

Callendar + Van Dusen

Modelo de Medición para Termómetros de Resistencia

La ecuación de Callendar - Van Dusen tiene más de 120 años de uso, revisemos brevemente a sus creadores y en que consiste.

Hugh Longbourne Callendar (1863...1930), fue un físico Británico, que realizó notables contribuciones a la termometría, calorimetría y conocimientos de las propiedades termodinámicas del vapor. En los principios de la termometría de platino, en 1885-86 Callendar encontró que la variación de resistencia con la temperatura en el intervalo de 0...+550 °C era bien descrita por una ecuación parabólica, la cual desde entonces lleva su nombre.



Milton S. Van Dusen Asistió a las universidades de Syracuse (1913) y Johns Hopkins (1921), fue investigador del *National Bureau of Standards* (NBS) ahora NIST de los EE.UU. Realizó investigaciones en el área termodinámica, conductividad y aislamiento térmico, en 1925 amplió la ecuación de Callendar a -200 °C, compensando la inexactitud que tenía la ecuación original añadiendo el coeficiente β de cuarto orden. Por cierto de acuerdo con un investigador de la biblioteca del NIST y sus colegas de las universidades a las que asistió, indican que al parecer Van Dusen era tímido con las cámaras, por lo cual no encontramos una imagen de él.

Apasionados por la Metrología

La Guía MetAs, es el boletín electrónico de difusión periódica de MetAs & Metrologos Asociados.

En *La Guía MetAs* se presentan: noticias de la metrología, artículos e información técnica; seleccionada por nuestros colaboradores, que deseamos compartir con Usted, colegas, usuarios, clientes, estudiantes, amigos y en fin, con todos aquellos interesados o relacionados con la metrología técnica e industrial.

Calle: Jalisco # 313. Colonia: Centro
49 000, Cd. Guzmán, Zapotlán El Grande, Jalisco, México
Teléfono & Fax: 01 (341) 4 13 61 23 multi-línea
E-mail: laguiametas@metas.com.mx. Web: www.metas.com.mx

Servicios Metrológicos:

Laboratorio de Calibración:

Presión, Alto Vacío, Temperatura, Humedad, Eléctrica, Vibraciones, Masa, Densidad, Volumen, Óptica y Dimensional

Ingeniería:

Selección de Equipos, Desarrollo de Sistemas de Medición y Software, Reparación y Mantenimiento

Gestión Metrológica:

Subcontratación de Servicios, Outsourcing, Selección de Proveedores, Confirmación Metrológica

Consultoría:

Capacitación, Entrenamiento, Asesoría, Auditorías, Ensayos de Aptitud, Sistemas de Calidad

RESEÑA HISTÓRICA

En 1871, el alemán Werner von Siemens inventó el detector de temperatura resistivo (RTD) y presentó una fórmula de interpolación de tercer orden. El sensor no funcionó debido a la inestabilidad de las indicaciones de temperatura.

En 1885, Callendar desarrolló el primer RTD de platino comercialmente satisfactorio. Callendar descubrió que el aislante utilizado por Siemens era quebradizo causando tensiones internas lo que producía la inestabilidad de las indicaciones. Cambió el material aislante y recoció el RTD a temperaturas más altas.

En 1887, Callendar publicó un artículo titulado “*On the practical measurement of temperature*” el cual puede ser considerado como el inicio de la termometría de resistencia, desde entonces, los termómetros de resistencia de platino han sido establecidos para la determinación (interpolación) de temperaturas entre los puntos fijos definidos en las escalas de temperatura internacionalmente reconocidas. En este trabajo propuso la ecuación de resistencia dependiente de la temperatura para resistores de platino, ver la ecuación 1.

Cuando se comparó la ecuación de Callendar para resistores de platino con termometría de gas a bajas temperaturas, se encontró que era inexacta. En 1925, Van Dusen un investigador del *National Bureau of Standards* (NBS) ahora NIST, amplió la ecuación a -200 °C , propuesta que permitió compensar estas inexactitudes mediante el modelo de medición que podemos observar en la ecuación 2.

Ecuación de Callendar para el intervalo positivo, de $0\dots+850\text{ °C}$. El término de 2º orden δ , en la función propuesta por Callendar estableció una mejor aproximación basada en la diferencia entre la temperatura real y la temperatura calculada solo con el modelo lineal de primer orden de alfa, $R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)$ que solo cubre el intervalo de $0\dots+100\text{ °C}$.

$$R_t = R_0 + R_0 \cdot \alpha \cdot \left[t - \delta \cdot \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \cdot \left(\frac{t}{100} \right) \right] \quad (1)$$

0...+850 °C
&
-200...0 °C

Callendar - Van Dusen en las escalas de temperatura

Escala	ITS-27	ITS-48 IPTS-48	IPTS-68	ITS-90
Instrumento de interpolación	Termómetro de resistencia de platino			
Intervalo 1 de temperatura	-190...0 °C	-182,97...0 °C	13,81...273,16 K	13,81...273,16 K
Interpolación	Callendar-Van Dusen , cuadrática	Callendar-Van Dusen , cuadrática	Función de Referencia (W_r)	Función de Referencia (W_r)
Instrumento de interpolación	Termómetro de resistencia de platino			
Intervalo 2 de temperatura	0...660 °C	0...630,5 °C	0,01...630,74 °C	0,01...961,78 °C
Interpolación	Callendar parábola	Callendar parábola	Callendar modificada	Función de Referencia (W_r)
Instrumento de interpolación	TC Platino + 10 % Rodio & Platino (Tipo S)			-
Intervalo 3 de temperatura	660...1 063,0 °C	660,5...1 063,0 °C 630,5...1 063 °C	630,74...1 064,43 °C	-
Interpolación	Parábola	Parábola	Parábola	-
Instrumento de interpolación	Pirómetros Ópticos			
Intervalo de temperatura	> 1 063,0 °C	> 1 063,0 °C	> 1 064,43 °C	> 961,78 °C
Interpolación	Ley de Wien	Ley de Planck	Ley de Planck	Ley de Planck

Cuadro 1. Ecuación de Callendar - van Dusen como ecuación de interpolación en las escalas internacionales de temperatura.

Ecuación de Callendar - Van Dusen para el intervalo negativo, de -200...0 °C. El término de 4º orden β , en la función establecida por Van Dusen y aplicada para $t < 0$ °C, se basa en la diferencia entre la temperatura real y la temperatura resultante de la ecuación 1 empleando solo los coeficientes α y δ .

$$R_t = R_0 + R_0 \cdot \alpha \cdot \left[t - \delta \cdot \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \cdot \left(\frac{t}{100} \right) - \beta \cdot \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \cdot \left(\frac{t}{100} \right)^3 \right] \quad (2)$$

Del valor de alfa (α) y de las constantes delta (δ) y beta (β) podemos sustituir para la obtención de las constantes A, B y C que por simplicidad son más ampliamente utilizadas y descritas en normas:

$$R_t = R_0 \cdot [1 + A \cdot t + B \cdot t^2] \quad (3)$$

$$R_t = R_0 \cdot [1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 \cdot (t - 100)] \quad (4)$$

Donde:

$$A = \alpha + \frac{\alpha \cdot \delta}{100} \quad (5)$$

$$B = -\frac{\alpha \cdot \delta}{100^2} \quad (6)$$

$$C = -\frac{\alpha \cdot \beta}{100^4} \quad (7)$$

**Coeficiente
de
temperatura**

Sensibilidad

En resumen, la ecuación de Callendar - Van Dusen fue la principal ecuación de interpolación de termómetros de resistencia patrón y de tipo industrial por muchos años. Pero con el desarrollo de los termómetros de resistencia, y los avances en los métodos de purificación del platino, la ecuación fue ciertamente no equivalente al platino puro y a los sensores de resistencia que actualmente conocemos.

En general podemos encontrar tres principales clases de termómetros de resistencia (RTD) hechos de platino: a) termómetros de resistencia de platino patrón (SPRT), b) termómetros de resistencia de platino de referencia o secundarios (PRT), y c) termómetros de resistencia de platino Industrial (IPRT), los cuales se construyen con una aleación compuesta de platino puro y con otros metales del grupo del platino para reducir el valor alfa de acuerdo a su aplicación.

Coeficiente de temperatura de la resistencia

Cada uno de los diferentes metales utilizados como elemento sensor, tiene una diferente cantidad de cambio relativo en resistencia por unidad de cambio en temperatura. Una medida de la sensibilidad del termómetro de resistencia es su coeficiente de temperatura alfa (α), el cual se define como el cambio de resistencia promedio por cada °C en el intervalo de 0...+100 °C dividido por R_0 , es decir:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0} \quad \Omega/\Omega/^\circ\text{C} \quad (8)$$

	IEC 60751	ASTM E 1137	BS 1904	DIN 43760	JIS C 1604	OIML R 84
R (0 °C)	100	100	100	100	100	5...1 000
Error Máximo Permissible (Tolerancia) @ 0 °C						
Clase AA	-	-	-	-	-	±0,1 °C
Clase A	±0,06 Ω ±0,15 °C	±0,06 Ω	±0,075 Ω	±0,06 Ω	0,03 Ω aparente	±0,15 °C
Clase B	±0,12 Ω ±0,30 °C	±0,12 Ω	±0,1 Ω	±0,12 Ω	0,5 Ω aparente	±0,30 °C
Clase C	-	-	-	-	-	±0,6 °C
Clase D	-	-	-	-	-	±1,2 °C
Alfa (α)						
Tipo I	0,003 850 55	0,003 85	0,003 85	0,003 85	-	0,003 85
Tipo II	-	-	-	-	0,003 916	0,003 91
Intervalo de Medición en °C						
Clase AA	-	-	-	-	-	-50...+250
Clase A	-200...+650	-200...+650	-183...+630	-	-200...+600	-100...+450
Clase B, C, D	-200...+850	-	-220...+1 050	-200...+850	-	-196...+650
Coefficientes CVD, Tipo I (385)						
A	3,9083 E-3	3,9083 E-3	3,9083 E-3	3,9083 E-3	3,97478 E-3	3,9083 E-3
B	-5,775 E-7	-5,775 E-7	-5,775 E-7	-5,775 E-7	-5,8775 E-7	-5,775 E-7
C	-4,183 E-12	-4,183 E-12	-4,183 E-12	-4,183 E-12	-3,4813 E-12	-4,183 E-12
Coefficientes CVD, Tipo II (391)						
A	-	-	-	-	-	3,969 E-3
B	-	-	-	-	-	-5,8410 E-7
C	-	-	-	-	-	-4,183 E-12

Cuadro 2. Lista de normas internacionales, tolerancia y coeficientes para IPRTs.

Entre mayor sea el coeficiente de temperatura, mayor el cambio en resistencia para un cambio de temperatura dado. Tres principales coeficientes de temperatura están especificados para el platino:

Coefficientes normados
0,003 925
0,003 916
0,003 851

1. ITS-90, la escala internacional de temperatura, requiere un coeficiente de temperatura mínimo de $\alpha \geq 0,003\ 925\ \text{°C}^{-1}$ para patrones (SPRT).
2. Con alambre de platino grado de referencia, utilizados en elementos de referencia o patrones secundarios (PRT), el coeficiente de temperatura es $\alpha \approx 0,003\ 916\ \text{°C}^{-1}$.
3. Sensores normados industriales de platino (IPRT), tipo: IEC, OIML, DIN, ASTM, etc., donde el coeficiente es $\alpha \approx 0,003\ 851\ \text{°C}^{-1}$.

Determinando o conociendo los coeficientes A y B podemos determinar también el valor de alfa mediante la ecuación 9.

$$\alpha = A + 100 \cdot B \tag{9}$$

CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS DE RESISTENCIA DE PLATINO

La calibración de un RTD puede llevarse a cabo en 2 diferentes formas: normalizado o caracterizado. El tipo de calibración a realizar está determinado por la forma en que el usuario va a utilizarlo y de la exactitud requerida.

Calibración de sensor normalizado

Calibración por normalización, prueba de tolerancia, la resistencia del sensor se compara con los valores definidos por las normas (IEC 751, ASTM 1137, etc.) a temperaturas específicas. La calibración por este método se utiliza en RTD industriales (IPRT) donde el indicador no puede modificar los coeficientes, los cuales son programados con una curva de RTD ya definida.

Existen fabricantes que han caracterizado las curvas de sus RTD de acuerdo a la calidad del platino las constantes A, B y C para la ecuación CVD publicadas cambian (referencia Minco):

Coeficientes especiales
0,003 911
0,003 926

alfa	α	δ	β
0,003 85	0,003 850	1,499 9	0,108 63
alfa	A	B	C
0,003 851	3,908 38 E-3	-5,775 E-7	-4,183 E-12
0,003 911	3,969 2 E-3	-5,849 5 E-7	-4,232 5 E-12
0,003 926	3,984 8 E-3	-5,870 E-7	-4,000 0 E-12

Cuadro 3. RTDs especiales, coeficientes caracterizados por el fabricante

Calibración de sensor por caracterización

Calibración por caracterización, es el método que se utiliza con mayor frecuencia para RTD's de referencia tipo PRT de media a alta exactitud, no recomendado para SPRT's en donde es necesaria la calibración mediante la función de referencia de la ITS-90. Con este método, se determina una nueva relación de resistencia versus temperatura en cada calibración y se calculan nuevos coeficientes, los cuales se obtienen midiendo los valores de resistencia a un número de temperaturas conocidas utilizando métodos de análisis de regresión. En este caso el error de interpolación es reducido aproximadamente la exactitud de la calibración.

Intervalo	CVD - ITS_90	
	3 Puntos de Calibración	4 Puntos de Calibración
0...+100	-0,7...+0,2	-
-30...+100	-	0...+1,2 (*)
0...+250	-4,0...+8,3	-
-30...+250	-	0...+3,2 (*)
0...+450	-7,4...+80	-25...+19
0...+660	-63...+63	-84...+15
0...+850	-368...+23	-97...+301

(*) Intervalo de desviación solo para el intervalo negativo (< 0 °C)

Cuadro 4. Puntos de calibración para CVD & desviaciones entre CVD & ITS-90

En función de la ecuación utilizada para el intervalo positivo o el negativo, los puntos mínimos para la determinación de los coeficientes A, B y C son: a) 3 puntos distribuidos en el intervalo positivo para la ecuación 3, y b) 4 puntos distribuidos en el intervalo positivo y negativo para la ecuación 4. Las desviaciones de las curvas pueden llegar a ser de varios milikelvin (mK ó m°C) tal como se muestra en el cuadro 4. El uso de la ecuación de Callendar - Van Dusen lleva implícito una incertidumbre intrínseca la cual se puede estimar a partir de la amplitud del intervalo de desviaciones que CVD tiene con la ITS-90, como ya se indicó en el cuadro 4.

Las diferencias encontradas entre los métodos de medición CVD & ITS-90 (suponiéndolo ideal) se muestran en el gráfico 1. Podemos observar que la ecuación cuadrática de CVD (línea roja) para el intervalo positivo presenta desviaciones que podrían compensarse con términos de mayor orden; presenta su mejor comportamiento hasta aproximadamente los 450 °C; a partir de ≈600 °C el aumentar el número de puntos a calibrar mediante caracterización no necesariamente disminuye la incertidumbre instrumental obtenida en la calibración debido a las limitaciones de la ecuación de CVD.

Las normas que especifican los requerimientos y la relación de temperatura - resistencia de los termómetros de resistencia de platino industrial son:

- IEC 60751** Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors.
- OIML R 84** Platinum, copper, and nickel resistance thermometers (for industrial and commercial use).

CVD
versus
ITS-90

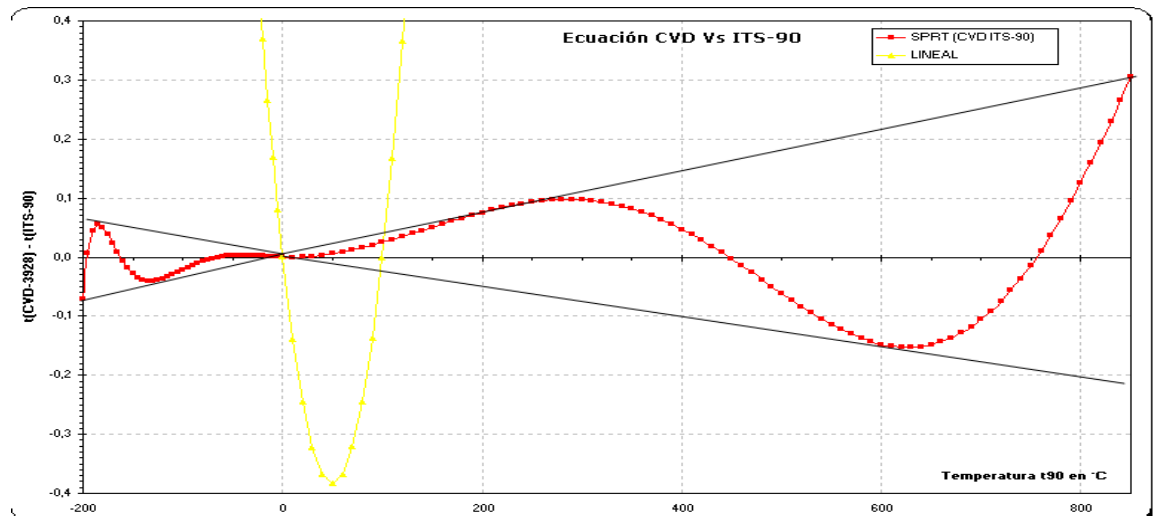


Gráfico 1. Ecuación CVD versus ITS-90

- ASTM E 1137** Standard specification for industrial platinum resistance thermometers.
- DIN 43760** Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors.
- BS 1904** Specification for industrial platinum resistance thermometer sensors.
- JIS C 1604** Resistance thermometer sensors.

REFERENCIAS

- Benedic, R. Fundamentals of temperature, pressure, and flow measurements. Third edition, chapter 4. Wiley.
- Bentley, R. (1998). Resistance and Liquid in Glass Thermometry. Volume 2 Handbook of Temperature Measurement, chapter 2. Springer.
- Britannica Online Encyclopedia www.britannica.com/EBchecked/topic/89861/H-L-Callendar.
- Building Automation Products. (2008). Temperature Accuracy of Thermistors and RTDs, Application note.
- FLUKE Hart Sci. (2009). How to calibrate an RTD or Platinum Resistance Thermometer (PRT). 6/2009. Application note 3498460 A-EN-Rev A. FLUKE Hart Scientific.
- Imperial Collage London. www3.imperial.ac.uk/.../physics_south_ken.
- Keith, Martin. E-mail communication, NIST Research Librarian. National Institute of Standards and Technology (NIST). 2009-10-14.
- Michalski, L. Eckersdprf, K. Kucharski, J. and McGhee, J. (2001). Temperature Measurement. Chapter 4. Wiley.
- Minco. (2000). Resistance thermometry: principles and applications of resistance thermometers and thermistors. Application Aid # 18.
- Sostmann, Henry E. (1989). Fundamentals of Thermometry. Part V Industrial (use) Platinum Resistance thermometer.

Normalización
"Standard"