

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Estudio de la calibración de sensores acústicos por el método de reciprocidad para diferentes geometrías. Aplicación a la evolución temporal de la sensibilidad de los hidrófonos en instalaciones *in situ*.”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor:
Pablo Gómez Magenti

Tutor:
D. Juan Antonio Martínez Mora

Cotutores:
D. Ivan Felis Enguix
Dña. María Saldaña Coscollar

GANDIA, 2016

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor, Joan, que me recibiese y aconsejase cuando me encontraba inmerso en la búsqueda de un tema para la realización de mi Trabajo final de Grado. Recuerdo como en la primera reunión me mencionó diversas opciones, entre ellas, una propuesta de Trabajo final de Máster que no había sido seleccionada por ningún alumno del Máster en Ingeniería Acústica, que trataba sobre los distintos métodos de calibración que existían, y en concreto, sobre uno que podía aplicarse sobre transductores dispuestos en formas geométricas asimétricas. Tras la adaptación de los objetivos de dicha propuesta con el fin de llevar el nivel del trabajo desde el nivel correspondiente a un TFM hasta el nivel propio de un TFG, contaba con tres opciones por las que decantarme. Fueron un par de días de indecisión, pero finalmente elegí (acertadamente, viendo como se ha desarrollado el trabajo) realizar mi proyecto sobre los distintos métodos de calibración de transductores electroacústicos. Mi más sincero agradecimiento por haberme guiado en la realización de este trabajo.

También me gustaría mencionar a mis cotutores, Ivan y María, por haber estado disponibles y dispuestos a ayudar en todo momento.

Ivan, INFINITAS gracias (y perdón por haberte robado tanto tiempo).

Por último, me gustaría agradecer a mis padres el hecho de que se esfuercen diariamente en sus trabajos con el fin de poder proporcionar una buena educación, entre otras tantas cosas, a sus hijos.

RESUMEN

Este proyecto consiste en un estudio de los dos principales métodos empleados para calibrar transductores acústicos: el método de comparación directa y el método de reciprocidad. El primero presenta la desventaja de que requiere que al menos uno de los dos transductores empleados esté previamente calibrado, pero cuenta con la ventaja de que precisa de menor equipamiento y la toma de medidas es más simple. El método de reciprocidad necesita de tres transductores, pero ofrece la ventaja de que es posible realizar calibraciones sin la necesidad de tener ningún transductor de referencia. En las calibraciones realizadas habitualmente, en laboratorio, los transductores a calibrar son situados enfrentados entre sí al aplicar el método de comparación directa, y en los vértices de un triángulo equilátero al utilizar el método de reciprocidad. Existen, sin embargo, instalaciones de sensores como los telescopios submarinos de neutrinos ANTARES o KM3NeT, situadas a gran profundidad bajo el mar, donde debido a la difícil accesibilidad no es posible situar los transductores de acuerdo a la geometría de un triángulo equilátero. El método de reciprocidad también permite trabajar con geometrías asimétricas, y esta posibilidad, junto con la ventaja de no utilizar transductores de referencia, convierte a este método en el método de calibración más interesante para llevar a cabo calibraciones *in situ* en instalaciones o redes de sensores.

PALABRAS CLAVE

Calibración; Transductor; Hidrófono; Comparación directa; Reciprocidad.

ABSTRACT

This project consists of an analysis of the two main methods used to calibrate acoustic transducers: the comparison method and the reciprocity method. The first one has the advantage that the procedure to take the measurements is simple. Its disadvantage is that it's needed that at least one of the two transducers required is previously calibrated. On the other hand, the reciprocity method, which requires three transducers, has the advantage that allows to make calibrations having no calibrated transducer. Usually, calibrations are performed in laboratories, where the transducers are located opposite each other when applying the comparison method, and placed in an equilateral triangle geometry when applying the reciprocity method. However, sometimes it's needed to calibrate transducers belonging to submarine acoustic sensor networks like ANTARES and KM3NeT, located deep under the sea, and it's not possible to place them in the traditional symmetric geometries. Besides not requiring previously calibrated transducer, the reciprocity method also allows to work with asymmetric geometries, and that makes this method the most interesting one to calibrate transducers *in situ* on sensor networks.

KEYWORDS

Calibration; Transducer; Hydrophone; Comparison method; Reciprocity method.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	9
1.1. Etapas del trabajo y estructura de la memoria	10
2. BASE TEÓRICA	12
2.1. Características de los hidrófonos	12
2.1.1. Sensibilidad	12
2.1.2. Directividad.....	13
2.2. Métodos de calibración de hidrófonos.....	14
2.2.1. Comparación directa.....	14
2.2.2. Reciprocidad	17
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL EMPLEADA	18
3.1. Equipamiento utilizado en los montajes experimentales.....	18
3.2. Comparación directa	22
3.3. Reciprocidad	23
3.3.1. Configuración Conf1	24
3.3.2. Configuración Conf2.....	24
3.3.3. Configuración Conf3.....	25
3.4. Reciprocidad sobre geometrías asimétricas.....	26
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LAS MEDIDAS EXPERIMENTALES	30
4.1. Scripts análisis	30
4.1.1. Comparacion_directa.m.....	31
4.1.2. Reciprocidad.m	34
4.1.3. Reciprocidad_sobre_geometrías_asimétricas.m	36
4.2. Resultados medidas experimentales	38
4.2.1. Resultados método comparación directa	38
4.2.2. Resultados método reciprocidad.....	43
4.2.3. Resultados método reciprocidad sobre geometrías asimétricas	45
5. CONCLUSIONES.....	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Telescopio de neutrinos KM3NeT.....	9
Figura 2. Hidrófono siendo sumergido en el mar.....	12
Figura 3. Patrones polares (izq. a der.): omnidireccional, bidireccional.....	13
Figura 4. Patrones polares (izq. a der.): cardioide, supercardioide, hipercardioide.....	14
Figura 5. Esquema montaje calibración hidrófonos emisores.....	15
Figura 6. Esquema montaje calibración hidrófonos receptores.....	16
Figura 7. Esquema posiciones de los hidrófonos en base a su función; Tensiones a medir.....	17
Figura 8. Plataforma PXI, modelo NI PXI-1031DC.....	18
Figura 9. Tarjeta NI PXI-ExpressCard8360.....	19
Figura 10. Amplificador de potencia 2100 RF.....	19
Figura 11. Base metálica triángulo equilátero 30 cm.....	19
Figura 12. Sonda atenuadora x100.....	19
Figura 13. Transductor SX30FR.....	20
Figura 14. Transductor SX60FR.....	20
Figura 15. Transductor ITC-1032.....	20
Figura 16. Transductor TC4034.....	20
Figura 17. Tanque del laboratorio D-203 de la EPSG.....	21
Figura 18. Piscina del Puerto de Gandía con ejes motorizados.....	21
Figura 19. Diagrama de bloques del montaje y conexionado en el método de comparación directa...	22
Figura 20. Montaje experimental comparación directa: Medida ITC-1032 --}} TC4034_01.....	23
Figura 21. Montaje experimental comparación directa: Medida SX60FR --}} TC4034_01.....	23
Figura 22. Diagrama de bloques del montaje y conexionado en el método de reciprocidad - Conf1 ..	24
Figura 23. Diagrama de bloques del montaje y conexionado en el método de reciprocidad - Conf2 ..	25
Figura 24. Diagrama de bloques del montaje y conexionado en el método de reciprocidad - Conf3 ..	25
Figura 25. Posiciones de los hidrófonos en las medidas del método de reciprocidad.....	26
Figura 26. Ejes motorizados de la piscina del Puerto de Gandía.....	27
Figura 27. Aplicación de control de los ejes motorizados de la piscina del Puerto de Gandía.....	27
Figura 28. Posiciones de los hidrófonos en las medidas, reciprocidad sobre geometrías asimétricas..	28
Figura 29. Montaje experimental reciprocidad sobre geometrías asimétricas: Triángulo escaleno.....	28
Figura 30. Montaje experimental reciprocidad sobre geometrías asimétricas: Distintos planos.1.....	29
Figura 31. Montaje experimental reciprocidad sobre geometrías asimétricas: Distintos planos.2.....	29
Figura 32. Ejemplo archivo con los datos de las medidas.....	30
Figura 33. Ejemplo representación voltaje emitido. Medida TC4034_02 --}} SX60FR.....	32
Figura 34. Ajuste de las medidas para una distancia determinada.....	36
Figura 35. Curvas RVR obtenidas para el hidrófono SX60FR mediante comparación directa.....	39
Figura 36. Curvas TVR obtenidas para el hidrófono SX60FR mediante comparación directa.....	39
Figura 37. Curvas RVR obtenidas para el hidrófono ITC-1032 mediante comparación directa.....	40
Figura 38. Curvas TVR obtenidas para el hidrófono ITC-1032 mediante comparación directa.....	40
Figura 39. Curvas RVR obtenidas para el hidrófono TC4034-01 mediante comparación directa.....	41
Figura 40. Curvas TVR obtenidas para el hidrófono TC4034-01 mediante comparación directa.....	41
Figura 41. Curvas RVR obtenidas para el hidrófono TC4034-02 mediante comparación directa.....	42
Figura 42. Curvas TVR obtenidas para el hidrófono TC4034-02 mediante comparación directa.....	42
Figura 43. Curva RVR obtenida para el hidrófono SX30FR mediante reciprocidad.....	43
Figura 44. Curvas RVR obtenidas para el hidrófono SX60FR mediante reciprocidad.....	44
Figura 45. Curva RVR obtenida para el hidrófono TC4034_01 mediante reciprocidad.....	44
Figura 46. Curvas RVR obtenidas para el hidrófono SX60FR mediante reciprocidad sobre geometrías asimétricas.....	45

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los transductores electroacústicos tienen como función la conversión de energía eléctrica en energía acústica o viceversa. El transductor que ocupa este estudio es el hidrófono, un tipo de transductor capaz de captar las variaciones de presión en el agua, basado en el principio del transductor piezoeléctrico, con la posibilidad de transformar una determinada amplitud de presión acústica en una determinada tensión eléctrica entre sus terminales.

Los hidrófonos son empleados en diversos campos de la investigación científica, como por ejemplo la Acústica Submarina, así como de forma industrial, por lo que es necesario conocer su comportamiento y su respuesta ante diversas situaciones con gran precisión. Para conseguir este objetivo, es recomendable calibrar los hidrófonos regularmente.

La calibración de un hidrófono consiste en determinar la tensión de salida que genera en función de una determinada presión acústica recibida.

Para llevar a cabo la calibración existen dos métodos principales: el método de comparación directa y el método de reciprocidad. El primero presenta la desventaja de que requiere de al menos un transductor de referencia previamente calibrado; pero por otro lado, necesita de un menor equipamiento y la toma de medidas es más simple, ya que únicamente son necesarios dos transductores para aplicarlo (el transductor de referencia y el transductor a calibrar). El método de reciprocidad requiere de tres transductores y mayor complejidad de montaje, pero tiene la ventaja de que es posible realizar calibraciones sin la necesidad de tener ningún transductor de referencia.

En las calibraciones realizadas en laboratorio: al utilizar el método de comparación directa, los hidrófonos se sitúan enfrentados entre sí; y al aplicar el método de reciprocidad, se sitúan en los vértices de un triángulo equilátero.

Existen, sin embargo, algunas instalaciones de sensores de difícil acceso, como pueden ser los telescopios submarinos de neutrinos ANTARES o KM3NeT, situados en una red de sensores acústicos y ópticos a grandes profundidades bajo el mar. En este tipo de detectores los hidrófonos se sitúan en diferentes plantas a lo largo de líneas verticales ancladas al fondo marino. Estas líneas, además, se mueven por el efecto de las corrientes marinas. Una vez realizada la instalación de los transductores, con el paso del tiempo y el uso habitual, es posible que las características de los mismos varíen. Llevar a cabo la calibración de los transductores *in situ* resulta complicado, debido a la difícil accesibilidad, y a que la geometría en que son situados los transductores, generalmente, no es una geometría en forma de triángulo equilátero.

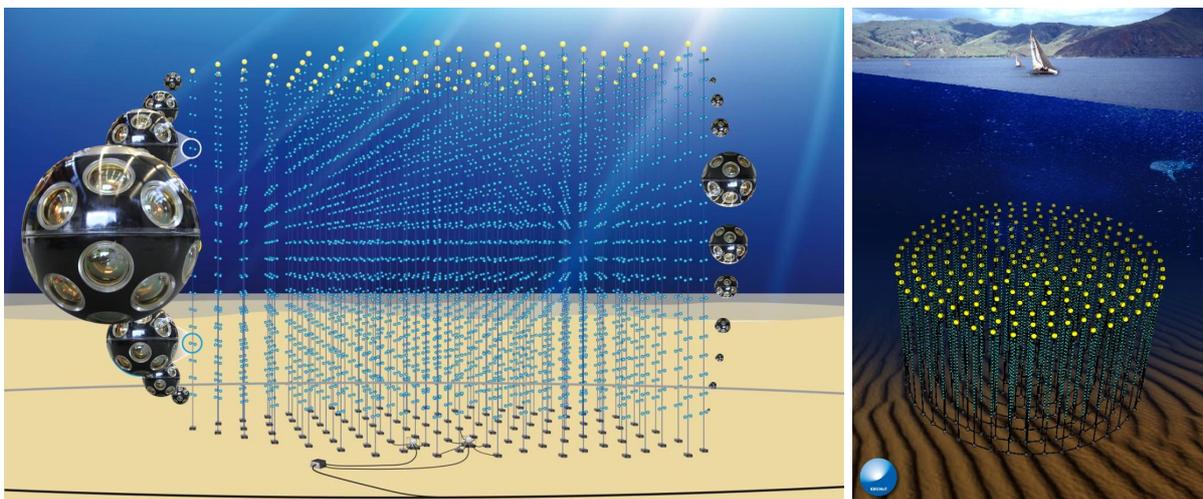


Figura 1. Telescopio de neutrinos KM3NeT

El método de reciprocidad permite la posibilidad de trabajar con geometrías asimétricas, y es esta posibilidad, junto con la ventaja de no utilizar transductores de referencia, lo que convierte a este método en el método de calibración más interesante para llevar a cabo calibraciones *in situ* en instalaciones o redes de sensores.

Los **objetivos principales** de este estudio son: en primer lugar, explicar la base de funcionamiento de los dos principales métodos de calibración de transductores acústicos; y en segundo, realizar una serie de medidas experimentales con las que demostrar la validez y la utilidad de estos dos métodos. Para cumplir con este segundo punto, además, será necesario desarrollar una serie de scripts para MATLAB con los que analizar las medidas.

Como **objetivos secundarios** destacan: primero, la explicación de las diferencias que existen entre el método de reciprocidad y el método de reciprocidad sobre geometrías asimétricas, y como variará la toma y el análisis de las medidas. También, la realización de una serie de medidas experimentales, posteriormente analizadas mediante otro script desarrollado para el software MATLAB. Otro objetivo secundario es sentar las bases de futuros estudios en los que los autores, tomando como base las explicaciones y el trabajo realizado en este proyecto, puedan acudir directamente a trabajar el método de reciprocidad sobre geometrías asimétricas.

1.1. Etapas del trabajo y estructura de la memoria

Tras la definición de los objetivos, el **proceso seguido** para la realización de este proyecto ha sido el siguiente:

- Estudio de las diferentes referencias bibliográficas proporcionadas por el tutor y los cotutores.
- Afianzamiento de los conocimientos relativos a los distintos métodos de calibración por medio de diversas tutorías.
- Introducción al equipamiento a utilizar en el laboratorio y a las metodologías experimentales a emplear.
- Toma de medidas experimentales de prueba, variando diversos parámetros, con el fin de afianzar el proceso de toma de medidas.
- Toma de medidas por medio del método de comparación directa, y desarrollo del script a utilizar para analizar dichas medidas. Análisis de las medidas.
- Toma de medidas por medio del método de reciprocidad, y desarrollo del script a utilizar para analizar dichas medidas. Análisis de las medidas.
- Introducción al equipamiento a utilizar en el Puerto de Gandía (piscina con ejes motorizados).
- Toma de medidas por medio del método de reciprocidad aplicado sobre tres geometrías asimétricas, y desarrollo del script a utilizar para analizar dichas medidas. Análisis de las medidas.
- Redacción de la memoria.

La **estructura** que da forma a la memoria de este trabajo es la siguiente:

- Capítulo 1: Introducción y objetivos. Se realiza una introducción sobre el tema de estudio y se explica qué objetivos se persiguen. Además, se explican las etapas seguidas al realizar el proyecto.
- Capítulo 2: Base teórica. Primero, se lleva a cabo un breve repaso de los conceptos más destacados en lo relativo a hidrófonos. A continuación, se explica el fundamento teórico de los dos principales métodos para llevar a cabo la calibración de transductores acústicos, así como el proceso que se debe seguir en cada uno de ellos.

- Capítulo 3: Metodología experimental empleada. Se explicita la metodología utilizada durante la toma de las medidas experimentales, así como todo el equipamiento utilizado.
- Capítulo 4: Análisis y resultados de las medidas experimentales. En primer lugar, es explicado el proceso de análisis de los resultados de las medidas experimentales, trabajando sobre la base de los scripts desarrollados. A continuación, son mostrados los resultados obtenidos y se realiza un breve análisis mencionando los aspectos más destacados.
- Capítulo 5: Conclusiones. Se exponen las conclusiones a las que se ha llegado tras la realización de este proyecto. Primero, en lo relativo a los resultados obtenidos; y a continuación, sobre la experiencia personal del autor y la consecución de los objetivos propuestos por el tutor al inicio del proyecto.
- Referencias bibliográficas. Se detallan los libros, páginas web y documentos consultados durante la realización del proyecto.
- Anexos. Se incluyen las hojas de especificaciones de los fabricantes, así como los scripts desarrollados.

2. BASE TEÓRICA

2.1. Características de los hidrófonos

Los hidrófonos son un tipo de transductor que tienen como función captar las variaciones de presión en el agua, que se basan en el principio del transductor piezoeléctrico; es decir, son capaces de transformar una determinada presión acústica en una determinada tensión eléctrica.



Figura 2. Hidrófono siendo sumergido en el mar

Las características más importantes a analizar a la hora de seleccionar un hidrófono para la aplicación que ocupa este trabajo son: la sensibilidad y la directividad.

2.1.1. Sensibilidad

Receiving Voltage Response (RVR)

Este parámetro, denominado también sensibilidad en recepción, es uno de los más importantes a tener en cuenta a la hora de utilizar un determinado sensor acústico ([7]). Sirve para expresar la tensión de salida generada a partir de la recepción de una determinada presión sobre la cerámica piezoeléctrica.

Se define como el cociente entre la tensión en el transductor cuando está en circuito abierto y la presión acústica que incide sobre él en campo libre ([8]).

$$RVR = \left| \frac{V}{p} \right| \left[\frac{V}{Pa} \right]$$

Sus unidades son V/Pa , aunque habitualmente suele expresarse: mV/Pa ; $V/\mu bar$; y también en unidades logarítmicas (dB). En caso de expresar este parámetro en decibelios, es necesario tomar una sensibilidad de referencia. En este estudio se van a expresar los resultados en dB , tomando como sensibilidad de referencia $V/\mu Pa$: $dB \text{ re } V/\mu Pa$. ([6], p.417)

Al trabajar con estas unidades, los valores de sensibilidad van a ser negativos, y cuanto menos negativos sean dichos valores (más próximos a cero), más sensible va a ser el determinado hidrófono. Es decir, ante una misma presión incidente, proporcionará una mayor tensión de salida.

Este parámetro, comúnmente denominado como “Receiving Sensitivity”, será llamado durante esta memoria o bien “sensibilidad en recepción” o simplemente “RVR”.

Transmitting Voltage Response (TVR)

La sensibilidad en emisión ([6], p.398), sirve para expresar la presión que se puede generar en el medio a 1 metro de distancia y en condiciones de campo libre, a partir de una determinada tensión de entrada en el transductor emisor.

$$TVR = \left| \frac{p}{V} \right| \left[\frac{Pa}{V} \right]$$

Estos valores de sensibilidad van a ser positivos, y cuanto más altos, más sensible va a ser el determinado hidrófono. Es decir, ante una misma tensión eléctrica, producirá una mayor presión acústica.

En este estudio se va a expresar este parámetro en *dB*, tomando como sensibilidad de referencia $\mu Pa/V$: *dB re $\mu Pa/V$* .

Este parámetro, comúnmente denominado como “Transmitting Sensitivity”, será llamado durante esta memoria o bien “sensibilidad en emisión” o simplemente “TVR”.

Los fabricantes de transductores, dada la limitación que produce el rango de frecuencias utilizables, proporcionan la sensibilidad únicamente para un pequeño y determinado rango de frecuencias. Por el contrario, en este trabajo, obtendremos el RVR y TVR de los hidrófonos en estudio en el mismo rango frecuencial: 30 kHz a 250 kHz.

2.1.2. Directividad

La directividad, determinada por los diagramas polares (horizontal y vertical), es otro parámetro fundamental a caracterizar, pues define cual es la respuesta de un hidrófono ante ondas de presión que provienen de distintas direcciones.

Gracias a esto, es posible situar el hidrófono de trabajo de forma que se maximice la captación de la fuente sonora deseada, y al mismo tiempo, se minimicen las realimentaciones y las fuentes sonoras no deseadas. En lo referido a directividad, existen tres tipos fundamentales de hidrófonos:

- **Omnidireccional.** Su diagrama polar es una circunferencia y tienen una cobertura de 360°; es decir, captan igualmente las ondas acústicas provenientes de todas las direcciones, por lo que tienen como inconveniente que son más susceptibles a realimentaciones.

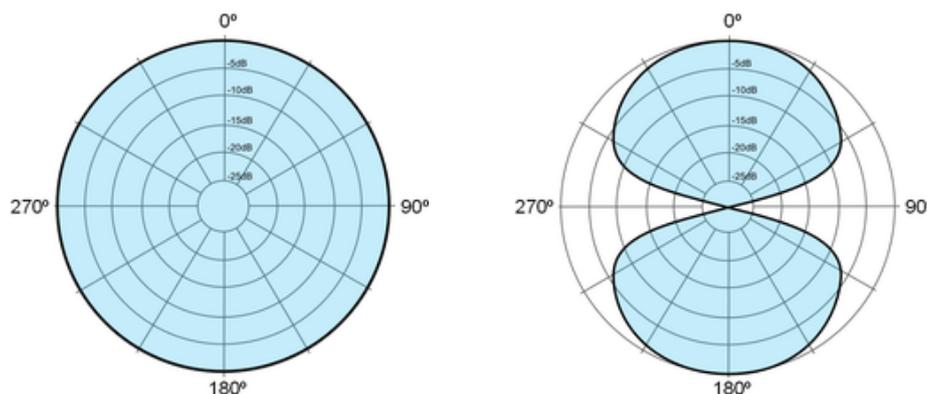


Figura 3. Patrones polares (izq. a der.): omnidireccional, bidireccional

- **Bidireccional.** Tienen una cobertura de 90° en ambos ejes y son sensibles a las radiaciones sonoras provenientes de ángulos opuestos; es decir, su máxima sensibilidad se encuentra en los ángulos 0° y 180° , y su máximo rechazo en los ángulos 90° y 270° . Este tipo de hidrófono es recomendable para captar fuentes sonoras enfrentadas cara a cara, ya que el resto de radiaciones provenientes de otros ángulos serán rechazadas.

- **Unidireccional.** Los transductores unidireccionales son aquellos más sensibles a las ondas sonoras provenientes de una dirección determinada. Por tanto, su máxima sensibilidad se encuentra en 0° . Existen varios tipos:

- **Cardioide.** Tienen una cobertura de 130° y ofrecen un buen rechazo a realimentaciones.
- **Supercardioide.** Tienen una cobertura de 115° y, mientras ofrecen un gran rechazo lateral, son sensibles a las radiaciones provenientes de la parte trasera del transductor.
- **Hipercardioide.** Tienen una cobertura de 110° y rechazan muy bien las radiaciones laterales. En lo relativo a la captación desde la parte trasera, prácticamente se comportan como transductores bidireccionales.

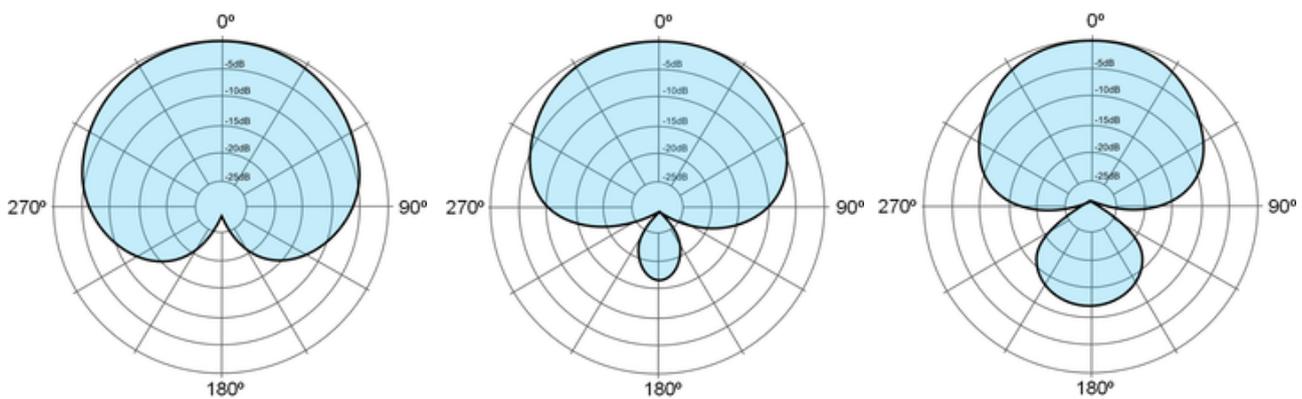


Figura 4. Patrones polares (izq. a der.): cardioide, supercardioide, hipercardioide

Los hidrófonos empleados en este estudio son hidrófonos omnidireccionales.

2.2. Métodos de calibración de hidrófonos

La calibración de un hidrófono consiste en determinar la tensión de salida que genera en función de una determinada presión acústica recibida. Por tanto, el parámetro utilizado para llevar a cabo una calibración es la sensibilidad, que tal y como se ha mencionado en el punto [2.1.1.](#), es uno de los parámetros más importantes a la hora de seleccionar un hidrófono de trabajo.

Existen dos métodos principales de calibración de hidrófonos: el método de comparación directa y el método de reciprocidad, explicados a continuación.

2.2.1. Comparación directa

En este método es estudiada la respuesta, por ejemplo en recepción, del hidrófono a calibrar en función de la respuesta, en emisión, y conocida, de un hidrófono de referencia. Durante la calibración es necesario mantener ambos hidrófonos correctamente alineados y realizar las mediciones en buenas condiciones; ya que pequeñas variaciones, como por ejemplo en la distancia, podrían producir reflexiones y realimentaciones que condujesen a un mal calibrado. ([1])([6], p.428)

2.2.1.1. Calibración de hidrófonos emisores

La fórmula de la sensibilidad en emisión de un hidrófono relaciona la presión (medida a 1 metro de la fuente) cuando es alimentado con una tensión V_{in} , expresando el resultado en decibelios dB re $\mu Pa/V$, para diferentes frecuencias:

$$TVR(f) = 20 \cdot \log\left(\frac{P_{1m}}{V_{in}}\right) \left[dB \text{ re } \frac{\mu Pa}{V} \right]$$

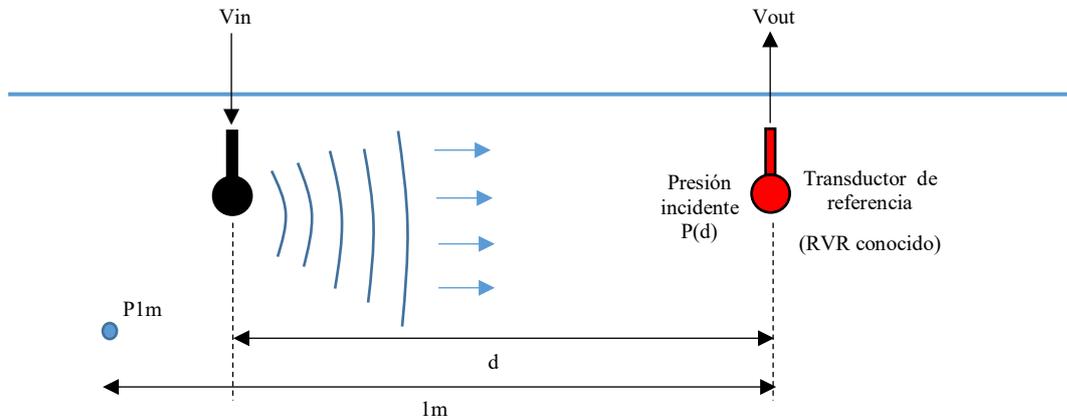


Figura 5. Esquema montaje calibración hidrófonos emisores

El proceso a seguir para calibrar hidrófonos emisores es:

- Se envía una señal sinusoidal de frecuencia f y duración dada (5 ciclos).
- Se registran las tensiones enviadas al emisor (V_{in}) y las tensiones que obtiene el receptor (transductor de referencia) (V_{out}).
- En base a los valores de sensibilidad en recepción del transductor de referencia (RVR_{ref}), se realizan una serie de operaciones con el fin de obtener la presión a una distancia de 1 metro del emisor.

$$RVR_{ref} = 20 \cdot \log\left(\frac{V_{out}}{P_{incidente}}\right) \rightarrow 10^{\frac{RVR_{ref}}{20}} = \frac{V_{out}}{P_{incidente}} \rightarrow P_{incidente}(d) = V_{out} \cdot 10^{-\frac{RVR_{ref}}{20}}$$

$$P(1m) = \frac{P_o}{1} = \frac{d \cdot P_{incidente}(d)}{1} = d \cdot V_{out} \cdot 10^{-\frac{RVR}{20}}$$

*Dada la pequeña longitud a la que se realizan las medidas experimentales en este estudio, es posible despreciar la atenuación.

$$P(r) = \frac{P_o}{r} \cdot e^{-\alpha \cdot r}$$

$$P_{incidente}(d) = \frac{P_o}{d} \rightarrow P_o = d \cdot P_{incidente}(d)$$

- Se calcula la sensibilidad en emisión:

$$TVR(f) = 20 \cdot \log\left(\frac{P_{1m}}{V_{in}}\right) \left[dB \text{ re } \frac{\mu Pa}{V} \right]$$

2.2.1.2. Calibración de hidrófonos receptores

La fórmula de la sensibilidad en recepción relaciona tensión y presión, tomando como unidades los dB re $V/\mu Pa$, para diferentes frecuencias:

$$RVR(f) = 20 \cdot \log \left(\frac{V_{out}}{P(d)} \right) \left[dB \text{ re } \frac{V}{\mu Pa} \right]$$

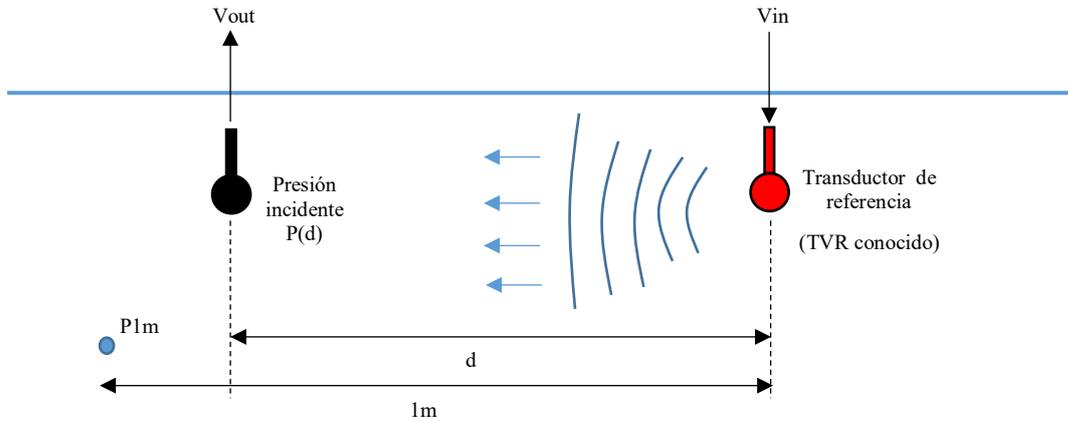


Figura 6. Esquema montaje calibración hidrófonos receptores

El proceso a seguir para calibrar hidrófonos receptores es:

- Se envía (por el transductor de referencia) una señal sinusoidal de frecuencia f y duración dada (5 ciclos).
- Se registran las tensiones enviadas al emisor (transductor de referencia) (V_{in}) y las tensiones obtenidas por el receptor (V_{out}).
- En base a los valores de sensibilidad en emisión del transductor de referencia (TVR_{ref}), se realizan una serie de operaciones con el fin de obtener la presión a la distancia d medida.

$$TVR_{ref} = 20 \cdot \log \left(\frac{P_{1m}}{V_{in}} \right) \rightarrow P_{1m} = V_{in} \cdot 10^{\frac{TVR_{ref}}{20}}$$

$$P(d) = \frac{P_o}{d} = \frac{P_{1m}}{d} \rightarrow P(d) = \frac{V_{in}}{d} \cdot 10^{\frac{TVR_{ref}}{20}}$$

- Se calcula la sensibilidad en recepción:

$$RVR(f) = 20 \cdot \log \left(\frac{V_{out}}{P(d)} \right) \left[dB \text{ re } \frac{V}{\mu Pa} \right]$$

2.2.2. Reciprocidad

En este método son requeridos tres transductores y no es necesario que ninguno de ellos sea calibrado previamente; es decir, no es necesario conocer las curvas fundamentales RVR y TVR ([6], p.429). Los transductores son distribuidos en tres posiciones, y en función de la posición ocupada, cada transductor desarrolla una función u otra. Las funciones posibles son: T (transmisor); R (reversible); y H (hidrófono).

En la siguiente figura es posible observar un esquema con las posiciones en que se distribuyen los hidrófonos, así como las tensiones a obtener en cada una de las configuraciones.

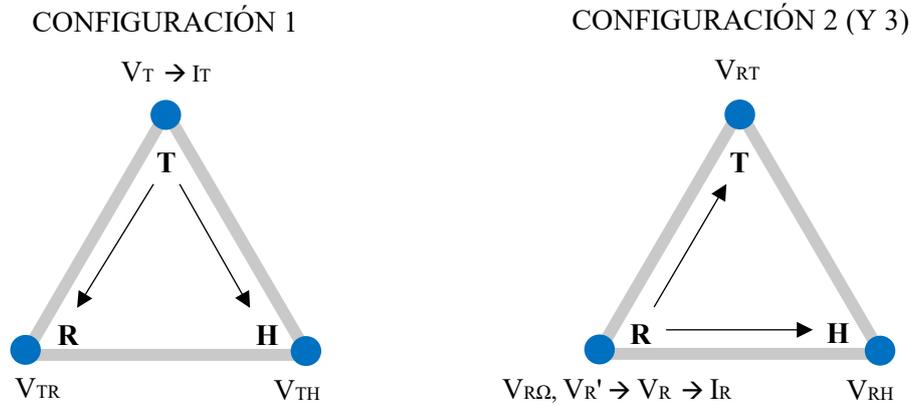


Figura 7. Esquema posiciones de los hidrófonos en base a su función; Tensiones a medir

A continuación, se explicitan las tensiones y corrientes que es necesario obtener para poder calcular la sensibilidad del hidrófono que cumple la función de “hidrófono H”:

- En primer lugar, tal y como indica el esquema relativo a la configuración 1, son obtenidas las tensiones V_{TR} y V_{TH} .
- A continuación, de acuerdo al esquema de la configuración 2, son obtenidas las tensiones tanto en bornes de la resistencia utilizada como la resultante del circuito: $V_{R\Omega}$ y V_R' . Con estas tensiones será posible calcular la corriente I_R . (Ampliado en el apartado 3.3.2.).
- Por último, trabajando sobre la configuración 3, son obtenidas las tensiones V_{RH} y V_{RT} .

Una vez obtenidos los datos buscados, el objetivo es calcular la sensibilidad para cada una de las frecuencias de la serie. Para ello, se aplican las siguientes fórmulas:

$$S_H(f) = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot d}{\rho_0 \cdot c} \cdot \frac{V_{TH}(f) \cdot V_{RH}(f)}{V_{TR}(f) \cdot I_R(f)}} \left[\frac{V}{Pa} \right] \rightarrow S_H(f) = \sqrt{\frac{2 \cdot d}{\rho_0 \cdot f} \cdot \frac{V_{TH}(f) \cdot V_{RH}(f)}{V_{TR}(f) \cdot I_R(f)}} \left[\frac{V}{Pa} \right]$$

$$c = \lambda \cdot f \rightarrow \frac{\lambda}{c} = \frac{1}{f}$$

$$RVR(f) = 20 \cdot \log \left(S_H(f) \left[\frac{V}{\mu Pa} \right] \right) \left[dB re \frac{V}{\mu Pa} \right]$$

Donde: $\lambda \rightarrow$ longitud de onda; $d \rightarrow$ distancia; $c \rightarrow$ velocidad del sonido; $\rho_0 \rightarrow$ densidad del medio.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL EMPLEADA

Las medidas experimentales han sido llevadas a cabo en dos escenarios. En el primero de ellos, un tanque de dimensiones 1.2 m x 0.8 m x 0.6 m en el laboratorio D-203 de la Escuela Politécnica Superior de Gandía, se han aplicado los métodos de comparación directa y reciprocidad. En el segundo escenario, una piscina de dimensiones 6.3 m x 3.6 m x 1.5 m en los tinglados del Puerto de Gandía, se ha aplicado de nuevo el método de reciprocidad, en esta ocasión con una mayor separación entre hidrófonos, y el método de reciprocidad sobre geometrías asimétricas.

Es necesario mencionar que durante todas las medidas llevadas a cabo en el laboratorio, la distancia entre transductores ha sido 30 cm; mientras que las llevadas a cabo en el Puerto tienen como distancia base 100 cm (aumentando la distancia al trabajar con geometrías asimétricas).

Antes de comenzar la explicación relativa al equipamiento y a las metodologías utilizadas para cada uno de los métodos de calibración, es necesario destacar la **nomenclatura utilizada para catalogar las series de medidas**:

“**Transductor_emisor --}} Transductor receptor**”, por ejemplo: ITC-1032 --}} TC4034_02.

3.1. Equipamiento utilizado en los montajes experimentales

El equipamiento utilizado para la toma de medidas ha incluido:

- Plataforma PXI de 4-7 ranuras de National Instruments, modelo NI PXI-1031DC, utilizada como fuente de alimentación y que permite usar tanto entradas en corriente continua como entradas en corriente alterna. Su función es enviar una serie de señales, determinadas por el software LabVIEW, por un canal X, y recibir otras señales por un canal Y.



Figura 8. Plataforma PXI, modelo NI PXI-1031DC

- Software LabVIEW, cuya función es seleccionar el tipo y la amplitud de la señal enviada por la plataforma PXI, y además, seleccionar el modo de almacenamiento de los datos recogidos.

- Ordenador portátil con capacidad para la tarjeta NI PXI-ExpressCard8360. Tiene como función el controlar la plataforma PXI.



Figura 9. Tarjeta NI PXI-ExpressCard8360

- Amplificador de potencia 2100 RF de E&I. Destacan las siguientes características:
 - Rango frecuencial: entre 10 kHz y 12 MHz.
 - Potencia de salida nominal: 100 W.
 - Ganancia: 50 ± 1.5 dB.



Figura 10. Amplificador de potencia 2100 RF

- Base metálica en forma de triángulo equilátero cuyo lado mide 30 cm.
- Sonda atenuadora x100, cuyo fin es atenuar la señal a la salida del amplificador para poder registrarla con la plataforma PXI.



Figura 11. Base metálica triángulo equilátero 30 cm



Figura 12. Sonda atenuadora x100

- Transductor SX30FR. Transductor FFR (Free Flooded Ring) con un patrón de radiación omnidireccional, cuya frecuencia de resonancia es 30 kHz. Su eficiencia mínima es del 50% y su funcionalidad es independiente de la profundidad a la que se esté trabajando.

- Transductor SX60FR. Al igual que el hidrófono anterior, perteneciente a la misma familia, se trata de un transductor FFR cuya funcionalidad es independiente de la profundidad a la que se esté trabajando, y cuya eficiencia mínima es del 50%. Su frecuencia de resonancia es 60 kHz y cuenta con un patrón de radiación omnidireccional.



Figura 13. Transductor SX30FR



Figura 14. Transductor SX60FR

- Transductor ITC-1032. Transductor con geometría esférica, cuya frecuencia de resonancia es 33 kHz, y que cuenta con un patrón de radiación omnidireccional. Además, ofrece eficiencias superiores al 50% en respuesta de la señal. Está fabricado con cerámica Channelite-5400, un tipo de cerámica de titanato zirconato de plomo de alta resistencia. La máxima profundidad a la que mantendría su capacidad de trabajo es 1250 metros.

- Transductor TC4034 (TC4034_01 y TC4034_02). Transductor de banda ancha esférico con un patrón de radiación omnidireccional, preparado para trabajar sobre un rango de frecuencias muy amplio (1 Hz hasta 480 kHz), por lo que es ideal para realizar mediciones bajo el agua. La máxima profundidad a la que mantendría su capacidad de trabajo es 900 metros. El hidrófono está encapsulado en caucho nitrilo (NBR), un tipo especial de caucho que tiene como principal función el proporcionar resistencia ante las aguas dulce y salada, y también ante el aceite.



Figura 15. Transductor ITC-1032



Figura 16. Transductor TC4034

- Tanque del laboratorio. Tanque de agua utilizado para la toma de medidas, cuyas dimensiones son 1.2 m x 0.8 m x 0.6 m.

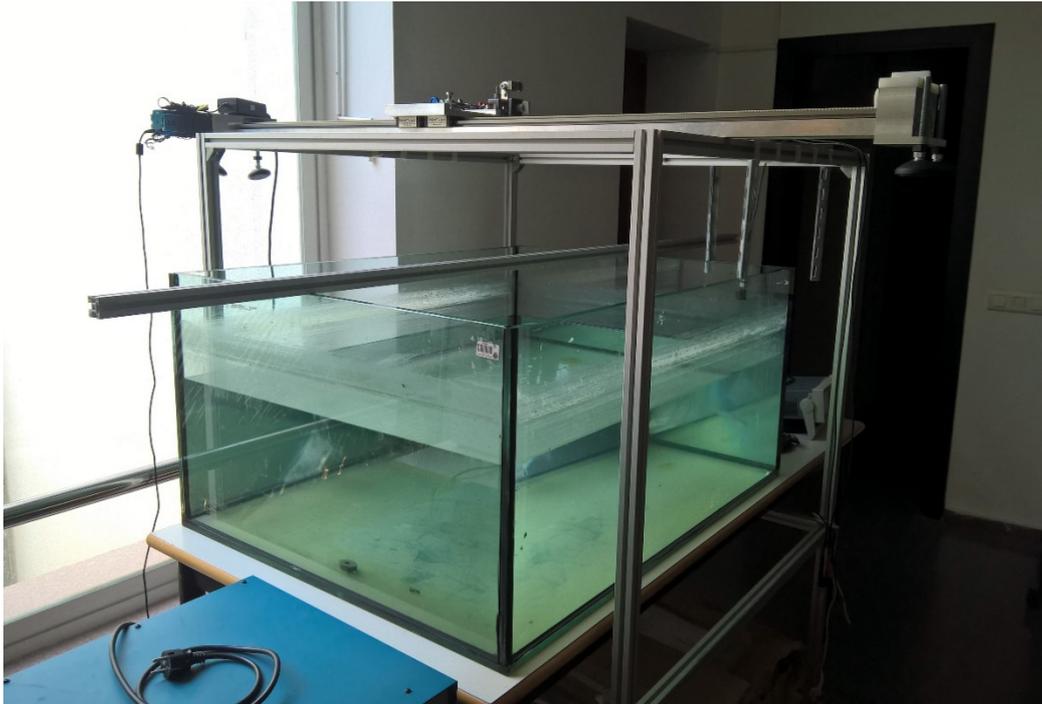


Figura 17. Tanque del laboratorio D-203 de la EPSG

- Piscina del Puerto de Gandía. Piscina utilizada para la toma de medidas, cuyas dimensiones son 6.3 m x 3.6 m x 1.5 m. Cuenta con unos ejes motorizados, con capacidad de movimiento en las tres dimensiones, que permiten situar los transductores en las posiciones deseadas con precisión milimétrica.



Figura 18. Piscina del Puerto de Gandía con ejes motorizados

3.2. Comparación directa

El procedimiento seguido para calibrar los transductores por medio del método de comparación directa es el siguiente:

- Por medio del ordenador (y su software LabVIEW), se le indica a la plataforma PXI qué tipo de señal debe enviar.
- La plataforma PXI envía dicho tipo de señal a la entrada del amplificador.
- Por un lado, una vez amplificada la señal de entrada, es transmitida al transductor que actúa como emisor de ondas sonoras. Por otro, mediante una sonda atenuadora x100, la señal es atenuada 100 veces y enviada al canal CH0 de la plataforma PXI.
- La onda de presión es captada por el transductor que actúa como receptor y, una vez convertida en tensión eléctrica, es transmitida al canal CH1 de la plataforma PXI.

De este modo y gracias al programa de LabVIEW utilizado, se generan una serie de ficheros de texto que cuentan con los datos de las amplitudes tanto de las señales enviadas como de las señales recibidas. (Ampliado en el apartado [4.1.](#))

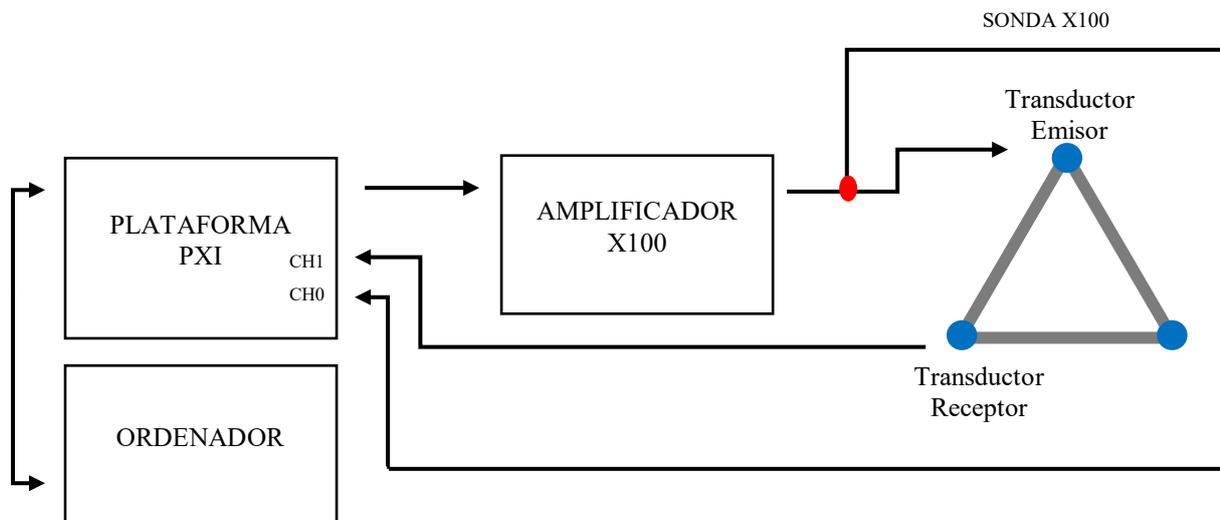


Figura 19. Diagrama de bloques del montaje y conexionado en el método de comparación directa

Siguiendo esta metodología, se han realizado diez mediciones utilizando cuatro de los hidrófonos arriba mencionados (SX60FR, ITC-1032, TC4034_01 y TC4034_02):

ITC-1032 --}} TC4034_02; ITC-1032 --}} SX60FR; ITC-1032 --}} TC4034_01;
 SX60FR --}} TC4034_02; SX60FR --}} ITC-1032; SX60FR --}} TC4034_01;
 TC4034_01 --}} ITC-1032; TC4034_01 --}} SX60FR;
 TC4034_02 --}} ITC-1032; TC4034_02 --}} SX60FR.

Los parámetros seleccionados para estas medidas han sido:

- Frecuencia inicial y frecuencia final: 30 kHz - 250 kHz.
- Amplitud de pico (antes de pasar por el amplificador): 400 mV.
- Frecuencia de muestreo: 2 MHz.
- Tiempo de captura: 1 ms.

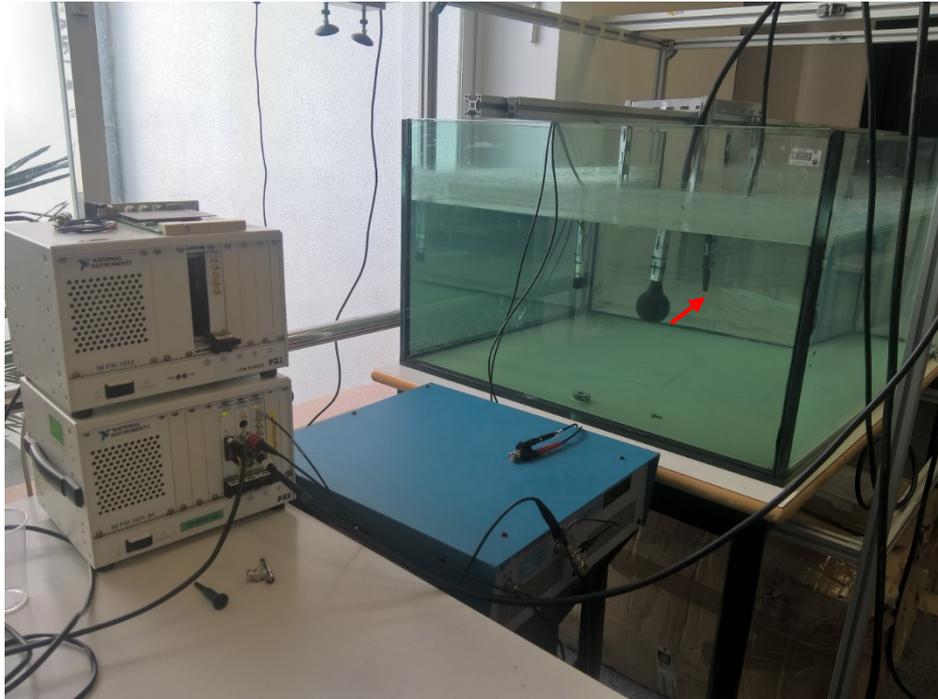


Figura 20. Montaje experimental comparación directa: Medida ITC-1032 --}} TC4034_01

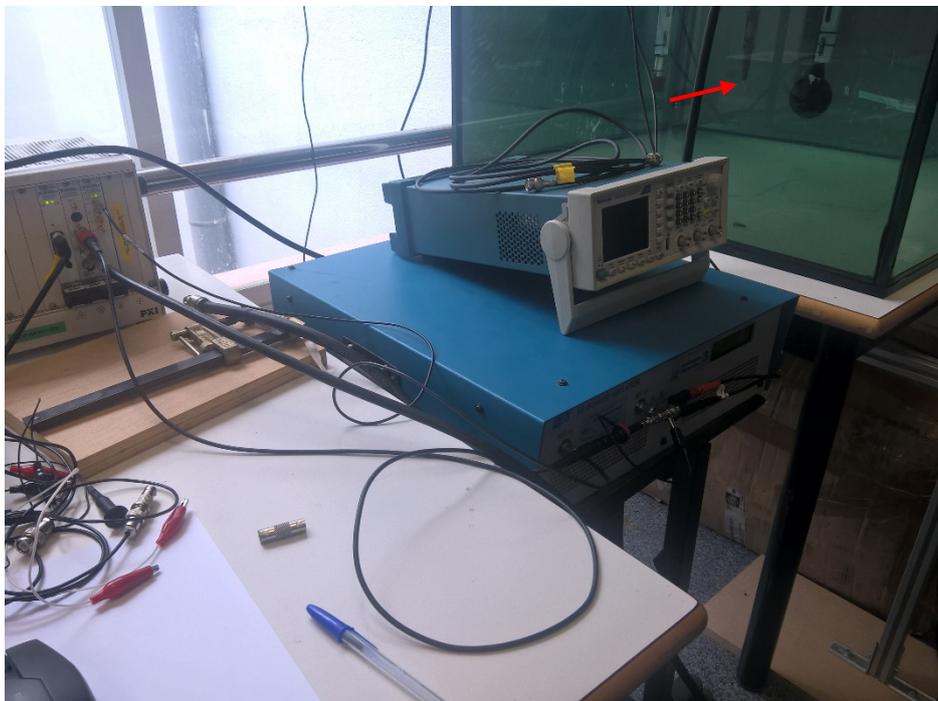


Figura 21. Montaje experimental comparación directa: Medida SX60FR --}} TC4034_01

3.3. Reciprocidad

Tal y como se ha mencionado anteriormente (2.2.2.), para aplicar el método de calibración por reciprocidad, es necesario distribuir los elementos en base a tres tipos de configuraciones (que denominaremos: Conf1, Conf2 y Conf3), y de esta forma es posible obtener el RVR de uno de los hidrófonos, concretamente del que ocupe la posición H (es decir, el que actúe como “hidrófono”).

Se realizan, por tanto, tres mediciones para obtener los datos necesarios para calibrar un único transductor.

3.3.1. Configuración Conf1

El procedimiento utilizado para esta configuración es similar al utilizado en el método de comparación directa; pero en esta ocasión, además de utilizar un tercer hidrófono, los datos almacenados son las señales recibidas por cada uno de los transductores que actúan como receptores (V_{TR} y V_{TH}). Así pues:

- En primer lugar, por medio del ordenador (y su software LabVIEW), se le indica a la plataforma PXI qué tipo de señal debe enviar.
- La plataforma PXI envía dicho tipo de señal a la entrada del amplificador.
- Una vez amplificada la señal de entrada, es transmitida al transductor que actúa como emisor.
- Por último, la onda de presión es captada por los dos transductores que actúan como receptores y, una vez convertida en tensión eléctrica, es transmitida a los canales CH0 y CH1 de la plataforma PXI.

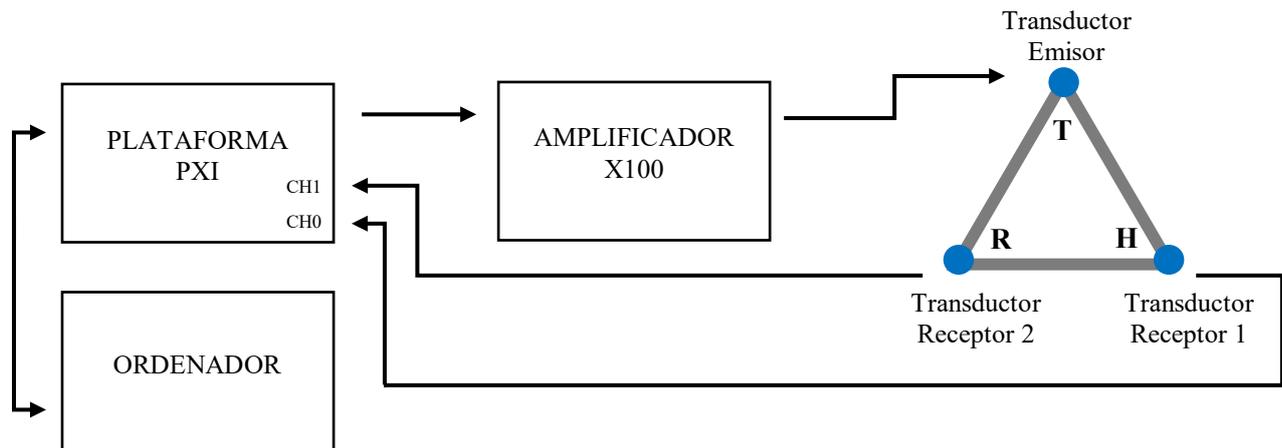


Figura 22. Diagrama de bloques del montaje y conexionado en el método de reciprocidad - Conf1

3.3.2. Configuración Conf2

El objetivo del montaje de esta configuración es obtener la tensión en bornes de la resistencia utilizada, para posteriormente poder calcular la corriente I_R . De esta forma será posible calcular la sensibilidad del hidrófono estudiado (H).

El problema es que al añadir una resistencia R de 1 k Ω al circuito, el voltaje total resultante es diferente. Por ello, se almacenan por separado tanto la tensión en bornes de la resistencia como la tensión resultante del circuito ($V_{R\Omega}$ y V'_R) para, posteriormente, en el análisis de las medidas, realizar la resta correspondiente.

Para ello, y siguiendo el diagrama mostrado en la siguiente figura, son utilizadas tanto una sonda atenuadora x100, como diversas pinzas de cocodrilo.

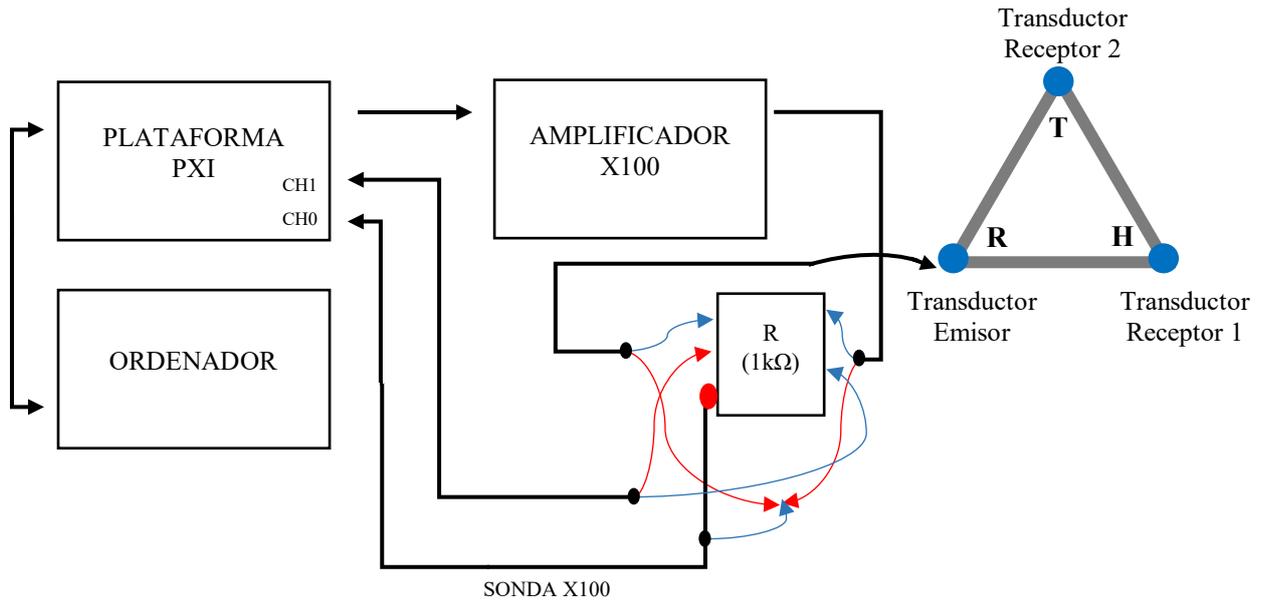


Figura 23. Diagrama de bloques del montaje y conexionado en el método de reciprocidad - Conf2

3.3.3. Configuración Conf3

El procedimiento utilizado para esta configuración es similar al utilizado para la configuración Conf1. En esta ocasión son almacenadas las tensiones V_{RH} y V_{RT} .

- En primer lugar, por medio del ordenador (y su software LabVIEW), se le indica a la plataforma PXI qué tipo de señal debe enviar.
- La plataforma PXI envía dicho tipo de señal a la entrada del amplificador.
- Una vez amplificada la señal de entrada, es transmitida, a través de la resistencia, al transductor que actúa como emisor.
- Por último, la onda de presión es captada por los dos transductores que actúan como receptores y, una vez convertida en tensión eléctrica, es transmitida a los canales CH0 y CH1 de la plataforma PXI.

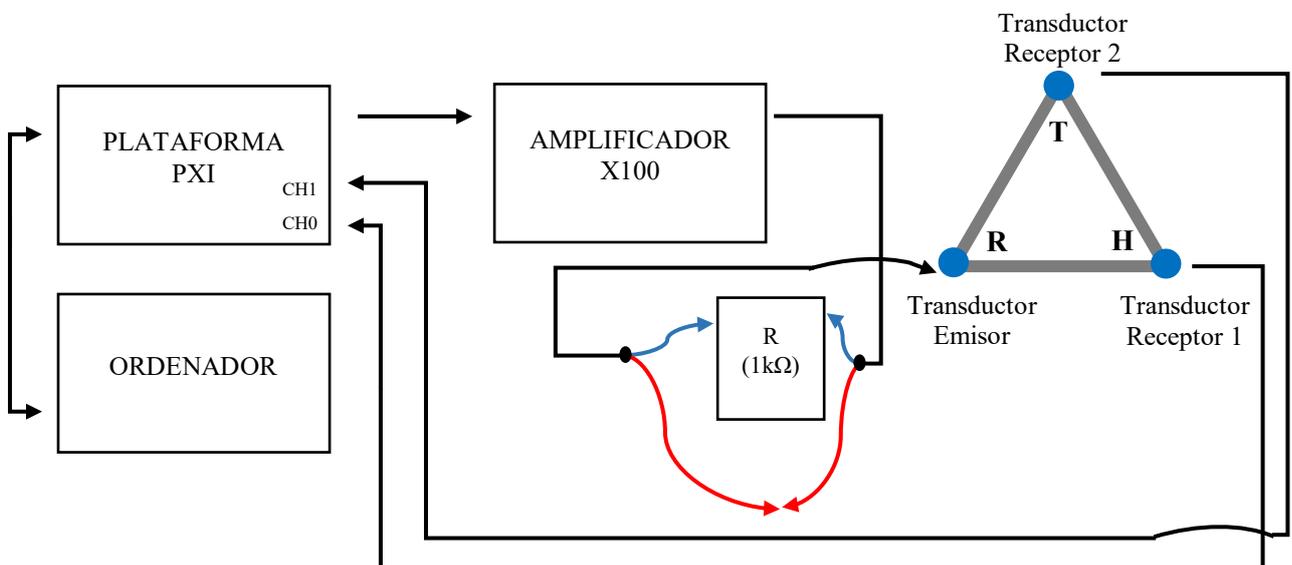


Figura 24. Diagrama de bloques del montaje y conexionado en el método de reciprocidad - Conf3

Esta metodología ha sido seguida en la toma de medidas en ambos escenarios.

En el primero de ellos, el tanque del laboratorio, se han realizado tres series de mediciones con el fin de calibrar los tres hidrófonos con características más adecuadas para este tipo de medidas, que son: SX30FR, SX60FR y TC4034_01.

Los parámetros seleccionados para estas medidas han sido:

- Frecuencia inicial y frecuencia final: 30 kHz - 250 kHz.
- Amplitud de pico (antes de pasar por el amplificador): 400 mV.
- Frecuencia de muestreo: 2 MHz.
- Tiempo de captura: 1 ms.

Se ha variado la posición de los hidrófonos, calibrando así en cada una de las tres series uno diferente:

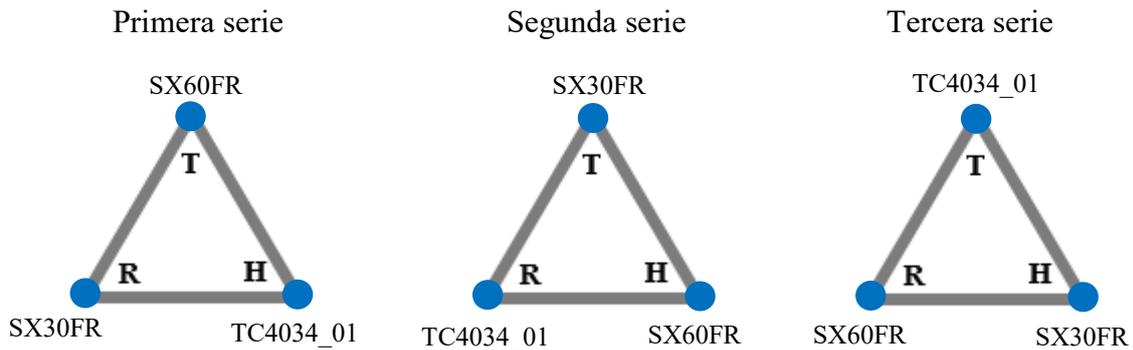


Figura 25. Posiciones de los hidrófonos en las medidas del método de reciprocidad

En el segundo escenario, la piscina con ejes motorizados del Puerto de Gandía, se ha calibrado por medio de este método el transductor SX60FR. Los parámetros de medida coinciden, con la salvedad de que en esta ocasión, al estar los hidrófonos separados 100 cm en lugar de 30 cm, la amplitud de pico (antes de pasar por el amplificador) empleada ha sido mayor: 700 mV.

3.4. Reciprocidad sobre geometrías asimétricas

Este punto obedece a uno de los objetivos de este estudio: la introducción del método de reciprocidad sobre geometrías asimétricas.

En lo relativo a la toma de medidas, el método no difiere del explicado en el punto anterior. Es decir, se deben realizar tres mediciones en distintas configuraciones con el fin de calibrar cada hidrófono. La diferencia está en el modo de llevar a cabo el análisis de estas medidas ([4.1.3.](#)).

Gracias al sistema de ejes motorizados de la piscina del Puerto de Gandía, y mediante el sistema de posicionamiento desarrollado por el Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC), es posible situar los hidrófonos con una precisión milimétrica.

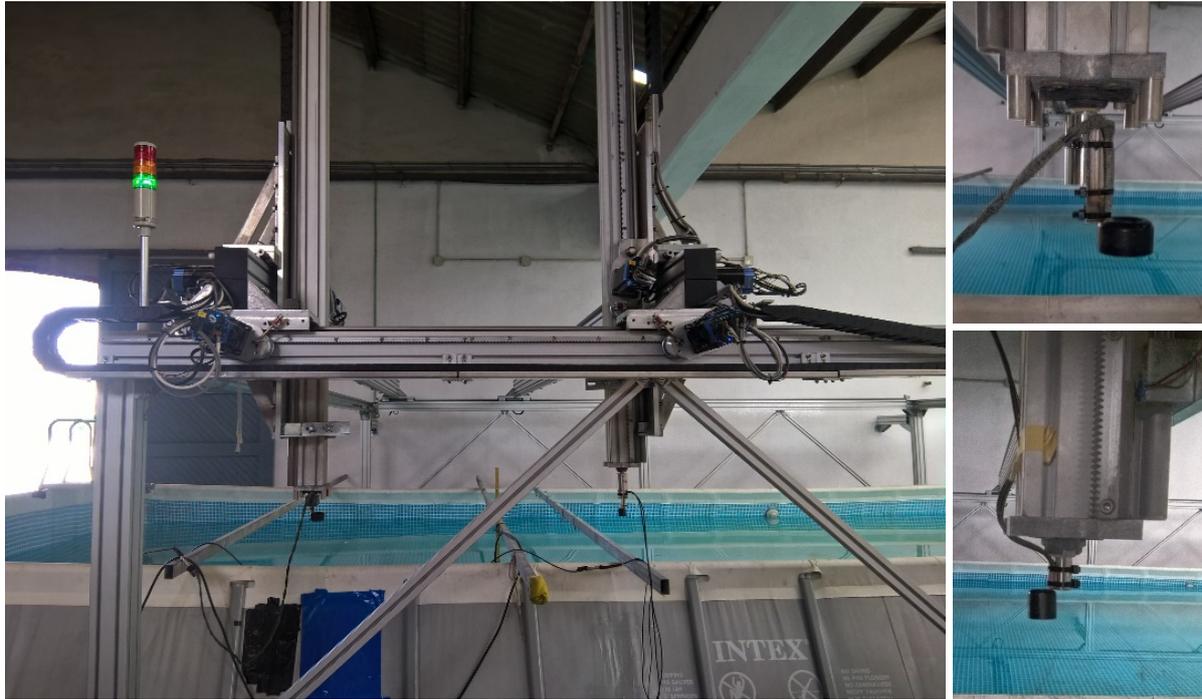


Figura 26. Ejes motorizados de la piscina del Puerto de Gandía

En la siguiente figura se puede observar la interfaz de la aplicación utilizada para controlar los ocho ejes con los que cuenta este sistema.



Sistema de Posicionamiento Status Move Network

X1: X2: Y1: Y2: Z1: Z2: P1: P2:

COMMAND:

Motor	Position	Speed	Acceleration	Torque	Status	Present	Direction
1	165000	0	0	-7	0	10	0
2	20000	8	-73	1	0	10	0
3	171341	0	0	-4	0	10	0
4	156341	-13	-73	6	0	10	0
5	61100	0	-37	-7	0	10	0
6	46436	0	0	-19	0	9	0
7	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	1	0	10	0
B	165000	23	-55	-2	0	10	0
C	20000	0	-12	-1	0	10	0

21148

Figura 27. Aplicación de control de los ejes motorizados de la piscina del Puerto de Gandía

En esta ocasión no se sitúan los transductores en los vértices de un triángulo equilátero. Las geometrías utilizadas han sido:

- Triángulo isósceles. El triángulo formado cuenta con dos lados iguales de 140 cm (TR y TH), y un tercer lado de 100 cm (RH).
- Triángulo escaleno. El triángulo formado cuenta con tres lados desiguales (TR = 140 cm; TH = 170 cm; RH = 105 cm).
- Distintos planos. Sobre el triángulo escaleno de la configuración anterior, se varía la posición en el eje Z (altura) de los hidrófonos SX30FR (aumentando Z 15 cm) y SX60FR (disminuyendo Z 15 cm), consiguiendo así tener los hidrófonos dispuestos en distintos planos (TR = 141 cm; TH = 171 cm; RH = 109 cm).

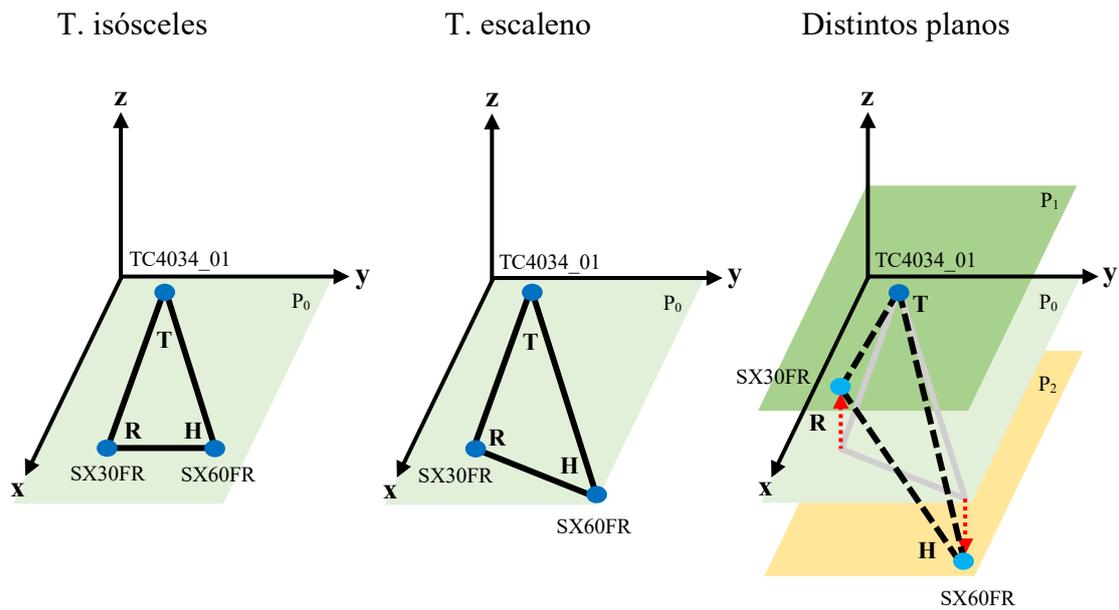


Figura 28. Posiciones de los hidrófonos en las medidas del método de reciprocidad sobre geometrías asimétricas

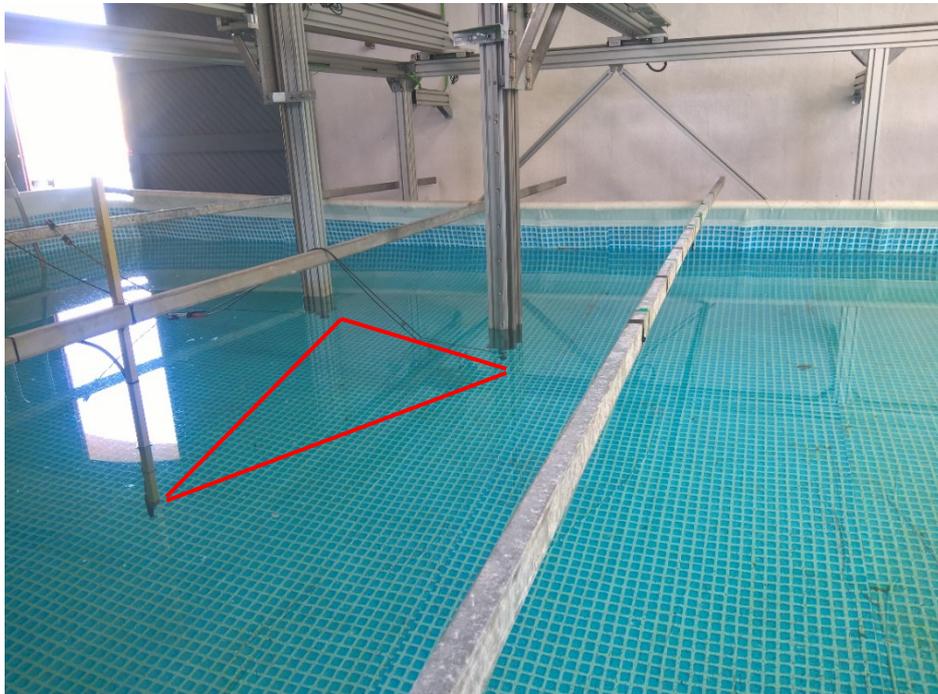


Figura 29. Montaje experimental reciprocidad sobre geometrías asimétricas: Triángulo escaleno

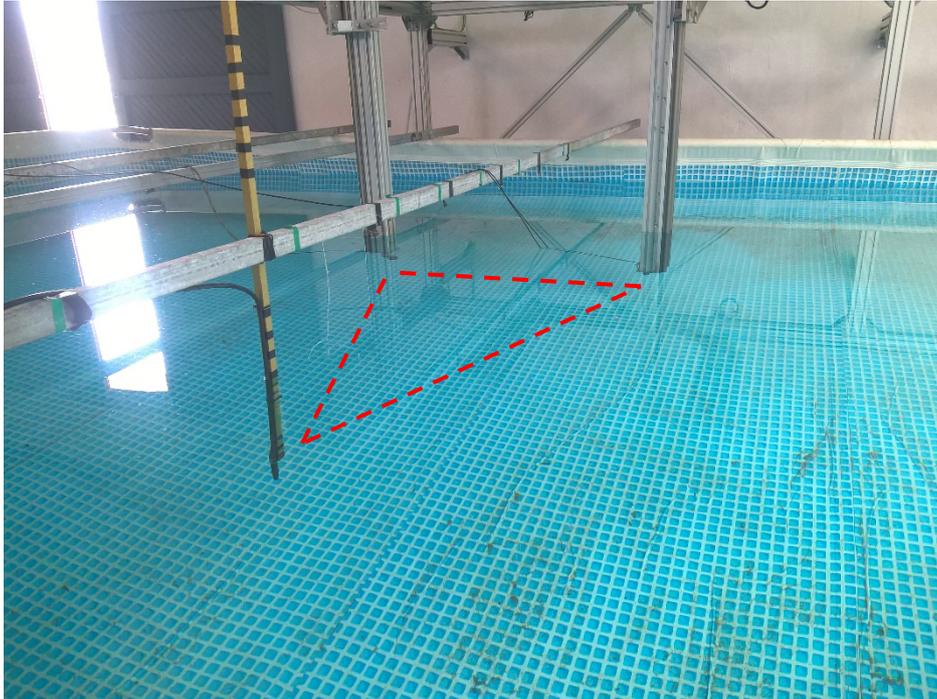


Figura 30. Montaje experimental reciprocidad sobre geometrías asimétricas: Distintos planos.1

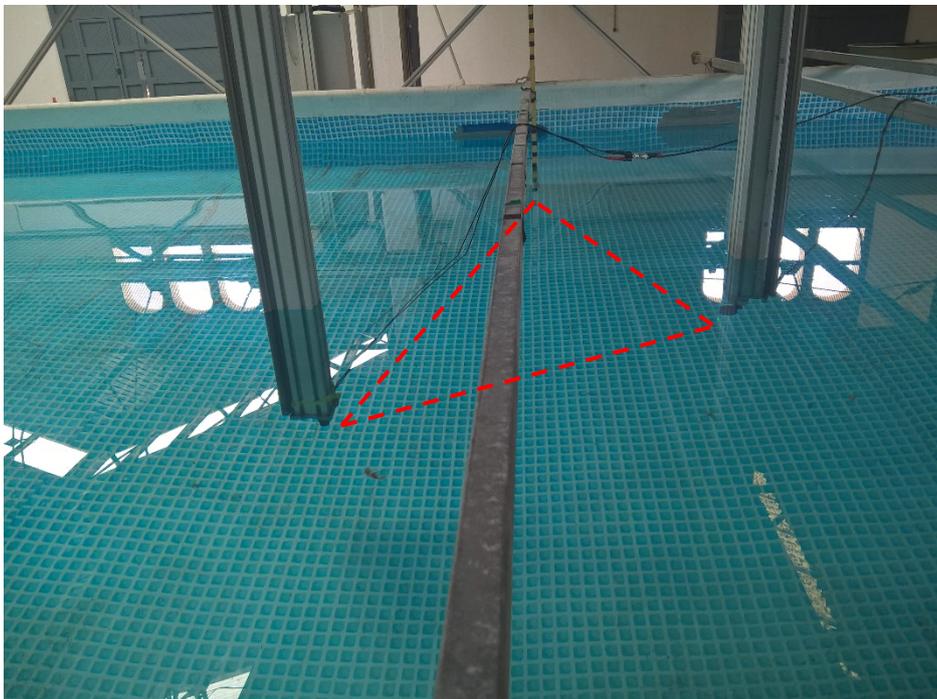


Figura 31. Montaje experimental reciprocidad sobre geometrías asimétricas: Distintos planos.2

En los tres casos, el hidrófono calibrado ha sido el SX60FR. Los parámetros seleccionados para estas medidas han sido:

- Frecuencia inicial y frecuencia final: 30 kHz - 250 kHz.
- Amplitud de pico (antes de pasar por el amplificador): 900 mV.
- Frecuencia de muestreo: 2 MHz.
- Tiempo de captura: 3 ms.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LAS MEDIDAS EXPERIMENTALES

4.1. Scripts análisis

El análisis de las medidas ha sido llevado a cabo por medio del software MATLAB.

En primer lugar es necesario recordar lo mencionado en el punto 3.2.: por medio del software LabVIEW los datos de las medidas son guardados en forma de una serie de ficheros de texto que cuentan con los datos de las amplitudes tanto de las señales enviadas como de las recibidas.

```

6 Configuración GF:
7 Forma de onda:
8 Tipo: Seno
9 Frecuencia: 35k Hz
10 Amplitud: 400m Vp
11 -
12 -
13 -
14 -
15 Burst:
16 N° ciclos: 5
17 Periodo: 500m s
18
19 Frecuencia muestreo: 2M Hz
20
21 Configuración captura:
22 Frecuencia de muestreo: 2M Hz
23 Filtro:
24 Estado: Inactivo
25 Tipo:
26 Frecuencia inferior: 0 Hz
27 Frecuencia superior: 0 Hz
28 Orden: 0
29
30
31 CH 0 (V) CH 1 (V)
32 0.0000E+0 0.0000E+0
33 -4.6875E-2 9.3750E-2
34 -9.3750E-2 7.0312E-2
35 -1.4063E-1 9.3750E-2
36 -1.8750E-1 7.0312E-2
37 -2.2656E-1 8.5937E-2
38 -2.6563E-1 7.0312E-2
39 -2.8906E-1 7.0312E-2
40 -3.1250E-1 6.2500E-2
41 -3.2813E-1 4.6875E-2

```

Figura 32. Ejemplo archivo con los datos de las medidas

Con el fin de poder analizar los resultados de una forma eficiente, la estructura de carpetas utilizada para almacenar las medidas del método de comparación directa debe ser:

Raíz → Series de medidas → Distancia entre hidrófonos → Carpeta con las frecuencias → Archivos de texto.

Por ejemplo:

Comparación directa → TC4034_02 --}}
 SX60FR → 30cm → Seno 35k → medida_5.lvm

Por otro lado, la estructura de carpetas utilizada para almacenar los archivos obtenidos por medio del método de reciprocidad debe ser:

Raíz → Series de medidas → Configuraciones 1, 2 y 3 → Distancia entre hidrófonos → Carpeta con las frecuencias → Archivos de texto.

Por ejemplo:

Reciprocidad → Reciprocidad4 15.6.2016
 (Sensibilidad del TC4034_01) → Conf1 → 30cm
 → Seno 35k → medida_5.lvm

Una de las funciones fundamentales del análisis ha sido “Vp_senos.m”. Esta función tiene como objetivos: la lectura de los datos guardados en los ficheros de texto; la detección de las señales; y por último, la obtención de las amplitudes de los voltajes.

La salida devuelta por esta función son una serie de matrices donde se pueden encontrar: un listado de las frecuencias de trabajo; la distancia a la que se han realizado las medidas; y la amplitud de los voltajes tanto en tiempo y frecuencia como en una correlación de ambas.

Esta función, facilitada por los tutores de este Trabajo final de Grado, ha sido llamada en los scripts desarrollados para realizar el análisis de los datos de este estudio.

4.1.1. Comparacion_directa.m

El objetivo de este script es calcular y representar las sensibilidades, tanto en emisión como en recepción, de los hidrófonos utilizados para las series de medidas donde se ha trabajado en base al método de comparación directa.

En primer lugar, se indica el directorio donde están las carpetas que almacenan las medidas, y a continuación, la carpeta de medidas que se quiere analizar. Por ejemplo, las medidas obtenidas al trabajar con el hidrófono TC4034_02 en emisión y el SX60FR en recepción:

```
raiz='C:\Users\Pablo\OneDrive\Documentos\UPV\GISTSI\4B - Trabajo de fin de
grado\Medidas\Comparación directa\10.4.2016 + 1.6.2016';
carp_rec='TC4034_02 --} SX60FR'
```

Son declaradas una serie de variables como: la frecuencia de muestreo, el número de ciclos, la presión de referencia y los colores a utilizar:

```
fs=2*1e6;
ciclos=5;
P_ref=1*1e-6;
color_azul_claro= [71 118 255]./255; color_azul_oscuro= [0 0 255]./255;
color_rojo_claro= [255 64 64]./255; color_rojo_oscuro= [255 0 0]./255;
color_negro_claro= [32 32 32]./255; color_negro_oscuro= [0 0 0]./255;
```

Mediante `vp_senos.m` se obtienen los datos relativos a frecuencias y amplitudes:

```
% Señales enviadas:
[f_env,Vp_env_t,Vp_env_f,Vp_env_c,d_env]=Vp_senos(raiz,carp_rec,fs,...
d_ini,'inicio',t_ini_env,100,prom,ciclos,1,encabezado);

% Señales recibidas:
[f_rec,Vp_rec_t,Vp_rec_f,Vp_rec_c,d_rec]=Vp_senos(raiz,carp_rec,fs,...
d_ini,'carpeta',t_ini_env,1,prom,ciclos,2,encabezado);
```

A continuación, son representadas las amplitudes de las señales emitidas y recibidas, tanto en tiempo y frecuencia como en correlación. Para comprobar la validez de las señales, se representan tanto la media como la desviación típica.

A lo largo del script se trabaja con la función `fill`. Sirve para representar, rellenando espacios entre curvas, pudiendo así visualizar más claramente el tamaño de la desviación típica.

Para las señales emitidas:

```
% Señal emitida
h=figure('Position',[5 45 1360 635]); hold on;
fill([f/1e3 fliplr(f/1e3)], [mean(Vp_env_t)+std(Vp_env_t)...
fliplr(mean(Vp_env_t)-std(Vp_env_t))], color_azul_claro,...
'EdgeColor', color_azul_claro);
plot(f/1e3, mean(Vp_env_t), 'LineWidth', 3, 'Color', color_azul_oscuro)

fill([f/1e3 fliplr(f/1e3)], [mean(Vp_env_f)+std(Vp_env_f)...
fliplr(mean(Vp_env_f)-std(Vp_env_f))], color_rojo_claro,...
'EdgeColor', color_rojo_claro);
plot(f/1e3, mean(Vp_env_f), 'LineWidth', 3, 'Color', color_rojo_oscuro)

fill([f/1e3 fliplr(f/1e3)], [mean(Vp_env_c)+std(Vp_env_c)...
fliplr(mean(Vp_env_c)-std(Vp_env_c))], color_negro_claro,...
'EdgeColor', color_negro_claro);
plot(f/1e3, mean(Vp_env_c), 'LineWidth', 3, 'Color', color_negro_oscuro)
```

```

xlabel('Frequency [kHz]', 'FontSize', 15);
ylabel('Amplitude [V]', 'FontSize', 15);
title('Emitted voltage', 'FontSize', 15); box('on');
legend('Emitted signal (time std)', 'Emitted signal (time mean)', ...
'Emitted signal (freq std)', 'Emitted signal (freq mean)', ...
'Emitted signal (corr std)', 'Emitted signal (corr mean)', ...
'Location', 'NorthEastOutside');
set(gca, 'FontSize', 15); axis([f(1)/1e3 f(end)/1e3 ...
min(min([Vp_env_t Vp_env_f Vp_env_c])) ...
max(max([Vp_env_t Vp_env_f Vp_env_c])))]);

saveas(h, [raiz, '\', 'Vp_env (utilizando la función FILL) ', ...
carp_rec], 'fig');

```

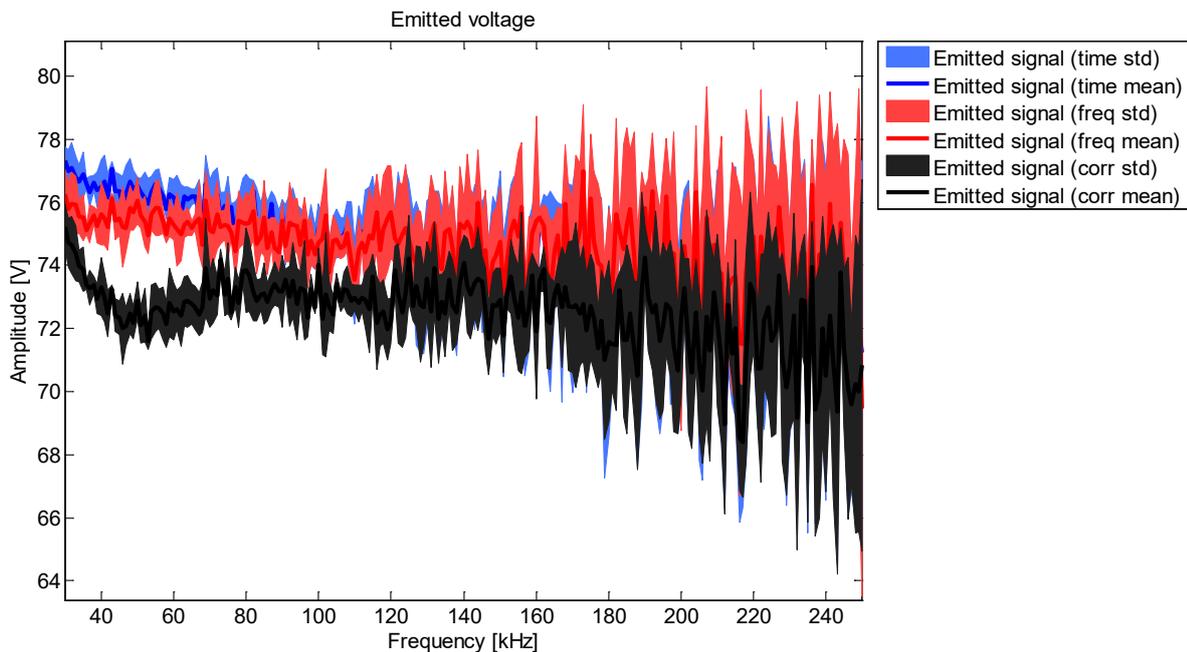


Figura 33. Ejemplo representación voltaje emitido. Medida TC4034_02 --}} SX60FR

A continuación, por medio de un *switch-case*, se selecciona el tipo de sensibilidad que se quiere obtener: en emisión (TVR) o en recepción (RVR).

En caso de querer obtener el TVR:

Se utilizan dos bucles anidados con el fin de recorrer todo el conjunto de frecuencias, y al mismo tiempo, las cinco medidas tomadas para cada frecuencia.

```

case 1; % Obtención de la sensibilidad de emisión (TVR)
for j=1:length(f);
    for i=1:prom;

```

Se selecciona la sensibilidad del transductor receptor (transductor de referencia cuya sensibilidad en recepción (RVR) es conocida):

```

% Sensibilidad del transductor receptor:
S_rec(j)= RVR_SX60FR(f(j));

```

Se procede a realizar los cálculos explicados en el primer apartado del punto [2.2.1.](#):

```

Pp_d_t(i,j)=Vp_rec_t(i,j)*1e6/10^(S_rec(j)/20);
Pp_d_f(i,j)=Vp_rec_f(i,j)*1e6/10^(S_rec(j)/20);
Pp_d_c(i,j)=Vp_rec_c(i,j)*1e6/10^(S_rec(j)/20);

```

```

Pp_1m_t(i,j)=Pp_d_t(i,j)*d;
Pp_1m_f(i,j)=Pp_d_f(i,j)*d;
Pp_1m_c(i,j)=Pp_d_c(i,j)*d;

Vp_t(i,j)=Vp_env_t(i,j);
Vp_f(i,j)=Vp_env_f(i,j);
Vp_c(i,j)=Vp_env_c(i,j);

% Sensibilidad del piezoeléctrico emisor:
TVR_1m_t(i,j)=20*log10(Pp_1m_t(i,j)/Vp_t(i,j)*1e-6);
TVR_1m_f(i,j)=20*log10(Pp_1m_f(i,j)/Vp_f(i,j)*1e-6);
TVR_1m_c(i,j)=20*log10(Pp_1m_c(i,j)/Vp_c(i,j)*1e-6);

```

Por último, se representan las curvas de sensibilidad en emisión:

```

% TVR
h=figure('Position',[5 45 1360 635]); hold on
fill([f/1e3 fliplr(f/1e3)], [mean(TVR_1m_t)+std(TVR_1m_t)...
fliplr(mean(TVR_1m_t)-std(TVR_1m_t))], color_azul_claro,...
'EdgeColor', color_azul_claro);
plot(f/1e3, mean(TVR_1m_t), 'LineWidth', 3, 'Color', color_azul_oscuro)

fill([f/1e3 fliplr(f/1e3)], [mean(TVR_1m_f)+std(TVR_1m_f)...
fliplr(mean(TVR_1m_f)-std(TVR_1m_f))], color_rojo_claro,...
'EdgeColor', color_rojo_claro);
plot(f/1e3, mean(TVR_1m_f), 'LineWidth', 3, 'Color', color_rojo_oscuro)

fill([f/1e3 fliplr(f/1e3)], [mean(TVR_1m_c)+std(TVR_1m_c)...
fliplr(mean(TVR_1m_c)-std(TVR_1m_c))], color_negro_claro,...
'EdgeColor', color_negro_claro);
plot(f/1e3, mean(TVR_1m_c), 'LineWidth', 3, 'Color', color_negro_oscuro)

xlabel('Frequency [kHz]', 'FontSize', 15);
ylabel('TVR [dB re uPa/V @ 1m]', 'FontSize', 15);
title(['Transmitting Voltage Response ', carp_rec], 'FontSize', 15);
box('on');
legend('TVR (time std)', 'TVR (time mean)', 'TVR (freq std)', ...
'TVR (freq mean)', 'TVR (corr std)', 'TVR (corr mean)', ...
'Location', 'NorthEastOutside');
set(gca, 'FontSize', 15); axis([f(1)/1e3 f(end)/1e3...
min(min([TVR_1m_t TVR_1m_f])) max(max([TVR_1m_t TVR_1m_f]))])

saveas(h, [raiz, '\', 'TVR (utilizando la función FILL) ', ...
carp_rec], 'fig');

```

En caso de querer obtener el RVR:

Al igual que en el caso anterior, se utilizan dos bucles anidados con el fin de recorrer todo el conjunto de frecuencias, y al mismo tiempo, las cinco medidas tomadas para cada frecuencia.

```

case 2; % Obtención de la sensibilidad de recepción (RVR)
for j=1:length(f);
    for i=1:prom;

```

Se selecciona la sensibilidad del transductor emisor (transductor de referencia cuya sensibilidad en emisión (TVR) es conocida):

```

% Sensibilidad del transductor emisor
S_rec(j)= TVR_TC4034 (f(j));

```

Se procede a realizar los cálculos explicados en el segundo apartado del punto [2.2.1.](#):

```
Pp_1m_t(i,j)=10^(S_env(j)/20)*Vp_env_t(i,j)*1e-6;
Pp_1m_f(i,j)=10^(S_env(j)/20)*Vp_env_f(i,j)*1e-6;
Pp_1m_c(i,j)=10^(S_env(j)/20)*Vp_env_c(i,j)*1e-6;

Pp_d_t(i,j)=Pp_1m_t(i,j)/d;
Pp_d_f(i,j)=Pp_1m_f(i,j)/d;
Pp_d_c(i,j)=Pp_1m_c(i,j)/d;

Vp_d_t(i,j)=Vp_rec_t(i,j);
Vp_d_f(i,j)=Vp_rec_f(i,j);
Vp_d_c(i,j)=Vp_rec_c(i,j);

% Sensibilidad del piezoeléctrico receptor:
RVR_t(i,j)=20*log10(Vp_d_t(i,j)/Pp_d_t(i,j)*1e-6);
RVR_f(i,j)=20*log10(Vp_d_f(i,j)/Pp_d_f(i,j)*1e-6);
RVR_c(i,j)=20*log10(Vp_d_c(i,j)/Pp_d_c(i,j)*1e-6);
```

Por último, se representan las curvas de sensibilidad en recepción:

```
% RVR
h=figure('Position',[5 45 1360 635]); hold on
fill([f/1e3 fliplr(f/1e3)], [mean(RVR_t)+std(RVR_t)...
fliplr(mean(RVR_t)-std(RVR_t))], color_azul_claro,...
'EdgeColor',color_azul_claro);
plot(f/1e3, mean(RVR_t), 'LineWidth',3, 'Color',color_azul_oscuro)

fill([f/1e3 fliplr(f/1e3)], [mean(RVR_f)+std(RVR_f)...
fliplr(mean(RVR_f)-std(RVR_f))], color_rojo_claro,...
'EdgeColor',color_rojo_claro);
plot(f/1e3, mean(RVR_f), 'LineWidth',3, 'Color',color_rojo_oscuro)

fill([f/1e3 fliplr(f/1e3)], [mean(RVR_c)+std(RVR_c)...
fliplr(mean(RVR_c)-std(RVR_c))], color_negro_claro,...
'EdgeColor',color_negro_claro);
plot(f/1e3, mean(RVR_c), 'LineWidth',3, 'Color',color_negro_oscuro)

xlabel('Frequency [kHz]', 'FontSize',15);
ylabel('RVR [dB re V/uPa]', 'FontSize',15);
title(['Received Voltage Response ', carp_rec], 'FontSize',15);
box('on');
legend('RVR (time std)', 'RVR (time mean)', 'RVR (freq std)',...
'RVR (freq mean)', 'RVR (corr std)', 'RVR (corr mean)',...
'Location', 'NorthEastOutside');
set(gca, 'FontSize',15); axis([f(1)/1e3 f(end)/1e3...
min(min([RVR_t RVR_f])) max(max([RVR_t RVR_f]))])

saveas(h, [raiz, '\', 'RVR (utilizando la función FILL) ',...
carp_rec], 'fig');
```

4.1.2. Reciprocidad.m

El objetivo de este script es calcular y representar la sensibilidad en recepción de los hidrófonos utilizados para las series de medidas donde se ha trabajado en base al método de reciprocidad.

En esta ocasión es necesario trabajar tanto con `vp_senos.m` como con una modificación suya: `vp_senos_resta.m`. La razón por la que es utilizada la función `vp_senos_resta.m`, son las señales que se deben almacenar al trabajar con la configuración Conf2 (las tensiones tanto en bornes

de la resistencia utilizada como la resultante del circuito: $V_{R\Omega}$ y V'_R), así como la resta que se debe realizar entre ellas.

Inicialmente, se indica el directorio donde están las carpetas “Conf1”, “Conf2” y “Conf3”; y el nombre del hidrófono a calibrar:

```
raiz='C:\Users\Pablo\OneDrive\Documentos\UPV\GISTSI\4B - Trabajo de fin de
grado\Medidas\Reciprocidad\Reciprocidad4 15.6.2016 (Sensibilidad del
TC4034_01)';
nombre_hid_sensibilidad='TC4034_01';
```

Son declaradas una serie de variables como: la frecuencia de muestreo, el número de ciclos, la presión de referencia, el valor de la resistencia utilizada en la Conf2, la densidad del agua y la velocidad del sonido en el agua:

```
fs=2*1e6;
ciclos=5;
P_ref=1*1e-6;
ValorResistencia=1000;
ro_agua=1000;
c_agua=1481;
```

A continuación, mediante `vp_senos.m` y `vp_senos_resta.m`, se obtienen las frecuencias, las distancias (en metros) y las tensiones requeridas para el cálculo de la sensibilidad:

- De la Conf1: las tensiones V_{TR} y V_{TH} .
- De la Conf2: las tensiones tanto en bornes de la resistencia utilizada como la resultante del circuito ($V_{R\Omega}$ y V'_R).
- De la Conf3: las tensiones V_{RH} y V_{RT} .

```
carp_rec='Conf1';
[ftr,Vtr_t,Vtr_f,Vtr_c,dtr]=Vp_senos(raiz,carp_rec,fs,d_ini,'carpeta',...
t_ini_env,1,prom,ciclos,1,encabezado);
[fth,Vth_t,Vth_f,Vth_c,dth]=Vp_senos(raiz,carp_rec,fs,d_ini,'carpeta',...
t_ini_env,1,prom,ciclos,2,encabezado);

carp_rec='Conf2';
[fR,VR_t,VR_f,VR_c,dR]=Vp_senos_resta(raiz,carp_rec,fs,d_ini,'inicio',...
t_ini_env,100,prom,ciclos,1,2,encabezado);

carp_rec='Conf3';
[frh,Vrh_t,Vrh_f,Vrh_c,drh]=Vp_senos(raiz,carp_rec,fs,d_ini,'carpeta',...
t_ini_env,1,prom,ciclos,1,encabezado);
[frt,Vrt_t,Vrt_f,Vrt_c,drt]=Vp_senos(raiz,carp_rec,fs,d_ini,'carpeta',...
t_ini_env,1,prom,ciclos,2,encabezado);
```

Se procede a realizar los cálculos para obtener la sensibilidad ([2.2.2.](#)), y a representar la curva RVR:

```
IR_t=VR_t/ValorResistencia;
IR_f=VR_f/ValorResistencia;
IR_c=VR_c/ValorResistencia;

SH_t=sqrt((2*d/ro./f).*(Vth_t.*Vrh_t)./(Vtr_t.*IR_t));
SH_f=sqrt((2*d/ro./f).*(Vth_f.*Vrh_f)./(Vtr_f.*IR_f));
SH_c=sqrt((2*d/ro./f).*(Vth_c.*Vrh_c)./(Vtr_c.*IR_c));
```

```
RVR_t=20*log10(SH_t*P_ref);
RVR_f=20*log10(SH_f*P_ref);
RVR_c=20*log10(SH_c*P_ref);

h=figure('Position',[5 45 1360 635]); hold on
plot(f/1e3,mean(RVR_t),'LineWidth',3,'Color','b');
plot(f/1e3,mean(RVR_f),'LineWidth',3,'Color','r');
plot(f/1e3,mean(RVR_c),'LineWidth',3,'Color','k');

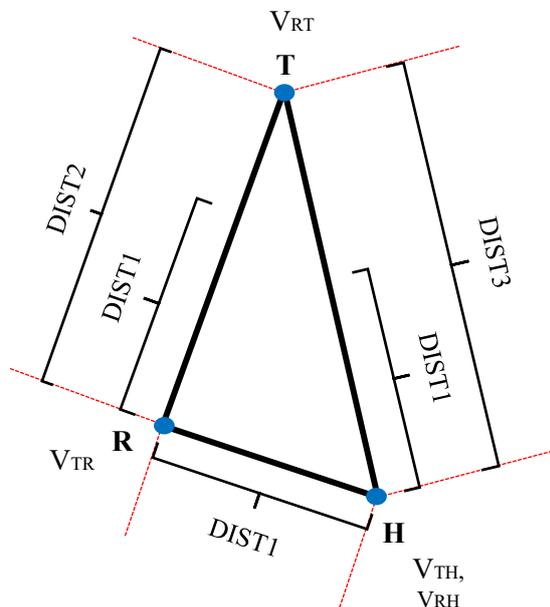
xlabel('Frequency [kHz]','FontSize',15);
ylabel('RVR [dB re V/uPa]','FontSize',15);
title(['Received Voltage Response',nombre_hid_sensibilidad],'FontSize',15);
box('on');
legend('RVR (time)','RVR (freq)','RVR (corr)',...
'Location','NorthEastOutside');
set(gca,'FontSize',15); axis([f(1)/1e3 f(end)/1e3...
min(min([RVR_t RVR_f])) max(max([RVR_t RVR_f]))]);

saveas(h,[raiz,'\','RVR (utilizando la función PLOT) ',...
nombre_hid_sensibilidad'],'fig');
```

4.1.3. Reciprocidad_sobre_geometrías_asimétricas.m

El objetivo de este script es el mismo que el de Reciprocidad.m: calcular y representar la sensibilidad en recepción de los hidrófonos utilizados para las series de medidas donde se ha trabajado en base al método de reciprocidad. La diferencia entre ambos es que, en esta ocasión, no se tienen las mismas distancias entre hidrófonos. Esto hace que no sea posible, al menos no directamente, seguir el mismo proceso seguido hasta ahora y nombrar una de las carpetas con la distancia en centímetros entre los hidrófonos.

Dada la linealidad entre presión y distancia, y tensión y distancia, se realiza un ajuste de los voltajes para adaptarlos a una distancia determinada. Se adaptan por tanto las tensiones V_{TH} , V_{RH} y V_{TR} (obtenidas tras realizar el análisis con la distancia DIST1 indicada en la carpeta) con el fin de obtener los valores que se habrían obtenido en caso de haber realizado el análisis con las distancias reales (DIST1, DIST2 y DIST3).



$$P(d) = \frac{P_o}{d}; V(d) = \frac{V_o}{d}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{xx}(DIST1) = \frac{V_o}{DIST1} \\ V_{xx}(DIST_y) = \frac{V_o}{DIST_y} \end{array} \right\} \rightarrow$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_o = DIST1 \cdot V_{xx}(DIST1) \\ V_{xx}(DIST_y) = \left(\frac{DIST1}{DIST_y} \right) \cdot V_{xx}(DIST1) \end{array} \right\}$$

Figura 34. Ajuste de las medidas para una distancia determinada

Al igual que en el caso anterior, en primer lugar se indica el directorio de trabajo, y son declaradas una serie de variables referentes a la toma de las medidas.

También, mediante `vp_senos.m` y `vp_senos_resta.m`, se obtienen las frecuencias, las distancias (en metros) y las tensiones mencionadas en el punto [2.2.2.](#)

El primer cambio con respecto al script anterior se produce al declarar las distancias reales entre los hidrófonos. Por ejemplo, para uno de los casos trabajados:

```
% T. isósceles
dist1_real=1;
dist2_real=1.4;
dist3_real=1.4;
```

Se procede a adaptar los voltajes y a realizar los cálculos para obtener la sensibilidad:

```
Vrh_t_adapt=(drh/dist1_real)*Vrh_t;
Vrh_f_adapt=(drh/dist1_real)*Vrh_f;
Vrh_c_adapt=(drh/dist1_real)*Vrh_c;

Vtr_t_adapt=(dtr/dist2_real)*Vtr_t;
Vtr_f_adapt=(dtr/dist2_real)*Vtr_f;
Vtr_c_adapt=(dtr/dist2_real)*Vtr_c;

Vth_t_adapt=(dth/dist3_real)*Vth_t;
Vth_f_adapt=(dth/dist3_real)*Vth_f;
Vth_c_adapt=(dth/dist3_real)*Vth_c;

IR_t=VR_t/ValorResistencia;
IR_f=VR_f/ValorResistencia;
IR_c=VR_c/ValorResistencia;

SH_t=sqrt((2*d/ro./f).*(Vth_t_adapt.*Vrh_t_adapt)./(Vtr_t_adapt.*IR_t));
SH_f=sqrt((2*d/ro./f).*(Vth_f_adapt.*Vrh_f_adapt)./(Vtr_f_adapt.*IR_f));
SH_c=sqrt((2*d/ro./f).*(Vth_c_adapt.*Vrh_c_adapt)./(Vtr_c_adapt.*IR_c));

RVR_t=20*log10(SH_t*P_ref);
RVR_f=20*log10(SH_f*P_ref);
RVR_c=20*log10(SH_c*P_ref);
```

La representación de la curva RVR se realiza del mismo modo que en el punto [4.1.2.](#)

4.2. Resultados medidas experimentales

Los datos relativos a la sensibilidad proporcionados por los fabricantes tienen una gran utilidad pues nos sirven para poder poner en contexto los resultados obtenidos en nuestras medidas. Por desgracia, los fabricantes de transductores no proporcionan las curvas RVR y TVR de sus hidrófonos para un gran rango de frecuencias.

De los transductores empleados únicamente se tiene información hasta: 40 kHz para el hidrófono SX30FR; 50 kHz para el ITC-1032; 90 kHz para el SX60FR; y hasta 500 kHz para los hidrófonos de la familia TC4034.

Esto provoca que, a pesar de que las medidas hayan sido tomadas para las frecuencias entre 30 kHz y 250 kHz, a la hora de representar los resultados obtenidos, las curvas únicamente sean dibujadas para, por norma general, entre 30 kHz y 90 kHz.

Y en algunos casos, como por ejemplo en las obtenidas con el hidrófono ITC-1032 como referencia, únicamente puedan dibujarse hasta 50 kHz; siendo especialmente llamativas las curvas obtenidas con este transductor como referencia ya que, al ser los valores de sensibilidad nulos de 51 kHz en adelante, en los 50 kHz es posible observar como la curva pasa a ser vertical, buscando los 0 dB.

Antes de mostrar los resultados obtenidos, es conveniente recordar lo explicado en el punto [2.1.1.](#): debido a las unidades utilizadas, al representar el RVR los valores serán negativos, y cuanto más próximos estén a 0 dB *re* $V/\mu Pa$, más sensible será el determinado hidrófono. Ante una misma presión incidente, proporcionará una mayor tensión de salida. Por otro lado, al representar el TVR los valores serán positivos, y cuanto más alejados estén de 0 dB *re* $\mu Pa/V$, más sensible será el determinado hidrófono. Es decir, ante una misma tensión eléctrica, producirá una mayor presión acústica (sobre el otro transductor, el receptor).

4.2.1. Resultados método comparación directa

Tal y como se ha mencionado en el punto [3.2.](#), con este método se han realizado diez mediciones utilizando cuatro hidrófonos: SX60FR, ITC-1032, TC4034_01 y TC4034_02. A continuación se muestran las curvas de sensibilidad RVR y TVR para cada uno de ellos.

En las gráficas se pueden observar las curvas obtenidas de las hojas de características del fabricante (en verde) y las curvas (tanto la media como la desviación típica) obtenidas al tomar como referencia los distintos hidrófonos.

4.2.1.1. Hidrófono SX60FR

Para obtener el RVR se han analizado las series de medidas: ITC-1032 --}} SX60FR; TC4034_01 --}} SX60FR; TC4034_02 --}} SX60FR.

Y para obtener el TVR se han analizado las series de medidas: SX60FR --}} TC4034_02; SX60FR --}} ITC-1032; SX60FR --}} TC4034_01.

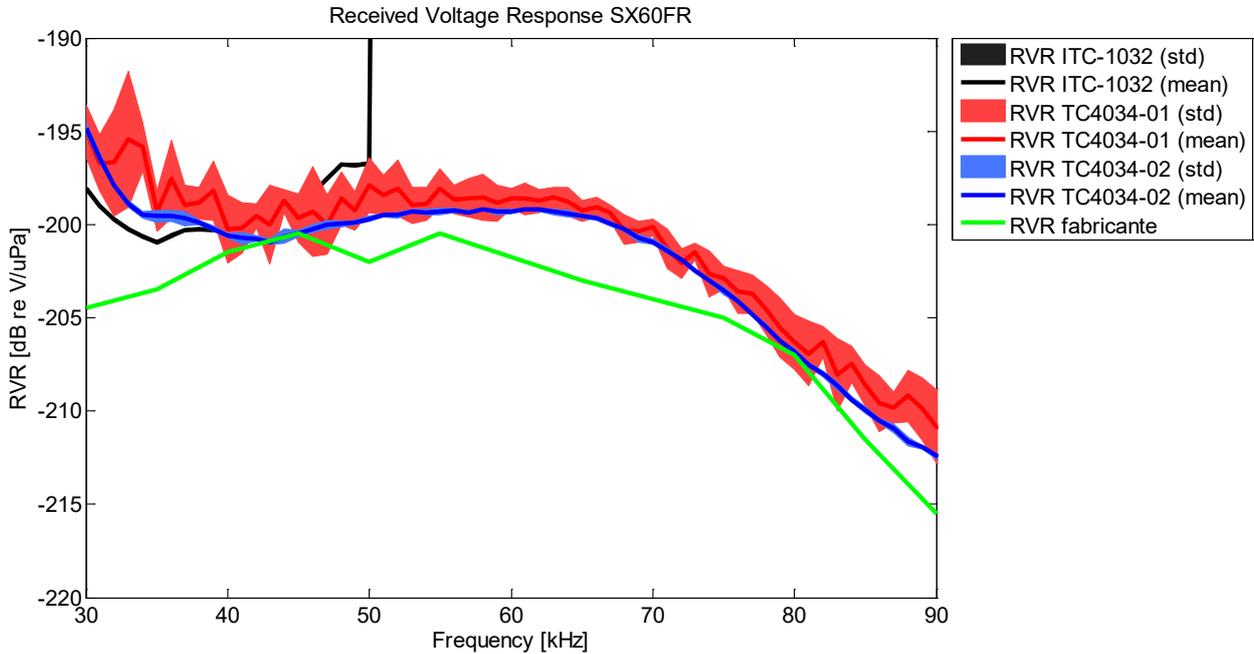


Figura 35. Curvas RVR obtenidas para el hidrófono SX60FR mediante comparación directa

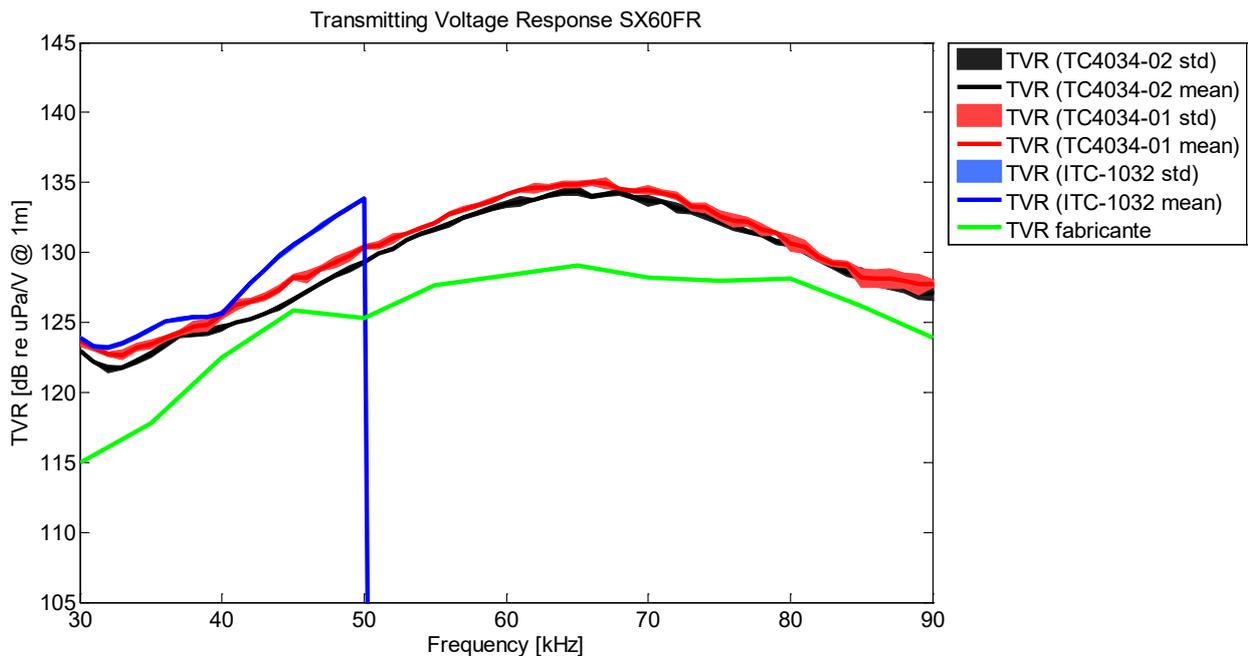


Figura 36. Curvas TVR obtenidas para el hidrófono SX60FR mediante comparación directa

Como se puede observar, en ambos casos, y a pesar de diferencias de entre 2 y 3 dB, los resultados obtenidos siguen la tendencia que dictan las hojas del fabricante. Las curvas indican que prácticamente en todo el rango de frecuencias representado, se ha obtenido una mayor sensibilidad tanto en emisión como en recepción que la prevista por el fabricante.

4.2.1.2 Hidrófono ITC-1032

Para obtener el RVR se han analizado las series de medidas: TC4034_01 --}} ITC-1032; TC4034_02 --}} ITC-1032; SX60FR --}} ITC-1032.

Y para obtener el TVR se han analizado las series de medidas: ITC-1032 --}} SX60FR; ITC-1032 --}} TC4034_01; ITC-1032 --}} TC4034_02.

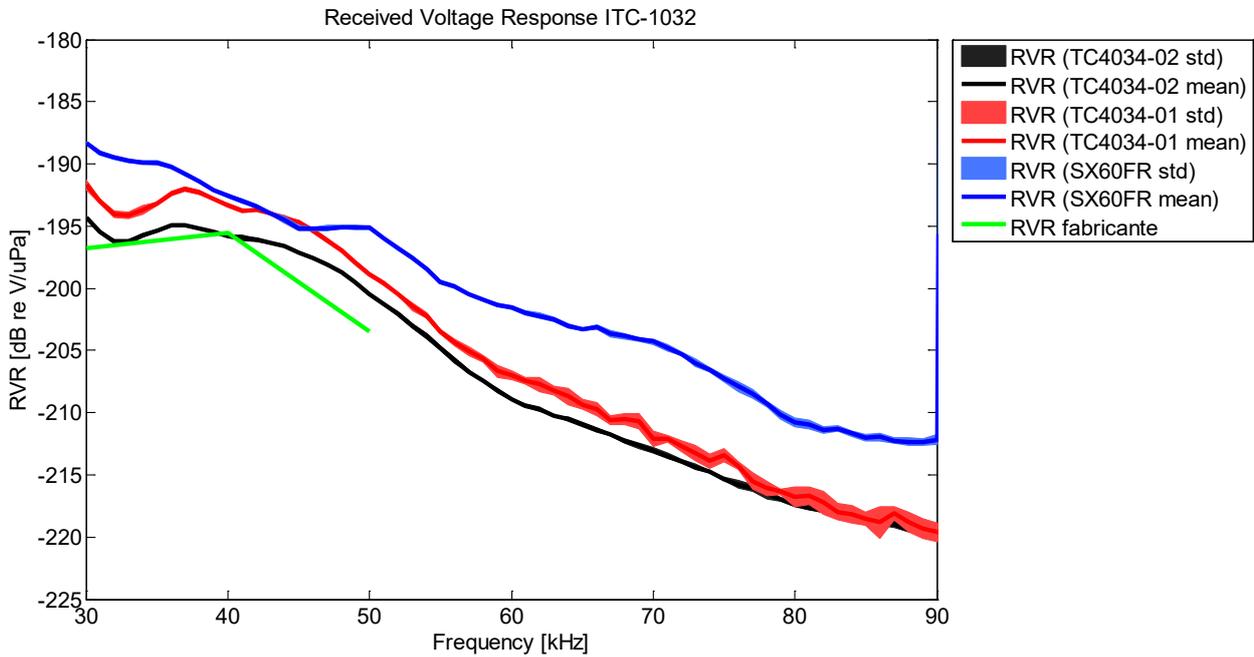


Figura 37. Curvas RVR obtenidas para el hidrófono ITC-1032 mediante comparación directa

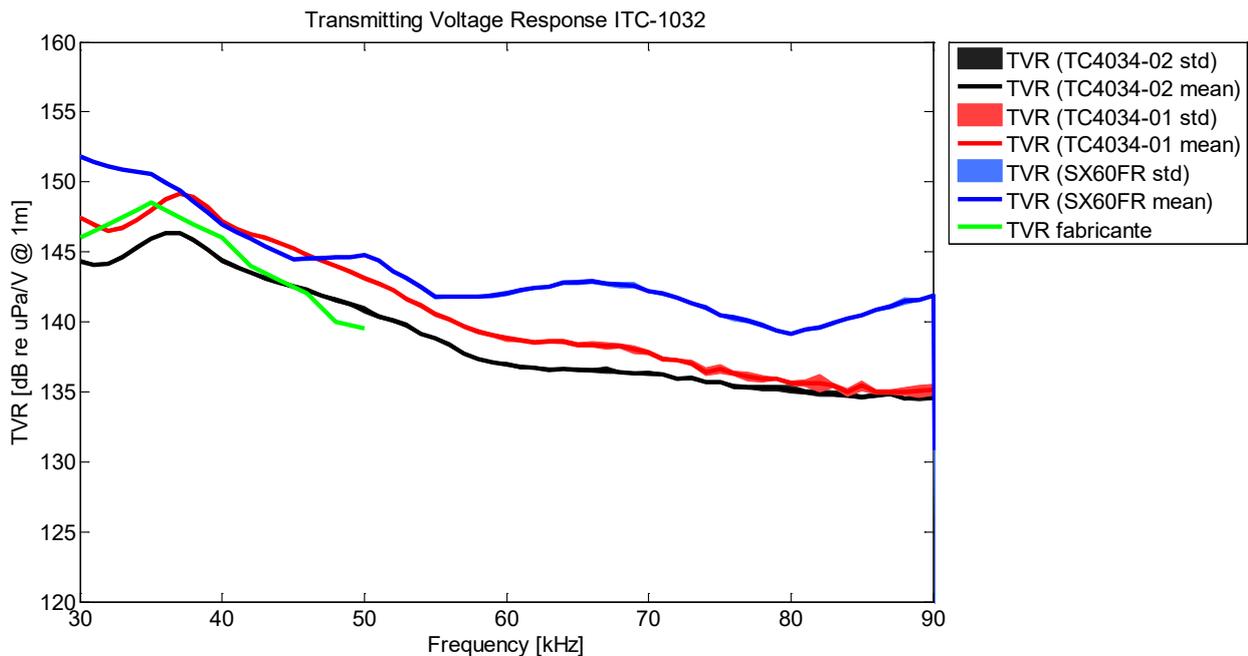


Figura 38. Curvas TVR obtenidas para el hidrófono ITC-1032 mediante comparación directa

El fabricante del ITC-1032 únicamente facilita datos de sensibilidad para frecuencias menores que 50 kHz, lo que dificulta una comparación con los resultados obtenidos. Aun así, es posible observar una tendencia común entre los TC4034 y el SX60FR, que obedece, en un rango de unos 3-4 dB, a la curva proporcionada por el fabricante.

4.2.1.3. Hidrófono TC4034_01

Para obtener el RVR se han analizado las series de medidas: ITC-1032 --}} TC4034_01; SX60FR --}} TC4034_01.

Y para obtener el TVR se han analizado las series de medidas: TC4034_01 --}} ITC-1032; TC4034_01 --}} SX60FR.

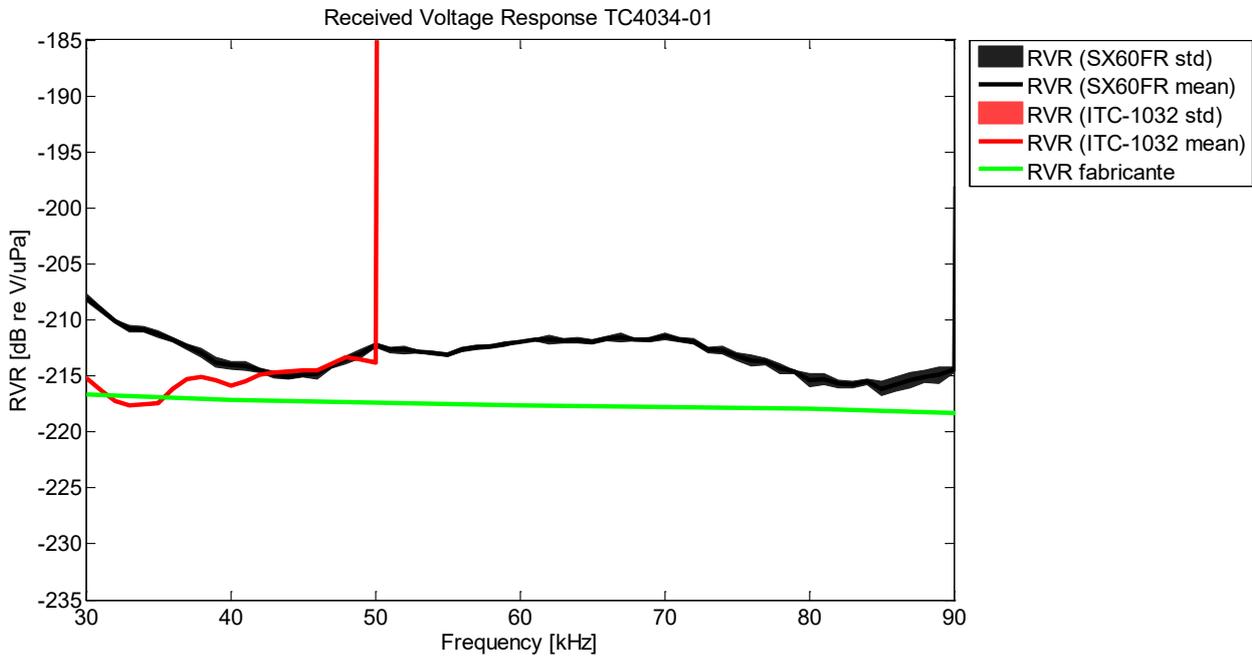


Figura 39. Curvas RVR obtenidas para el hidrófono TC4034-01 mediante comparación directa

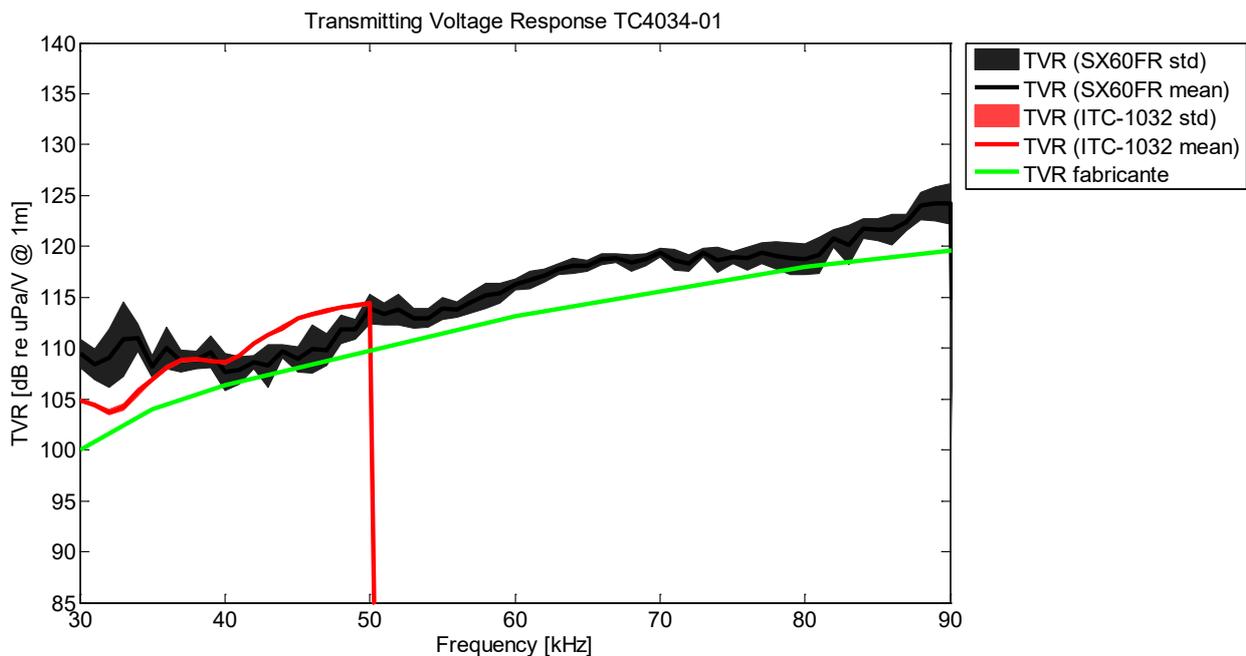


Figura 40. Curvas TVR obtenidas para el hidrófono TC4034-01 mediante comparación directa

El resultado obtenido en recepción no es bueno pues no se observa una tendencia clara. Sin embargo, en emisión sí es posible ver que las curvas obtenidas obedecen a la facilitada por el fabricante. Es destacable que al trabajar con el SX60FR se obtiene una gran desviación típica. Dado que esta gran desviación típica no se da en el resto de medidas, podría estar producida por las reflexiones derivadas de alguna situación excepcional (como por ejemplo el movimiento de la base metálica) durante esa medida en particular.

4.2.1.4. Hidrófono TC4034_02

Para obtener el RVR se han analizado las series de medidas: ITC-1032 --}} TC4034_02; SX60FR --}} TC4034_02.

Y para obtener el TVR se han analizado las series de medidas: TC4034_02 --}} ITC-1032; TC4034_02 --}} SX60FR.

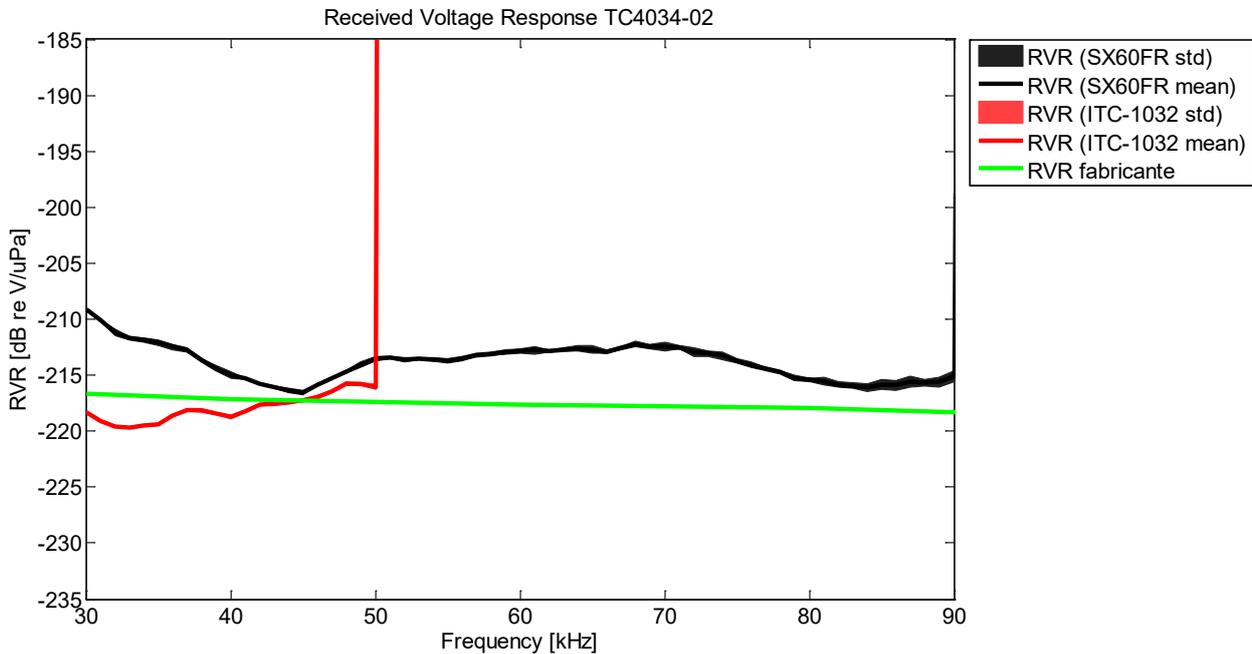


Figura 41. Curvas RVR obtenidas para el hidrófono TC4034-02 mediante comparación directa

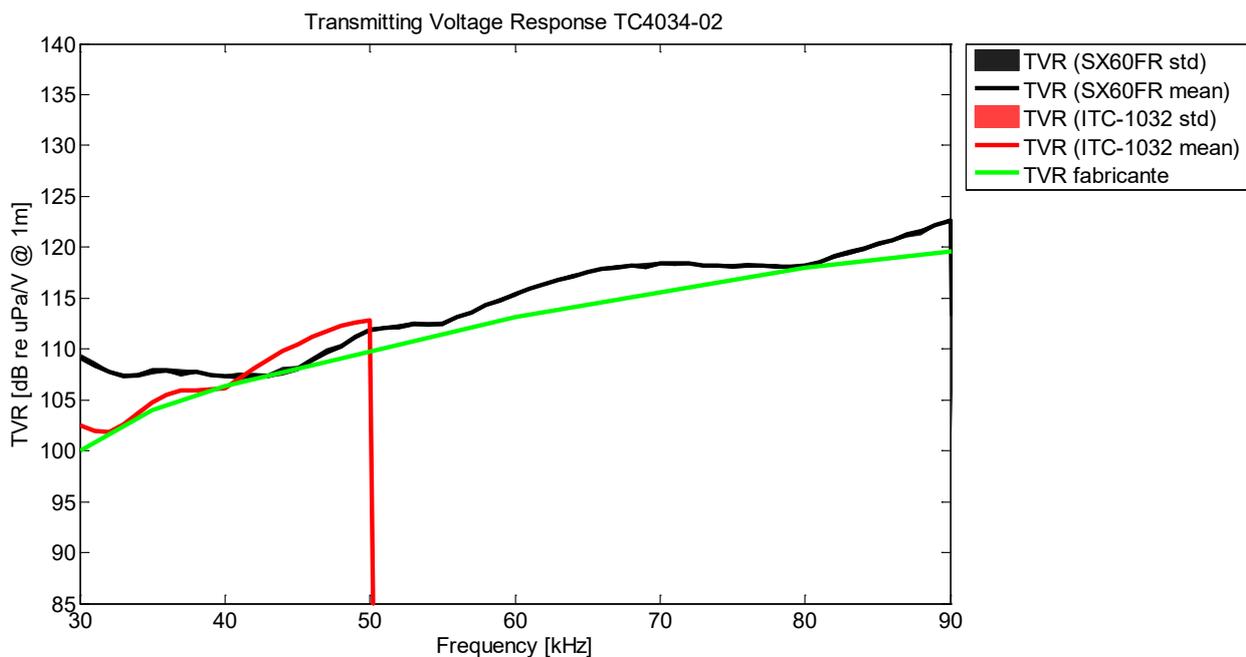


Figura 42. Curvas TVR obtenidas para el hidrófono TC4034-02 mediante comparación directa

Los resultados obtenidos para el hidrófono TC4034_02 son muy similares a los obtenidos para el otro transductor de la misma familia (TC4034_01). Se obtienen malos resultados para la sensibilidad en recepción, pero buenos para la sensibilidad en emisión.

4.2.2. Resultados método reciprocidad

Con este método se ha trabajado con tres hidrófonos: SX30FR, SX60FR y TC4034_01. Durante la toma de las distintas series de medidas, se ha ido variando la posición de los diferentes hidrófonos con el fin de poder calibrar uno de ellos en cada serie.

En las siguientes gráficas se pueden observar las curvas obtenidas de las hojas de características del fabricante (en verde) y las curvas de sensibilidad RVR obtenidas para cada calibración.

4.2.2.1. Hidrófono SX30FR

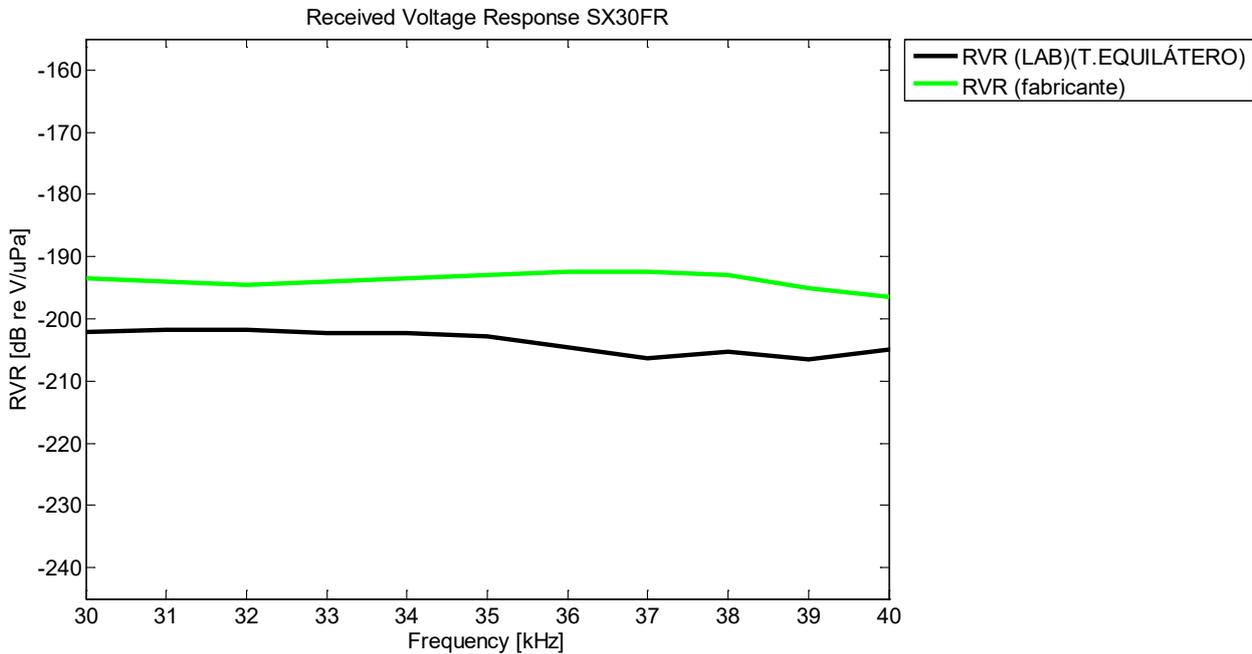


Figura 43. Curva RVR obtenida para el hidrófono SX30FR mediante reciprocidad

Durante este proyecto este hidrófono, SX30FR, ha sido calibrado únicamente por medio del método de reciprocidad, por lo que no es posible comparar estos resultados con los obtenidos por comparación directa. En la gráfica es posible observar que, si bien la curva obtenida sigue la tendencia marcada por el fabricante, existe una diferencia de unos 7-8 dB a lo largo de todo el rango de frecuencias. A diferencia de lo sucedido en las medidas analizadas hasta el momento, se ha obtenido una menor sensibilidad en recepción que la prevista por el fabricante.

4.2.2.2. Hidrófono SX60FR

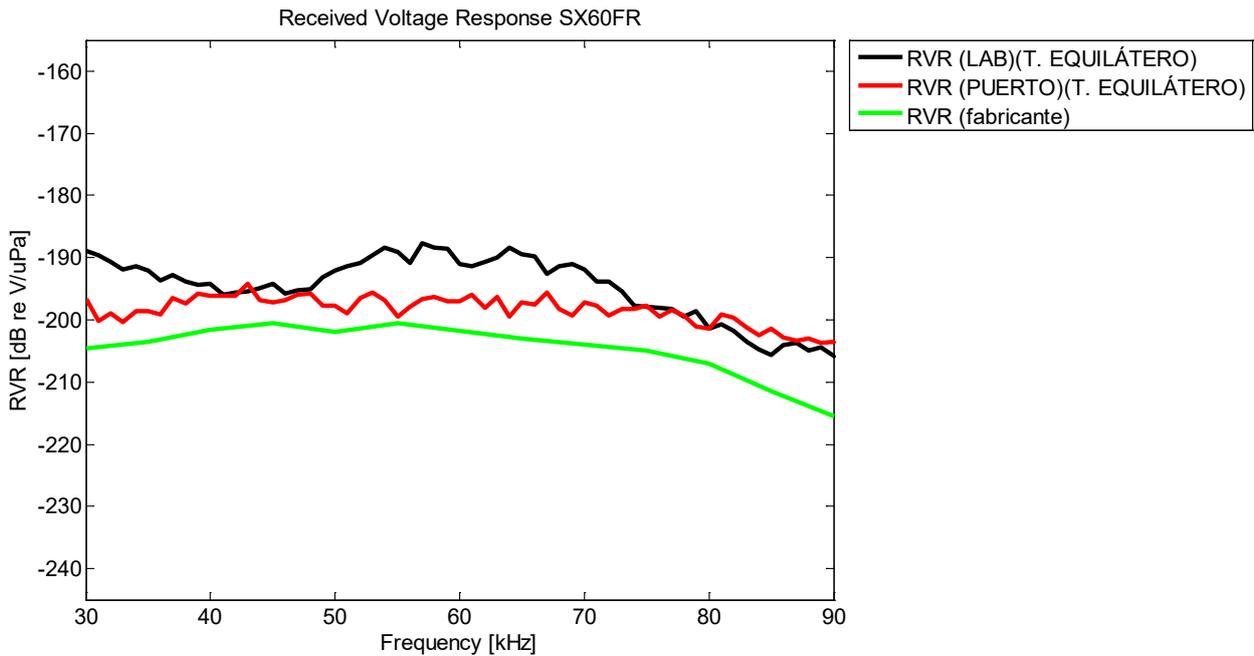


Figura 44. Curvas RVR obtenidas para el hidrófono SX60FR mediante reciprocidad

Los resultados obtenidos para el hidrófono SX60FR trabajando sobre un triángulo equilátero, primero en el laboratorio, y luego en el puerto, son similares a los obtenidos por el método de comparación directa (4.2.1.1.).

En la curva obtenida del análisis de las medidas realizadas en el laboratorio es posible observar una mayor diferencia (entre 10 y 12 dB) con la que prevista por el fabricante, que en la obtenida del análisis de las medidas realizadas en el puerto (entre 3 y 5 dB en la mayor parte de la curva representada). En ambos casos se ha obtenido una mayor sensibilidad en recepción que la prevista por el fabricante.

4.2.2.3. Hidrófono TC4034_01

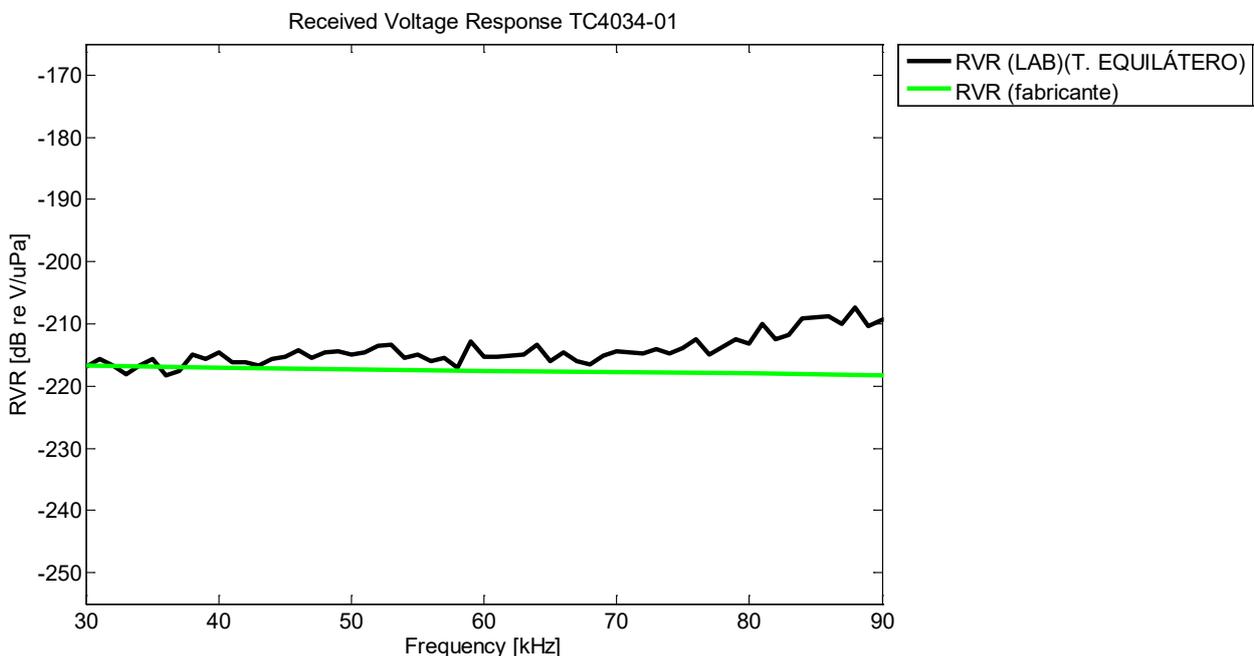


Figura 45. Curva RVR obtenida para el hidrófono TC4034_01 mediante reciprocidad

Las curvas obtenidas para el hidrófono TC4034_01 son muy similares a las obtenidas mediante el método de comparación directa (4.2.1.3.). Se ha obtenido una mayor sensibilidad en recepción que la prevista por el fabricante. Es posible observar una diferencia de unos 2 dB con la curva del fabricante hasta aproximadamente los 70 kHz, y también, que a medida que aumenta la frecuencia dicha diferencia va aumentando hasta llegar a los 9 dB en los 90 kHz.

4.2.3. Resultados método reciprocidad sobre geometrías asimétricas

Con este método se ha trabajado con los tres mismos hidrófonos (SX30FR, SX60FR y TC4034_01) del método anterior. La diferencia es que en esta ocasión los hidrófonos no están situados en los vértices de un triángulo equilátero, sino sobre tres geometrías asimétricas: triángulo isósceles, triángulo escaleno y situados en distintos planos (3.4.). Además, en esta ocasión únicamente es calibrado el hidrófono SX60FR.

En la siguiente gráfica se puede observar la curva obtenida de las hojas de características del fabricante (en verde) y las curvas de sensibilidad RVR obtenidas para la calibración realizada sobre las geometrías asimétricas empleadas.

4.2.3.1. Hidrófono SX60FR

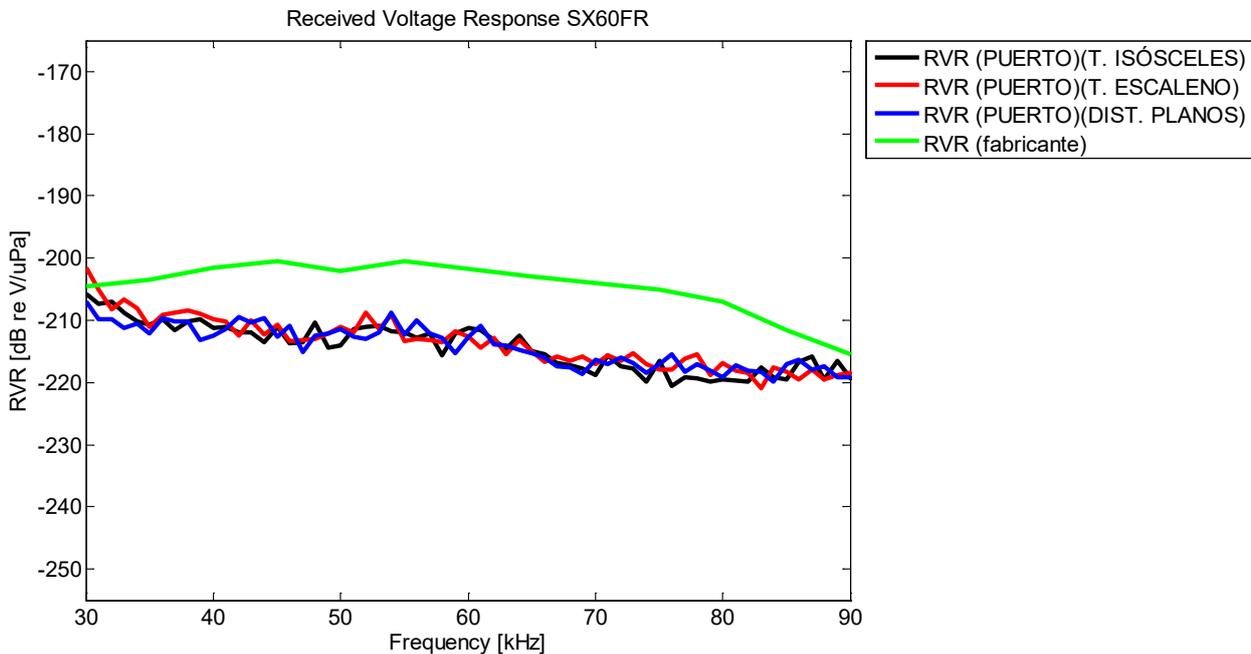


Figura 46. Curvas RVR obtenidas para el hidrófono SX60FR mediante reciprocidad sobre geometrías asimétricas

Observando la gráfica obtenida destaca, en primer lugar, la similitud que existe entre las tres curvas correspondientes a la sensibilidad en recepción obtenidas al trabajar en cada una de las geometrías asimétricas empleadas. También destaca que en los tres casos, a diferencia de lo sucedido al calibrar este hidrófono por los métodos de comparación directa (4.2.1.1.) y reciprocidad (4.2.2.2.), la sensibilidad obtenida es menor que la prevista por el fabricante.

Las diferencias entre la curva del fabricante y las curvas obtenidas, que entre los 40 kHz y los 80 kHz son de aproximadamente 10 dB, se deben a la utilización de geometrías no convencionales y los problemas que esto genera, como pueda ser una menor proporción de señal a ruido en recepción en algunas de las medidas.

5. CONCLUSIONES

Los objetivos planteados al inicio del proyecto fueron subdivididos en principales y secundarios. Entre los principales, destacaban la explicación y el análisis de los dos principales métodos de calibración de transductores acústicos: comparación directa y reciprocidad. Y la realización de una serie de medidas experimentales, posteriormente analizadas mediante unos scripts desarrollados para el software MATLAB, con las que demostrar la validez y la utilidad de dichos métodos. Entre los secundarios, se encontraba la explicación de las diferencias que existen entre el método de reciprocidad y el método de reciprocidad aplicado a geometrías asimétricas, y como variará la toma y el análisis de las medidas. También, la realización de una serie de medidas experimentales, posteriormente analizadas mediante otro script desarrollado para MATLAB. Otro objetivo era sentar las bases de futuros estudios en los que los autores pudiesen trabajar directamente con el método de reciprocidad sobre geometrías asimétricas, tomando como base el trabajo realizado en este proyecto.

Con estos objetivos en mente, durante este proyecto han sido calibrados una serie de transductores acústicos por medio de distintos métodos de calibración: comparación directa, reciprocidad y reciprocidad sobre geometrías asimétricas. Para ello, se ha trabajado sobre dos escenarios: un tanque en el laboratorio D-203 de la Escuela Politécnica Superior de Gandía, y una piscina con ejes motorizados en el Puerto de Gandía.

De cara a la evaluación de los resultados obtenidos, es necesario tener en cuenta que los transductores utilizados en este estudio han sido utilizados con anterioridad durante un tiempo considerable, por lo que sus propiedades mecánicas podrían haber variado con respecto a las otorgadas por el fabricante. Los valores de sensibilidad obtenidos en las medidas incluyen este posible error.

De la realización de este trabajo se extraen una serie de conclusiones, tanto en lo relativo a la eficacia de los distintos métodos de calibración utilizados y los resultados ofrecidos por los diversos transductores, como en lo relativo a las impresiones personales del autor y la consecución de los objetivos propuestos al inicio del proyecto.

La calibración por medio del método de **comparación directa** ofrece muy buenos resultados. Para los cuatros transductores empleados (SX60FR, ITC-1032, TC4034_01 y TC4034_02) se obtienen unos niveles de sensibilidad en emisión y recepción que mejoran las estimaciones hechas por los fabricantes. Se obtienen curvas de sensibilidad que prácticamente en todo el rango de frecuencias empleado, siguen la tendencia dictada por las hojas de características de los fabricantes, con diferencias en el margen de los 3-4 dB.

En caso de conocer las curvas características de alguno de los transductores y poder manipular la posición de estos a placer, este es el método recomendable, ya que requiere de menos material, los montajes y la toma de medidas son más simples, y ofrece muy buenos resultados.

Por medio del método de **reciprocidad** han sido calibrados tres transductores (SX30FR, SX60FR y TC4034_01). Las curvas obtenidas han resultado especialmente llamativas en el caso del transductor SX30FR, ya que es el único transductor calibrado tradicionalmente, bien por medio de comparación directa o bien por medio de reciprocidad, en el que los resultados de sensibilidad son peores que los estimados por la curva del fabricante. Dado que este hidrófono no ha sido calibrado por medio de otros métodos no es posible concluir si se trata de un fallo puntual en dicha serie de medidas o si el tiempo y el uso han podido cambiar (empeorar) las características de este transductor.

La calibración del hidrófono TC4034_01 ha proporcionado una curva de sensibilidad en recepción muy similar a la obtenida por comparación directa, siguiendo la tendencia de la curva del fabricante.

En cuanto al transductor SX60FR, ha sido calibrado en ambos escenarios prácticos. En el primero de ellos, el tanque del laboratorio, la curva obtenida está bien diferenciada de la prevista por el fabricante, en márgenes de 10-12 dB; mientras que la obtenida en la piscina del puerto difiere en márgenes de 3-4 dB. En ambos casos se consigue una mayor sensibilidad que la prevista por el fabricante, pero es posible observar como en la medida realizada en el puerto los resultados se aproximan más a lo previsto en las hojas de características. Estos mejores resultados se deben a las condiciones de las medidas, especialmente a la mayor distancia entre los transductores y las paredes del recinto de medida, que provoca que sea más complicado captar las interferencias producidas por las reflexiones de la señal.

Este método resulta muy útil por el hecho de poder llevar a cabo las calibraciones sin necesidad de conocer las características de ninguno de los tres transductores empleados.

El tercer método, consistente en una adaptación del segundo, es el método de **reciprocidad sobre geometrías asimétricas**. En esta ocasión, dado que la calibración se debe realizar sobre tres geometrías distintas (triángulo isósceles, triángulo escaleno y sobre distintos planos), se decide calibrar un único transductor, el SX60FR.

En los tres casos la sensibilidad obtenida es menor que la prevista por el fabricante, y además, destaca que las diferencias llegan a ser de aproximadamente 10 dB para algunas frecuencias. Si bien alrededor de los 30 kHz y los 90 kHz, las curvas obtenidas se aproximan a los valores propuestos en las hojas de características, en el resto de frecuencias no se observa una tendencia que obedezca a la curva del fabricante. Dado que al trabajar con este hidrófono en el resto del estudio, no se dan estas diferencias tan grandes, se puede concluir que están provocadas por la utilización de geometrías no convencionales y los efectos que estas tienen tanto en la recepción de la señal, como en el posterior cálculo de la sensibilidad, ya que el método de reciprocidad fue determinado considerando una misma distancia entre transductores.

Este método es realmente interesante pues permite realizar la calibración de transductores sin la necesidad de conocer las características de ninguno de ellos, y muy especialmente, pues es posible calibrar sin la necesidad de manipular la posición de dichos transductores. Tiene el potencial para llegar a cubrir una gran función en instalaciones de sensores acústicos y ópticos de difícil acceso, como puedan ser los telescopios submarinos de neutrinos ANTARES o KM3NeT, situados a grandes profundidades bajo el mar, donde el correcto funcionamiento y la precisión de los aparatos es un requerimiento obligado, y la calibración *in situ* de los transductores permitirá ahorrar una gran cantidad de tiempo y dinero.

Durante la realización de este proyecto se ha cumplido con la mayor parte de los objetivos propuestos. En primer lugar, los objetivos principales:

- Se ha explicado la base teórica y el proceso a seguir para realizar el calibrado de transductores acústicos por medio de los métodos de comparación directa ([2.2.1.](#)) y reciprocidad ([2.2.2.](#)).
- Se han tomado varias series de medidas experimentales por medio de ambos métodos principales (comparación directa: [3.2.](#), reciprocidad: [3.3.](#)).
- Sobre la base de una función facilitada por los cotutores, se han desarrollado dos scripts de MATLAB con el fin de analizar las medidas ([4.1.1.](#), [4.1.2.](#)); consiguiendo así ver la validez de ambos métodos ([4.2.1.](#), [4.2.2.](#)).

En cuanto a los objetivos secundarios:

- Se ha explicado que la base del método de reciprocidad sobre geometrías asimétricas es la misma que la del método de reciprocidad, y que las mayores diferencias se encuentran en el análisis de las medidas. Y se han tomado varias series de medidas experimentales con el método de reciprocidad sobre geometrías asimétricas (3.4).
- Se ha desarrollado un tercer script con el fin de analizar dichas medidas (4.1.3.). Si bien los resultados obtenidos tras analizar las medidas realizadas por medio del método de reciprocidad sobre geometrías asimétricas en este trabajo presentan una mayor desviación de la esperada, este método continúa siendo altamente prometedor y merecedor de futuros estudios en mayor profundidad, dadas las importantes ventajas previamente mencionadas.

Ya en el terreno personal, únicamente expresar satisfacción por el trabajo desarrollado. Con la salvedad de que los resultados obtenidos al trabajar sobre el método de reciprocidad aplicado a geometrías asimétricas han presentado una desviación un tanto mayor que la prevista, la totalidad de los objetivos propuestos por el tutor y los cotutores al inicio del proyecto han sido conseguidos.

Considero que este trabajo puede ser una buena guía y servir de base para todo aquel lector que se quiera introducir en el mundo de la calibración de transductores electroacústicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1].ARDID RAMÍREZ, M. (2009). *Calibration in acoustic detection of neutrinos*. Gandía, España: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research
- [2].ARDID RAMÍREZ, M. [et al.]. (2007). “Calibration of sensors for acoustic detection of neutrinos” en *Journal of Physics*, Conference Series 81. Gandía, España: IOP Publishing. <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/81/1/012015/pdf>> [Última consulta: 1 de agosto de 2016]
- [3].INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (1997). *Calibration of Hydrophones*, IEC STANDARD Publication No. 565. Ginebra, Suiza.
- [4].ISAEV, A. E. [et al.]. (2004). “Reduction of the Error of Hydrophone Calibration with Respect to the Field in a Hydroacoustic Tank by the Reciprocity Method” en *Acoustical Physics*, 2004, Vol. 50, No. 5, p. 535-543.
- [5].KEPRT, J., BENES P. (2008). *A comparison of AE sensor calibration methods*. Brno, República Checa. <<http://www.ndt.net/article/jae/papers/26-060.pdf>> [Última consulta: 1 de agosto de 2016]
- [6].KINSLER, L. E. [et al.]. (2000). *Fundamentals of Acoustics, 4th ed.* Estados Unidos de América: Publication Services, Inc.
- [7].LEVIN, P. A. (1973). “Calibration of Hydrophones” en *Technical Review: To Advance Techniques in Acoustical, Electrical and Mechanical Measurement*, No. 1, p. 3-17. Dinamarca: Brüel & Kjær. <<http://www.bksv.com/doc/TechnicalReview1973-1.pdf>> [Última consulta: 1 de agosto de 2016]
- [8].RAMIS J., ALBA J., MARTÍNEZ J.A. Y URIS A. (1998). *Características Generales de los Transductores*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- [9].TRESSLER, J. F. (2008). “Chapter 11. Piezoelectric Transducer Design for Sonar Applications” en *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications*, A. Safari y E. K. Akdogan. Estados Unidos de América: Springer Science Business Media, LLC.