

Calibración de una termocupla de Chromel - Alumel

Patricia Martínez - Marcelo Azuaga
Laboratorio IV - Dpto. de Física - UBA 1997

Las termocuplas son, tal vez, los sensores de temperatura más usados en la actividad científica y en la industria.

En lo que sigue, mostraremos como se procedió a calibrar una termocupla de Chromel - Alumel en el rango de $-114\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $327\text{ }^{\circ}\text{C}$. La idea básica consistió en medir las diferencias de potencial originadas principalmente por efecto Seebeck, para ciertas temperaturas fijas correspondientes a puntos de fusión de sustancias conocidas y construir un gráfico de calibración.

I - FUNDAMENTOS TEORICOS :

Una termocupla es un transductor de temperatura, es decir, un dispositivo que traduce una magnitud física en una señal eléctrica. Está compuesta por dos alambres de metales diferentes, los que unidos convenientemente generan entre sus extremos libres una diferencia de potencial proporcional a la diferencia de temperatura entre ellos. Su funcionamiento, se basa en un descubrimiento hecho por Seebeck en 1821: *si se sueldan dos metales diferentes, cuyos extremos están a distintas temperaturas, aparece una f.e.m. (llamada f.e.m Seebeck)*¹

Posteriormente, se mostró que esta f.e.m proviene en realidad de dos efectos diferentes:

- Uno resultante sólo del contacto entre dos metales disímiles y la temperatura de dicha unión. Este es el llamado “Efecto Peltier” y es debido a la difusión de electrones desde el conductor con mayor densidad electrónica al de menor densidad.¹
- Otro, debido a los gradientes de temperatura a lo largo de los conductores en el circuito. Este es el llamado “Efecto Thompson” y es debido al flujo de calor entre los extremos de los conductores, que es transportado por los electrones, induciendo entonces una f.e.m. entre los extremos de los mismos.¹

En la mayoría de los casos, la f.e.m. Thompson es bastante pequeña en comparación con la f.e.m. Peltier y, dependiendo de los materiales elegidos para la termocupla, la f.e.m. Thompson puede ser despreciada.

Históricamente, se llamó efecto Seebeck a la combinación de los efectos Thompson y Peltier. En realidad, esto sería así si no hubiera gradientes de temperatura en la zona aledaña a las uniones de la termocupla. Sin embargo, éste efecto de tipo espacial se manifiesta, por ejemplo cuando la termocupla está en presencia de un campo magnético. En general, se considera el efecto del campo sobre la f.e.m. desarrollada en las uniones solamente; sin embargo los gradientes de temperaturas generados a lo largo de los cables, son responsables de diferencias de potencial que en algunos casos son más que apreciables y deben ser tenidos en cuenta.³

En la mayoría de los casos, considerar los efectos Peltier y Thompson sumados es aceptable como una buena aproximación del efecto Seebeck.

Debemos mencionar también, que la inserción de un metal intermedio en el circuito de una termocupla no afecta la f.e.m. neta, si las dos uniones con el tercer metal se mantienen a la misma temperatura.

La mayoría de las tablas sobre termocuplas dan valores de voltajes en función de la temperatura.

Sin embargo, existen tablas que dan valores del *coeficiente Seebeck* en función de la temperatura. Veamos la relación existente entre el voltaje Seebeck y el coeficiente Seebeck. Definimos al coeficiente Seebeck como el cociente entre el voltaje generado en la termocupla (ΔV) por una pequeña diferencia de temperatura (ΔT) entre sus extremos y dicha diferencia de temperatura.²

Para cada metal, es posible determinar su coeficiente Seebeck absoluto formando una cupla con un metal de referencia. Por convención, el signo de dicho coeficiente se dice positivo, si la corriente inducida fluye hacia el metal de referencia. Podemos ver en la figura 1, las curvas para los coeficientes Seebeck del Chromel y del Alumel usados en la termocupla a calibrar.

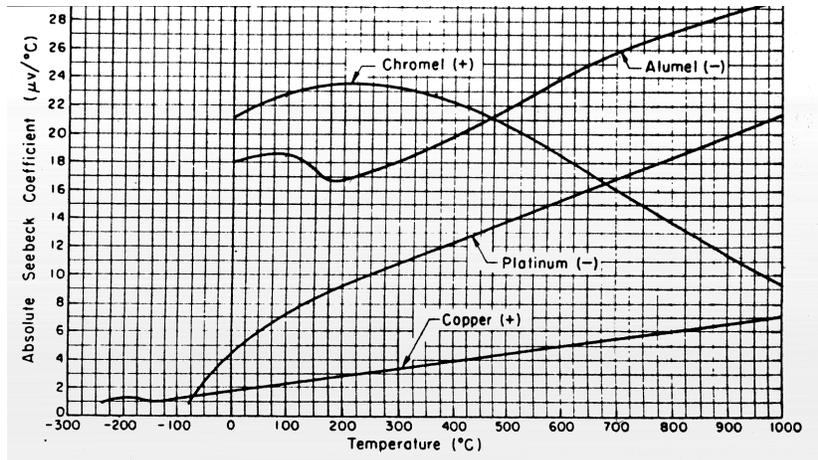


Figura 1 Coeficientes Seebeck absolutos en función de la temperatura, para distintos materiales usados comúnmente en la construcción de termocuplas.²

Para cada combinación de metales, podemos determinar el coeficiente Seebeck relativo a partir de los coeficientes absolutos de cada material, lo cual se observa en la figura 2 :

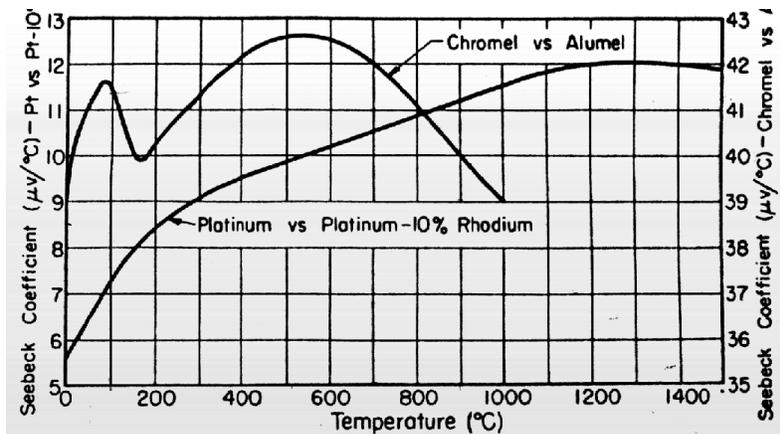


Figura 2 Coeficientes Seebeck relativos en función de la temperatura, para combinaciones de platino con platino y chromel con alumel. Se observa que para chromel-alumel, dicho coeficiente se encuentra acotado entre 39 y 43 $\mu V/^{\circ}C$.²

En una primera aproximación, para diferencias de temperatura muy pequeñas alrededor de una cierta T_0 , la f.e.m. Seebeck generada se puede calcular como :

$$V_s = S \times T_0 \quad (1)$$

Mediante ésta fórmula es posible relacionar las tablas confeccionadas para los coeficientes Seebeck de las distintas termocuplas con las tablas usuales que especifican las f.e.m. generadas por ellas.

Para finalizar, podemos decir que la importancia de las termocuplas en la investigación científica y en la industria es debida , entre otras cosas, a su bajo costo, versatilidad, alta velocidad de respuesta y amplio rango de uso. Por otro lado, es necesario contar con un punto de referencia, ya que éste dispositivo sólo mide diferencias de potencial.

II-ARREGLO EXPERIMENTAL :

La termocupla elegida para calibrar, fue una del tipo “K” : de Chromel (10% cromo y 90% níquel) y Alumel (2% aluminio, 90% níquel y el resto, silicio y manganeso)³ enfundada en una vaina de fibra de vidrio de 1,5 mm de diámetro. En primer lugar se procedió a realizar la soldadura entre los extremos de las aleaciones, retorciéndolas y utilizando un soldador de arco.

Por otro lado, se unieron los extremos libres de la termocupla a sendos cables de cobre (éstas son las llamadas *uniones de referencia*) que llevan la señal generada hasta un microvoltímetro marca KEITHLEY (midiendo en la escala de hasta 200 mV) que a su vez se conectó a una PC-XT a través de una interfaz. De esta manera, fue posible seguir la evolución de las mediciones a través de la pantalla del monitor.

Las dos uniones de referencia se introdujeron en un tubo de ensayo con aceite (deshidratado, para evitar el cortocircuito y al mismo tiempo mantener la temperatura homogénea alrededor de las uniones), y éste a su vez sumergido en un baño de agua con hielo. El arreglo se puede observar en la figura 3.

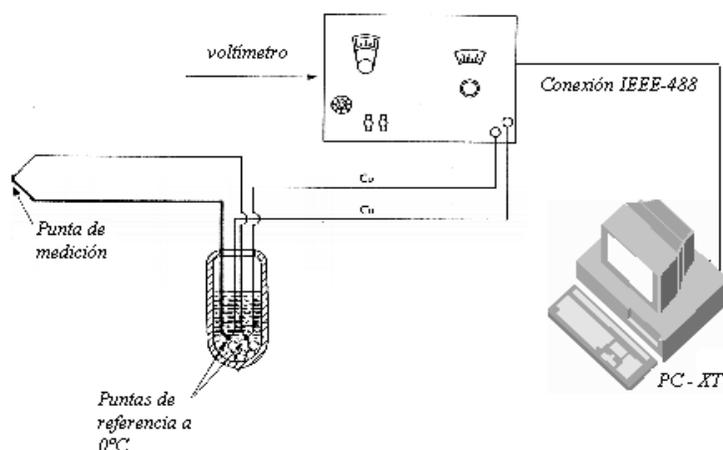


Figura 3 Disposición de los distintos componentes presentes en el arreglo experimental utilizado.

Para la calibración, utilizamos como puntos fijos , los puntos de fusión de distintas sustancias conocidas, obtenidos a través de tablas de constantes físicas.

Calibración a bajas temperaturas :

Las sustancias utilizadas fueron :

<i>Sustancia</i>	<i>Punto de fusión</i>
Tetracloruro de Carbono	-23°C
Mercurio	-38.87°C
Cloroformo	-63.05°C
Acetona	-94.8°C
Alcohol Eílico	-114.5°C

Tabla 1 *Puntos de fusión de las sustancias usadas para la calibración a bajas temperaturas*⁷

Para conseguir que estas sustancias solidifiquen, se procedió a colocar cada una de ellas (en forma sucesiva) en un tubo Pyrex (junto con la unión de las dos aleaciones) y éste a su vez dentro de un termo que contenía aire líquido (a alrededor de -170°C). Una vez solidificada la sustancia, retiramos el tubo del termo y comenzamos las mediciones. Cuando la sustancia alcanza la temperatura de fusión se observa el *plateau* (f.e.m constante durante el tiempo que dura el cambio de fase) en el monitor.

Se efectuaron, por lo menos, dos mediciones de cada sustancia.

Calibración para altas temperaturas :

1^{ra} Calibración :

Las sustancias utilizadas fueron :

<i>Sustancia</i>	<i>Punto de fusión</i>
Estaño	231.968°C
Plomo	327.502°C

Tabla 2 *Puntos de fusión de las sustancias usadas para la calibración a altas temperaturas*⁷

Para obtener temperaturas lo suficientemente altas para fundir las muestras, se empleó un horno con resistencia de Kantal, conectado a un variac alimentado por la tensión de línea.

En forma sucesiva, procedimos a fundir cada uno de los metales en un crisol. Colocamos cada vez la unión Chromel- Alumel dentro del metal fundido realizando una nueva soldadura cada vez, pues la junta queda contaminada luego de cada medición. Procedimos a medir de igual forma que para bajas temperaturas hasta observar el *plateau*.

Se efectuaron dos mediciones de cada metal.

Con el fin de obtener dos puntos más para esta calibración, medimos la f.e.m. correspondiente al agua a 0°C y a 100°C (colocando la punta de medición en el baño de hielo y en agua en ebullición, respectivamente).

2^{da} Calibración :

Dado que sólo disponíamos de dos metales para hacer la calibración a altas temperaturas, procedimos a hacer otra calibración contra termómetro. Para ello usamos un termómetro de mercurio de escala $-10^{\circ}\text{C} / 150^{\circ}\text{C}$, un recipiente con aceite (1 litro aproximadamente) y un calentador eléctrico por inmersión. Aseguramos la unión Chromel- Alumel al bulbo del termómetro para evitar gradientes de temperatura. Procedimos a hacer dos mediciones :

- a) Tomamos una muestra de unos pocos mililitros de aceite en un tubo Pyrex y tabulamos (manualmente) la temperatura medida con el termómetro y el voltaje registrado en el microvoltímetro.
- b) Repetimos la medición, pero ahora registrando la evolución térmica del total de aceite contenido en el recipiente.

III-RESULTADOS :

A partir de las mediciones realizada con las distintas sustancias usadas como patrón en ésta experiencia, se procedió a graficar su evolución térmica atravesando los correspondientes cambios de fase para cada una de ellas. (*figuras 4,5 6 y 7*)

En estos gráficos se pueden apreciar los *plateau* correspondientes a los cambios de fase de cada sustancia, durante los cuales la temperatura no varía apreciablemente. Se procedió en cada caso, a promediar los valores centrales de cada uno de estos “plateau” , adjuntando estos resultados y sus errores estadísticos correspondientes sobre los gráficos.

Cabe consignar que se realizaron dos ó hasta tres evoluciones temporales para cada sustancia con el fin de obtener una mejor definición de dichos *plateau*. Para ello se tuvo en cuenta la cantidad de muestra analizada en cada caso, ya que en algunos casos (por ejemplo, alcohol, estaño) los “plateau” eran apenas apreciables en una primera medición. Debido a los bajos calores de fusión de algunas de las sustancias estudiadas, al aumentar la cantidad de muestra se extendía la duración de los *plateau* lo cual era nuestro interés primordial en la experiencia.

Se muestran en los gráficos las evoluciones temporales con mayor definición de los registrados durante la experiencia, asignándose a cada resultado obtenido su correspondiente temperatura de fusión según figuran en tablas de constantes físicas de los materiales.

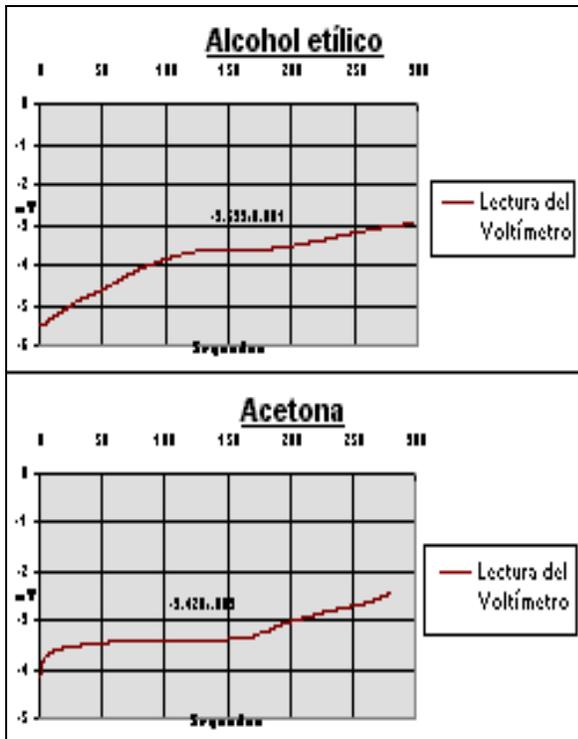


Figura 4 : Plateaux utilizados para la calibración con bajas temperaturas

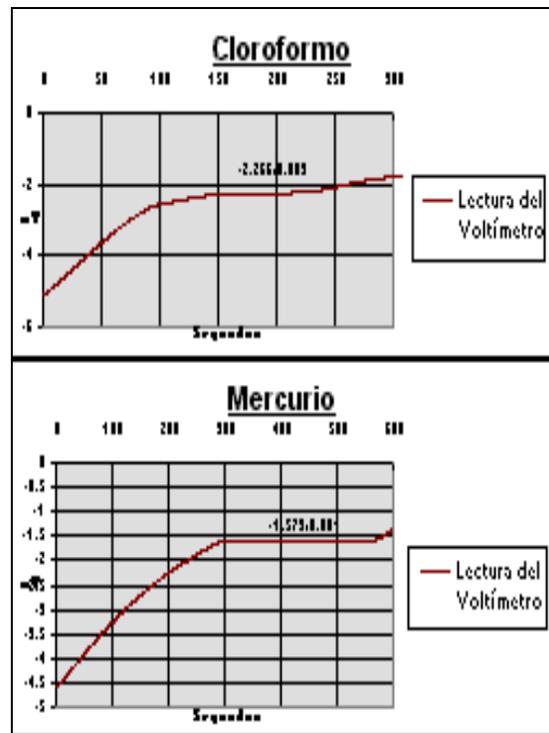


Figura 5 : Plateaux utilizados para la calibración con bajas temperaturas

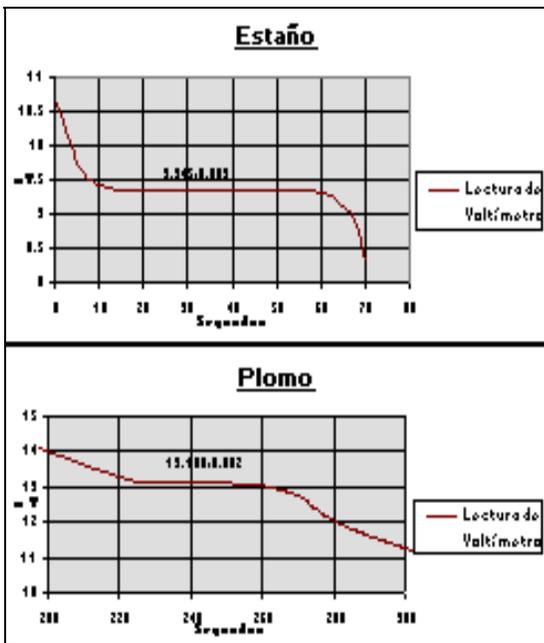


Figura 6 : Plateaux utilizados para la calibración con altas temperaturas

Calibración con bajas temperaturas :

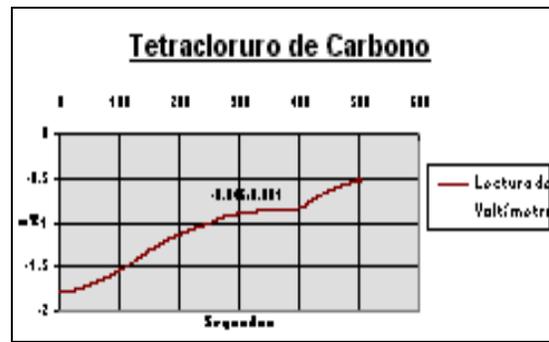


Figura 7 : Plateau utilizado para la calibración con bajas temperaturas

Las termocuplas tipo K ó de Chromel - Alumel son ideales para rangos de temperatura que van de 0°C a 1200°C ya que en el rango de bajas temperaturas pierde su linealidad, lo cual hace incómodo su uso en determinaciones de precisión.

Esta pérdida de linealidad se hizo evidente al graficar los datos correspondientes a los puntos fijos de las sustancias por debajo de los 0°C, por lo cual se procedió a realizar un ajuste de tipo polinómico sobre las mediciones realizadas con el fin de obtener una curva de calibración más apropiada para este rango de temperaturas.

En el gráfico de Calibración para bajas temperaturas (*figura 8*), se tabuló conjuntamente con la figura el resultado de dicho ajuste. La mejor aproximación a los datos medidos resultó ser un polinomio de grado cuatro al cual se le exigió contener al origen de coordenadas ya que se complementaron las mediciones colocando la unión de la termocupla en el baño de hielo usado como referencia. (obteniéndose una lectura idénticamente nula en el microvoltímetro)

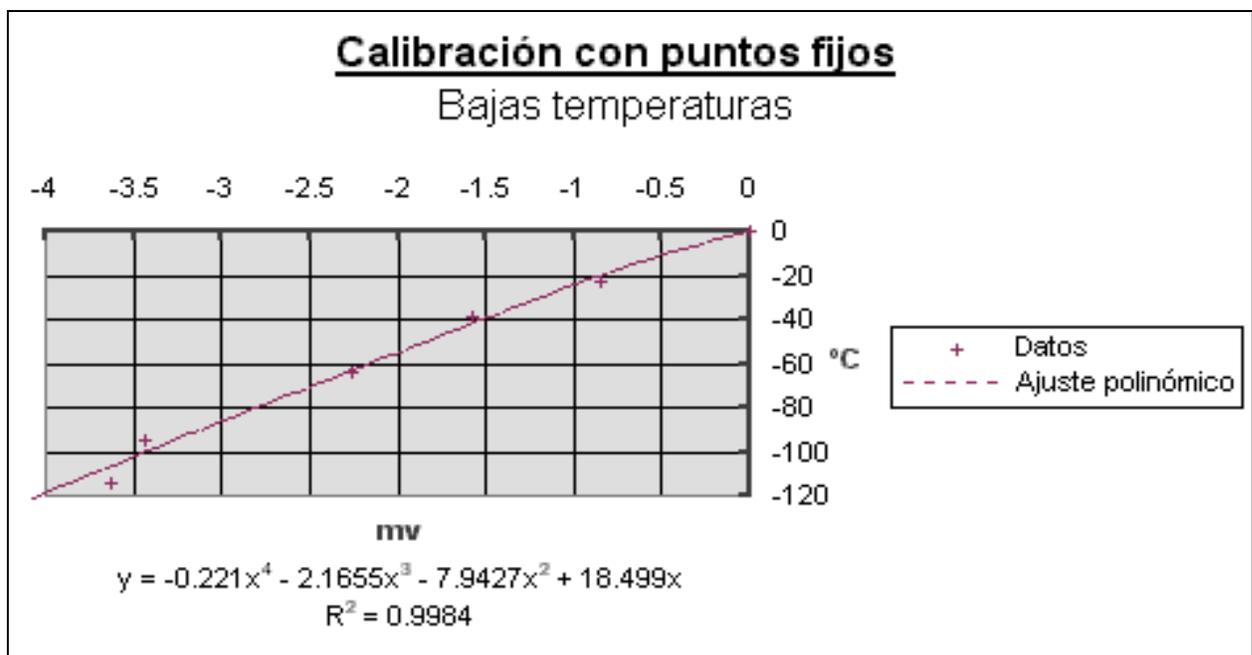


Figura 8 Calibración para bajas temperaturas. Se observan los datos obtenidos junto con el ajuste polinómico propuesto

En el siguiente gráfico (*figura 9*), se consignaron los valores medidos para los distintos puntos de fusión juntamente con la curva de calibración provista por el fabricante de la termocupla utilizada.

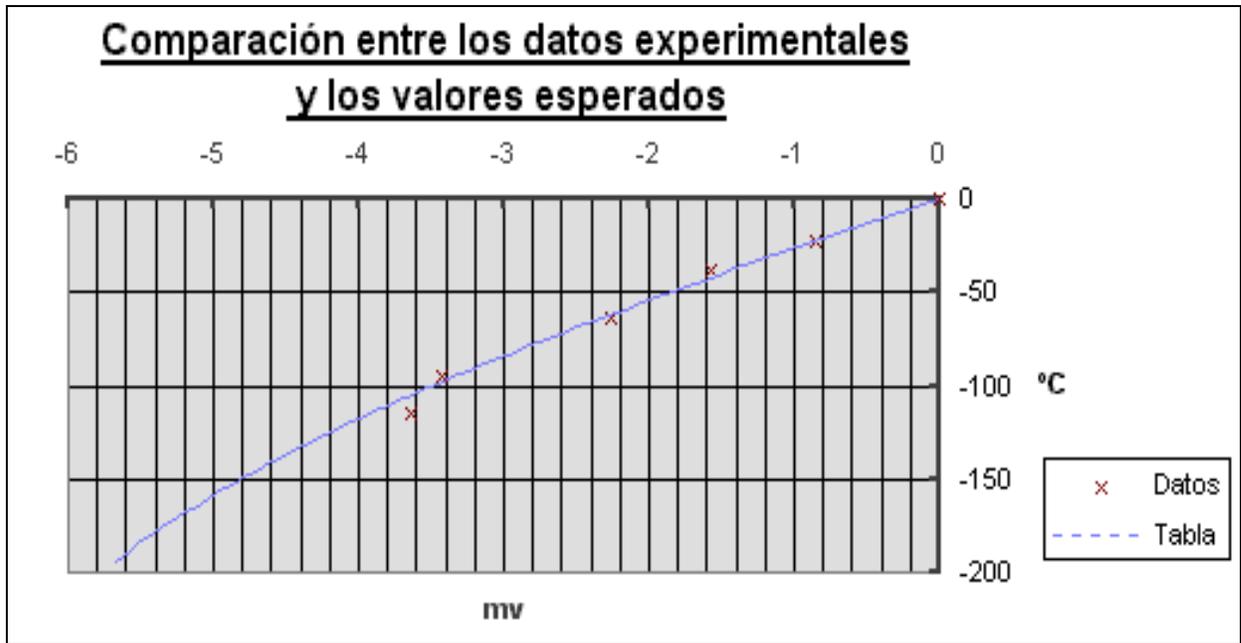


Figura 9 Comparación entre los datos experimentales obtenidos y los valores esperados.

Nota: En todos los gráficos de este informe se usa la siguiente convención de colores: datos experimentales y ajustes de dichos datos se muestran siempre en color rojo; en cambio valores esperados provistos por el fabricante se muestran en azul.

Del gráfico se puede observar que en líneas generales los datos siguen la tendencia de los esperados con algunas fluctuaciones más ó menos importantes, como en el caso del alcohol.

Posiblemente, la mayor fuente de error en estas mediciones haya sido la falta de pureza en las sustancias utilizadas como referencia para la calibración de la termocupla. Esto conlleva una asignación incorrecta de los puntos de fusión que corresponden a materiales en estado puro.

La asignación de un polinomio de grado cuatro para el ajuste de las mediciones obedeció no sólo a la relativa bondad del ajuste con los datos consignados sino a haber sabido que en general para este tipo particular de transductor (termocupla tipo K) los polinomios que, usualmente, mejor se apegan a los datos de los fabricantes son precisamente polinomios de orden cuatro ó cinco⁶. Así lo hicimos, ya que aventurar una curva de calibración de este tipo con tan pocos resultados hubiera sido arriesgado si no hubiéramos constatado con datos provenientes de la fabricación de dichos elementos.

Con los datos obtenidos (junto a sus errores $\pm 1\text{mv}$ para los potenciales medidos) se obtuvo entonces la siguiente curva de calibración para temperaturas desde -120°C hasta los 0°C :

$$y = -0.221x^4 - 2.1655x^3 - 7.9427x^2 + 18.499x$$

$$r^2 = 0.9984$$

$$S_a = 0.0829 \quad S_b = 0.618$$

$$S_c = 2.38 \quad S_d = 2.078$$

$$\text{con } y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx$$

Calibración con

altas temperaturas :

En ésta etapa es donde se presentaron algunas dificultades debidas a la falta de suficientes sustancias para proceder a calibrar en forma confiable la termocupla, por lo cual se dividió la calibración según dos procedimientos distintos, como consignáramos anteriormente.

1. Calibración con puntos fijos :

Con los datos provenientes de los *plateau* observados para el plomo y el estaño, más la medición hecha en el baño de hielo y una medición adicional realizada en agua en ebullición completa, se procedió a calibrar la termocupla en el rango de los 0°C - 330°C.

Los resultados han sido volcados en el gráfico de Calibración con puntos fijos (*figura 10*) conjuntamente con los datos del ajuste lineal realizado sobre estas mediciones.

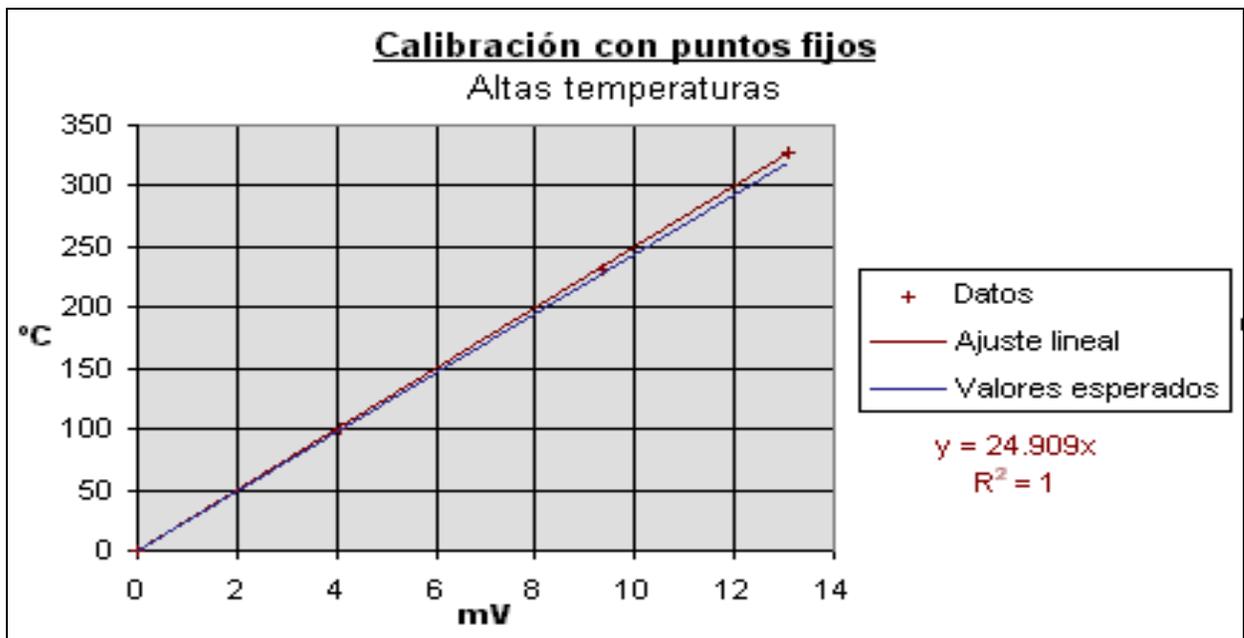


Figura 10 Calibración para altas temperaturas. Se observan los datos experimentales, su ajuste lineal y los valores esperados.

También en el gráfico, se muestra la recta de calibración esperada de acuerdo a datos del fabricante con la que concuerda, dentro del rango de error calculado.

Mediante el cálculo de la regresión lineal hecha para nuestros datos, se obtuvo la siguiente recta de calibración:

$$y = 24.909x$$

$$r^2 = 1$$

$$S_a = 0.798$$

$$S_b = 0.096$$

$$\text{con } y = a + b \cdot x$$

Del resultado de la pendiente de ésta recta de calibración obtenemos un parámetro importante de la termocupla: su sensibilidad. Según nuestros datos la sensibilidad resultó ser para la termocupla **K** analizada:

Sensibilidad = 24.9 ± 0.01 °C/mV

(los fabricantes suelen expresar dicha sensibilidad en términos inversos, es decir en mV/°C ; en este caso el resultado es 0.041 ± 0.002 mV/°C)

Este dato es de fundamental importancia en el uso de termocuplas, ya que nos permite elegir los transductores con mayor respuesta a los cambios de temperatura, lo cual redundará en mejor precisión en las mediciones a efectuar.

2. Calibración contra termómetro :

Como mencionamos anteriormente, se procedió a medir la temperatura de una muestra de aceite calentada previamente mediante un calentador eléctrico por inmersión, que luego se dejó evolucionar libremente en contacto con el medio ambiente. Se midió la temperatura con nuestra termocupla y paralelamente con un termómetro de mercurio.

En un principio, se realizó una primera medición con una muestra pequeña de aceite en un tubo Pyrex de pequeñas dimensiones, de manera que la evolución de la temperatura era muy rápida para obtener una medición precisa.

Por ello, medimos nuevamente pero directamente del recipiente conteniendo el total de aceite (capacidad aproximada de un litro) para lograr una evolución más lenta de su temperatura.

Los resultados obtenidos fueron graficados (junto al error de lectura estimado para el termómetro : ± 1 °C) conjuntamente con los valores esperados para la termocupla en el gráfico de Calibración contra termómetro. (figura 11)

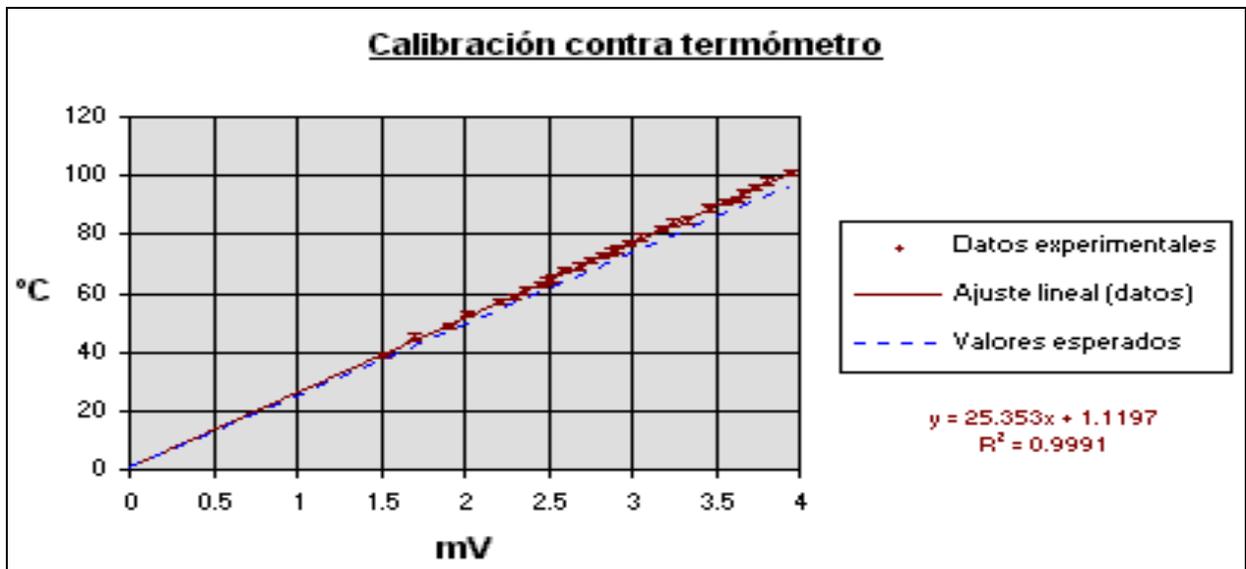


Figura 11 Calibración contra termómetro. Se observan los datos experimentales, su ajuste lineal y la comparación con los valores esperados.

Como se puede apreciar, los datos se apartan apreciablemente de los valores esperados aún incluyendo los respectivos errores de medición. Nuestra explicación del fenómeno está basada en la diferente velocidad de respuesta de ambos sensores de temperaturas utilizados en ésta calibración. Aquí se puede ver como el termómetro de mercurio arroja valores siempre

superiores a los consignados por la termocupla , siendo estas diferencias cada vez menores a medida que la temperatura desciende. Para confirmar nuestras sospechas sobre los distintos tiempos de respuesta de ambos dispositivos, realizamos algunas mediciones de éstos tiempos (utilizando un cronómetro, considerando como error 0.2seg) para la termocupla y el termómetro al producirse cambios bruscos de temperatura en una muestra de agua. El procedimiento seguido fue el siguiente: en el primer caso se colocaron ambos dispositivos en agua en ebullición e inmediatamente después se llevaron a un baño de agua con hielo . En el segundo caso se partió de agua a 40°C procediéndose de igual modo que en el caso anterior y en el tercer caso se partió de agua a 30°C y luego se expusieron ambos dispositivos a la temperatura ambiente. Estos resultados se hallan expresados en la Tabla 3.

<i>Diferencia de temperaturas</i>	<i>Dispositivos</i>	<i>Tiempo de respuesta</i>
De 100°C a 0°C	Termocupla / Termómetro	3.5 seg. / 50 seg.
De 40° a 0°C	Termocupla / Termómetro	1.8 seg. / 30 seg.
De 30°C a 22°C	Termocupla / Termómetro	0.5 seg. / 10 seg.

Tabla 3 Resultados obtenidos para los tiempos de respuesta de un termómetro de mercurio y una termocupla Chromel- Alumel.

De esta tabla se aprecia una marcada diferencia entre los tiempos de respuesta de ambos dispositivos por lo cual, cuando la termocupla estuvo midiendo la temperatura correcta, el termómetro se encontraba varios grados por encima.

Para una mejor comprensión del fenómeno se realizaron un par de mediciones ya no de los tiempos de respuesta sino de la diferencia en la medición de ambos dispositivos cuando la termocupla ya marcaba la temperatura correcta. Para ello medimos con los dos sensores la temperatura de sendos baños de agua a 32°C y 28°C y procedimos a sacarlos simultáneamente dejándolos evolucionar hasta temperatura ambiente.

El resultado fue que cuando la termocupla registraba la temperatura ambiente correcta el termómetro se hallaba 8°C y 7°C por encima.

Esto explica entonces que las diferencias entre las mediciones de la temperatura del aceite con ambos dispositivos fueran desde 7°C hasta unos 4°C para temperaturas más cercanas a la temperatura ambiente. La disminución en estas diferencias para temperaturas más bajas se debe a que el aceite se encuentra a una temperatura más cercana a la ambiente, por lo cual su evolución temporal es más lenta permitiendo que la medición del termómetro se acerque a la de la termocupla. Los resultados para la regresión lineal realizada fueron :

$$y=25\,353x+1\,1197$$

$$r^2=0.9991$$

$$S_a=0.434$$

$$S_b=0.151$$

$$\text{con } y=a+b \cdot x$$

IV -CONCLUSIONES:

A pesar de la simpleza del arreglo experimental usado, los resultados obtenidos para las distintas calibraciones con los puntos fijos de las sustancias de referencia, se adecuaron a lo esperado.

Sin embargo, el poder disponer de sustancias patrones de pureza comprobada mejoraría la calibración realizada. Sin duda la escasez de sustancias de referencia conspiraron contra una calibración más precisa como así también el no disponer de tubos distintos para cada muestra testada lo que contribuía a una posible contaminación de las mismas.

Para el caso de la calibración a bajas temperaturas, el ajuste polinómico propuesto aproxima en mejor medida los datos que el ajuste lineal sugerido en la práctica. Esto concuerda con las indicaciones especificadas por el fabricante que recomienda la utilización de ésta termocupla en un rango de 0° C a 1200°C, donde la linealidad está prácticamente asegurada. (Estrictamente, para una termocupla Chromel- Alumel, el ajuste debería responder a un polinomio de tercer grado, cuyos coeficientes cúbico y cuadrático son despreciables frente al coeficiente lineal. Por esta razón, es aceptable plantear una regresión lineal en éste rango de temperaturas)⁴. Para bajas temperaturas como las medidas, se sugiere utilizar una termocupla de Cobre - Constantan cuyo rango es de -200°C a 400°C.

Para altas temperaturas, se pudo apreciar la linealidad de la termocupla en el rango estudiado como se esperaba a partir de los datos del fabricante, como así, su sensibilidad. Con respecto a esto último, cabe consignar que a partir de datos del fabricante, la termocupla usada tiene menor sensibilidad que otras como por ejemplo una de Chromel - Constantan.

Otra de las desventajas de la termocupla usada es que la f.e.m. generada por ella va decayendo con el tiempo, lo cual no la hace muy confiable después de transcurrido cierto tiempo. Todo esto nos permite aseverar que una elección más adecuada para nuestro experimento hubiera sido la termocupla de Cobre - Constantan (tipo T).

La calibración contra termómetro adoleció de fallas de elección del arreglo experimental, debido a la dispar respuesta de los dispositivos usados. Una mejor manera hubiera sido asegurar baños de temperatura estables a ciertos intervalos, para así poder asegurar que la lectura de ambos sensores sea la correcta. De todas formas, el seguir en esa dirección nunca arrojaría resultados más precisos que los que se pueden obtener con una calibración a partir de los cambios de fase de sustancias puras.

Para evitar errores de estimación del voltaje Seebeck real generado por la termocupla, sugerimos para un mejor arreglo experimental, reemplazar al voltímetro por un potenciómetro, el cual no exigiría la circulación de corriente inducida a través de los conductores. La resistencia de dichos conductores merman la diferencia de potencial leída⁵.

Por otro lado, como se mencionó en la introducción, el evitar gradientes de temperatura bruscos en los conductores mejorarían la medición precisa del voltaje Seebeck.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- J.Beckwith, *Mechanical measurements* (Macmillan, London)- Capítulo 13
- 2- R.Heikes y R.Ure, *Science and Engineering of Thermoelectricity* (Clarendon Press Co.,1961) - Capítulos 1,2 y 10
- 3-J.Dike,*Thermoelectric Thermometry* (Interscience,New York,1956)
- 4-P.L.Walstrom, *American Journal of Physics* - Vol **56** ,Pág. 890-894.
- 5-A.M.Guenault, N.S.Lawson y S.D.Veazey, *American Journal of Physics* - Vol **46** ,Pág. 399-401.
- 6-Malmstadt-Enke-Crouch, *Electronic Analog Measurements and Transducers* (Ed. Benjamin/Cummings, California, 1974)
- 7-C.D.Hodoman, *Handbook of Chemistry and Physics* (Ed. McGraw Hill, New York, 1976)