

VARIABLES DE INFLUENCIA EN LA MEDICIÓN DE POTENCIA ULTRASÓNICA

Rogelio Amezola Luna y Alfredo A. Elías Juárez

Centro Nacional de Metrología

Laboratorio de Ultrasonido/ División de Vibraciones y Acústica/ Área de Metrología Física

Tel.: (442) 2 11 05 00 ext. 3592 y 3515 Fax: (442) 2 11 05 53

ramezola@cenam.mx y aelias@cenam.mx

Resumen:

La potencia ultrasónica permite conocer la cantidad de energía que emite un instrumento de ultrasonido. Su medición es de particular relevancia en la calibración y/o evaluación de equipo de ultrasonido médico. En este trabajo se analizan y evalúan las principales variables de influencia detectadas en la medición de potencia ultrasónica utilizando una balanza de fuerza de radiación, en el intervalo de 10 mW a 1 W considerando el intervalo de frecuencia de 1 MHz a 10 MHz. Los efectos estudiados, en general, están asociados con la alineación transductor-blanco, corrientes de aire, electrostática y propiedades del medio de propagación. La alineación transductor-blanco y las imperfecciones del blanco constituyen dos importantes fuentes de error en la medición. La automatización del sistema permite cuantificar variaciones y desviaciones debidas a efectos térmico-temporales.

1. INTRODUCCIÓN

Desde los primeros desarrollos de equipo médico que opera por técnicas de ultrasonido (diagnóstico, terapia, litotricia; entre otros) se ha puesto particular interés en la medición y caracterización de los campos de ondas de ultrasonido generados por estos instrumentos, ya sea como medio para evaluar su desempeño o por razones de seguridad y/o reglamentación [1]. La medición de potencia ultrasónica es un parámetro comúnmente usado en la evaluación de campos ultrasónicos, donde se determina la cantidad de energía que emite un instrumento de ultrasonido. Esto proporciona un estimado de la cantidad de energía que puede recibir un paciente en un tratamiento de terapia o diagnóstico con ultrasonido y permite medir su dosis para que ésta no sea factor de riesgo para su salud.

En el Laboratorio de Ultrasonido, **LU**, del Centro Nacional de Metrología (**CENAM**), como parte de la calibración y evaluación de equipos de ultrasonido médico, se determina la potencia ultrasónica de emisión utilizando una balanza de fuerza de radiación provista con un blanco reflejante cónico a 45° nominales. Esta balanza es parte integral del Sistema de Referencia Nacional para Medición de Potencia Ultrasónica (**SRNMPU**).

En el presente trabajo se analizan y cuantifican las principales fuentes de incertidumbre identificadas en la medición de potencia ultrasónica en el intervalo de 10 mW a 1 W a diferentes frecuencias de

operación. Se establecen relaciones entre algunas magnitudes (de entrada) medidas y el mensurando (potencia ultrasónica), de acuerdo al tipo de blanco utilizado y el principio de medición (gravimétrico). El análisis realizado permite eliminar o aminorar errores de medición asociados con algunas variables de influencia.

2. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE POTENCIA ULTRASÓNICA [2]

La balanza de fuerza de radiación se calibra utilizando un juego de masas calibrado, donde se determina su linealidad y estabilidad de medición. Para determinar la potencia total radiada por un equipo de ultrasonido médico, el transductor se sumerge ligeramente en el tanque de inmersión (el cual contiene agua destilada tipo 1), de manera tal que la cara del transductor se encuentre próxima y alineada perpendicularmente al eje de simetría del blanco reflejante (ver Fig. 1). Una vez que el transductor es alineado, éste se excita a través de la consola o módulo central. De esta forma, el transductor emite un haz ultrasónico que viaja a través del agua contenida en el tanque hasta ser reflejado por el blanco. La balanza registra la fuerza de radiación debida a la presión acústica ejercida por el haz del transductor sobre el blanco reflejante como una diferencia en el peso del blanco.

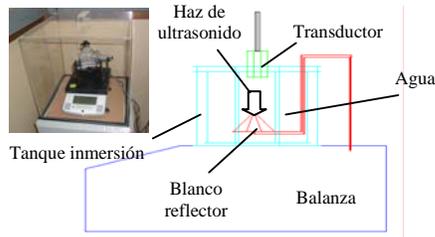


Fig. 1 Arreglo de medición de potencia ultrasónica usando la balanza de fuerza de radiación

La potencia ultrasónica, P , es determinada por la transferencia de momento en el haz ultrasónico y puede ser expresada como el producto de la velocidad del sonido, c , en el medio de propagación (agua) y la fuerza de radiación, F , producida por el equipo bajo medición:

$$P = c \cdot F \quad (1)$$

Si se considera que la extensión del blanco es lo suficientemente grande para cubrir completamente la sección transversal del haz ultrasónico con un frente de onda plana, la ecuación (1) puede expresarse para un blanco perfectamente reflector como [2]:

$$P = \frac{c \cdot F}{2 \cdot \cos^2 \theta} \quad (2)$$

donde θ es el ángulo entre la dirección del ultrasonido incidente y la normal a la superficie de reflexión. Debido a que la balanza utiliza el principio gravimétrico de medición, la fuerza de radiación es expresada como el producto de la masa m y la aceleración de la gravedad g como:

$$F = m \cdot g \quad (3)$$

La potencia determinada en (1) y (2) es la medida en el blanco reflejante, por lo que para determinar la potencia en la cara del transductor es necesario hacer correcciones por la atenuación del medio (agua). Entonces, de (2) y (3), la potencia ultrasónica debe determinarse por:

$$P = \frac{c \cdot m \cdot g \cdot \exp(2 \cdot \alpha \cdot d)}{2 \cdot \cos^2 \theta} \quad (4)$$

donde α es el coeficiente de atenuación de la onda de ultrasonido en el agua, en m^{-1} , y d es la distancia efectiva del blanco reflector a la cara del transductor bajo medición, en m.

Debido a efectos térmico-temporales, como fluctuaciones de las condiciones ambientales y del medio de propagación, ondas reflejadas por las paredes del tanque de inmersión y calentamiento del transductor bajo medición, es conveniente determinar la potencia en función de valores

promedio determinados en ciclos de apagado-encendido-apagado (*off-on-off*) de la fuente que alimenta al transductor. Además, es necesario considerar extrapolaciones del cambio en las lecturas causado por la deriva térmico-temporal. Por lo anterior, se determina una masa equivalente como función de las masas medidas en las zonas de transición *off-on-off*, de acuerdo a (ver Fig. 2a):

$$m = \frac{(m_4 - m_3) + (m_2 - m_1)}{2} \quad (5)$$

Se utiliza un programa de control y adquisición de datos, desarrollado con el fin de capturar de forma continua la medición de masa y evaluar los efectos térmico-temporales. La Fig. 2b muestra una serie de cinco mediciones en las cuales puede observarse un efecto térmico-temporal despreciable.

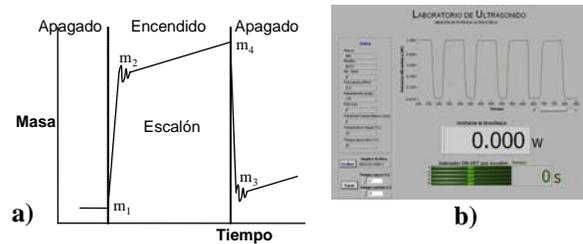


Fig. 2 Medición de masa en 4 puntos de un escalón

3. ANÁLISIS Y CUANTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE INCERTIDUMBRE

En esta sección se analiza y cuantifica cada fuente de incertidumbre identificada en la medición de potencia ultrasónica. Para ello se cuantifican las incertidumbres de cada fuente siguiendo la *Guía para la expresión de incertidumbres* [3], sin considerar correlación entre variables y considerando cada fuente como un mensurando independiente, de acuerdo a:

$$U(y) = k \cdot u(y) = k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial Y}{\partial X_i} \cdot u(x_i) \right]^2} \quad (6)$$

Donde:

- $U(y)$ Incertidumbre expandida
- k Factor de cobertura
- $u(y)$ Incertidumbre combinada
- Y Estimado del mensurando Y
- $\partial Y / \partial X_i$ Coeficientes de sensibilidad de cada magnitud de entrada X_i
- $u(x_i)$ Incertidumbre del estimado de cada magnitud de entrada x_i

donde $(\partial Y / \partial X_i) \cdot u(x_i)$ es la contribución de incertidumbre de cada fuente.

Los resultados obtenidos en el análisis y cuantificación de las fuentes de incertidumbre son los siguientes.

a) Velocidad del sonido en el medio (agua), c

Su influencia en el mensurando, se asocia principalmente con las propiedades del medio (homogeneidad) y las condiciones ambientales (temperatura). En el caso del agua destilada, la velocidad del sonido se puede aproximar por un polinomio de quinto grado, como [4,5]:

$$c = \sum_{i=0}^5 w_i \cdot T^i \quad (7)$$

donde:

w_i	Valor del coeficiente
0	0,140238754e4
1	0,503711129e1
2	-0,580852166e-1
3	0,334198834e-3
4	-0,147800417e-5
5	0,314643091e-8

T , es la temperatura del agua en °C. La incertidumbre determinada es $\pm 1,4$ m/s (k=2), que incluye la incertidumbre asociada a la expresión matemática experimental (7), así como la debida a la medición de temperatura del agua.

b) Aceleración de la gravedad, g

La aceleración de la gravedad en las cercanías al lugar de medición es de 9,780845 m/s² y se le asoció una incertidumbre de medición de $\pm 3 \cdot 10^{-4}$ m/s² (k=2), en base al Informe de Medición de la aceleración de la gravedad en CENAM[6] y otros factores debidos a incertidumbres tipo B de la medición (i.e. instrumentación).

c) Coeficiente de atenuación del ultrasonido, α

El coeficiente de atenuación α es función de la frecuencia de propagación de la onda de ultrasonido en el agua y las características del medio. En el caso de agua destilada en el intervalo de 0 °C a 60 °C, su valor se aproxima por [7]:

$$\frac{\alpha}{f^2} = (5,68524 \cdot 10^1 - 3,02545 \cdot 10^0 \cdot T + 1,17416 \cdot 10^{-1} \cdot T^2 - \dots - 2,95430 \cdot 10^{-1} \cdot T^3 + 3,96985 \cdot 10^{-3} \cdot T^4 - 2,11091 \cdot 10^{-7} \cdot T^5) \cdot 10^{-1} \quad (8)$$

donde f es la frecuencia de operación en Hz. La incertidumbre estimada para el coeficiente de atenuación es $\pm 4,5 \cdot 10^{-3}$ m⁻¹ (k=2) e incluye la influencia de la temperatura y la frecuencia.

d) Distancia transductor – blanco, d

A menor distancia de separación transductor-blanco, el efecto de atenuación del medio de propagación se reduce en la medición de potencia. En la Fig. 3 se muestran resultados sobre la

influencia de d en la medición de la potencia. La incertidumbre de medición máxima es $\pm 1,5$ mm (k=2).

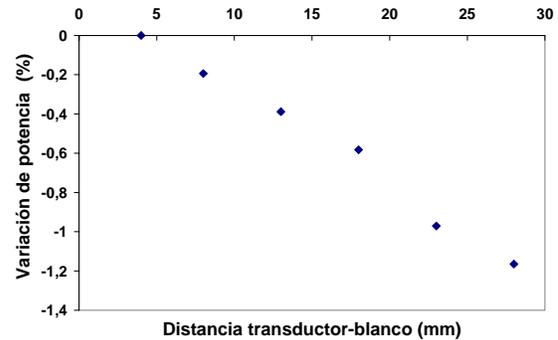


Fig. 3 Variación de potencia con la distancia transductor-blanco

e) Ángulo del blanco reflector, θ

El ángulo de incidencia entre el eje de propagación de la onda de ultrasonido y la superficie reflejante del blanco juega un papel importante en la medición de potencia ultrasónica, ya que la desalineación produce errores sistemáticos y aleatorios (inestabilidad) en la medición (ver Fig. 4). La incertidumbre estimada es $\pm 0,02^\circ$ (k=2) y corresponde a la desalineación angular máxima determinada (considerada como una distribución rectangular) y la imperfección geométrica (conicidad) del blanco reflejante.

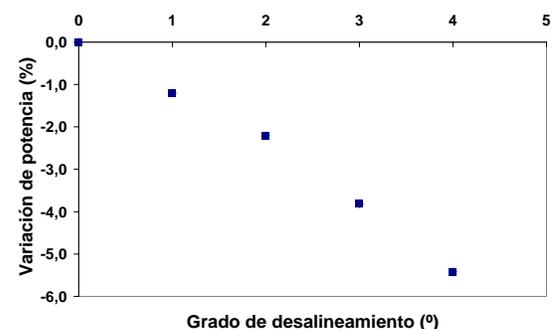
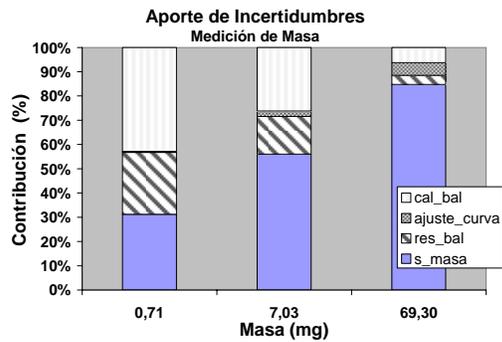


Fig. 4 Variación de la potencia con la desalineación angular del transductor

f) Masa, m

De acuerdo con la ecuación (4) la masa mantiene una relación directa con la potencia ultrasónica. Un miligramo medido por la balanza, corresponde a aproximadamente 14,65 mW. Para analizar el efecto de la medición de masa, se estimó la influencia de la repetibilidad de la medición de masa (s_masa), la resolución de la balanza (res_bal), el ajuste por linealidad de la balanza ($ajuste_curva$) y la calibración de la balanza (cal_bal), ver Fig. 5 y 6. La resolución de la balanza es de 0,137 mg (2 mW).



masa, mg			
m:	0,71	7,03	69,30
U(m), k=2:	0,18	0,32	1,81
Fuente de Incertidumbre	Contribución $\delta Y / \delta X_i \cdot u(x_i)$		
	mg		
s_masa	0,048	0,142	0,898
res_bal	0,039	0,039	0,039
ajuste_curva	0,001	0,006	0,055
cal_bal	0,066	0,066	0,066

Fig. 5 Incertidumbre de la medición de masa

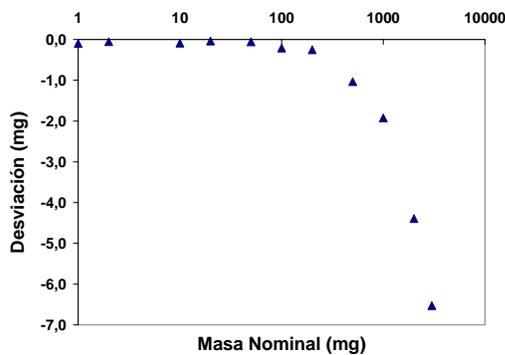


Fig. 6 Linealidad de la balanza en masa

La incertidumbre máxima de calibración de la balanza es $\pm 0,1$ mg ($k=2$); incluye la repetibilidad, resolución y patrón de medición (ver Fig. 7).

g) Diámetro finito, b

Es posible que el tamaño del blanco (82,3 mm diámetro) no refleje completamente el haz ultrasónico y que parte de esa energía no sea cuantificada por la balanza. Por lo que se asignó una incertidumbre de 2 % (como una distribución rectangular) sobre el valor medido, de acuerdo a la norma IEC 1161-92 [2].

h) Alineación del transductor, Atr

Al igual que la alineación angular, la alineación por traslación lineal en el plano de la cara activa del transductor, produce errores en la medición. Se determinó que puede producir variaciones de hasta 0,6 %/mm de desalineación (ver Fig. 8). Este valor fue considerado como distribución rectangular.

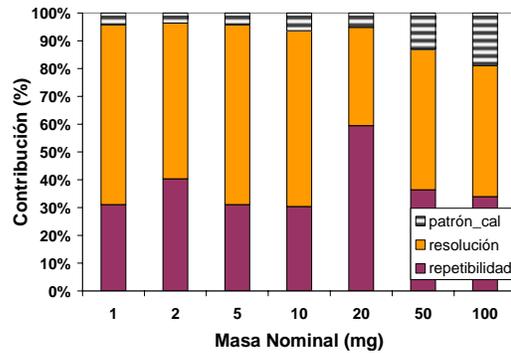


Fig. 7 Incertidumbre de la calibración de la balanza

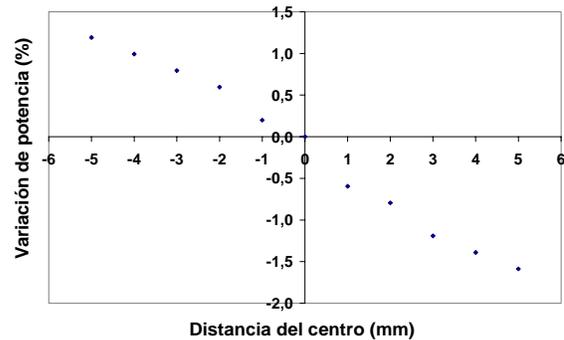


Fig. 8 Variación de la potencia con el desalineamiento del transductor

i) Flotación

No fue detectado con variaciones de presión estática $< \pm 0,5$ kPa (condiciones del laboratorio).

j) Corrientes de aire

Afectación considerable en niveles bajos (10 mW), al enclaustrar la balanza se controla esta fuente de variación en las mediciones.

k) Dispersión del haz (scattering)

No se detectaron efectos considerables usando agua desgasificada. Se corroboró la expresión (8) determinando el coeficiente de atenuación en el agua, no se encontraron diferencias significativas respecto a los valores esperados. Las diferencias fueron menores al 1 %.

l) Electrostática

Electrostática es una variable de gran influencia en la estabilidad de la balanza. Por lo que su efecto se controló manteniendo una humedad relativa en el laboratorio mayor a 45 % HR.

m) Convección térmica

A potencias < 1 W en periodos de 1 s a 40 s, no se detectaron cambios en la temperatura del agua como consecuencia de una posible convección térmica por calentamiento del transductor.

n) Vibraciones

La balanza fue apoyada en una gran masa (~500 kg) con una placa de amortiguación de vibraciones, por lo que no se detectó afectación (inestabilidad), en el intervalo medido, en condiciones normales de operación del laboratorio. Se monitoreó una fuerza fija durante varios días para evaluar su efecto.

4. CONTRIBUCIONES DE LAS FUENTES DE INCERTIDUMBRE

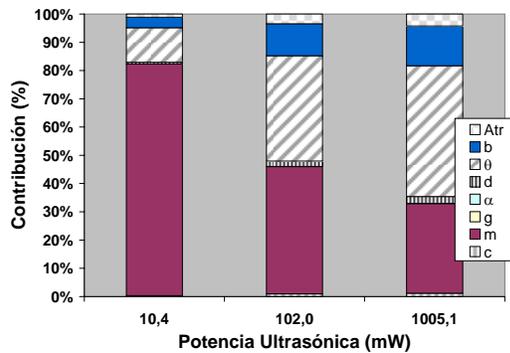
Los coeficientes de sensibilidad de *P*, derivados para cada magnitud de entrada en (4), son:

$$\frac{\partial P}{\partial c} = \frac{m \cdot g \cdot \exp(2 \cdot \alpha \cdot d)}{2 \cdot \cos^2 \theta} \quad \frac{\partial P}{\partial m} = \frac{c \cdot g \cdot \exp(2 \cdot \alpha \cdot d)}{2 \cdot \cos^2 \theta}$$

$$\frac{\partial P}{\partial g} = \frac{c \cdot m \cdot \exp(2 \cdot \alpha \cdot d)}{2 \cdot \cos^2 \theta} \quad \frac{\partial P}{\partial \alpha} = \frac{c \cdot m \cdot g \cdot d \cdot \exp(2 \cdot \alpha \cdot d)}{\cos^2 \theta}$$

$$\frac{\partial P}{\partial d} = \frac{c \cdot m \cdot g \cdot \alpha \cdot \exp(2 \cdot \alpha \cdot d)}{\cos^2 \theta} \quad \frac{\partial P}{\partial \theta} = \frac{c \cdot m \cdot g \cdot \exp(2 \cdot \alpha \cdot d) \cdot \text{sen} \theta}{\cos^3 \theta}$$

En la Fig. 9 se presentan algunas gráficas de contribución de incertidumbre, a diferentes potencias de operación (aprox. 10 mW, 100 mW y 1 W). En estas mediciones se utilizó un transductor de 3,5 MHz en onda continua de 19 mm (diámetro nominal). Mediciones a otras frecuencias de operación a 10 mW presentaron comportamientos similares.



Potencia Ultrasónica, mW			
P:	10,4	102,0	1005,1
U(P), k=2:	2,7	6,2	47,9
Fuente de Incertidumbre	Contribución $\delta Y / \delta X_i \cdot u(x_i)$ mW		
c	0,0	0,0	0,5
m	1,3	2,3	13,1
g	0,0	0,0	0,0
α	0,0	0,0	0,0
d	0,0	0,1	1,0
θ	0,2	1,9	19,1
b	0,1	0,6	5,8
Atr	0,0	0,2	1,7

Fig. 9 Aportaciones de incertidumbre en la medición de potencia ultrasónica

5. DISCUSIÓN

El análisis de las fuentes de incertidumbre realizado aplica en las condiciones de medición descritas, sin

embargo, el efecto de dichas variables en el mensurando puede incrementarse o reducirse considerablemente bajo otras condiciones de medición. Entre ellas, mediciones a alta potencia ultrasónica (> 1 W) o bien mediciones en alta frecuencia (> 10 MHz). Los resultados obtenidos muestran algunas limitantes de la balanza de fuerza de radiación para medir potencias ultrasónicas inferiores a 10 mW; además de presentar un comportamiento no lineal en alta potencia. El porcentaje de contribución a la incertidumbre combinada asociado con la desalineación del blanco reflejante y el transductor, se incrementa con la potencia. Si bien los coeficientes de reflexión del blanco no fueron analizados, cabe aclarar que el blanco usado es del tipo recomendado por [2] para mediciones de potencia.

6. CONCLUSIONES

Se analizaron y cuantificaron diversas fuentes de incertidumbre en la medición de potencia ultrasónica; utilizando para ello una balanza de fuerza de radiación. La resolución y estabilidad de la balanza, la alineación transductor-blanco y las imperfecciones del blanco fueron las principales fuentes de incertidumbre. Este trabajo permitirá realizar mejoras metrológicas al Sistema de Referencia Nacional para Medición de Potencia Ultrasónica del CENAM.

AGRADECIMIENTOS

Al CENAM por el apoyo en el desarrollo de este trabajo y a los colegas Dra. Ana Lilia López Sánchez y Dr. Andrés E. Pérez Matsumoto por sus valiosas observaciones y sugerencias durante la preparación de este documento.

REFERENCIAS

- [1] Preston R. C., Output measurements for medical ultrasound, 1991 Ed. Springer-Verlag.
- [2] IEC 1161-92 "Ultrasonic power measurement in liquids in the frequency range 0,5 MHz to 25 MHz".
- [3] NMX-CH-140-IMNC-2002 "Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones".
- [4] Grosso V.A. and Mader C.W. "Speed of sound in pure water". JASA 1972 Vol. 52 (1442 a 1446).
- [5] Córdova A./Amezola L./ Elías J. "Caracterización de campos ultrasónicos en agua usando hidrófonos", AMMAC 2003.
- [6] Informe de medición de la aceleración de la gravedad local en CENAM. Emitido por el Instituto de Geofísica UNAM 1993.

- [7] IEC 1101-1991. "The absolute calibration of hydrophones using the planar scanning technique in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz".
- [8] Fick S. and Franklin B. "Ultrasonic power output measurement by pulsed radiation pressure" 1996. *Journal of Research of NIST* Vol. 101 (659 a 669).
- [9] Beissner, K. "Minimum target size in radiation force measurements". *JASA* 1984 Vol. 76 (1505 a 1510).