromotriz.

El principio de funcionamiento de los sensores termoeléctricos se basa en los descubrimientos de Thomas Johann Seebeck (1822), Jean C.A. Peltier (1834) y William Thompson (1847), denominados efecto Seebeck, efecto Peltier y efecto Thompson.

El efecto Seebeck consiste en la aparición de una diferencia de potencial entre dos puntos distintos de un conductor eléctrico que se encuentran de manera simultánea a diferentes temperaturas. En un termopar, el efecto Seebeck se manifiesta por la aparición de una corriente eléctrica que sólo depende de la diferencia de temperaturas entre las uniones (Figura 1).

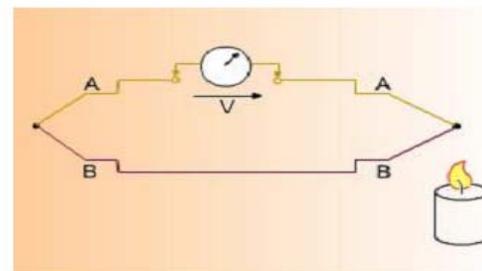


Figura 1. Efecto Seebeck en un termopar.

El efecto Peltier, se fundamenta en el calentamiento o enfriamiento de una unión entre dos metales A y B distintos al pasar corriente por ella. Este efecto, sólo depende del tipo de metal y de la temperatura T_1 y T_2 de las uniones (Figura 2).

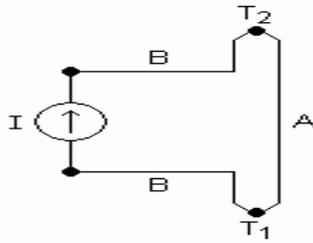


Figura 2. Efecto Peltier.

El efecto Thompson, se caracteriza por la absorción o liberación de calor por parte de un conductor sometido a un gradiente de temperatura, por el que circula una corriente. Se libera calor cuando la corriente circula del punto más caliente hacia el más frío.

En la Figura 3 se muestra un termopar constituido por un conductor de hierro y otro de constantán (aleación de cobre y níquel). Cuando las uniones están a temperaturas T_1 y T_2 se produce una tensión V_1 , la cual corresponde a la suma de las caídas de potencial en cada una de las juntas. Por lo tanto, el termopar es básicamente un dispositivo de medida diferencial, se necesita una temperatura de referencia conocida para una de las uniones (normalmente es la del punto de agua/hielo de 0°C), así la temperatura de la otra unión será deducida del voltaje de salida

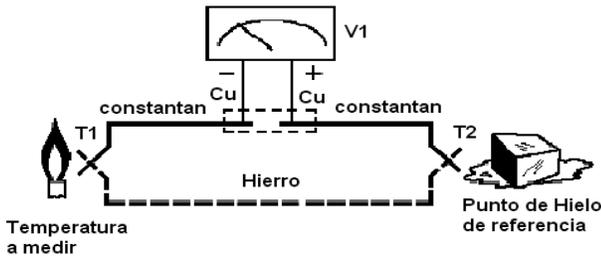


Figura 3. Termopar con referencia a 0°C .

La Figura 4 muestra una técnica de medida alternativa, en las aplicaciones prácticas donde los requisitos de exactitud no son exigentes. La temperatura de la unión de referencia se permite cambiar con el entorno del sistema de medida, pero es medida cuidadosamente por algún tipo de termómetro absoluto.

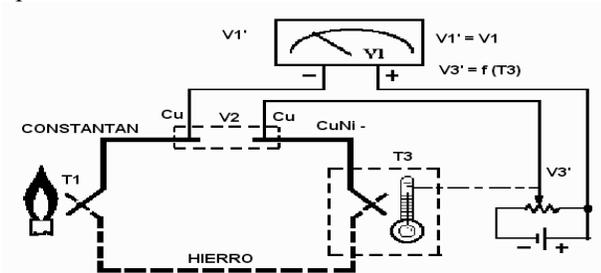


Figura 4. Sustitución de la Temperatura de Referencia.

Se puede usar una medida del voltaje del termopar combinada con una temperatura de referencia conocida para calcular la temperatura de la unión medida. Sin embargo, en la práctica se usa un método termoeléctrico

para medir la temperatura de referencia y poner el voltaje de salida para que corresponda a un termopar referido a 0°C . Simplemente, este voltaje se añade al voltaje del termopar y entonces la suma corresponde al voltaje normal tabulado para un termopar de referencia de punto de hielo.

Se utilizó un termopar tipo J debido a sus características adecuadas para este uso, como lo son: su bajo costo, fácil construcción, resistencia a diferentes atmósferas y amplio rango de operación (-200 a 1200°C).

El acondicionamiento es una etapa esencial del tratamiento de la señal, consiste en prepararla antes de llevarla a un convertidor A/D, a un microprocesador o DSP. En la actualidad se han integrado los componentes de la etapa de acondicionamiento en circuitos electrónicos compactos, empezando por el uso de amplificadores operacionales integrando varios de ellos en uno sólo, como los amplificadores de instrumentación. Además las cadenas de acondicionamiento se han ido reduciendo drásticamente y hoy en día se cuenta con circuitos integrados que realizan todas esas tareas, como se observa en la Figura 5.

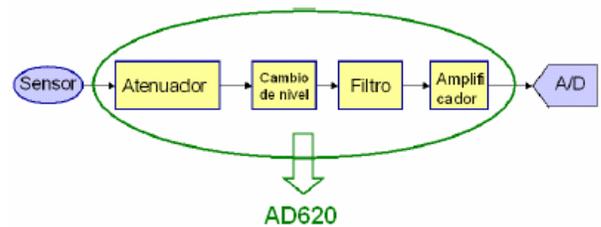


Figura 5. Cadena de acondicionamiento contenida en un circuito (AD620).

El circuito de acondicionamiento empleado para la termocupla se basa en el amplificador para instrumentación fabricado por Analog Devices [3]; el AD620 es un amplificador sencillo y bajo costo, de fácil uso, bajo ruido, buen ancho de banda (120 kHz) y utilizado ampliamente en diversas aplicaciones.

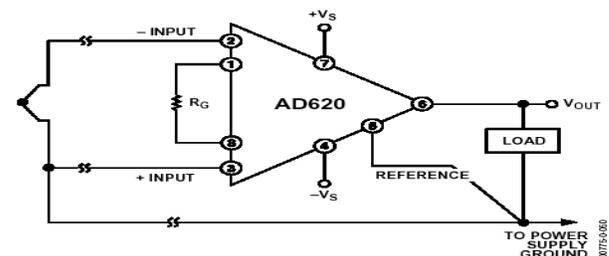


Figura 6. Circuito acondicionador para el amplificador de instrumentación AD620 para entrada de termopares.

Para la medición de la temperatura de referencia (ambiente) se utilizó un sensor de precisión, LM35 (National Semiconductor [2]). El LM35 es un circuito integrado con un voltaje de salida linealmente

proporcional a la temperatura en escala Celsius. No requiere calibración externa y proporciona una alta precisión en su rango de temperatura de -55 a 150 °C, posee un factor de escala de 10 mV/°C, lo que facilita su utilización en la obtención directa de la temperatura a partir del voltaje de salida.

En el circuito del acondicionamiento (Fig. 6) la alimentación del amplificador fue de ± 12 V y se seleccionó un valor de R_G de $49,4$ Ω para obtener una ganancia de 1000, de acuerdo a la relación suministrada por Analog Devices [3] para el AD620:

$$R_G = \frac{49,4 \text{ k}\Omega}{G - 1} \quad (1)$$

La compensación de la temperatura de referencia se realizó a través del software (MATLAB), la Figura 7 representa el esquema empleado.

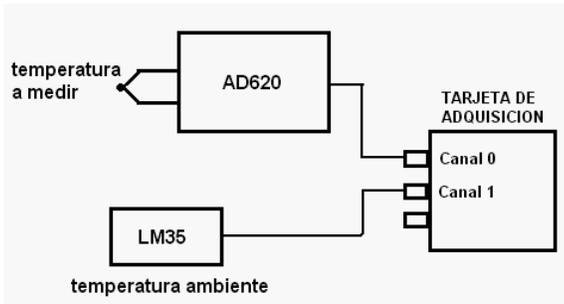


Figura 7. Esquema de adquisición de datos para la termocupla tipo J.

A través del canal 0 en la tarjeta de adquisición de datos se recibe el voltaje del amplificador de instrumentación (V_{C0}) y en otro canal (canal 1) se adquiere el voltaje proveniente del LM35 (V_{C1}); la temperatura de corrección se obtiene mediante el factor de escala del LM35, y se determina el voltaje correspondiente a ese valor de temperatura para la termocupla J a partir de su tabla de referencia [4]. Por ejemplo para valores de voltaje en los canales de $V_{C0} = 2,763$ V y $V_{C1} = 0,240$ V, la temperatura en el LM35 es:

$$T_{LM35} = 100 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{V}} * 0,240 \text{ V} = 24^{\circ}\text{C}$$

con éste valor de temperatura se localiza en la tabla de referencia de la termocupla el valor de voltaje correspondiente:

°C	0	1	2	3	4	5
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253
10	0.507	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762
20	1.019	1.071	1.122	1.174	1.226	1.277
30	1.537	1.589	1.641	1.693	1.745	1.797
40	2.059	2.111	2.164	2.216	2.269	2.322

Figura 8. Tabla de referencia Termocupla tipo J [4].

El voltaje leído ($1,226$ V) se resta al valor del voltaje del canal 0, para obtener el voltaje corregido:

$$V_{\text{correg}} = 2,763 \text{ V} - 1,226 \text{ V} = 1,537 \text{ V}$$

con este voltaje se encuentra la temperatura corregida para la termocupla, como se observa en la Figura 8, corresponde a 30 °C. Usando MATLAB se realiza todo el proceso anterior para cualquier entrada por los canales 0 y 1, finalmente se presenta en pantalla la temperatura de la termocupla, Figura 9.

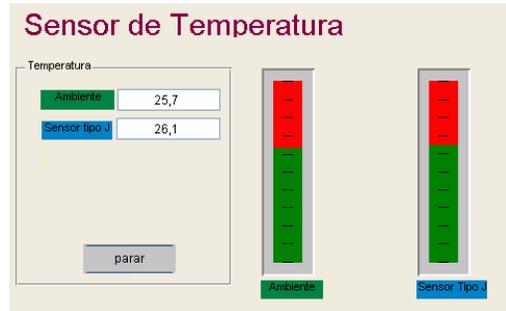


Figura 9. Valores de temperatura para el LM35 (ambiente) y la termocupla tipo J en MATLAB.

3. CIRCUITOS INTEGRADOS

Existen en el mercado circuitos completos que realizan todas las etapas del acondicionamiento de la señal, el AD594 (Analog Devices), Fig. 10. es un amplificador de instrumentación que realiza la compensación de temperatura en la juntura de la termocupla (punto de hielo) produce un nivel de salida de voltaje alto a partir de la señal proveniente de la termocupla, con una proporcionalidad lineal de salida, de factor 10 mV/°C; con lo cual para conocer la temperatura en la termocupla tipo J¹, basta multiplicar por el valor del factor de escala 100 °C/V.

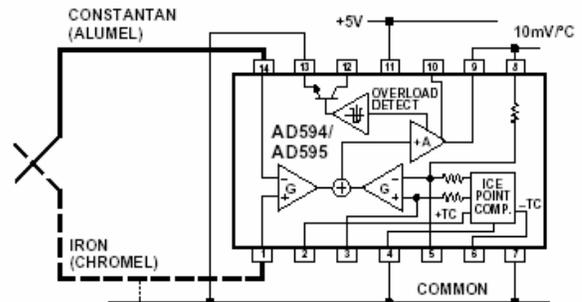


Figura 10. Conexión para el AD594 con una sola fuente de alimentación.

Para la obtención de la temperatura en la termocupla, se adquiere la señal por un canal de la tarjeta Figura 11. y usando MATLAB se convierte el voltaje de salida del AD594, Figura 12.

1. El AD594 está precalibrado para termocuplas tipo J, para las termocuplas tipo K se dispone del AD595

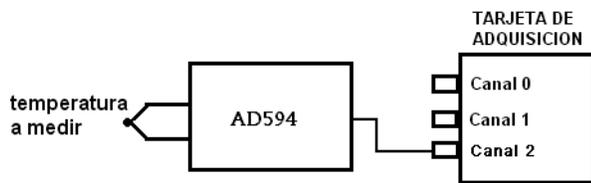


Figura 11. Esquema de adquisición de datos para la termocupla tipo J usando el AD594.

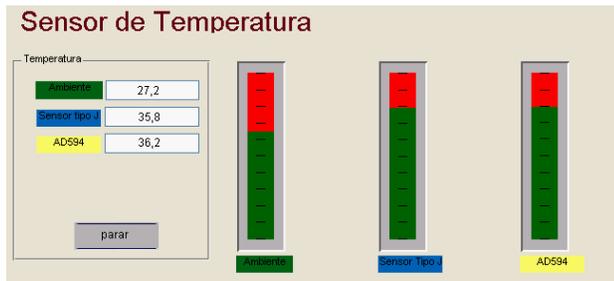


Figura 12. Valores de temperatura para el AD594 en MATLAB.

4. SENSORES DE TEMPERATURA RESISTIVOS

Este grupo lo constituyen las RTD (Resistance Temperature Detector) y los termistores. Las RTD son sensores basados en elementos conductores mientras que los termistores se fundamentan en semiconductores.

Los dispositivos RTD más comunes están contruidos con una resistencia de platino (Pt), llamadas también PRTD, aunque también se utilizan otros materiales cuyas características se recogen en la Tabla 1. Típicamente tienen una resistencia entre 20. y 20k. La ventaja más importante es que son lineales dentro del rango de temperatura entre -200°C y 850°C .

Material	Rango Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Variación (% / $^{\circ}\text{C}$) a 25°C
Platino	-200 a 850	0.39
Níquel	-80 a 320	0.67
Cobre	-200 a 260	0.38
Níquel-acero	-200 a 260	0.46

Tabla 1. Características de los materiales usados para las RTD

Los termistores son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura de resistencia que puede ser positivo o negativo, si su coeficiente es negativo se denominan NTC (Negative Temperature Coefficient), mientras que si es positivo se denomina PTC (Positive Temperature Coefficient).

El fundamento de los termistores está en la dependencia de la resistencia de los semiconductores con la temperatura, debida a la variación con ésta del número de portadores. Al aumentar la temperatura, lo hace también el número de portadores reduciéndose la resistencia, y de ahí que presente coeficiente de temperatura negativo.

Esta dependencia varía con la presencia de impurezas, y si el dopado es muy intenso, el semiconductor adquiere propiedades metálicas con coeficiente de temperatura positivo (PTC) en un margen de temperatura limitado.

Para las NTC en un margen de temperatura reducido (50°C), la dependencia se puede considerar de tipo exponencial de la forma:

$$R_T = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} = R_0 f(T) \quad (2)$$

donde:

R_T : resistencia en ohmios a la temperatura absoluta T

R_0 : resistencia en ohmios a la temperatura absoluta de referencia T_0

β : constante dentro de un intervalo moderado de temperaturas.

Si el valor de β se puede considerar constante e independiente de la temperatura en un intervalo, se puede obtener una linealización:

$$\ln \left(\frac{R_T}{R_0} \right) = \beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (3)$$

Se podría obtener una gráfica de $\ln R$ vs $1/T$, lo que resultaría en una línea recta de pendiente β e intercepto igual a $-\beta/T_0$.

Como circuito acondicionador para los termistores se puede emplear un divisor de tensión Figura 13.

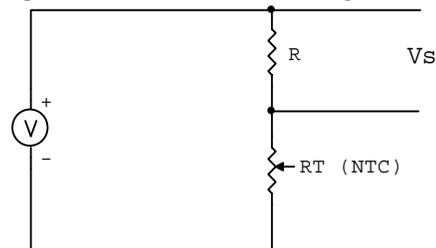


Figura 13. Circuito acondicionador con divisor de tensión para termistores.

La tensión de salida del divisor será:

$$V_s = V \frac{R}{R_T + R} = \frac{V}{1 + \frac{R_T}{R}} \quad (4)$$

A partir de (2), se obtiene:

$$\frac{R_T}{R} = \frac{R_0}{R} f(T) = s f(T) \quad (5)$$

donde se ha definido $s = R_0 / R$. V_s puede expresarse como:

$$V_s = \frac{V}{1 + s f(T)} = V F(T) \quad (6)$$

La función $F(T)$ tiene una forma que depende de cada material en particular y del valor de s . Si se desea que V

varíe linealmente con T, F (T) deberá ser una función de primer orden. La elección del valor de s apropiado depende del margen de temperaturas al que se desee aplicar el termistor. Para los circuitos acondicionadores utilizados en las mediciones de laboratorio con los termistores (PT100 y NTC) se utilizaron los valores de resistencias y voltaje mostrados en la Figura 14a y 14b.

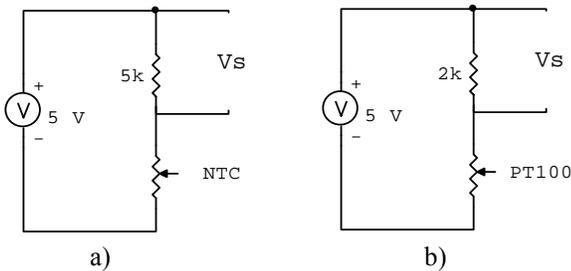


Figura 14. Circuito acondicionador para termistores. a) Termistor Coeficiente Negativo (NTC). b) Termistor de Coeficiente Positivo (PTC).

Para obtener la linealización de la dependencia de la temperatura de la resistencia, se sometieron los dos sensores resistivos a diferentes temperaturas y se compararon con un termómetro calibrado, midiéndose el voltaje de salida como función de la temperatura a la que estaban los termistores (Tabla 2).

T (°C)	Voltaje (V)		T (°C)	Voltaje (V)	
	NTC	PT100		NTC	PT100
24	2,529	1,167	44	2,007	1,260
25	2,460	1,176	47	1,902	1,285
26	2,476	1,170	48	1,878	1,275
29	2,376	1,191	49	1,854	1,280
32	2,268	1,212	54	1,704	1,322
34	2,213	1,220	60	1,560	1,335
36	2,150	1,230	63	1,504	1,368
38	2,140	1,244	67	1,381	1,368
40	2,080	1,250	71	1,272	1,397
42	2,047	1,260	74	1,225	1,440
43	1,970	1,260	78	1,053	1,448

Tabla 2. Voltaje de salida de los termistores en función de la temperatura.

Las Figuras 15 y 16 muestran la relación entre el voltaje de salida y la temperatura en cada termistor, la linealidad no está claramente marcada en todo el rango analizado sobre todo para la PTC como se aprecia.

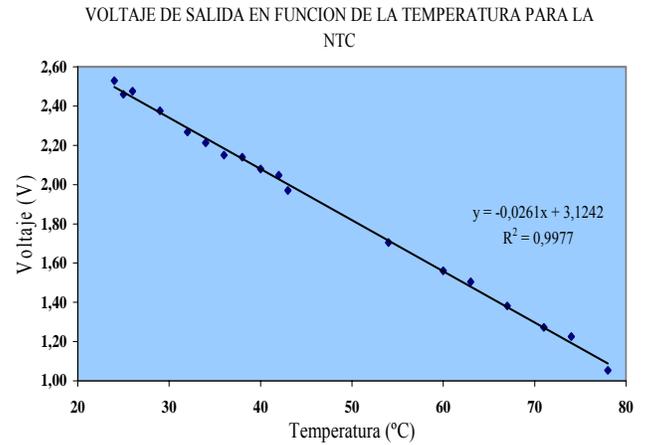


Figura 15. Linealización para el termistor NTC.

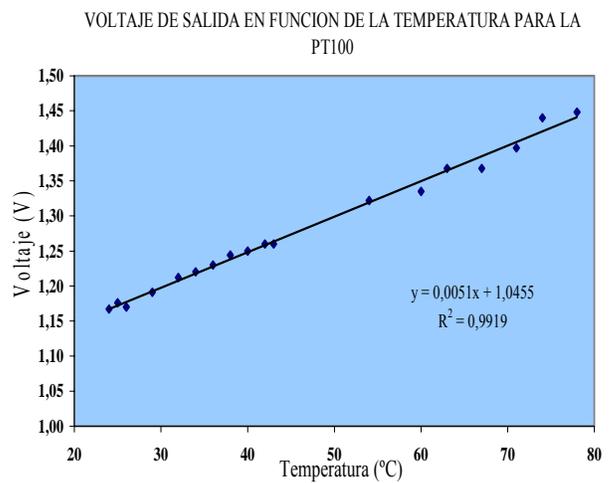


Figura 16. Linealización para el termistor PT100. Usando la ecuación (4) se determina la resistencia de cada termistor con los valores usados para cada uno (figuras 14a y 14b):

$$R_T = R \left[\frac{V}{V_s} - 1 \right] \tag{7}$$

De la ecuación (7) para la NTC con R = 5000 Ω y para la PTC con R = 2000 Ω, se obtienen los datos de la Tabla 3.

T (°C)	R _T		T (°C)	R _T	
	NTC	PT100		NTC	PT100
24	4885	6569	44	7456	5937
25	5163	6503	47	8144	5782
26	5097	6547	48	8312	5843
29	5522	6396	49	8484	5813
32	6023	6251	54	9671	5564
34	6297	6197	60	11028	5491
36	6628	6130	63	11622	5310
38	6682	6039	67	13103	5310
40	7019	6000	71	14654	5159
42	7213	5937	74	15408	4944
43	7690	5937	78	18742	4906

Tabla 3. Variación de la resistencia de los termistores con respecto a la temperatura

1. El AD594 está precalibrado para termocuplas tipo J, para las termocuplas tipo K se dispone del AD595

Para la adquisición de los datos provenientes de los circuitos se utilizó el esquema mostrado en la Figura 17.

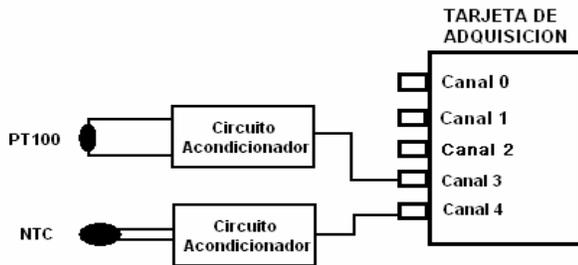


Figura 17. Esquema de adquisición de datos para la termocupla tipo J usando el AD594.

A través de MATLAB se obtienen los valores de temperatura a partir del voltaje de salida, con la ecuación linealizada obtenida (Figuras 18 y 19); para una mayor exactitud podría introducirse la tabla de datos de la temperatura en función del voltaje y usar un comando que realice la interpolación.

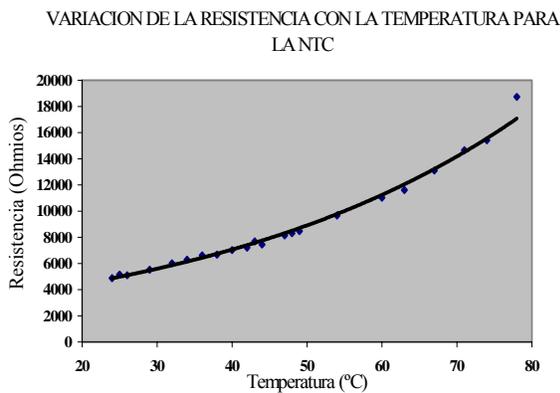


Figura 18. Dependencia de la resistencia con la temperatura para la NTC.

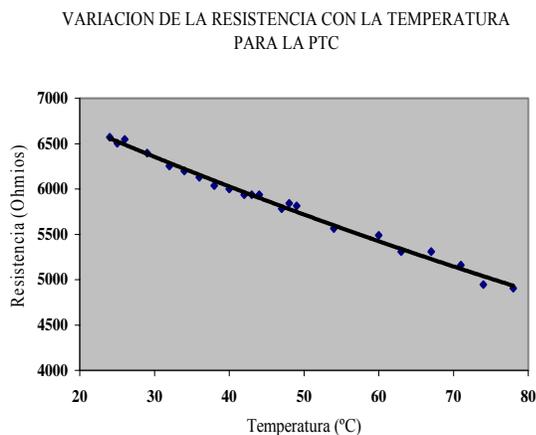


Figura 19. Dependencia de la resistencia con la temperatura para la PTC

En la Figura 20 se muestran los resultados de los valores de la temperatura, registrados en todos los sensores usados en el presente trabajo.

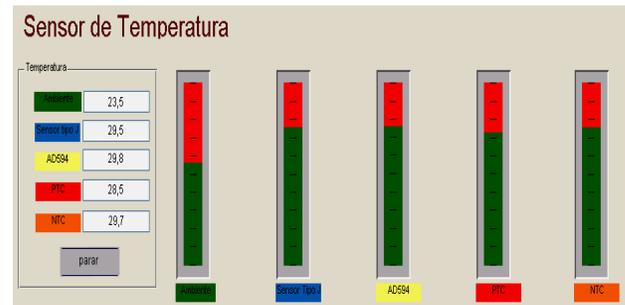


Figura 20. Valores de temperatura para los termistores PT100 y NTC en MATLAB.

5. CONCLUSIONES

Las termocuplas son sensores muy útiles para mediciones de temperatura en aplicaciones diversas, presentan la ventaja de resistir ambientes en los que otros instrumentos tendrían limitaciones y ser lineales en un amplio rango. La compensación de la temperatura puede hacerse empleando un sensor calibrado como el LM35 o utilizando un circuito integrado que realiza la compensación como el AD594.

Los termistores presentan una elevada sensibilidad a variaciones de temperatura haciendo que resulten muy adecuados para mediciones precisas de temperatura. Presentan una linealidad más limitada que las termocuplas y requieren circuitos acondicionadores que permiten trabajar en condiciones de mayor linealidad.

Los termistores NTC poseen elevadas resistencias a bajas temperaturas, presentan un rango lineal más amplio que los PTC, los cuales para altas temperatura se desvían en mayor cuantía. Por lo anterior para la mayoría de aplicación son más empleadas las NTC que las PTC.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pallas Areny, Ramón. Sensores y Acondicionadores de Señal. Marcombo, S.A. Barcelona, 2001.
- [2] National Semiconductor: www.national.com
- [3] Analog Devices: www.analog.com
- [4] Bentley, John P. Sistemas de medición, principios y aplicaciones. Compañía Editorial continental S.A. de C.V. México, 1993.