

PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LAS ESPECIFICACIONES DE EXACTITUD EN EL RANGO DE TEMPERATURA DE 700 °C A 1000 °C DE UN HORNO TUBULAR

Procedure for calculating accuracy specifications in the temperature range 700 °C to 1000 °C in a furnace tube.

RESUMEN

Se desarrolló un proceso para la calibración de un horno tubular marca Industrias Terrigeno, Modelo ESP serie 462 en un rango de 700 °C a 1000 °C, con el fin de determinar la exactitud y el intervalo de confianza de la temperatura programada en el equipo cuando se efectúan tratamientos térmicos a materiales estudiados.

Utilizando el análisis metrológico estándar para el cálculo de incertidumbres en medidas directas, se concluye que la contribución a la incertidumbre expandida, por la incertidumbre tipo B debido a especificaciones de exactitud del horno es del 2% de la temperatura máxima programada en el rango de 700 °C a 1000 °C.

PALABRAS CLAVES: Horno tubular, incertidumbre expandida, calibración, equipo patrón, tolerancia.

ABSTRACT

We developed a process for calibrating a Terrigeno Industries furnace tube, model ESP series 462 in a 700 °C to 1000 °C range, in order to determine the accuracy and the confidence interval of the temperature in the equipment when heat treatments are made on materials studied.

Using the standard metrological analysis for the calculation of uncertainties in direct measurements, we conclude that the contribution to the expanded uncertainty, by the uncertainty type B due to accuracy specifications of the furnace, is 2% of the maximum temperature programmed in the 700 °C at 1000 °C range.

KEYWORDS: Furnace tube, expanded uncertainty, calibration, standard equipment, tolerance.

JULY ANDREA RINCÓN LÓPEZ

Estudiante Ingeniería Física
Universidad Tecnológica de Pereira
jarincon@utp.edu.co

EDUARDO ANDRÉS FLÓREZ GALEANO

Estudiante Ingeniería Física
Universidad Tecnológica de Pereira
eafllorez@utp.edu.co

BEATRIZ CRUZ MUÑOZ

Ph.D en Física
Profesora Asistente
Facultad de ciencias básicas
Universidad Tecnológica de Pereira
bcruz@utp.edu.co

MILTON HUMBERTO MEDINA BARRETO

Ph.D En Física
Profesor Asistente
Facultad de ciencias básicas
Universidad Tecnológica de Pereira
mmedina@utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Al realizar una medición determinada, es indispensable comprender que ésta no será exacta, es decir, el resultado de la medida no coincidirá justamente con el valor verdadero del mesurando. Por eso, para expresar de manera correcta el resultado de una medición, es necesario calcular su respectiva incertidumbre asociada [1], lo que ha generado un aumento en el uso de procedimientos metrológicos que pretenden generar toda una cultura para la correcta expresión de resultados.

Con base a la norma GTC 51: Guía para la Expresión de Incertidumbre en Mediciones y la GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement) [2], se diseñó una metodología para el cálculo de la incertidumbre tipo B por especificación para un horno tubular, en el rango de 700 °C a 1000 °C (el rango más utilizado en los tratamientos térmicos del Grupo de Investigación en Propiedades Magnéticas y Maneto-ópticas de Nuevos Materiales GIMM). El objetivo es incluir este resultado en el cálculo de la incertidumbre expandida de las medidas efectuadas en el horno, debido a que en la ficha

técnica del equipo proporcionada por el fabricante, no están incluidas las especificaciones de exactitud.

2. EXPERIMENTACIÓN

Se ubicó el equipo patrón paralelo a la termocupla interna del horno para comparar la magnitud de la temperatura programada con la registrada por el sensor de la termocupla tipo K.

A continuación se presentan las fichas técnicas del equipo a calibrar (A_i) y del equipo patrón (A_r):

Ficha técnica del horno tubular de Industrias Terrigeno	
Tubo de Cuarzo	
Horno/Mufla Modelo: ESP	
Serie: 462	
Medidas interiores	Longitud: 30 cm, Diámetro: 5 cm
Medidas exteriores	Longitud: 30 cm, Diámetro: 28 cm

Potencia	1.6 KW
Temperatura máxima	1200 °C
Control: Automático programable, con funciones PID (Proporcional Integrado Derivativo), salida SSR, entrada a termocupla, relevos de estado sólido, disipadores de calor, ocho rampas y sostenido de temperatura.	

Tabla 1.a) Ficha técnica del horno tubular de Industrias Terrígeno (A_i)



Figura 1. Horno tubular de Industrias Terrígeno, ubicado en el laboratorio del GIMM.

Ficha técnica de la termocupla tipo K	
Rango	0-1000 °C
Resolución	1 °C
Especificaciones de exactitud	0.25% T _{max}

Tabla 1.b) Ficha técnica de la termocupla tipo K (A_r)

El rango de temperatura a analizar se subdividió en 7 rampas programadas en el horno: 700 °C - 750 °C - 800 °C - 850 °C - 900 °C - 950 °C - 1000 °C, sosteniendo la temperatura por 30 minutos en cada rampa y con el fin de tomar los datos en temperaturas estables se inició la medición pasados los primeros 15 minutos en cada una de ellas, obteniendo 6 medidas en cada rampa las cuales se presentan en las columnas A_i y A_r de la tabla 2.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con los datos de la tabla 2 se halló tanto el error absoluto entre A_i y A_r [1] de cada medida como el promedio de estos errores absolutos, los cuales se transformaron en el mesurando estudiado por medio del análisis metrológico estándar.

$$E = |A_i - A_r| \quad [1]$$

DATOS EXPERIMENTALES DE TEMPERATURA			
Temperatura Programada (°C)	A _i (°C)	A _r (°C)	E = A _i - A _r (°C)
700	703	660	43
	706	708	2
	703	664	39
	704	725	21
	703	664	39
	704	716	12
			$\bar{E} = 26$

750	759	744	15
	750	732	18
	758	758	0
	749	744	5
	757	738	19
	748	730	18
			$\bar{E} = 13$
800	796	813	17
	808	779	29
	799	814	15
	797	800	3
	806	804	2
	807	780	27
			$\bar{E} = 16$
850	857	828	29
	848	878	30
	853	814	39
	855	841	14
	846	866	20
	856	822	34
			$\bar{E} = 28$
900	896	903	7
	904	870	34
	904	899	5
	896	907	11
	905	869	36
	903	914	11
			$\bar{E} = 17$
950	948	926	22
	955	923	32
	952	963	11
	946	944	2
	953	915	38
	947	959	12
			$\bar{E} = 10$
1000	997	1008	11
	996	980	16
	1001	1006	5
	997	1004	7
	997	979	18
	1004	969	35
			$\bar{E} = 15$

Tabla 2. Errores absolutos (E) y promedios de los errores absolutos (\bar{E}) correspondientes a las medidas de temperatura.

Se identificaron las fuentes de incertidumbre tipo A y B del equipo patrón con las que se determinó la incertidumbre combinada (μ_c), cuantificándose de acuerdo a las siguientes expresiones [3]:

Incertidumbre tipo A (μ_A)

$$\mu_A = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde σ es la desviación estandar y n el número de datos.

Incertidumbre tipo B (μ_B)

1. Por especificaciones del equipo patrón:

$$\mu_{B1} = \frac{\text{Especificaciones}}{\sqrt{3}}$$

2. Por resolución digital del equipo patrón:

$$\mu_{B2} = \frac{\text{Resolución}}{2\sqrt{3}}$$

Donde las especificaciones y la resolución se encuentran en la tabla 1.b)

Incertidumbre combinada (μ_C)

$$\mu_C = \sqrt{(\mu_A)^2 + (\mu_{B1})^2 + (\mu_{B2})^2}$$

Los resultados de estos cálculos se muestran en la tabla 3.

CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES					
T (°C)	\bar{E}	Incertidumbres			
		μ_A	μ_{B1}	μ_{B2}	μ_C
700	26	6,89	1,44	0,29	7,04
750	13	3,27	1,44	0,29	3,58
800	16	4,67	1,44	0,29	4,90
850	28	3,75	1,44	0,29	4,03
900	17	5,67	1,44	0,29	5,86
950	20	5,60	1,44	0,29	5,79
1000	15	4,43	1,44	0,29	4,67

Tabla 3. Incertidumbres tipo A, B1, B2 y combinada de los valores de los errores promedio de las medidas de temperatura.

Para determinar la incertidumbre expandida de las medidas de temperatura, se aplicaron los criterios presentados en el diagrama de flujo de la Figura 2:

El primer paso fue elegir el nivel de confianza p , para ello se empleó el criterio de distribución dominante, determinando que no puede aplicarse el teorema del Límite Central, ya que la incertidumbre dominante es la incertidumbre tipo A (ver tabla 2) y corresponde a una distribución normal. Para la estimación del número efectivo de grados de libertad γ_{ef} , se utilizó el criterio de evaluación tipo A con una restricción $\gamma_i = n - 1$ [5] y con un nivel de confiabilidad del 95%, se calculó el factor de cobertura K [4].

Los resultados obtenidos para el número efectivo de grados de libertad (γ_{ef}), el factor de cobertura (K) y finalmente la incertidumbre expandida (μ_E) se presentan en la Tabla 4.

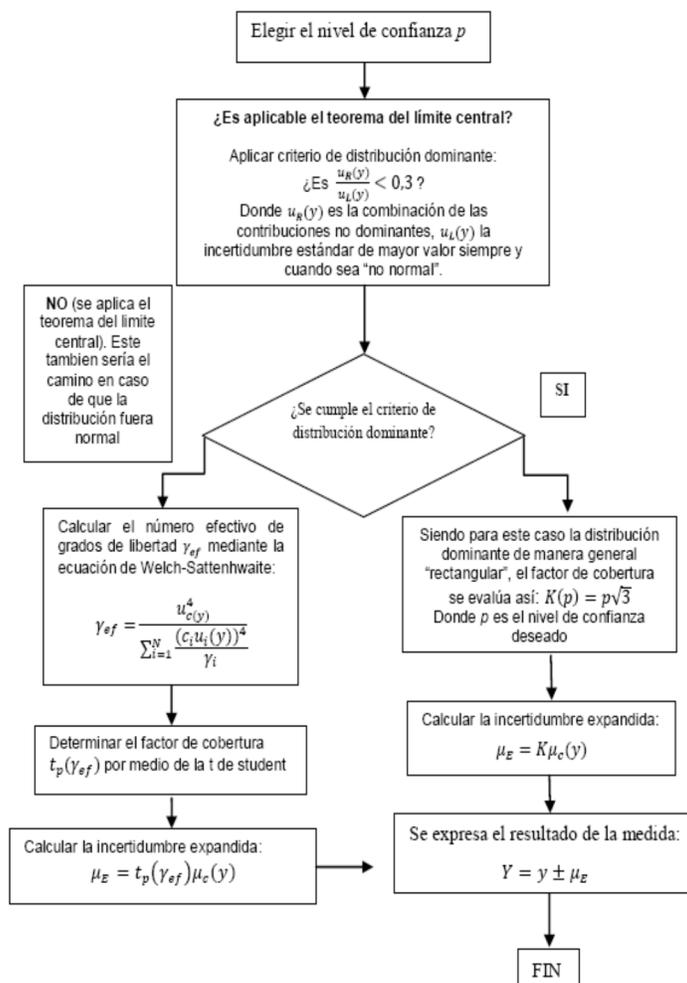


Figura 2. Cálculo del Teorema del Límite central y la incertidumbre expandida [3].

\bar{E}	$\gamma_{efectivo}$	K	μ_E
26	5,4	2,6	18
13	7,2	2,4	8,5
16	6,1	2,5	12
28	6,7	2,5	9,9
17	6,1	2,5	14
20	5,7	2,6	15
15	6,2	2,5	11

Tabla 4. Numero efectivo de grados de libertad (γ_{ef}), Factor de cobertura (K), e Incertidumbre Expandida (μ_E).

Posteriormente, se graficó el error absoluto promedio correspondiente a cada rampa de temperatura, con su respectiva incertidumbre expandida (Tabla 4).

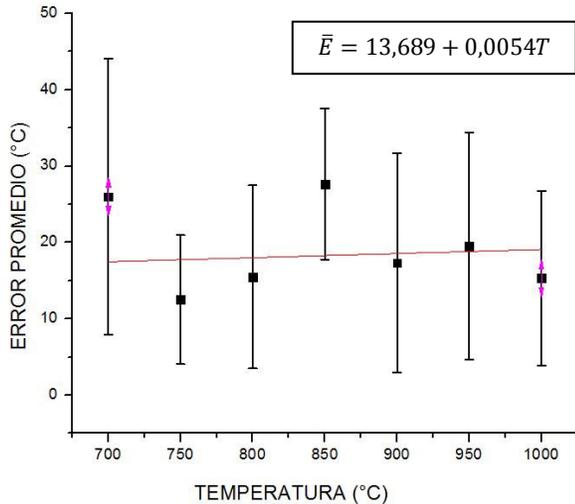


Figura 3. Error promedio (con sus respectivas barras de incertidumbre) en función de la Temperatura.

Para el análisis de la desviación de los datos de la figura 3 se realizó una aproximación por mínimos cuadrados obteniendo la siguiente ecuación:

$$\bar{E} = 13,689 + 0,0054T$$

Sin embargo, debido a la rigurosidad en el manejo de cifras significativas se obtiene que la pendiente es cero y el intercepto es 14 °C.

Para el cálculo de la especificación por exactitud del horno, se tomó el valor máximo de la temperatura estudiada (1000 °C) y se realizó la siguiente regla de tres

$$\begin{array}{l} 1000 \text{ °C} \longrightarrow 100 \% \\ 14 \text{ °C} \longrightarrow X \% \end{array}$$

Se obtuvo entonces que la especificación de exactitud del equipo es 1,4 el cual se aproxima al 2 % como entero superior.

Con este resultado se completa la ficha técnica del horno tubular marca Terrigeno serie 462, permitiendo realizar un análisis completo de las incertidumbres de la medida, donde se obtiene que las incertidumbres tipo B quedan expresadas de la siguiente forma:

1. Por especificaciones del horno:

$$\mu_{B1} = \frac{2 \% T_{max}}{\sqrt{3}}$$

2. Por resolución digital del horno:

$$\mu_{B2} = \frac{1 \text{ °C}}{2\sqrt{3}}$$

Las especificaciones halladas son validas sólo en un plato de 0 a 5 cm respecto al centro del horno, rango en el cual la temperatura programada por el usuario permanece constante.

4. CONCLUSIÓN

Se determinó la incertidumbre expandida de cada uno de los errores promedio para los datos de calibración de la temperatura en un rango entre 700 °C - 1000 °C, lo cual permitió obtener la especificación por exactitud del horno tubular del 2 % de la temperatura máxima.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a la Universidad Tecnológica de Pereira por la financiación parcial a través de la VII convocatoria de financiación de proyectos, Código E6-11-7, al Ph. D Hernando Correa de la Universidad del Quindío, por facilitarnos algunos equipos de medida y el Msc. Luis Enrique Llamosa Rincón por su asesoría.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. L. E. Llamosa, J. C. Gómez, A. F. Ramírez. Metodología para la estimación de la incertidumbre en mediciones directas. Scientia et Technica Año XV, No 41, Mayo de 2009. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.
- [2] Joint committee for guides in metrology, Francia. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [Archivo PDF en línea]. Sèvres: JCGM, 2008. 132 p. Disponible en Internet: (URL: http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf).
- [3]. L. E. Llamosa, J. C. Gómez. Utilización del teorema del límite central en el cálculo de la incertidumbre de medición. Scientia et Technica Año XV, No 43, Diciembre de 2009. Universidad Tecnológica de Pereira ISSN 0122-1701
- [4]. L. E. Llamosa, L. G. Meza, D. L. Rodríguez. Aspectos metrológicos fundamentales para la acreditación de un laboratorio de patronamiento eléctrico. Postergraph S.A., 2005. 220p.