

Análisis metrológico del proceso de medición de temperatura en un evaporador simple y doble efecto

Metrological analysis of the temperature measurement process in a single and double effect evaporator

Wilmer Mendoza Donado¹, Mario Arteta Consuegra¹, Cristian Pedraza Yepes¹, José Daniel Hernández-Vásquez²

¹Departamento de Ingeniería Mecánica-Universidad del Atlántico; ²Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação. PósMQI/PUC-Rio.

E-mail: jdhernandez@aluno.puc-rio.br

Resumen: Este trabajo analizó el proceso de medición de temperatura en un evaporador simple y doble efecto, a partir de un estudio estadístico de los termómetros de expansión térmica. La metodología aplicada (t-student) fue dividida en tres fases: (i) estimar el parámetro $t_{\text{calculado}}$ en base a las temperaturas obtenidas con los termómetros evaluados y con un patrón de calibración certificado; (ii) calcular el valor $t_{\text{crítico}}$ en función de los grados de libertad; (iii) comparar los resultados obtenidos para ambos termómetros. Los resultados consolidados confirmaron que ambos instrumentos presentan comportamiento estadísticamente igual, para mediciones entre 60 y 75 °C con probabilidad de 95%.

Palabras-clave: metrología, máquinas térmicas, termómetro bimetalico, medición de temperatura, método t-student.

Abstract: This work analyzed the process of temperature measurement in a single evaporator and double effect, from a statistical study of thermal expansion thermometers. The applied methodology (t-student) was divided into three phases: (i) to estimate the $t_{\text{calculado}}$ parameter based on the temperatures obtained with the thermometers evaluated and with a certified calibration standard; (ii) calculate the $t_{\text{crítico}}$ value according to degrees of freedom; (iii) compare the results obtained for both thermometers. The consolidated results confirmed that both instruments presented statistically the same behavior, for measurements between 60 and 75 °C with probability of 95%.

Keywords: metrology, thermal machines, bimetallic thermometer, temperature measurement, t-student method.

1. INTRODUCCIÓN

Entre los procesos de transferencia de calor, uno de los que tiene mayor aplicación en la industria es la evaporación [1, 2]. Esta transferencia es una combinación de convección ordinaria en el líquido y convección adicional producida por la ascensión de las burbujas de vapor [3,4].

El balance energético del intercambiador de calor depende fuertemente de los controladores de temperatura. Para el caso particular de este trabajo, el evaporador simple y de doble efecto estudiado es conformado por dos termómetros tipo bimetalicos con capacidad de medición hasta 150 °C y resolución de 2 °C [1]. Así, considerando la relevancia de este tipo de intercambiador para la industria y la responsabilidad del área metrológica con garantizar la confiabilidad del proceso de medición (balance energético), en particular, este trabajo evaluó los termómetros bimetalicos identificados como T221-16 y T222-16, ambos ubicados en el equipo de evaporación simple y de doble efecto instalados en el CELTI (Centro de Laboratorio y Talleres de Ingeniería) de la Universidad del Atlántico, persiguiendo dos objetivos fundamentales: (i) verificar posibles discrepancias en la medición de temperatura; (ii) evaluar si el desempeño metrológico de ambos termómetros puede ser considerado estadísticamente igual dentro de un nivel de probabilidad de 95,0%.

2. MÉTODO ESTADÍSTICO: T-STUDENT

El test de hipótesis t-student es una técnica estadística muy utilizada para evaluar el comportamiento de variados procesos en Ingeniería. La fundamentación matemática consiste en: (i) Determinar el parámetro $t_{calculado}$, que es dado por la siguiente expresión:

$$t_{cal} = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{S_{\bar{x}-\bar{y}}} \quad (1)$$

Donde,

$$S_{\bar{x}-\bar{y}} = \sqrt{\frac{SS_x + SS_y}{m(n-1)}} \quad (2)$$

$$SS_x = \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

$$SS_y = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (4)$$

En las ecuaciones anteriores:

- t_{cal} : Estadística del test;
- \bar{x} : Promedio de la muestra 1;
- \bar{y} : Promedio de la muestra 2;
- $S_{\bar{x}-\bar{y}}$: Desviación estándar combinada;
- SS_x : Desviaciones residuales de la muestra 1;
- SS_y : Desviaciones residuales de la muestra 2;
- m : Tamaño de la muestra 1;
- n : Tamaño de la muestra 1;
- x_i : Valores de la muestra 1;
- y_i : Valores de la muestra 2.

(ii) Encontrar el valor crítico t_{crit} en función de los grados de libertad (φ), donde φ es dado por:

$$\varphi = m + n - 2 \quad (5)$$

Finalmente, si $t_{cal} > t_{crit}$, las mediciones de los termómetros comparados no pueden ser consideradas estadísticamente iguales para un grado de confiabilidad de 95,0%.

3. MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1. Descripción del evaporador

El evaporador objeto de estudio (figura 1) está formando por dos cuerpos cilíndricos de 20" de diámetro exterior por 303/4" de altura, fabricadas en lámina de cobre, con sus respectivos indicadores de nivel. Dos calandrias de 6" de diámetro interior, fabricados en cobre, las cuales contienen 37 tubos de cobre de 5/82 de diámetro nominal de 19 BWG. El largo de los tubos es de 5" y el espesor de pared de los tubos es de 0,042 milésimas de pulgada. Estas calandrias son del tipo de fisión, debido a que la mezcla de vapor-

agua dentro de los tubos pesa menos que el agua líquida de los cuerpos.



Figura 1. Evaporador simple y doble efecto

3.2. Medición de temperatura

La medición de temperatura es realizada a partir de dos termómetros de tipo bimetalicos cuyas características metrológicas se detallan a seguir:

Tabla 1. Características termómetros bimetalicos

Instrumento	Termómetro bimetalico A	Termómetro bimetalico B
Ubicación	CELTU – UA	CELTU - UA
Rango	0 a 150 °C	0 a 150 °C
División de Escala	2 °C	2 °C
Resolución	1 °C	1 °C
Tol. Máx. del Proceso	5,0%	4,0%

Cada termómetro fue calibrado utilizándose un patrón de referencia de un laboratorio de metrología acreditado por la ONAC (Organismo Nacional de Acreditación de Colombia) que cuenta con mejor jerarquía metrológica [5], *i.e.*: resolución de 0,001 °C; $U = 0,0083^{\circ}\text{C}$ ($k=2$). Durante el curso de los experimentos fue aplicado el método de comparación directa y 11 medidas distintas de temperatura fueron colectadas en un rango de 15 °C, tanto para el instrumento de prueba como para el patrón de referencia. Adicionalmente, fueron realizadas 6 repeticiones de cada punto experimental. Aplicándose el

método de eliminación de *outliers* de Grubbs [6], fue posible detectar y eliminar valores aberrantes. En el curso de los experimentos, los termómetros evaluados fueron dispuestos en un bloque térmico cuya mayor desviación es 0,001 °C. De esta forma, se garantiza que los termómetros evaluados están midiendo la misma temperatura dentro una amplitud de 0,001 °C. Esta no uniformidad del medio térmico es considerada una de las fuentes de incertidumbre.

Finalmente fue aplicado el método t-student con el fin de evaluar si el desempeño de metrológico de ambos instrumentos puede ser considerado estadísticamente igual para un nivel de confianza de 95,0%.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las tablas 2 a 4 muestran los principales resultados obtenidos. Estas tablas muestran como punto fijo la temperatura medida por los termómetros evaluados. Dado que el termómetro de referencia cuenta con una mejor jerarquía metrológica, se muestran las variaciones de temperatura detectadas por este instrumento patrón con tres dígitos decimales. De esta forma, es posible considerar una variación mayor en la indicación de temperatura. Al final de la sección se realiza una discusión detallada de los mismos.

Tabla 2. Aplicación del método t-student: puntos comparados, 0 °C a 45 °C

BANCO DE PRUEBA: Evaporador simple y doble efecto								
Teste de hipótesis t-student entre el termómetro T221-16 y T22-16								
No. de Medidas	0 °C		15 °C		30 °C		45 °C	
	T221-16	T22-16	T221-16	T22-16	T221-16	T22-16	T221-16	T22-16
1	0,100	0,200	14,800	15,100	30,101	29,901	45,200	44,800
2	0,100	0,200	14,797	15,097	30,101	29,901	45,203	44,803
3	0,102	0,202	14,801	15,101	30,100	29,900	45,198	44,798
4	0,100	0,200	14,803	15,103	30,099	29,899	45,198	44,798
5	0,104	0,204	14,798	15,098	30,098	29,898	45,199	44,799
6	0,100	0,200	14,799	15,099	30,097	29,897	45,198	44,798
media x_i	0,101	0,201	14,800	15,100	30,099	29,899	45,200	44,800
$\sum (x_i - \text{media } x_i)^2$	1,28E-05	1,28E-05	2,11E-05	2,11E-05	1,21E-05	1,21E-05	2,13E-05	2,13E-05
S_{x-y}	9,26E-04		1,19E-03		8,96E-04		1,19E-03	
t calculado	108,04		252,88		223,11		335,75	
t tabulado	2,228							

Tabla 3. Aplicación del método t-student: puntos comparados, 60 °C a 105 °C

BANCO DE PRUEBA: Evaporador simple y doble efecto								
Teste de hipótesis t-student entre el termómetro T221-16 y T222-16								
No. de Medidas	60 °C		75 °C		90 °C		105 °C	
	T221-16	T222-16	T221-16	T222-16	T1	T2	T1	T2
1	59,901	59,901	74,905	74,905	89,898	90,098	105,201	105,101
2	59,899	59,899	74,901	74,901	89,898	90,098	105,199	105,099
3	59,900	59,900	74,902	74,902	89,904	90,104	105,198	105,098
4	59,900	59,900	74,900	74,900	89,900	90,100	105,198	105,098
5	59,903	59,903	74,902	74,902	89,900	90,100	105,199	105,099
6	59,899	59,899	74,900	74,900	89,902	90,102	105,200	105,100
media x_i	59,900	59,900	74,902	74,902	89,900	90,100	105,199	105,099
$\Sigma (x_i - \text{media } x_i)^2$	1,01E-05	1,01E-05	1,46E-05	1,46E-05	3,07E-05	3,07E-05	6,83E-06	6,83E-06
S_{x-y}	8,19E-04		9,87E-04		1,43E-03		6,75E-04	
t calculado	0,00		0,00		139,82		148,23	
t tabulado	2,228							

Tabla 4. Aplicación del método t-student: puntos comparados, 120 °C a 150 °C

BANCO DE PRUEBA: Evaporador simple y doble efecto						
Teste de hipótesis t-student entre el termómetro T221-16 y T222-16						
No. de Medidas	120 °C		135 °C		150 °C	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2
1	119,799	119,899	135,000	135,200	150,099	150,199
2	119,800	119,900	134,999	135,199	150,100	150,200
3	119,799	119,899	135,000	135,200	150,100	150,200
4	119,799	119,899	135,000	135,200	150,101	150,201
5	119,798	119,898	135,002	135,202	150,103	150,203
6	119,799	119,899	135,002	135,202	150,098	150,198
media x_i	119,799	119,899	135,001	135,201	150,100	150,200
$\Sigma (x_i - \text{media } x_i)^2$	1,52E-06	1,52E-06	6,70E-06	6,70E-06	1,48E-05	1,48E-05
S_{x-y}	3,19E-04		6,68E-04		9,94E-04	
t calculado	313,964		299,344		100,593	
t tabulado	2,228					

A partir de las tablas anteriores, se visualiza que en el 81,8% de los puntos de temperaturas evaluados (i.e.: 9 de 11): las mediciones realizadas por los dos termómetros no pueden considerarse estadísticamente iguales para un nivel de confianza de 95%. Por otro lado, únicamente los puntos de 60 °C y 75 °C presentan resultados homólogos entre los termómetros T221-16 y T222-16, para un nivel de confianza de 95%.

Considerando las condiciones necesarias para aplicar el test t-student, este test sólo pudo ser aplicado al grupo de mediciones de los

termómetros T221-16 y T222-16, a fin de determinar un comportamiento similar entre las mediciones realizadas por cada termómetro. A partir de los resultados obtenidos fue posible concluir que las mediciones realizadas por los termómetros T221-16 y T222-16 en el intervalo de 0°C hasta 150°C no pueden ser consideradas estadísticamente iguales –a excepción de los puntos 60 °C y 75 °C–, por lo tanto se recomienda no instalar el termómetro T221-16 para controlar el proceso de medición asociado a termómetro T222-16 y viceversa.

5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Este trabajo se propuso como objetivo fundamental analizar metrologicamente el proceso de medición de temperatura en un evaporador simple y doble efecto. En ese sentido, el método t-student fue aplicado con resultados ampliamente satisfactorios. Vale la pena resaltar que la literatura muestra diversas otras técnicas para realizar un análisis estadístico entre dos series de datos. Con relación a uno de los métodos más utilizados, i.e.: error normalizado, el método t-student presenta la ventaja de comparar únicamente un valor calculado con un punto crítico establecido para una distribución normal para datos menores a 30 elementos. Adicionalmente, la distribución de probabilidad asociada no es considerada una distribución normal standard (donde la serie de datos, teóricamente, debe ser infinita) y si una distribución t-student (es decir, un número de datos menores que 30). Lo anterior supone la no aplicación de estadística no-paramétrica para mostrar que los datos experimentales siguen una distribución gaussiana, lo que facilita la aplicación del método. Para la situación donde es aplicado el método del error normalizado, necesariamente, se debe garantizar la normalidad de los datos.

Con base en los experimentos realizados y con el auxilio de las teorías metrológicas aplicadas, fue posible comparar estadísticamente dos termómetros basados en el principio de expansión térmica, utilizando el test de hipótesis t-student. De esta forma, los resultados descartaron la hipótesis inicial que ambos elementos tenían el mismo comportamiento metrológico.

Cabe resaltar que el método puede ser aplicado en muchos otros procesos siempre y cuando se definan bien las características comunes que deben tener los elementos a evaluar. Se recomienda usar los termómetros bimetálicos solamente en el rango de medición evaluado, ya que usar los termómetros en rangos de temperatura diferentes proporcionará mediciones no confiables y sin posibilidad de trazabilidad.

Todas las mediciones realizadas en este trabajo fueron de carácter estático, se recomienda evaluar y asimilar las recomendaciones hechas por los suplementos 1 y 2 de la ISO-GUM a fin de calcular la incertidumbre de medición para procesos de medición dinámicos.

5. REFERENCIAS

- [1] Mendoza, W.; Arteta, M. Evaluación de la confiabilidad metrológica de los termómetros bimetálicos en el CELTI de la Universidad del Atlántico. Trabajo de Grado en fase de conclusión. Universidad del Atlántico. Programa de Ingeniería Mecánica. 2016.
- [2] Incropera, F. P.; Dewitt, D. P. Fundamentos de transferencia de calor. Pearson Educación, 1999. ISBN 9701701704.
- [3] Fuchs, W. R.; Fernandes, N.; Barros, A. Física moderna. Polígono, 1972.
- [4] Van Wylen, G. J. S. Fundamentals of classical thermodynamics, 1985
- [5] Measures, I. B. O. W. A.; Taylor, B. N.; THOMPSON, A. The international system of units (SI). 2001.
- [6] Blessing, R.H. Outlier treatment in data merging. Journal of applied crystallography, v. 30, 421-426, 1997