

Caracterización de sensores termicos

Leonel Fernando Ardila, Juan Sebastián Flórez,
Johan Camilo Méndez

Abstract—En este trabajo se presenta la comprobación experimental de los modelos matemáticos de ocho sensores determinando la relaciones entre los parámetros termométricos y la temperatura. Se determina el comportamiento de un diodo, un integrado LM335 y dos termopares a partir de la variación de la su diferencia de potencial y el de dos termistores y dos RTD a partir de su resistividad. Como resultado se determinó el coeficiente de variación de temperatura α del diodo, $0.00218V/^{\circ}C$, del LM335, $9.4 \times 10^{-3}V/^{\circ}C$, y de los dos RTD, el de cobre $a \times 10^{-4}\Omega/^{\circ}$ y el de platino de $0.396\Omega/^{\circ}C$, se encontró el factor β de los dos termistores, siendo $\beta_1 = 3231^{\circ}K$ y $\beta_2 = 262.7^{\circ}K$. Finalmente se determinó que los termopares empleados son de tipo J y C con coeficientes de variación del voltaje con la temperatura de $\alpha_J = 255\mu V/^{\circ}C$ y $\alpha_C = 20\mu V/^{\circ}C$ respectivamente.

Index Terms—Sensores térmicos, Temperatura, Resistencia.



1 INTRODUCCIÓN

En el universo los cuerpos están formados a partir del agrupamiento de enormes cantidades de partículas. cuando dos cuerpos se juntan, las partículas de ambos interactúan transfiriendo de esta manera su movimiento las unas a las otras. Después de cierto tiempo y estadísticamente hablando las partículas de ambos cuerpos se mueven de forma semejante. Este comportamiento se explica a partir de la ley cero de la termodinámica que establece que si dos sistemas están en equilibrio térmico, independientemente con un tercero, entonces los tres sistemas están en equilibrio térmico. Se define el equilibrio como el estado en el que no existe ningún tipo de transferencia energía de un cuerpo a otro, De esta manera es sensato afirmar que los cuerpos comparten un valor común, esta propiedad se denomina temperatura.

Algunas propiedades de ciertos cuerpos se ven alteradas a medida que la temperatura

varía en estos, el ejemplo más conocido es el del mercurio que al cambiar su temperatura se ve modificado su volumen o como en el cobre en el que se ve modificada su resistividad. Esta relación con otras propiedades permite cuantificar la temperatura a partir de la variación de una propiedad diferente. A este tipo de cuerpos se les denomina termómetros y a esta propiedad se le conoce como parámetro termométrico.

Para determinar la temperatura de un cuerpo A es necesario juntarlo a un cuerpo B que se comporte como uno descrito en el párrafo anterior. Cuando este sistema alcanza el equilibrio térmico, se mide la propiedad que varía y a partir de esta se obtiene la Temperatura. Cabe destacar que la transferencia de energía del cuerpo al que se le está midiendo la temperatura debe ser suficientemente pequeña como para no generar un error considerable. Existen diferentes tipos de termómetros, a continuación se presentarán algunos de ellos junto con sus propiedades más relevantes.

- Leonel Fernando Ardila
E-mail: lfardilap@unal.edu.co,
- Juan Sebastián Flórez
E-mail: sjsflorezj@unal.edu.co,
- Johan Camilo Méndez
E-mail: jocmendezca@unal.edu.co,
Universidad Nacional de Colombia, Departamento de física.

1.1 Termómetros resistivos

Son termómetros cuyo parámetros termométrico es la resistividad, los hay

de dos tipos basados en metales como platino, níquel, cobre conocidos como termómetros metálicos y otros compuestos de óxidos semiconductores como el óxido férrico, óxido de níquel, óxido cobalto, germanio o silicio.

1.1.1 Termómetro semiconductor (Thermistor)

Su nombre es una combinación de palabras, THERM-ally sensitive res-ISTOR. este tipo de termómetros presenta una alta sensibilidad pero la relación entre la resistividad y la temperatura es hiperbólica. Existen dos tipos de termistores los NTC (coeficiente de temperatura negativo) en los cuales la resistencia decrece a medida que la temperatura aumenta y los de coeficiente de temperatura positivo (PTC) al aumentar su temperatura aumenta su resistividad. A continuación se presenta la forma funcional que da cuenta de la resistencia del termistor.

$$\begin{aligned} R(T) &= R_0 \exp\left(\beta \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right]\right) \\ &= R_0 \exp\left(\frac{E_g}{\kappa_B} \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right]\right) \end{aligned} \quad (1.1.1)$$

En esta ecuación T y T_0 son temperaturas absolutas, R_0 es la resistencia a la temperatura T_0 . Existe un modelo de mayor generalidad que describe el comportamiento de un termistor, tal modelo se conoce con el nombre de modelo de Steinhart-Hart. La temperatura es tratada como el inverso de un polinomio de tercer grado del logaritmo de la resistencia. De nuevo es importante expresar las temperaturas en K° .

$$T = 1/(A + B \ln(R) + C(\ln(R))^3) \quad (1.1.2)$$

En la literatura se puede encontrar la función inversa que expresa el comportamiento de la resistencia respecto de la temperatura [3].

1.1.2 Termómetro metálico (RTD)

Los RTD (Resistance Temperature Detectors) son detectores contruidos a partir de metales de alta pureza. Para este tipo de termómetros la resistividad aumenta a medida que la temperatura también lo hace obteniéndose una relación lineal entre estas dos variables, estos termómetros se caracterizan por poseer una

gran exactitud en un rango de -150°C a 600°C . La ecuación que describe su resistividad viene dada por:

$$R(T) = R_0 (1 - \alpha (T - T_0)) \quad (1.1.3)$$

Donde α es el coeficiente de variación de la temperatura y R_0 es la temperatura a T_0 . Otra Ecuación mas general y que describe muy bien este comportamiento es la ecuación de Callendar-Van Dusan.

$$R(T) = R(0) \left[1 + AT + BT^2 + CBT^3 + \dots + NT^n\right] \quad (1.1.4)$$

1.2 Termopar

Es uno de los termómetros más usados debido a su gran versatilidad y su bajo costo, a pesar de ello su principal limitante radica en su exactitud ya que cuando se trabaja con precisiones inferiores a un grado celsius los errores se incrementan significativamente. Su rango de medición oscila entre los -150 a 1500°C y son contruidos a partir de la unión de dos metales o aleaciones diferentes. Este tipo de termómetros funciona a partir del efecto Seebeck según el cual al unir por sus extremos dos alambres de diferentes metales y al someter las junturas a diferentes temperaturas se genera una diferencia de potencial. Este potencial presenta un comportamiento altamente lineal con relación a la temperatura.

Existen diferentes tipos de termocuplas clasificados a partir de los metales o aleaciones de las que están contruidos, los hay tipo k (cromel-alumel), tipo E (cromel/constantán [aleación de Cu-Ni]), tipo J (hierro/constantán), tipo T (cobre/constantán), tipo N (nicrosil [Ni-Cr-Si]/nasil [Ni-Si]). Existe además un subgrupo de termopares más estables pero con una menor sensibilidad ($10\mu\text{V}/^\circ\text{C}$), generalmente son de gran utilidad para cuantificar altas temperaturas, los hay de tipo B, tipo R, tipo S, todos contruidos de platino y rodio.

$$R_t = R_0[1 + (t - t_0)]$$

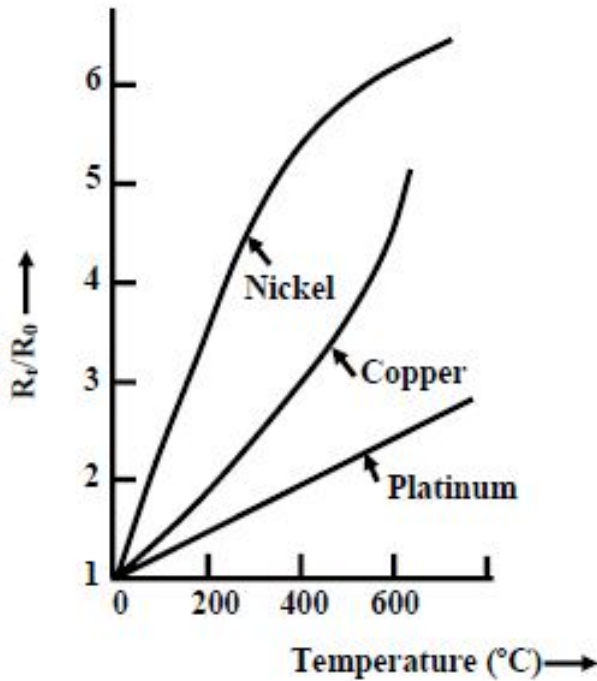


Figure 1. Esquema de la relación R vs T para tres tipos de termopares

1.3 Diodo semiconductor

Este termómetro se caracteriza por tener un bajo costo y además por presentar una relación altamente lineal con pendiente negativa entre su diferencia de potencial y su Temperatura. La ecuación para un rectificador es:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{e\phi_0}{\kappa_B T}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{\kappa_B T}\right) - 1\right] \quad (1.3.1)$$

Considerando valores de $e \cdot V$ mucho mas grandes que $\kappa_B T$ se puede asumir que la expresión (1.3.1) funciona como un rectificador y que se va a generar en la juntura un campo electrico que va a permitir el buen funcionamiento del diodo según sea conectado.

$$\approx I_0 \left[\exp\left(\frac{e(V - \phi_0)}{\kappa_B T}\right) \right] \quad (1.3.2)$$

Cuando se considera una corriente constante la expresión (1.3.2) se puede simplificar en:

$$V = V_0 - b \cdot T \quad (1.3.3)$$

en donde $V_0 = \phi_0 e^{-1}$ y $b = \kappa_B \ln \frac{I}{I_0} e^{-1}$ y así mismo los valores de ϕ_0 y I_0 representan la altura de la parte baja de la banda de conducción del semiconductor y la corriente de saturación dada según la temperatura.

1.4 Termómetro basado en el circuito integrado LM335:

El sensor de temperatura LM335 es un circuito integrado que funciona como un diodo zener cuya barrera de potencial aumenta proporcionalmente con su temperatura absoluta a razón de $10mV/^{\circ}K$. Tiene un error de $\pm 2^{\circ}K$ para temperaturas entre $-40^{\circ}C$ y $100^{\circ}C$. El rango de voltaje del voltaje de salida del LM335 es de $2.33V$ a $3.73V$ cuando la temperatura varia entre $-40^{\circ}C$ y $100^{\circ}C$ [4].

2 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

En esta práctica experimental se caracterizaron seis tipos diferentes de termómetros, dos metálicos de cobre y de platino (PT100), dos termopares, dos termistores tipo NTC y PTC, un diodo y el circuito integrado LM335.

Para precisar el comportamiento de estos dispositivos a diferentes temperaturas se mezcla hielo con agua en un vaso de precipitado hasta que el sistema alcanza una temperatura de entre $2^{\circ}C$ y $4^{\circ}C$, esta temperatura se mide con una termocupla (de un multímetro) en grados centígrados, este termómetro se deja dentro del vaso. Después se sumergen en el agua uno de los termómetros antes mencionados que es conectado a un multímetro con el que se medirá bien sea la resistividad o la diferencia de potencial dependiendo de cual sea su tipo. Cuando todo el sistema está en equilibrio térmico, este se sitúa encima de una estufa, cuando el sistema se empieza a calentar, se tabulan los datos de la propiedad modificada y de la temperatura. Finalmente cuando el agua llega a una temperatura de $88^{\circ}C$ comienza a ebulir y es en este punto en el que no se toman ya mas datos.

Cabe resaltar que los dos termistores, el diodo y el LM335 tuvieron que ser sumergidos en un tubo de ensayo con glicerina para evitar que cuando se sumergieran en el agua

alrededor de los electrodos de estos se generaran corrientes que modificaran las medidas. La glicerina es una sustancia que presenta una muy mala conductividad eléctrica pero por el contrario una muy buena conductividad térmica. El tubo de ensayo se debe colocar a la par con los hielos y el agua, ya que de no ser así al principio del experimento se obtienen datos erróneos de la temperatura.

Para el diodo y el LM335 se construyeron los siguientes circuitos:

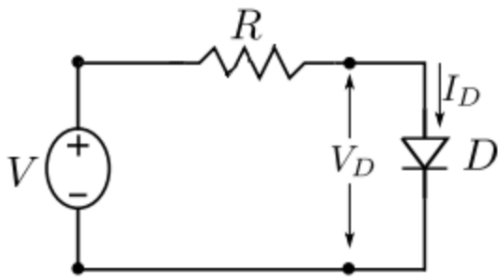


Figure 2. Circuito construido para estudiar el diodo como termómetro, $V = 10V$, $R=10k\Omega$, y V_D son los puntos en donde se mide la caída de potencial en el diodo.

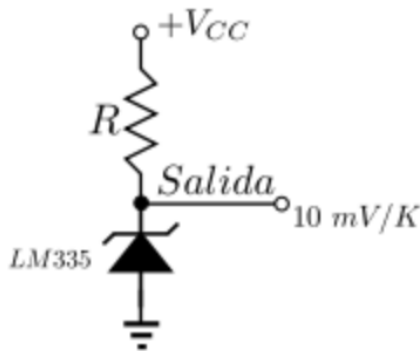


Figure 3. Circuito construido empleando el integrado LM335 como termómetro, $V_{cc}=10V$, $R=10k\Omega$, la diferencia de potencial se mide con respecto al pin de salida y tierra.

3 ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para la caracterización de cada uno de los sensores de temperatura se tomaron datos de la variación de temperatura y se comparó con su correspondiente valor asociado al parámetro termométrico en cada caso. Con

los datos obtenidos se realizaron gráficas y se hicieron ajustes a las curvas.

3.1 Diodo

Para el diodo los parámetros asociados son V_0 y b . Se realiza la linealización y se obtiene la siguiente gráfica:

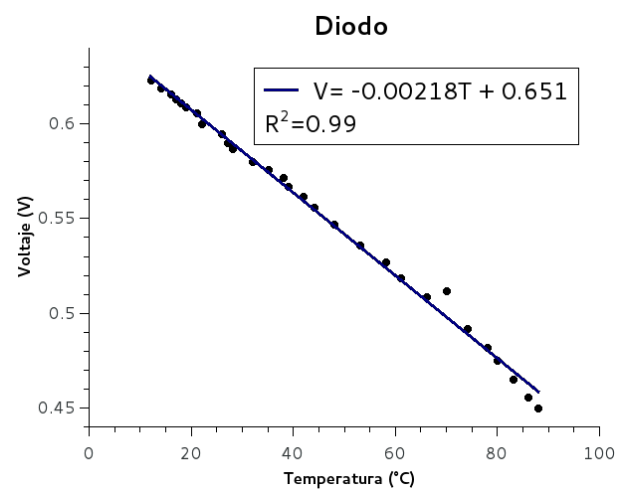


Figure 4. Voltaje en función de la temperatura para un valor de corriente $I = 10A$ con su respectiva linealización.

Se obtuvo un valor de $V_0 = 0.651V$ y $b = 0.00218V^{\circ}C^{-1}$. Mediante estos valores se puede encontrar que $\phi_0 = 1.0434004 \times 10^{-19}J$ o $\phi_0 = 0.6112eV$.

3.2 Bobina de cobre

Al estudiar el cobre como un sensor térmico se busca relacionar la resistencia de un alambre muy largo con la temperatura. Se obtuvo la siguiente gráfica:

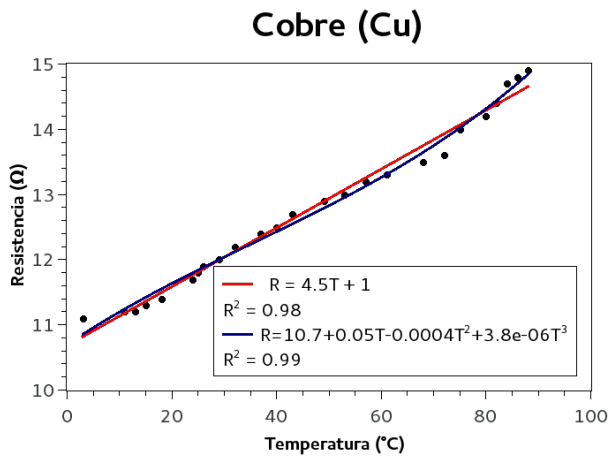


Figure 5. Resistencia en función de la temperatura con su respectiva linealización.

Se encuentra que para la relación de Callendar-Van Dusen tiene un buen comportamiento con los siguientes parámetros: $R(0) = 10.7\Omega$, $A = 0.05\Omega^\circ C^{-1}$ y $B = 0.0004\Omega^\circ C^{-1}$. Usando puntos fijos como el punto de congelación y de ebullición se puede construir un termómetro con una nueva escala pues como el comportamiento es lineal basta con hacer una reescala.

3.3 Platino

Se realiza el mismo procedimiento en el tratamiento de datos que se hizo en el cobre y se obtuvo:

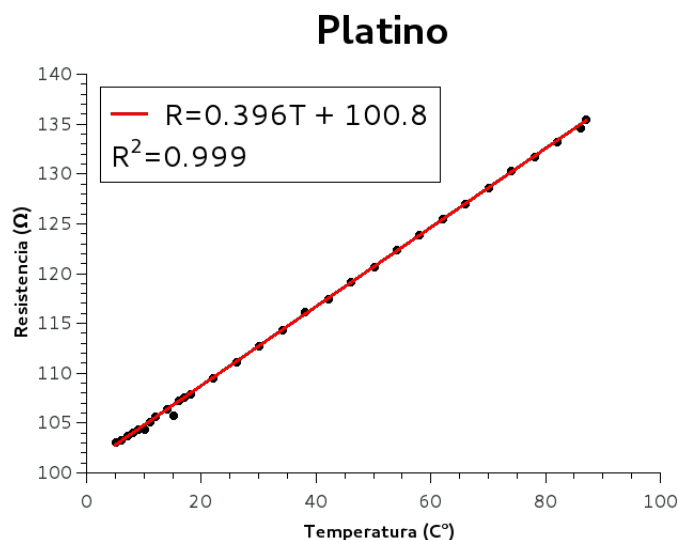


Figure 6. Resistencia en función de la temperatura con su respectiva linealización.

Se obtienen las siguientes relaciones para los parámetros: $R_0 = 100.8\Omega$ y $\alpha = 0.396\Omega^\circ C^{-1}$. Luego, el platino tiene un comportamiento lineal en el rango de 0 a $88^\circ C$.

3.4 Circuito integrado LM335

Se busca la relación entre la temperatura y la resistencia del circuito integrado LM335. Por lo tanto, se graficaron los datos obtenidos y se ajustaron con una función lineal.

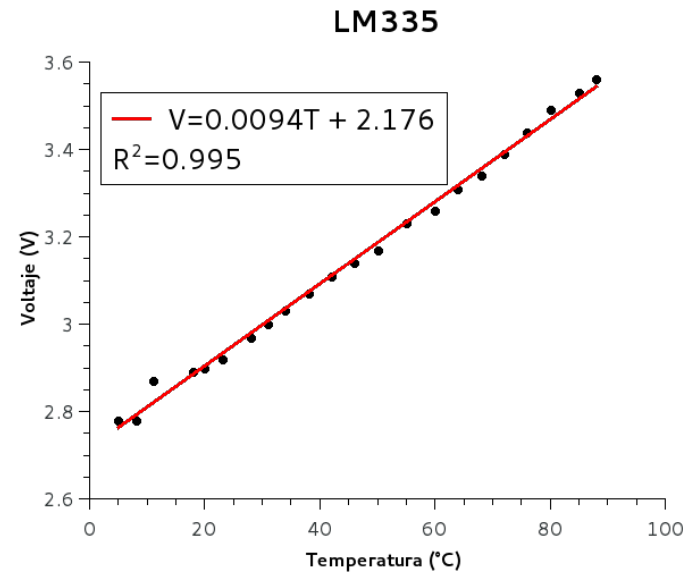


Figure 7. Resistencia en función de la temperatura con su respectiva linealización

Los valores relevantes en este ajuste son $R(0) = 2.176\Omega$ y $\alpha = 9.4 \times 10^{-3}V/C^\circ$. El valor teórico del coeficiente α es $\alpha = 10mV/^\circ C$, luego el error porcentual asociado al coeficiente α es $Error_\alpha = 6\%$. Se puede observar que el modelo lineal se ajusta bastante bien a los datos obtenidos, sin embargo, el modelo obtenido predice que el voltaje de salida a $-40^\circ C$ es de $1.63V$ y el voltaje de salida a $100^\circ C$ es de $3.11V$. Al parecer el circuito utilizado se encuentra descalibrado, ya que el rango de voltajes de salida no coincide con el rango dado por el proveedor.

3.5 Termopar café

Se busca la relación entre el voltaje de salida del termopar y la temperatura de este, por lo tanto se procedió a graficar los datos obtenidos y realizar un ajuste lineal a los datos.

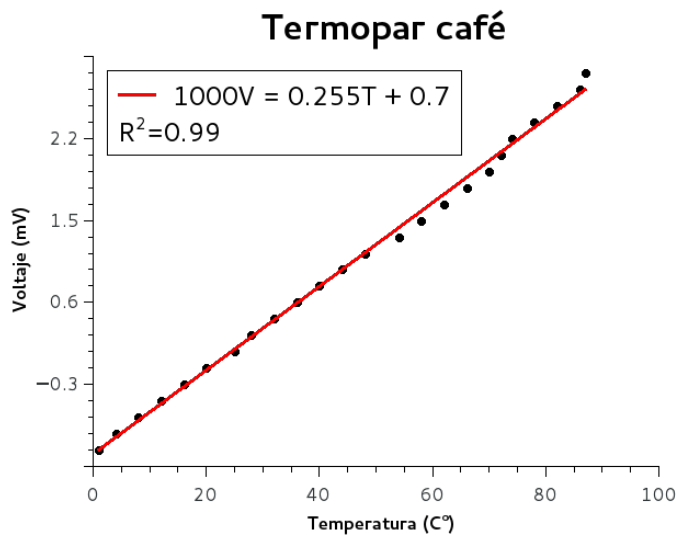


Figure 8. Voltaje de salida en función de la temperatura con su respectiva linealización

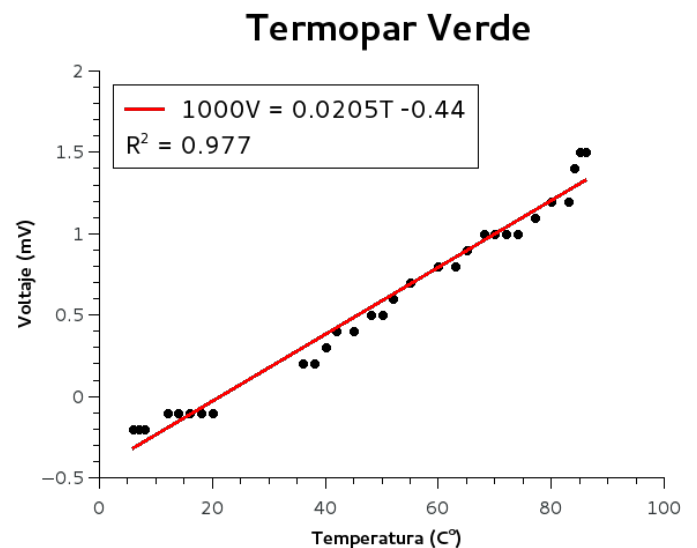


Figure 9. Voltaje en función de la temperatura con su respectiva linealización

La constante que relaciona el cambio en el voltaje con el cambio en la temperatura es $\alpha = 255 \mu V/^{\circ}C$ (sensibilidad del termopar). Al comparar con los datos registrados para los diferentes tipos de termopares, es más probable que el termopar café correspondiera a un termopar tipo J, ya que el termopar tipo J tiene una sensibilidad de $\alpha_J = 55 \mu V/^{\circ}C$. Sin embargo todas los datos para la sensibilidad de los termopares difieren mínimo en un orden de magnitud del encontrado para en termopar café [2].

3.6 Termopar Verde

De forma similar a como se realizó el análisis del termopar café se procedió a analizar los datos del termopar verde.

La relación entre el cambio en el voltaje y el cambio en la temperatura es lineal, y la constante de proporcionalidad es $\beta = 20 \mu V/^{\circ}C$. A partir de los datos registrados para la sensibilidad de cada tipo de termopar se tiene que el termopar verde corresponde a un termopar tipo C, ya que el termopar tipo C tiene una sensibilidad de $\alpha_C = 16 \mu V/^{\circ}C$ [2].

3.7 Termistor negro

Para realizar el análisis de los termistores es primordial conocer si su coeficiente de temperatura es negativo o positivo. Las gráficas de resistencia en función del voltaje tienen distinto comportamiento según el coeficiente de temperatura. Al graficar la resistividad como función de la temperatura, se observa claramente que para ambos termistores la resistividad decrece a medida que la temperatura aumenta de lo cual se concluye que el coeficiente de temperatura es positivo.

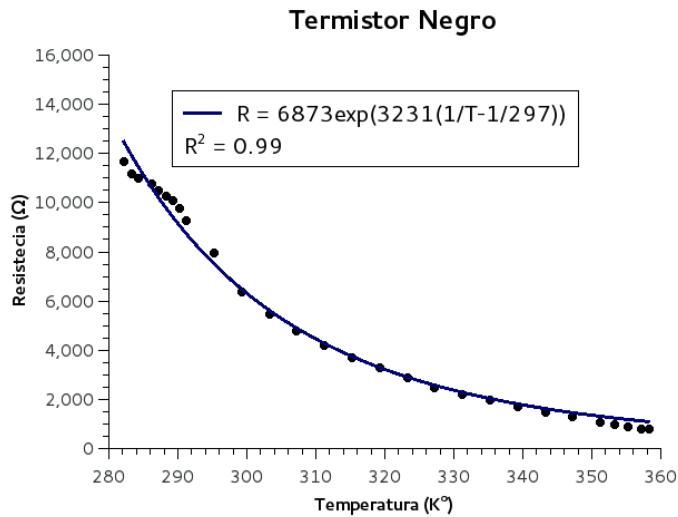


Figure 10. Resistencia en función de la temperatura y su respectivo ajuste

El modelo de decaimiento exponencial ajusta con gran precisión los datos obtenidos. El factor β del termistor negro tiene un valor de $\beta_{negro} = 3231^{\circ}K$, y tiene asociada una energía gap de $E_g = 4.46 \times 10^{-20}J$. Fue necesario tomar los datos del termistor negro dos veces, ya que la glicerina debe encontrarse en equilibrio térmico con el baño térmico de agua al iniciar el experimento, condición que no que satisfecha la primera vez que se realizó el experimento.

3.8 Termistor verde

Los datos del termistor verde no pudieron ser ajustados por un modelo tipo decaimiento exponencial, luego se realizó un ajuste con el modelo de Steinhart-Hart expresando la temperatura en función de la resistencia del termistor.

3.8.1 Modelo β

El ajuste de decaimiento exponencial arroja un valor de $\beta_{verde} = 262.7^{\circ}K$, el cual tiene un valor asociado de $E_g = 3.63 \times 10^{-21}$. Sin embargo, el ajuste utiliza como $T_0 = 76^{\circ}C$, un valor bastante lejano del $T_{ambiente} = 20^{\circ}C$.

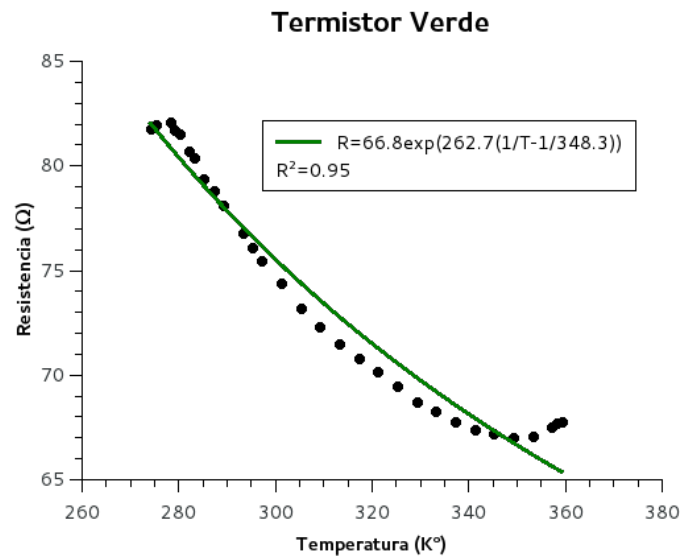


Figure 11. R vs t

3.8.2 Modelo Steinhart-Hart

Se realizó un ajuste utilizando el modelo de Steinhart-Hart, sin embargo no se obtuvo una mejora significativa en la precisión del ajuste. Utilizando una calculadora virtual se encuentran los valores de las constantes A,B,C, asociados. El error es el mismo asociado a este ajuste es el mismo al ajuste exponencial.

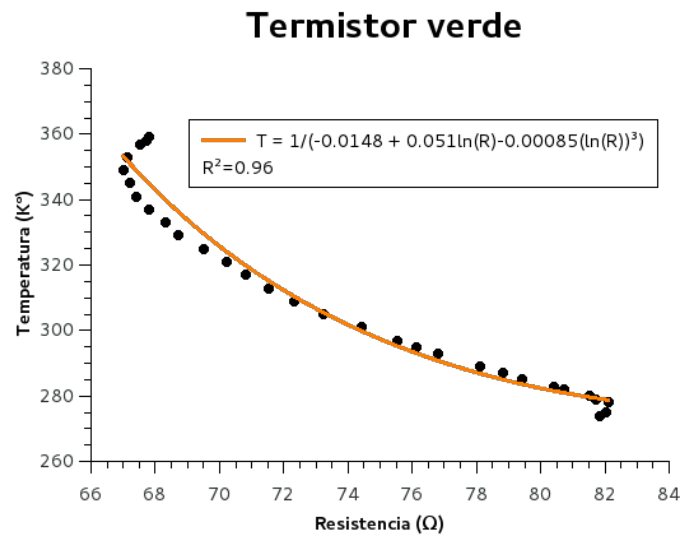


Figure 12. Temperatura en función de la resistencia con su respectiva linealización

No se encontró un modelo que ajuste satisfactoriamente los datos obtenidos por el termistor verde. Esto puede deberse a errores sistemáticos que afectaron los valores de los puntos medidos.

4 CONCLUSIONES

Se logró corroborar experimentalmente los modelos que dan cuenta de la variación del parámetro termométrico con respecto a la temperatura para los sensores analizados. También que un termómetro debe alcanzar el equilibrio lo más rápidamente posible sin perturbar de sobremanera el sistema que se está midiendo, es decir, la energía que absorbe el termómetro debe ser muy pequeña.

REFERENCES

- [1] CHARLES KITTEL *Introduction to solid state Physics*. (John Wiley Sons, Inc, 1953)
- [2] <http://instrumentacionbustos.blogspot.com.co/2008/09/sensores-de-temperatura.htm>, 26/02/2016
- [3] <http://www.thinksrs.com/downloads/programs/Therm20Calc/NTCCalibrator/NTCcalculator.htm>, 26/02/2016
- [4] <http://www.ti.com/product/LM335>, 26/02/2016