

# CONSIDERACIONES EN LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LA CALIBRACIÓN Y MEDICIÓN CON MEDIDORES DE ESESORES POR ULTRASONIDO

Colín Castellanos, Carlos y Viliesid Alonso, Miguel  
 Centro Nacional de Metrología (CENAM)  
 Carretera a los Cues km 4,5, Municipio del Marqués, Querétaro, México.  
 (442) 211-0500, [ccolin@cenam.mx](mailto:ccolin@cenam.mx) y [mviliesi@cenam.mx](mailto:mviliesi@cenam.mx)

**Resumen:** Uno de los instrumentos de campo más utilizados en mantenimiento industrial es el medidor de espesores por ultrasonido. Permite la medición rápida del espesor de paredes de recipientes o de tubería a presión -y sin necesidad de desmontar ningún componente- que están sujetos a abrasión, corrosión u oxidación, sin embargo, la medición correcta depende de algunas buenas prácticas en su uso, en su calibración y en su ajuste. El presente artículo aborda estos aspectos y los discute tomando como ejemplo un instrumento comercial típico. Asimismo, se aborda el tema del límite en exactitud de las mediciones realizadas por esta técnica, presentado el balance de incertidumbre con un análisis de sensibilidad de los contribuyentes. Por otro lado, se demuestra que factores tales como la variación de temperatura no afectan mayormente la medición. Finalmente, se enuncian los valores de incertidumbre típicos entre los que se encuentran normalmente estas mediciones.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los Medidores de Espesores por Ultrasonido (MEU) en la actualidad son ampliamente utilizados en la industria pues permiten determinar en campo el espesor de la pared de, por ejemplo, una tubería que conduce vapor. En este caso, como en muchos otros, los componentes están sujetos a corrosión, abrasión y fatiga y es imprescindible saber de cuánto ha sido la pérdida de espesor de la pared para prevenir que el componente falle. Se hace evidente la dificultad y el trastorno que implica detener el proceso para desmontar la tubería e inspeccionarla. El MEU permite medir el espesor en forma sencilla e inmediata sin necesidad de desmontar nada. No obstante, es bueno conocer el principio de medición y las principales variables de influencia para establecer los límites de esta técnica y las precauciones que se deben tener al utilizarlo.

## 2. PRINCIPIO DE MEDICIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO.

El principio de medición es muy sencillo. Consiste en la medición de tiempo de vuelo de una señal acústica que viaja a través de la pared que deseamos medir y se refleja en la interface o frontera de esta. Por lo tanto, la ecuación que permite encontrar el espesor sería:

$$e = \frac{c \cdot t}{2} \quad (1)$$

Donde:

*e* - espesor a medir (mensurando) en mm,  
*c* - velocidad de propagación del sonido en el material a medir,  
*t* - tiempo de vuelo medido.

Los equipos de ultrasonido que se emplean actualmente permiten el uso de transductores que operan en un intervalo de frecuencias de 0.25 a 25 MHz. Las ondas ultrasónicas son generadas por un oscilador piezoeléctrico que está dentro de la sonda del instrumento. Este elemento se fija contra la superficie de la pared que se desea determinar su espesor mediante un medio acoplador (gel o aceite) con objeto de garantizar un contacto regular con la misma y lograr una transferencia eficaz y uniforme de la señal acústica. Posteriormente la señal se propaga en el material a la velocidad de propagación del sonido en ese medio. Cuando el haz sónico alcanza la frontera o interface del material, éste es reflejado de retorno a la sonda. Esta última cuenta con un transductor que recoge dicha señal y el instrumento determina el tiempo de vuelo. Finalmente esta señal es procesada y desplegada como sea conveniente.

## 3. CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE ESPESOR POR ULTRASONIDO.

Dado que se trata de un instrumento que mide una longitud, el método aquí propuesto para su calibración es el uso de longitudes conocidas que abarquen todo el intervalo de medición. Bajo este procedimiento de ajuste y calibración, no es

necesario conocer la velocidad de propagación en ese material ya que la ajustamos experimentalmente. A grandes rasgos los pasos a seguir son:

- a) **Referencia inicial “cero”.** Se debe poner a cero con el disco de referencia que viene con el instrumento para tal fin (normalmente viene fijo a un costado del instrumento). Ponga un poco de acoplante y coloque el transductor sobre el disco haciendo una ligera presión. Presione “ZERO” en el panel del instrumento y espere la instrucción “ENTER” para confirmar la referencia cero.
- b) **Determinación de la velocidad del sonido en el material a medir.** El método recomendado para determinar experimentalmente la velocidad del sonido es usando dos patrones con longitudes calibradas, del material a medir o similar, que abarquen el intervalo de calibración del instrumento. Con estas dos referencias el MEU calcula un valor medio de *c*.
- c) **Calibración.** Para calibrar el instrumento se utilizan bloques de distintas longitudes. Se pueden utilizar patrones escalonados como los indicados en la norma ASTM E 797, bloques patrón (como los mostrados en la figura 1) o piezas de una muestra representativa con la geometría y composición del material a medir. Con los patrones escalonados se determina el error contra el valor calibrado realizando 5 mediciones de cada escalón.

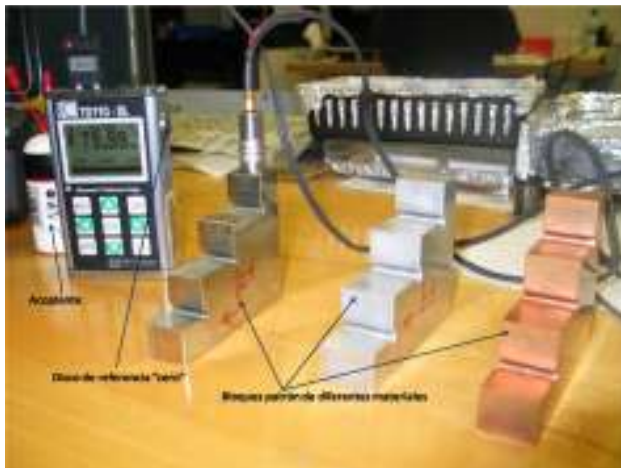


Figura 1. MEU y bloques patrón para calibración.

La siguiente tabla muestra los resultados de una calibración realizada al instrumento mostrado en la figura anterior con un patrón de acero 4140. Cabe señalar que la velocidad del sonido se ajustó con los escalones de los extremos en 5 ocasiones y se

obtuvo un valor promedio de 5928 m/s con una desviación estándar de 6 m/s.

Tabla 1. Resultados de calibración de un MEU.

| Valor nominal mm | Lecturas |       |       |       |       | Error mm |
|------------------|----------|-------|-------|-------|-------|----------|
|                  | 1        | 2     | 3     | 4     | 5     |          |
| 20.01            | 20.00    | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | -0.01    |
| 39.97            | 39.96    | 39.95 | 39.95 | 39.96 | 39.96 | -0.01    |
| 59.97            | 59.98    | 59.99 | 59.98 | 59.98 | 59.98 | 0.01     |
| 79.85            | 79.86    | 79.86 | 79.86 | 79.86 | 79.86 | 0.01     |

#### 4. ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

La ecuación 1 es el modelo matemático que utilizaremos para hacer el análisis de incertidumbres.

Como el espesor de referencia está dado a 20 °C el modelo se modifica con:

$$e(1 + \alpha * \Delta T) = \frac{c * t}{2} \quad (2)$$

$$e = \frac{C * t}{2(1 + \alpha \Delta T)} \quad (3)$$

Para simplificar la expresión utilizaremos un desarrollo en serie de Taylor, es decir:

$$(1 + \alpha \Delta T)^{-1} = 1 - \alpha \Delta T + (\alpha \Delta T)^2 - (\alpha \Delta T)^3 + \dots$$

Como  $\alpha \Delta T \ll 1$  entonces,  $(\alpha \Delta T)^2$  con mayor razón es todavía más pequeño y por lo tanto podemos despreciar esos términos de la serie. Finalmente el modelo queda como:

$$e = \frac{1}{2} c \cdot t (1 - \alpha \Delta T) \quad (4)$$

Donde:

$\alpha$  - es el coeficiente de expansión térmica lineal del material del patrón;

$\Delta T$ - es la diferencia de temperatura del ambiente con respecto a la temperatura de referencia (20 °C).

#### 4.1. Expresión de la incertidumbre estándar combinada, $u_c$ .

Se obtiene la siguiente expresión para la incertidumbre estándar combinada:

$$u = \sqrt{\frac{\partial^2 e}{\partial c^2} u_c^2 + \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} u_t^2 + \frac{\partial^2 e}{\partial \alpha^2} u_\alpha^2 + \frac{\partial^2 e}{\partial \Delta T^2} u_{\Delta T}^2 + u_R^2} \quad (5)$$

Donde:

$u_c$  - es la incertidumbre estándar de la velocidad del sonido;

$u_t$  - es la incertidumbre estándar del tiempo de vuelo;

$u_\alpha$  - es la incertidumbre estándar del coeficiente de expansión térmica del material del patrón;

$u_{\Delta T}$  - es la incertidumbre estándar de la diferencia de temperatura con respecto a la estándar (20 °C);

$u_R$  - es la incertidumbre por repetibilidad o resolución (elegir la mayor).

#### 4.2. Coeficientes de Sensibilidad.

Con la ecuación (1) y la ecuación (4) se calculan los coeficientes de sensibilidad conforme a la GUM, resultando:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial e} &= \frac{2}{t} \\ \frac{\partial c}{\partial t} &= \frac{2e}{t^2} \\ \frac{\partial e}{\partial c} &= \frac{1}{2} t * (1 - \alpha \Delta T) \\ \frac{\partial e}{\partial t} &= \frac{1}{2} c * (1 - \alpha \Delta T) \\ \frac{\partial e}{\partial \alpha} &= -\frac{1}{2} c * t * \Delta T \\ \frac{\partial e}{\partial \Delta T} &= -\frac{1}{2} c * t * \alpha \end{aligned}$$

#### 4.3. Contribuyentes a la incertidumbre de calibración.

Para ejemplificar el modelo utilizaremos los valores de calibración de la tabla 1 y las siguientes condiciones; resolución del MEU 0.01 mm, coeficiente de expansión térmica del acero  $11.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . La temperatura del laboratorio es de  $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ . La incertidumbre de calibración del patrón escalonado es de 0.01 mm y la longitud mayor es de 80 mm.

Las incertidumbres estándar estimadas con los datos indicados son:

Velocidad del sonido ( $u_c$ ). Utilizando la expresión (1), la incertidumbre estándar de la velocidad del sonido en el material se estima como:

$$u_c = 2 * \sqrt{\frac{1}{t^2} u_p^2 + \frac{e^2}{t^4} u_t^2} = 580 \quad (6)$$

Donde:

$u_p$  - es la incertidumbre estándar del patrón de ajuste

$u_t$  - es la incertidumbre estándar del tiempo de vuelo

Patrón de referencia ( $u_p$ ). La incertidumbre estándar del patrón de ajuste se obtiene de su certificado de calibración.

$$u_p = \frac{U}{k} = \frac{0.01}{2} = 0.005 \quad (7)$$

Tiempo de vuelo ( $u_t$ ). La incertidumbre estándar en la medición del tiempo de vuelo se puede estimar a partir de la resolución de la base de tiempo del oscilador (intervalo de muestreo). De la literatura se tiene un valor de esta incertidumbre de  $7 \times 10^{-9}$  s, considerando una distribución rectangular tenemos,

$$u_t = \frac{7 \times 10^{-9}}{\sqrt{3}} = 2 \times 10^{-9} \quad (8)$$

Coficiente de expansión térmica ( $u_\alpha$ ). La incertidumbre del coeficiente de expansión térmica para los diferentes materiales se estima como un 10% del valor del coeficiente y se le asigna una distribución rectangular, por lo tanto:

$$u_\alpha = \frac{0.1 * \alpha}{\sqrt{3}} = 6.64 \times 10^{-7} \quad (9)$$

Diferencia de temperatura ( $u_{\Delta T}$ ). La incertidumbre de la variación de temperatura durante la calibración se considera como la tolerancia permisible de la temperatura del laboratorio  $\pm \Delta T$  considerada con una distribución rectangular, es decir:

$$u_{\Delta T} = \frac{\Delta T}{\sqrt{3}} = 0.58 \quad (10)$$

Repetibilidad de las mediciones ( $u_{REP}$ ). La incertidumbre por repetibilidad se obtiene con la desviación estándar de la media de las mediciones repetidas realizadas durante la calibración, datos mostrados en la tabla 1.

$$u_{REP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = 0.002 \quad (11)$$

Donde:

$x_i$  – es la lectura de la medición  $i$  en el MEU

$\bar{x}$  – es el promedio aritmético de las  $n$  mediciones

Resolución del MEU ( $u_{RES}$ ). Para instrumentos digitales la incertidumbre por resolución es:

$$u_{RES} = \frac{DM}{2\sqrt{3}} = 0.003 \quad (12)$$

Donde:

$DM$  – resolución del MEU.

Para el cálculo tomamos como  $u_R$  el valor de la incertidumbre estándar por repetibilidad ya que es la mayor entre  $u_{REP}$  y  $u_{RES}$

#### 4.4. Determinación de la incertidumbre de calibración.

Con base en el modelo de la ecuación 5 obtenemos la incertidumbre estándar en la calibración de un MEU, para el caso en que la longitud mayor calibrada es de 80 mm el resultado es:

$$u = 0.01 \text{ mm}$$

Considerando un factor de cobertura  $k = 2$ , para expresar la incertidumbre expandida a un nivel de confianza de 95 %, aproximadamente obtenemos el resultado final de dicha incertidumbre.

$$U = 0.02 \text{ mm}$$

La tabla 2 muestra el balance de incertidumbre para la calibración de un MEU. En la última columna se observa el porcentaje de participación de cada una de las fuentes. Se observa en dicha tabla que los componentes de mayor peso son la velocidad del sonido y el tiempo de vuelo.

## 5. ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE UNA MEDICIÓN EN CAMPO.

Ahora bien, un MEU utilizado en campo tiene otras variables de influencia que analizaremos en esta sección. Consideraremos el caso de una medición en campo con condiciones ambientales muy distintas de las del laboratorio. En particular se considera la medición de un ducto que conduce vapor a 150 °C y una temperatura ambiental de 40 °C. Estas condiciones implican hacer consideraciones adicionales en la incertidumbre de la ecuación 1.

### 5.1. Nuevo modelo de medición.

La ecuación 1 para una medición en campo se modifica de la siguiente manera:

$$e = \frac{ct}{2} + \delta_{MEU} + \delta_T \quad (13)$$

### 5.2. Nuevo modelo de la incertidumbre estándar combinada y coeficientes de sensibilidad.

La incertidumbre estándar combinada y los coeficientes de sensibilidad de acuerdo al nuevo modelo de medición se muestran en la siguiente expresión:

$$u = \sqrt{\frac{c^2}{4} u_t^2 + \frac{t^2}{4} u_c^2 + u_{MEU}^2 + u_T^2} \quad (14)$$

Donde:

$u_c$  - es la incertidumbre estándar de la velocidad del sonido;

$u_t$  - es la incertidumbre estándar del tiempo de vuelo;

$u_{MEU}$  - es la incertidumbre estándar del medidor de espesores por ultrasonido (certificado de calibración);

$u_T$  - es la incertidumbre estándar debida a la temperatura.

### 5.3. Contribuyentes adicionales a la incertidumbre.

Se consideran las siguientes fuentes adicionales de incertidumbre:

Incertidumbre de la velocidad de propagación ( $u_c$ ).

Se determina esta incertidumbre considerando el cambio del módulo de elasticidad del material, en función de la temperatura, para el caso de sólidos, la densidad prácticamente es constante. Para un

intervalo de temperatura de  $\approx 100$  °C el valor del módulo de elasticidad del acero disminuye en un 5 %, aproximadamente [3], provocando que  $c$  disminuya proporcionalmente a la raíz cuadrada de este decremento como se puede apreciar en la ecuación 15.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (15)$$

Donde:

$E$  – Módulo de elasticidad del material

$\rho$  - Densidad del material

Entonces, la incertidumbre estándar de la velocidad del sonido considerando una distribución rectangular es,

$$u_c = \frac{\sqrt{5} * c}{100 * \sqrt{3}} = 76664.7 \quad (16)$$

Incertidumbre de la base de tiempo del oscilador ( $u_t$ ). De la literatura y considerando una distribución rectangular tenemos,

$$u_t = \frac{7x10^{-9}}{\sqrt{3}} = 4.1x10^{-9} \quad (17)$$

Incertidumbre de calibración del MEU ( $u_{MEU}$ ). Se determina esta incertidumbre del certificado de calibración del MEU.

$$u_{MEU} = \frac{U_{MEU}}{2} = 0.01 \quad (18)$$

Incertidumbre debida a la diferencia de temperatura ( $u_T$ ). Se determina con la expresión de la expansión térmica lineal de los cuerpos.

$$u_T = \frac{e * \alpha * \Delta T}{\sqrt{3}} = 3.3x10^{-4} \quad (19)$$

Con base en el modelo de la ecuación 14 obtenemos la incertidumbre estándar de medición de un MEU, para el caso en que la longitud medida es de 10 mm el resultado es:

$$u = 0.13 \text{ mm}$$

Considerando un factor de cobertura  $k = 2$ , para expresar la incertidumbre expandida a un nivel de confianza de 95 %, aproximadamente obtenemos el resultado final de dicha incertidumbre.

$$U = 0.26 \text{ mm}$$

En la tabla 3, al final de este documento, se muestra el balance de incertidumbre de la medición en campo con un MEU.

### 6. ANALISIS DE SENSIBILIDAD.

Haciendo un análisis de sensibilidad para determinar el efecto al variar las fuentes de incertidumbre en un intervalo de  $\pm 50$  %, se observa el comportamiento mostrado en las figuras 2 y 3 para la calibración de un MEU y para la medición en campo con el mismo instrumento, respectivamente.

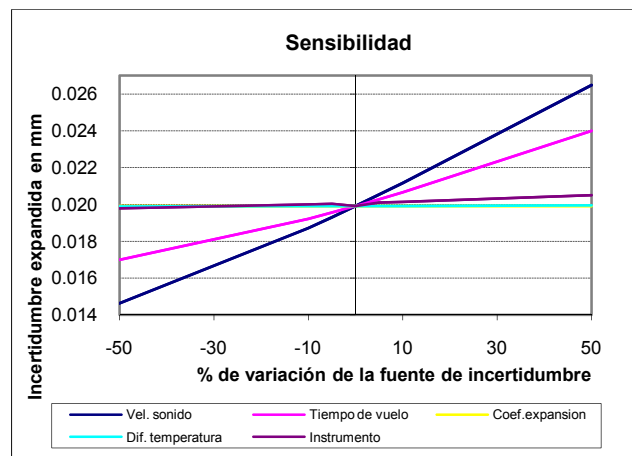
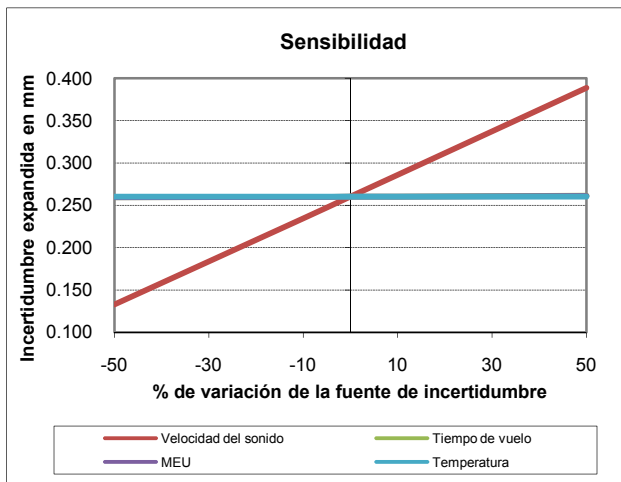


Figura 2. Análisis de sensibilidad en la calibración de un MEU.

En la figura 2 se observa claramente que las dos principales contribuyentes en la incertidumbre de calibración de un MEU es la velocidad de propagación del sonido en el material y el tiempo de vuelo.



**Figura 3.** Análisis de sensibilidad en la medición en campo.

Para el caso de la medición en campo, se observa en la figura 3 que prácticamente la única fuente que contribuye a la incertidumbre es la velocidad de propagación del sonido en el medio.

## 7. CONCLUSIONES

Los límites metrológicos de estos instrumentos se encuentran en la medición de espesores con incertidumbres en el mejor de los casos de 0.02 mm en ambiente de laboratorio, razón por la cual su uso se limita a aplicaciones industriales o simplemente para verificación. Para el caso de aplicaciones en ambientes industriales como el mostrado en este trabajo, la incertidumbre de medición se ve fuertemente influenciada por el espesor a medir, obteniéndose valores desde 0.04 mm y hasta 0.26 mm en un intervalo de espesores de 1 mm y hasta 10 mm, con temperatura del material de 150 °C y temperatura ambiente de 40 °C.

Podemos observar que en la calibración de un MEU las dos fuentes de incertidumbre que participan con 61% y 36% son la velocidad del sonido y la determinación del tiempo de "vuelo", respectivamente. Para mejorar la incertidumbre debemos de atacar estas dos fuentes, sin embargo ambas están relacionadas con el tiempo de vuelo por lo que, si deseamos medir con menos incertidumbre se deben utilizar osciladores con una mejor estabilidad y menor deriva.

Para el caso de mediciones en campo la figura 3 muestra como única fuente de incertidumbre a la velocidad del sonido. Mejorar este valor es más complicado, ya que la variabilidad en la producción

de materiales hace que dicha velocidad tenga una gama de valores muy amplia. Si utilizamos como referencia tablas de fabricantes nuestra incertidumbre de medición será mucho mayor que si utilizamos un trozo del material a medir para ajustar la velocidad, por ejemplo podemos medir con un calibrador una brida en las tuberías, una oreja o parte del faldón de los recipientes a presión, etc., y con esta referencia ajustar la velocidad del sonido, lo cual nos permitiría reducir hasta en un 70% la incertidumbre de medición en campo, esto debido a que en lugar de que se ajuste la velocidad a la temperatura ambiente y se mida a la temperatura de operación, estaremos ajustando la velocidad del sonido a una temperatura más cercana a la de operación.

Conclusión final. El límite metrológico de estos instrumentos se determina:

- En el laboratorio por el oscilador
- En la medición en campo por la velocidad del sonido.

Para reducir la incertidumbre debemos:

- En el laboratorio contar con un instrumento cuyo oscilador sea estable y con menor deriva.
- En la medición en campo ajustar la velocidad del sonido utilizando un material, si no igual por lo menos similar, y a una temperatura lo más cercana posible (resguardando en todo momento la seguridad del metrólogo) a la temperatura de operación de la tubería o del equipo.

## REFERENCIAS

- [1] ASTM E 797 - 95, Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact Method, reapproved 2001.
- [2] Viliesid Alonso, Miguel. Estimación de la Incertidumbre y Efecto de la Temperatura en la Calibración de Instrumentos de Medición de Espesores por Ultrasonido, asesoría técnica, mayo de 2005.
- [3] P. Coca Rebollero y J. Rosique, Ciencia de los materiales. Teoría, ensayos y tratamientos. Ed. Pirámide 2002.

**Tabla 2. Balance de incertidumbre en la calibración de un MEU, alcance nominal 80 mm.**

| Nº                                      | Magnitud de entrada<br>Fuente de<br>incertidumbre | Fuente de<br>información | Incertidumbre<br>original<br>mm | Tipo de<br>distribución | Incertidumbre<br>estándar<br>$u(x_i)$ | Coefficiente<br>de<br>sensibilidad | Contribución<br>$u_i^2(y)$ | % de<br>participación |
|---|---|--------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 1                                       | <b>Velocidad del sonido</b>                       | cálculo                  |                                 | normal                  | 5.8E+02                               | 2.70E-05                           | <b>2.43E-04</b>            | 61.4                  |
| 1.1                                     | Patrón  | certificado              | 0.01                            | normal                  | 0.005                                 | 3.71E+04                           | 3.4E+04                    |                       |
| 1.2                                     | Tiempo de vuelo                                   | estimación               | 7.00E-09                        | rectangular             | 2.02E-09                              | 1.10E+11                           | 4.9E+04                    |                       |
| 2                                       | <b>Tiempo</b>                                     | información              | 7.00E-09                        | rectangular             | 2.02E-09                              | 5.93E+06                           | <b>1.43E-04</b>            | 36.2                  |
| 3                                       | <b>Coefficiente de expansión térmica</b>          | tablas                   | 1.15E-06                        | rectangular             | 6.64E-07                              | -160                               | <b>1.1E-08</b>             | 0.0                   |
| 4                                       | <b>Temperatura Medidor de ultrasonido</b>         | mediciones               | 1                               | rectangular             | 0.577                                 | -1.84E-03                          | <b>1.1E-06</b>             | 0.3                   |
| 5                                       | <b>Temperatura</b>                                | cálculo                  |                                 | normal                  | 2.9E-03                               | 1                                  | <b>8.3E-06</b>             | 2.1                   |
| 5.1                                     | Repetibilidad                                     | mediciones               | 0.003                           | rectangular             | 0.001525                              | 1                                  | 2.3E-06                    |                       |
| 5.2                                     | Resolución  | manual equipo            | 0.01                            | rectangular             | 0.00288675                            | 1                                  | 8.3E-06                    |                       |
|   |   |                          |                                 |                         |                                       |                                    | <b>3.9E-04</b>             | 100.0                 |
| <b>INCERTIDUMBRE ESTANDAR COMBINADA</b> |   |                          |                                 |                         |                                       |                                    | 0.01 mm                    |                       |
| <b>INCERTIDUMBRE EXPANDIDA (k = 2)</b>  |   |                          |                                 |                         |                                       |                                    | <b>0.02 mm</b>             |                       |

**Tabla 3. Balance de incertidumbre en la medición en campo con un MEU para un espesor de 10 mm y una temperatura de 150 °C del material y 40 °C de temperatura ambiente.**

| Nº                                      | Magnitud de entrada<br>Fuente de<br>incertidumbre | Fuente de<br>información | Incertidumbre<br>original | Tipo de<br>distribución | Incertidumbre<br>estándar<br>$u(x_i)$ | Coefficiente de<br>sensibilidad | Contribución<br>$u_i^2(y)$ | % de<br>participación |
|---|---|--------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 1                                       | <b>Velocidad del sonido</b>                       | manual                   | 132554                    | rectangular             | 7.6E+04                               | 1.69E-06                        | <b>1.67E-02</b>            | 98.6                  |
| 2                                       | <b>Tiempo de vuelo</b>                            | catalogo                 | 7.00E-09                  | rectangular             | 4.04E-09                              | 2953000                         | 1.4E-04                    | 0.8                   |
| 3                                       | <b>MEU</b>  | estimación               | 1.99E-02                  | normal                  | 9.94E-03                              | 1                               | 1.0E-04                    | 0.6                   |
| 4                                       | <b>Temperatura</b>                                | estimación               | 5.00E+00                  | rectangular             | 3.32E-04                              | 1                               | 1.1E-07                    | 0.0                   |
|   |   |                          |                           |                         |                                       |                                 | 1.69E-02                   | 100.0                 |
| <b>INCERTIDUMBRE ESTANDAR COMBINADA</b> |   |                          |                           |                         |                                       |                                 | 0.13 mm                    |                       |
| <b>INCERTIDUMBRE EXPANDIDA (k = 2)</b>  |   |                          |                           |                         |                                       |                                 | <b>0.26 mm</b>             |                       |