

¿CÓMO INTERPRETAR EL CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE UN TERMÓMETRO DE RESISTENCIA DE PLATINO?

R. Ramírez Bazán
División de Termometría
Centro Nacional de Metrología
km 4,5 Carr. a los Cués, El Marqués, 76900, Qro., México.
e-mail ramirez@cenam.mx fax 211-05-48

Resumen: A lo largo del trabajo se discuten algunos elementos para la interpretación adecuada de la información que contienen los certificados de calibración para termómetros de resistencia de platino.

INTRODUCCIÓN.

¿Cuál es la intención de calibrar un instrumento? Existen varias respuestas, sin duda, más de una justifica la acción de calibrar un termómetro o cualquier otro instrumento.

Si la principal razón es de orden administrativo, y el objetivo es cumplir con los requisitos de un "sistema de calidad", entonces existe el riesgo de que los certificados de calibración sean letra muerta y no impacten al proceso de producción o servicio. En este caso, basta que los certificados cumplan con lo dispuesto en el "sistema de calidad". Por otro lado, si la razón es caracterizar los instrumentos de medición para ayudar a mantener procesos controlados, entonces es necesario aportar información significativa en el certificado de calibración. El certificado debe contener información valiosa y accesible para el cliente y él debe tener los elementos para hacer uso de la misma.

En este trabajo revisaremos un certificado de calibración de un termómetro de resistencia de platino (TRP) con el objetivo de desglosar la información contenida en él.

Elementos de un certificado de calibración.

El certificado consta de una carátula con la información que relaciona unívocamente al instrumento con el certificado. En su interior se identifican el termorresistor y el lector de resistencia. Así mismo, se declara la concordancia de las mediciones conforme a la Escala Internacional de Temperatura 1990 (EIT-90) [1], los puntos fijos utilizados, sus temperaturas en °C, los valores de la función de referencia (W_r) y los resultados experimentales de la función W del calibrando. Se expresa el valor de resistencia aparente del termorresistor medido en el punto triple del agua (PTA) y las constantes de calibración (a , b , c y d) para la función de desviación en cada subintervalo de calibración.

La incertidumbre se expresa en forma gráfica, con un nivel de confianza de aproximadamente un 95 %. Al final del certificado se incluyen tablas para facilitar el cálculo de la temperatura a partir de los datos experimentales en resistencia al usar el TRP.

Proceso de calibración.

En la práctica existen dos casos para realizar la calibración de un TRP: a) El cliente envía el termorresistor y el lector en conjunto para calibrarse. b) Sólo envía el termorresistor, en este caso el lector de resistencia debe ser alguno de los que pertenezca al CENAM. La selección de los puntos fijos en donde se realizarán mediciones para calibrar el termómetro los determina la EIT-90 [1]. Ver tabla 1.

El desarrollo experimental inicia al someter al termorresistor a un ciclo térmico entre el PTA y el punto fijo superior del intervalo de calibración. Si el termorresistor es estable, entonces se procede a calibrarlo midiendo la resistencia en orden descendente hasta completar los puntos de calibración. Se finaliza el desarrollo experimental midiendo el valor del PTA. Una vez obtenidos los valores experimentales de resistencia se determinan los valores de las constantes de la función de desviación y se estima la incertidumbre.

La función W .

La función W representa el comportamiento normalizado de un termorresistor de platino a lo largo de su intervalo de operación, respecto a la resistencia que tiene en el punto triple del agua. R_t es la resistencia que presenta en cualquier temperatura t y R_0 es la resistencia en el PTA.

Por definición:
$$w = \frac{R_t}{R_0} . \quad (1)$$

La función W tiene características importantes, entre ellas: a) Todas las funciones W de cualquier termómetro pasan por la unidad en el PTA; b) es adimensional; c) al normalizar el valor de la resistencia no importa qué valor tenga de R_0 el

termorresistor, 10,100 o 25 ohms, se mantiene la forma de la función que sigue; d) presupone que, dadas las características del termorresistor de platino, las tensiones mecánicas y térmicas son factores multiplicativos a la resistencia y del mismo valor en todo el intervalo de operación de estos sensores. Estos factores se ven anulados al dividir el valor de R_t entre R_0 ; e) al trabajar en términos de W se da una mayor estabilidad a la calibración.

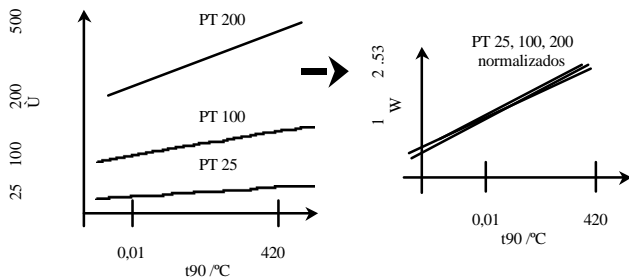


Figura 1. Normalización del termorresistor.

En la figura 1 se ilustran termorresistores de platino con diferentes resistencias nominales a 0°C y el efecto de normalizarlos por medio de W .

La función de referencia.

La función de referencia (W_r) representa el comportamiento de un conjunto de termorresistores de platino considerados como los "representativos" de lo que se puede obtener de este tipo de sensores. Fue establecida al ajustar al comportamiento (en términos de W) de los termorresistores "representativos" con el polinomio de la ecuación 2 para temperaturas superiores a 0°C y para las inferiores con el de la ecuación 3. En otras palabras, es la línea base sobre la cual se comparará cualquier

otro TRP. Los valores de A_i y C_i aparecen en el texto de la EIT-90 [1].

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left[\frac{T_{90} / K - 754,15}{481} \right]^i \quad (2)$$

$$\ln[W_r(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left[\frac{\ln(T_{90} / 273,16K) + 1,5}{1,5} \right]^i \quad (3)$$

La función de desviación.

La comparación del comportamiento de un termorresistor de platino "cualquiera" contra W_r da lugar a la función de desviación definida como:

$$W = W - W_r \quad (4)$$

Es decir, nos indica qué tan alejado está el termorresistor "cualquiera" de los puntos que definen los termorresistores de platino "representativos". (fig. 2).

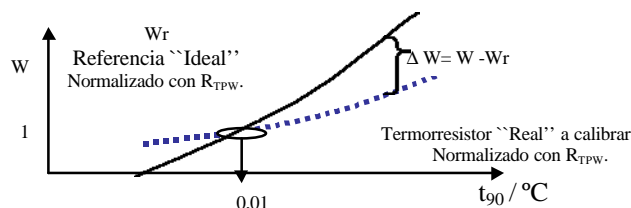


Figura 2. Función de desviación.

Los valores experimentales del calibrando expresados en términos de W en un certificado (ver cuadro 1), permiten obtener las diferencias respecto al valor de la función de referencia W_r en los puntos de calibración. A estas diferencias les colocaremos un polinomio definido para cada subintervalo en que realicemos la calibración (tabla 1). El polinomio se usa para interpolar a cualquier valor de temperatura.

Tabla 1. Subintervalos de la EIT 90.

Subintervalo (°C)		Puntos fijos de calibración	Función de desviación
-38,8344 a 29,7646	PT Hg a PF Ga	PT Hg, PTA y PF Ga	$\Delta W = a_n (W - 1) + b_n (W - 1)^2$
0 a 29,7646	0°C a PF Ga	PTA y PF Ga	$\Delta W = a_p (W - 1)$
0 a 156,5985	0°C a PS In	PTA y PS In	$\Delta W = a_p (W - 1)$
0 a 231,928	0°C a PS Sn	PTA, PS In y Sn	$\Delta W = a_p (W - 1) + b_p (W - 1)^2$
0 a 419,527	0°C a PS Zn	PTA, PS Sn y Zn	$\Delta W = a_p (W - 1) + b_p (W - 1)^2$
0 a 660,323	0°C a PS Al	PTA, PS Sn, Zn, y Al	$\Delta W = a_p (W - 1) + b_p (W - 1)^2 + c_p (W - 1)^3$
0 a 961,78	0°C a PS Ag	PTA, PS Sn, Zn, Al y Ag	$\Delta W = a_p (W - 1) + b_p (W - 1)^2 + c_p (W - 1)^3 + d_p (W - W_{660,323})^2$; $d_p = 0$ para $T < a$ PS Al

USO DE LA INFORMACIÓN DEL CERTIFICADO.

Las constantes de la función de desviación.

Al contar con los valores experimentales de R_0 y R_t se calcula W y con las constantes de la función de desviación del certificado tenemos varios caminos para calcular la temperatura t , tales como:

- Programar el lector de resistencia.
- Utilizar la tabla de W vs t del certificado.
- Calcular W_r ($W_r = W - W_0$) y usar la tabla de W_r vs t .
- Calcular W_r ($W_r = W - W_0$) y usar la función inversa propuesta en la EIT-90.

De los caminos anteriores se derivan las siguientes preguntas: ¿Cómo programar el instrumento lector? ¿Cómo convertir el valor de W a t vía la tabla de W ? ¿Cómo convertir el valor de W a t vía la tabla de W_r ? ¿Cómo convertir el valor de W a t vía la función inversa de la EIT-90?

Para los usuarios de TRP con lector programable, en términos de la EIT 90, las constantes que se declaran en el certificado se programan en el instrumento. Sin embargo, tienen el inconveniente de funcionar como cajas negras. Consideramos que la forma más conveniente de realizar mediciones de temperatura de la más alta calidad, en forma transparente y económica, con termorresistores de platino es la de trabajar con valores de resistencia y utilizar una hoja de cálculo con la función inversa o las tablas de W y W_r .

El lector de resistencia eléctrica debe realizar la medición a 4 hilos, debe al menos contar con una estabilidad y división mínima de $\pm 1 \text{ m}\Omega$ en el intervalo de 80°C a 26°C para que al usar un PT 100 (termorresistor de platino de 100Ω nominales en el punto de hielo) exista la posibilidad de realizar mediciones de temperatura con una resolución mejor que $0,01^\circ\text{C}$ en el intervalo de -38°C a 420°C .

¿Cómo usar las tablas del certificado y la función inversa?

Se mostrará el uso de las tablas W_r y W mediante un ejemplo. Las características del TRP son las siguientes: un lector de $1 \text{ m}\Omega$ de resolución y un PT100 recién calibrado de 0°C a 157°C . Realicemos la conversión de una lectura expresada en resistencia a temperatura.

Lectura 1 $107,596 \Omega$

Para ello cuento con los datos del certificado de calibración (cuadro1).

La ec. (5) proviene de asignar a la función de desviación el modelo indicado por la EIT-90. (Tabla 1).

Cuadro 1. Fragmento de un certificado de calibración.

PATRÓN	
CALIBRANDO	
Punto Fijo	
Temperatura / °C	
W_r	
W	
PS- In	
156,5985	
1,609 801 85	
1,609 627	
$R_0 = 100,004 \Omega \pm 1 \text{ m}\Omega$	
Se propone la siguiente función de desviación entre 0°C a 157°C para ajustar a la función de referencia W_r de la EIT90.	
$W - W_r = a(W - 1)$. (5)	
Donde:	$a = -0,000 2870$

Tabla 2. Valores de W_r

$t_{90}/^\circ\text{C}$	W_r
0	0,999 960 11
2	1,007 934 75
4	1,015 904 52
6	1,023 869 41
8	1,031 829 43
10	1,039 784 59
12	1,047 734 89
14	1,055 680 32
16	1,063 620 90
18	1,071 556 63
20	1,079 487 51
22	1,087 413 54
24	1,095 334 73
26	1,103 251 08
28	1,111 162 58
30	1,119 069 26
32	1,126 971 10
34	1,134 868 10
36	1,142 760 00

Tabla 3. Valores de W

$t_{90}/^\circ\text{C}$	W	dW/dt
0	0,999960	0,003986
2	1,007932	0,003984
4	1,015900	0,003981
6	1,023863	0,003979
8	1,031820	0,003976
10	1,039773	0,003974
12	1,047721	0,003972
14	1,055664	0,003969
16	1,063603	0,003967
18	1,071536	0,003964
20	1,079465	0,003962
22	1,087388	0,003959
24	1,095307	0,003957
26	1,103221	0,003955
28	1,111131	0,003952
30	1,119035	0,003950

a) Usando la tabla de W_r .

La tabla de W_r ha sido generada utilizando la ec (2).

- Con el valor de resistencia (R_0) medido en una celda de PTA o con el valor corregido de la medición en un baño de hielo al recibir el certificado y R_t calcular W .

R_0 medido localmente = $100,014$

R_t registrado en bitácora = $107,596$

$$W = \frac{107,596}{100,014} = 1,075809$$

- Sustituir los valores de a y W en la ecuación (5) de la función de desviación y encontrar el valor de W_r .

$$W_r = W - a(W - 1); \quad W_r = 1,075\ 831$$

- Con el valor calculado de W_r , dirigirse a la tabla 2 y en la columna de W_r encontrar entre qué valores se encuentra e interpolar el valor de t_x .

$T_{90}/^{\circ}\text{C}$	W_r
18	1,071 556 63
1,075 831	
20	1,079 48751

$$t_x = 18 + \frac{(20-18) \cdot (1.075831-1.07155663)}{1.07948751-1.07155663}; \quad \mathbf{t_x=19,078^{\circ}\text{C}}$$

b) Usando la tabla de W .

La tabla 3 (W) se generó con la ec. 5 y la constante señalada en el certificado de calibración.

- Proceder de igual forma que en el paso 1 del inciso a.
- Con el valor calculado de W , dirigirse a la tabla 3 y en la columna de W encontrar entre qué valores se encuentra e interpolar el valor de t_x .

$t_{90}/^{\circ}\text{C}$	W	dW
18	1,071 536	0,003964
1,075 809		
	1,079 465	0,003962

$$t_x = 18 + \frac{(20-18) \cdot (1.075809-1.071536)}{1.079465-1.071536}; \quad \mathbf{t_x= 19,078^{\circ}\text{C}}$$

c) Usando las constantes de la función de desviación y una hoja de cálculo (o una calculadora programable).

La función inversa $T(W_r)$ se aproxima para temperaturas por arriba de 0°C por la ecuación 6 y para temperaturas por debajo de 0°C por la ecuación 7.

$$T_{90} / K - 273.15 = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left[\frac{W_r(T_{90}) - 2.64}{1.64} \right]^i \quad (6)$$

$$T_{90} / 273,16 K = B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left[\frac{W_r(T_{90})^{1/6} - 0,65}{0,35} \right]^i \quad (7)$$

- En este caso debemos proceder de igual forma que en el paso 1 y paso 2 del inciso a, t_x se encuentra en grados Celsius.
- La ec 6 (para $t > 0^{\circ}\text{C}$) puede escribirse como:

$$\mathbf{t_x= D_0 + D_1 \cdot t_a + D_2 \cdot t_a^2 + D_3 \cdot t_a^3 + D_4 \cdot t_a^4 + D_5 \cdot t_a^5 + D_6 \cdot t_a^6 + D_7 \cdot t_a^7 + D_8 \cdot t_a^8 + D_9 \cdot t_a^9} \quad (8)$$

$$\text{Dónde: } t_a = \frac{W_r - 2.64}{1.64} \quad (9)$$

Los valores de cada una de las constantes D_0 hasta D_9 están definidas en el texto de la escala EIT 90 [1].

Para el caso de temperaturas por debajo de 0°C podemos escribir la ec. 7 como:

$$\mathbf{t_x= [B_0 + B_1 \cdot t_b + B_2 \cdot t_b^2 + B_3 \cdot t_b^3 + B_4 \cdot t_b^4 + B_5 \cdot t_b^5 + B_6 \cdot t_b^6 + B_7 \cdot t_b^7 + B_8 \cdot t_b^8 + B_9 \cdot t_b^9 + B_{10} \cdot t_b^{10} + B_{11} \cdot t_b^{11} + B_{12} \cdot t_b^{12} + B_{13} \cdot t_b^{13} + B_{14} \cdot t_b^{14} + B_{15} \cdot t_b^{15}] \cdot 273.16 - 273.15} \quad (10)$$

$$\text{Dónde: } t_b = \frac{W_r^{1/6} - 0,65}{0,35} \quad (11)$$

Los valores de cada una de las constantes B_0 hasta B_{15} están definidas en el texto de la escala EIT 90 [1].

¿Cómo obtener el valor de la incertidumbre que corresponde a esta medición?

Al valor de la temperatura calculada le corresponde una incertidumbre que se puede conocer utilizando la gráfica de incertidumbre del certificado. Para ello proceda como se indica:

- Localice en el eje horizontal el valor de la medición de temperatura y proyecte una línea perpendicular en el punto correspondiente hasta encontrar la curva que representa a la incertidumbre.
- En ese punto de cruce trace una línea horizontal hasta alcanzar el eje vertical que representa el valor de incertidumbre.

Al encontrar el valor de incertidumbre hay que tener en cuenta las leyendas que se establecen en el certificado de calibración. Si se declara que ha sido considerada la propagación de la incertidumbre del baño de hielo del usuario, el valor encontrado en la gráfica es el valor final de la incertidumbre de la medición asociada al termorresistor o TRP, según sea el caso de calibración. En esos casos se consideró el modelo siguiente como un elemento en el cálculo de la incertidumbre, en donde $U_{\text{baño de hielo}} = \pm 5 \text{ mK}$ es la incertidumbre estimada del baño de hielo del usuario.

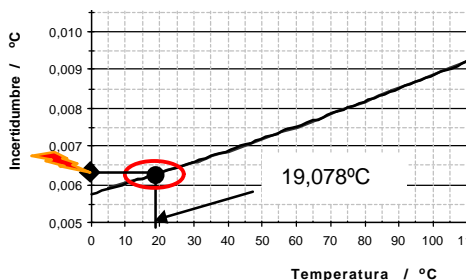
$$U_{\text{PROPAGADA}} = U_{\text{baño de hielo}} \cdot W \quad (12)$$

Si no se consideró ese valor en el certificado, el usuario debe obtener el valor final de la incertidumbre utilizando el siguiente modelo:

$$U_{\text{PROPAGADA}} = U_{\text{celda de PTA o baño de hielo}} \cdot W \quad (13)$$

Entonces, al valor de la gráfica hay que sumar este elemento con la información del usuario.

Gráfica 1. Incertidumbre.



Al recibir el certificado y el instrumento ...

Antes de utilizar en forma cotidiana el termómetro recién calibrado, o de pensar en programarlo, el usuario debe en primer lugar medir la resistencia del termómetro en el PTA. Esta acción es indispensable si sólo se envió a calibrar el termorresistor y para evitar errores sistemáticos por variaciones en la resistencia debida a efectos de transporte u otros motivos. En los ejemplos anteriores, se utilizó un valor de R_0 medido localmente y no el del certificado. Si no hubiésemos medido localmente el R_0 el valor de la temperatura calculada sería:

$$W = \frac{107,596}{100,004} = 1,075917; \text{ tx sin corregir} = 19,105;$$

Si comparamos tx y tx sin corregir apreciamos que existe una diferencia de 0,027 °C

Es importante que se mida regularmente el valor de resistencia en una celda de PTA, ya que con el paso del tiempo el valor de la R_0 puede cambiar. De no hacerlo, nuestras mediciones de temperatura se verán afectadas sistemáticamente. Recomendamos que el usuario realice mediciones y actualizaciones periódicas (de ser posible diario) del valor de R_0 para efectos de controlar su TRP y eliminar este error sistemático.

En el caso que no se cuente con celda de PTA se puede trabajar con un baño de hielo caracterizado previamente realizado con el agua de mejor calidad disponible. Para ello utilice agua tipo 1 y de no ser posible al menos use agua comercial de garrafón. La temperatura de un baño de hielo es de $0^\circ\text{C} \pm 5\text{mK}$ de incertidumbre, (al menos es lo que podemos soportar en este momento). La temperatura del baño de hielo se encuentra por debajo de la temperatura del PTA ($0,01^\circ\text{C}$), por lo tanto, hay que trasladar el valor de la resistencia medida en el baño de hielo a su equivalente en el PTA. Para ello hay que emplear la siguiente relación:

$$R_{0\text{equivalente}} = R_h + R_h * \frac{dW}{dt} * \Delta t \quad (14)$$

En la ecuación anterior R_h es la resistencia medida en el punto de fusión del hielo; dW/dt es la razón de cambio en la función W con respecto a la EIT 90; aproximadamente 0,004. Este valor puede tomarse con mayor exactitud de un certificado de calibración para un determinado sensor. Δt es el incremento de temperatura entre el punto de fusión y el PTA.

Si al mismo termorresistor en lugar de medirle inicialmente su resistencia en el PTA, lo hacemos en un baño de hielo, encontramos que:

$$R_h = 100,010 \Omega;$$

Del certificado: $dW/dt = 0.003986$; $\Delta t = 0,01^\circ\text{C}$

Si aplicamos la ecuación 14. $R_{0\text{equivalente}} \approx 100,014 \Omega$

Otra información relevante.

Es muy común que al trabajar con termómetros de resistencia de platino escuchemos hablar del término α . Si el termómetro fue calibrado más allá de los cien grados es posible conocer su valor tal como lo declara la IEC 751.

$$a = \frac{(R_{100} - R_h)}{100 * R_h} \quad (15)$$

En nuestro ejemplo, R_h tiene un valor de $100,010 \Omega$. El valor de R_{100} lo podemos obtener de las tablas W , W_r o en forma experimental.

Al despejar R_t de la ec. (1) obtenemos: $R_t = W * R_0$

Del informe $W_{100} = 1,392660$; entonces, $R_t = 139,285 \Omega$

Sustituyendo en la ec. (15): $a = 0,00392 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

CONCLUSIONES.

Se presentó una guía para interpretar la información contenida en un certificado de calibración de un TRP. A partir de un lector de resistencia sin más atributos que los señalados, un termorresistor de platino y el certificado de calibración se pueden realizar mediciones de temperatura de alta calidad. La medición de resistencia en el PTA directa o indirectamente mediante un baño de hielo es fundamental para medir temperatura con termorresistores de platino sin desviaciones sistemáticas y llevar al mismo tiempo un control metrológico de estos instrumentos.

REFERENCIAS.

- [1] H. Preston-Thomas, "The international Temperature Escale of 1990 (ITS-90)" *Metrologia* **27**, 3-10, (1990)
- [2] IEC 751, International standard. Industrial platinum resistance thermometer sensor. Amendment 2. 1995-07

