

BALANCE DE INCERTIDUMBRES EN LA CALIBRACIÓN “IN SITU” DE UN HIDRÓFONO

Albert Garcia-Benadí⁽¹⁾, Javier Cadena-Muñoz⁽²⁾, Joaquin del-Rio-Fernández⁽²⁾, Xavier Roset⁽²⁾, Antoni Mànuel-Lázaro⁽²⁾

⁽¹⁾Laboratorio de Metrología y Calibración. Universitat Politècnica de Catalunya. Rambla Exposició, 24.08800 Vilanova i la Geltrú (Barcelona)

⁽²⁾SARTI Research Group. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Rambla Exposició, 24.08800 Vilanova i la Geltrú (Barcelona)

⁽¹⁾Teléfono: 938967200 . Correo electrónico: laboratorimetrologia@upc.edu

RESUMEN: El objetivo de este artículo es poner en relieve la posibilidad de la calibración de los hidrófonos en su medio. Con esta finalidad se detallarán los parámetros a tener en cuenta, se propondrán sistemáticas de obtención de los parámetros y se estimarán las contribuciones a la incertidumbre de cada una de ellas mediante la asignación de la distribución de probabilidad adecuada en cada caso.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se están realizando diferentes estudios en el medio marino, algunos de ellos para conocer la relación entre la variación de ciertos parámetros con el cambio climático (variación del pH y nivel de CO₂.) Otros se centran en el estudio de la contaminación acústica marina y su afectación a los cetáceos. Para el estudio de la contaminación sonora y del seguimiento de cetáceos se utilizan los hidrófonos. Los hidrófonos son unos micrófonos preparados para trabajar en el medio acuático con altas presiones.

La sensibilidad habitual en este tipo de equipos es de -170 dB rel 1 V/μPa y su funcionalidad más usual es un sensor que reacciona a las variaciones de presión del medio con una generación de corriente, por ello siempre se utiliza un amplificador de corriente, ya que las variaciones en el medio son de bajo nivel. Otro hecho notable a tener en cuenta es el proceso de cuantificación que realizan estos equipos en la conversión de la señal analógica a digital.

El control metrológico de un hidrófono marino es relevante para la veracidad de sus mediciones, pero actualmente, estos equipos sólo se calibran en el laboratorio, y la logística de recuperación del hidrófono de su emplazamiento y el transporte suele ser técnicamente complejo y de un elevado coste. El hecho de realizar la calibración in situ provoca que la incertidumbre que obtengamos sea más elevada que la obtenida en un laboratorio, pero es necesario evaluar si dicha incertidumbre es suficiente para la función que debe realizar el equipo.

2. DESARROLLO/DESCRIPCIÓN

Para la realización de una calibración en el medio marino de los hidrófonos, primero es necesario conocer algunas de las variables a tener en cuenta. En la Figura 1 vemos un esquema de posicionamiento de los elementos que participan en la calibración.

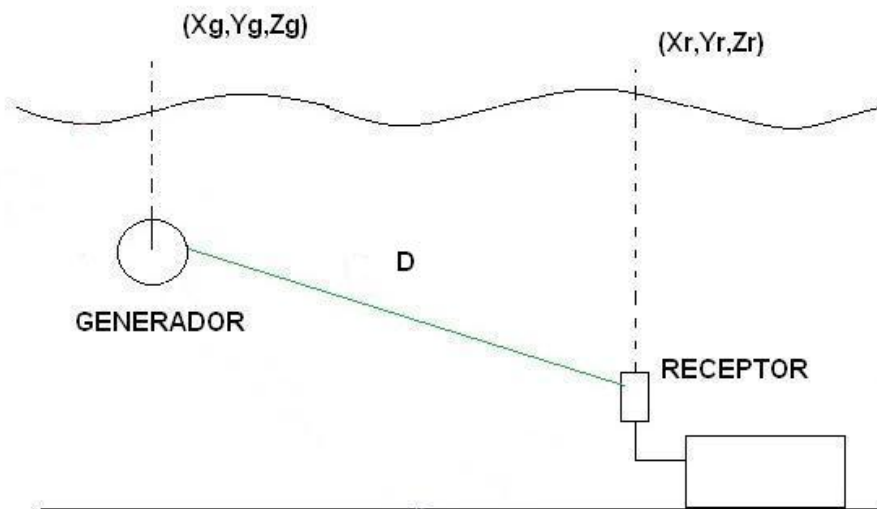


Figura 1. Esquema de los elementos participantes en la calibración.

En la Figura 1 se pone de manifiesto 2 factores; la importancia de conocer la posición del Generador y del Receptor, y la posibilidad de rebotes en el medio, tanto en la superficie del agua como el lecho marino. Por ello para poder realizar una calibración de una señal “pura” sin interferencias se puede evaluar la distancia a la que se encuentra el generador del receptor, en función del tiempo de respuesta de los equipos, para poder disponer de un tiempo donde se obtenga una señal “pura”. Este intervalo de tiempo lo podemos detallar en la ecuación 1, donde pone de manifiesto el intervalo de recepción de la onda “pura”.

$$\Delta t = \frac{1}{c \cdot \sin \theta} \cdot \left[(hr - d_0 \cdot \sin \theta) \pm \sqrt{d_0^2 \cdot \sin^2 \theta - h_r^2} \right]$$

Ecuación 1. Cálculo del intervalo de tiempo para la recepción de una onda pura

Donde h_r es la distancia del hidrófono respecto al fondo marino, d_0 es la distancia del emisor al hidrófono, c es la velocidad del sonido en el agua y θ es el ángulo de la onda reflejada

El parámetro relevante en la calibración de un hidrófono es la sensibilidad del equipo en función de la frecuencia. En este artículo se detalla la sistemática de cálculo para una única frecuencia. Por ello si se desea aplicar la sistemática de cálculo en un caso real se realizará el cálculo para cada una de las frecuencias, dentro de su rango de trabajo. La sensibilidad, a partir de ahora S , se calcula según la ecuación 2. De aquí obtenemos que las unidades de la sensibilidad sean dB rel 1V/ μ Pa.

$$S = 20 \cdot \log \left(\frac{V}{P} \right)$$

Ecuación 2. Cálculo de la Sensibilidad

Donde V es la tensión, expresada en voltios, que recibe el equipo y P es la presión que recibe el equipo, expresada en μ Pa ya que la mínima presión detectable en el medio marino es 1 μ Pa en lugar de los 20 μ Pa cuando el medio es el aire. El cálculo de la Presión de la recepción se determina en la ecuación 3.

$$P_R = P_0 \cdot 10^{\frac{SL-TL}{20}}$$

Ecuación 3. Cálculo de la Sensibilidad

Donde P_R es la presión en la recepción, SL es el nivel sonoro en la fuente expresado en dB y TL es la pérdida en la transmisión detallado en la ecuación 4.

$$TL = C \cdot \log(r') + \alpha \cdot r + TL_{rebotes}$$

Ecuación 4. Cálculo de la pérdida de transmisión

Donde C depende del procedimiento de la generación de la onda. Como ejemplo, si la propagación de la onda generada es esférica (hecho habitual para grandes profundidades), el valor de C es 20. En cambio si la propagación de la onda generada es cilíndrica, el valor de C es 10. r' es la misma magnitud que r , aunque expresada en metros.

El parámetro $\alpha \cdot r$ es la componente de absorción del medio, donde r es la distancia entre el emisor y receptor y α es el índice de atenuación propio del medio. En este caso r está expresada en km.

El término $TL_{rebotes}$ es la componente de pérdidas a causa de los rebotes sobre la superficie del mar, así como el lecho marino. Esta componente puede ser relevante en función de los parámetros de la frecuencia, profundidad y distancia.

La ecuación que basamos nuestro estudio la hallamos de la composición de las ecuaciones 2,3 y 4 obteniendo la ecuación 5:

$$S = 20 \cdot \log(V) - SL + C \cdot \log(r') + \alpha \cdot r + T_{rebotes}$$

Ecuación 5. Cálculo de la Sensibilidad (S) en función de los parámetros del medio

Para facilitar la interpretación de las posteriores ecuaciones vamos a definir los parámetros detallados en la ecuación 5.

$$\begin{aligned} R &= 20 \cdot \log(V) \\ G = SL &= 20 \cdot \log\left(\frac{P_s}{P_0}\right) \\ M &= C \cdot \log(r') + \alpha \cdot r + TL_{rebotes} \end{aligned}$$

Ecuación 6. Definición de los parámetros

En la ecuación 6 se detalla el término propio del receptor, R , que se relaciona con la tensión que genera en función de una presión. El segundo término es propio del generador, G , el tercer término de la ecuación es el propio de la sistemática u , procedimiento seguido para la realización del ensayo. Así como, el propio del medio donde nos encontramos, M . De ahora en adelante, vamos a prescindir del término de rebotes, ya que si planteamos una sistemática adecuada, ver ecuación 1, la contribución de este término no es relevante, ya que afecta en el segundo ciclo y no en la captación inicial de la onda. Este dato se refleja en la Figura 2, donde tenemos una recepción de un pulso de 10 kHz generado a una distancia aproximada de 1,2 km en una zona de aguas poco profundas. En esta figura vemos que los rebotes afectan la señal una vez se ha generado la señal "pura".



Figura 1. Recepción de 1 pulso 10 kHz

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se detallan a continuación son las contribuciones de tipo B [3] a causa de la vinculación de las variables mediante ecuaciones. A la ecuación 5 le aplicamos el cálculo de incertidumbres según [3] para obtener la incertidumbre combinada, ver ecuación 7.

$$u^2(S) = \left(\frac{\partial S}{\partial R}\right)^2 \cdot u^2(R) + \left(\frac{\partial S}{\partial G}\right)^2 \cdot u^2(G) + \left(\frac{\partial S}{\partial M}\right)^2 \cdot u^2(M) = u^2(R) - u^2(G) + u^2(M)$$

Ecuación 7. Cálculo de la incertidumbre combinada

La definición de parámetros realizada en la ecuación 6 facilita el cálculo de las derivadas parciales. A continuación se detalla el cálculo de la incertidumbre asociada de cada uno de los parámetros.

3.1. Incertidumbre del Receptor

El valor de $u(R)$ está relacionado con la tensión mínima que es capaz de generar el equipo en función de la presión que detecta. Por ello, le asociamos una distribución de probabilidad triangular centrada en el valor tensión mínima que da el fabricante. La ecuación 8, es la resultante.

$$u^2(R) = \left(\frac{\partial R}{\partial V}\right)^2 \cdot u^2(V) = \left(\frac{20}{V \cdot \ln(10)}\right)^2 \cdot \frac{V_{\min}^2}{6}$$

Ecuación 8. Contribución a la incertidumbre del término del receptor.

3.2. Incertidumbre del Generador

El valor $u(G)$ lo extraemos del certificado de calibración de nuestro equipo patrón, así, conociendo el valor de la incertidumbre asociada al equipo obtenemos su contribución a la incertidumbre:

$$u^2(G) = \left(\frac{\partial G}{\partial P_s} \right)^2 \cdot u^2(P_s) = \left(\frac{20}{\ln(10) \cdot P_s / P_0} \right)^2 \cdot u^2(P_s)$$

Ecuación 9. Contribución del generador

En la ecuación 9 se refleja la incertidumbre asociada a la presión del generador, $u(P_s)$, que la obtenemos mediante la ecuación 10, donde se refleja la incertidumbre de calibración del generador, U_G . Este cálculo se ha de realizar de este modo ya que la incertidumbre del certificado hace siempre referencia a S del generador y no a la presión generada.

$$u^2(P_s) = \left(\frac{U_G}{k_G} \right)^2 - u^2(V)$$

Ecuación 10. Cálculo de la incertidumbre del certificado de patrón en función de S y V

3.3. Incertidumbre del Medio

El término propio del medio $u(M)$ recoge la esencia de las relaciones entre las variables propias del medio y la sistemática del procedimiento que deseamos emplear. El resultado es la ecuación 11.

$$u^2(M) = \left(\frac{\partial M}{\partial \alpha} \right)^2 \cdot u^2(\alpha) + \left(\frac{\partial M}{\partial r} \right)^2 \cdot u^2(r) + \left(\frac{\partial M}{\partial C} \right)^2 \cdot u^2(C)$$

Ecuación 11. Balance de incertidumbres para el medio

Para la componente a la incertidumbre del coeficiente de atenuación del medio, tenemos la ecuación 12 extraída de [4] que nos liga estas componentes con los parámetros de temperatura, Salinidad, pH, profundidad y frecuencia:

$$\alpha = \left(\frac{A_1 \cdot P_1 \cdot f_1}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 \cdot P_2 \cdot f_2}{f^2 + f_2^2} + A_3 \cdot P_3 \right) \cdot f^2$$

Ecuación 12. Ecuación de l índice de atenuación del medio en dB/km

Donde la frecuencia del sonido (f) en kHz, la temperatura (t) en grados Celsius, la salinidad (S) en ‰, la profundidad (d) en metros y c la velocidad del sonido en el medio.

$$A_1 = 8 \cdot \frac{86}{c} \cdot 10^{(0,78 \cdot pH - S)} \quad A_2 = 21,44 \cdot \frac{S}{c} \cdot (1 + 0,025 \cdot t) \quad A_3 = 4,937 \cdot 10^{-4} - 2,59 \cdot 10^{-5} \cdot t + 9,11 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 1,5 \cdot 10^{-8} \cdot t^3$$

$$P_1 = 1 \quad P_2 = 1 - 1,37 \cdot 10^{-4} \cdot d + 6,2 \cdot 10^{-9} \cdot d^2 \quad P_3 = 1 - 3,83 \cdot 10^{-5} \cdot d + 4,9 \cdot 10^{-10} \cdot d^2$$

$$f_1 = 2,8 \cdot \sqrt{\frac{S}{35}} \cdot 10^{\left(4 - \frac{1245}{t+273}\right)} \quad f_2 = \frac{8,17 \cdot 10^{\left(\frac{1990}{t+273}\right)}}{1 + 0,0018 \cdot (S - 35)}$$

Ecuación 13. Detalle de las componentes del índice de atenuación

Para el caso de la velocidad del sonido en el medio, ecuación 14 extraída de [4], existe dependencia con la temperatura, la salinidad y la profundidad.

$$c = 1412 + 3,21 \cdot T + 1,19 \cdot S + 0,0167 \cdot D$$

Ecuación 14. Velocidad del medio en función de la temperatura (T), salinidad (S) y profundidad (D) expresados en grados Celsius, ‰ y m respectivamente.

De la ecuación 14 realizamos la propagación de errores y hallamos que la contribución de la incertidumbre de la velocidad del medio es:

$$u^2(c) = 3,21^2 \cdot u^2(T) + 1,19^2 \cdot u^2(S) + 0,0167^2 \cdot u^2(D)$$

Ecuación 15. Contribución a la incertidumbre de la velocidad del sonido en el medio

Al calibrar un hidrófono en el laboratorio, se aporta una gran precisión de la medición de la distancia así como una incertidumbre muy pequeña. En el caso que presentamos, la metodología del cálculo de la distancia entre el receptor y emisor se realiza mediante el posicionamiento por coordenadas aportado por GPS. Actualmente, el error asociado a estas mediciones es elevado aunque mediante el uso de estaciones diferenciales el error pasa a ser del orden de milímetros, así como su incertidumbre. Este es el caso elegido. Así mismo para el cálculo de la distancia entre coordenadas, que están situadas sobre un elipsoide de revolución, habitualmente el WGS84 se utiliza métodos de cálculo específicos [5]. El cálculo de la incertidumbre asociada a la medición y cálculo de distancias será motivo de otro artículo debido a su complejidad. Por ello dejamos esta incógnita como $u(r)$.

El término de $u(C)$ se debe extraer en función de la sistemática de la generación del ruido, por ello es conveniente realizar un estudio previo con el generador, para determinar el valor de la incertidumbre asociada a C. Cabe destacar que C no posee unidades, simplemente es el factor que nos indica como se propaga la onda por el medio. La incertidumbre asociada a este factor dependerá en gran parte de la precisión e incertidumbre que se obtenga del posicionamiento.

Los valores de $u(T)$, $u(S)$ y $u(P)$ dependerán de los instrumentos y métodos empleados. Sí que es cierto que estos valores varían en función de la latitud y la profundidad, ver figura 3, pero en nuestro caso planteamos un estudio en aguas poco profundas. Este hecho nos da validez en la hipótesis que no existe el gradiente de estas magnitudes. Aún así si consideramos un estudio para aguas profundas se debe tener en cuenta este gradiente. Podemos afirmar que la suma de estas distribuciones de probabilidad, habitualmente no normales, dan como resultado una normal. Este hecho es lo que presenta el teorema del límite central. Por ello, concluimos que la aportación de la incertidumbre de la densidad seguirá una distribución normal.

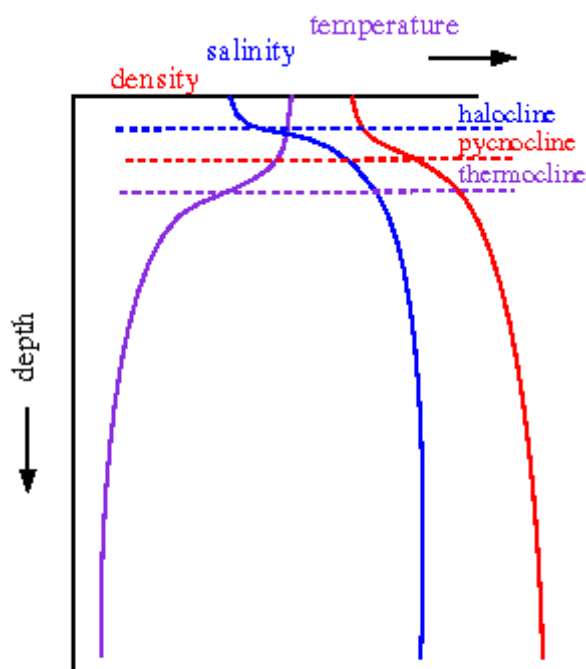


Figura 3. Variación de T, S y ρ en diferentes latitudes y profundidades

4. CONCLUSIONES

Se ha detallado la ecuación del cálculo para la sensibilidad de un hidrófono. Se han hallado las contribuciones a la incertidumbre en el proceso. A continuación se detalla, en la tabla 1, la descripción de cada término, así como la asignación de su distribución de probabilidad asociada.

Descripción	Acrónimo	Distribución probabilidad
Tensión	$u(V)$	Triangular
Presión del patrón	$u(P_0)$	Normal-Triangular
Velocidad del sonido en el medio	$u(c)$	Normal
Índice de atenuación del medio	$u(\alpha)$	Normal
Distancia	$u(r)$	----
C	$u(C)$	Normal

Tabla 1. Descripción de los términos

El estudio del cálculo de de la incertidumbre teniendo en cuenta todos los parámetros se ha llevado a cabo a lo largo de este artículo. Otras líneas de investigación para desarrollar en su totalidad son el cálculo de la incertidumbre asociada a la localización de las coordenadas por GPS y la implantación de los cálculos en casos reales.

5. REFERENCIAS

- [1] F. H. Fisher and V. P. Simmons “*Sound absorption in sea water*” J. Acoust. Soc. Am., Vol. 72, No. 6, December 1982
- [2] N. P. Fofonoff and A.C. Millard Jr. “*Algorithms for computation of fundamental properties of seawater*” Unesco/SCOR/ICES/IAPSO Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards and SCOR Working Group 51.
- [3]. “*Evaluation of measurement data-Guide to expression of uncertainty in measurement*”, September 2008
- [4] R.E. Francois and G. R. Garrison “*Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption*” J. Acoust. Soc. Am. Vol. 72, N.6, December 1982
- [5] T.Vicenty “*Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations*” Survey Review XXII,176, April 1975

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado con el apoyo del Ministerio Español de Economía y competitividad bajo el proyecto de investigación: “Sistemas Inalambricos para la Extension de Observatorios Submarinos” (CTM2010-15459).