

## ESTUDIO DEL EFECTO PARAMÉTRICO EN AGUA CON APLICACIÓN A UN CALIBRADOR ACÚSTICO PARA DETECCIÓN DE NEUTRINOS

PACS: 43.30.Yj

Campo Valera María Mercedes; Ardid Ramírez Miguel; D. Tortosa Dídac; Felis Enguix Ivan; Martínez Mora Juan Antonio.

Universidad Politécnica de Valencia

C/Paraninf 1, 46730, Grao de Gandía, Valencia. España

Tel: (+34) 963 870 000 - Ext. 43681

Fax: (+34) 962 849 309

E-mail: macamva@epsg.upv.es

### ABSTRACT

The parametric generation is a non-linear effect which allows the generation of low frequencies (secondary beam), emanating from high frequency beams (primary beam), showing a narrow directivity pattern, similar to that of the high frequencies, but maintaining a lower attenuation. In this case, the parametric effect is used for the construction of an acoustic calibrator for the detection of neutrinos in submarine telescopes. For that purpose, a systematic study with a flat transducer is presented, balancing the results on analytical and numerical models with experimental measures, using different sorts of signals, such as parametric sinus and sweeps.

### RESUMEN

La generación paramétrica es un efecto no lineal que permite la generación de bajas frecuencias (haz secundario) partiendo de haces de alta frecuencia (haz primario), presentando un patrón de directividad estrecho, similar al de altas frecuencias pero manteniendo una menor atenuación. En este caso el efecto paramétrico se emplea en la construcción de un calibrador acústico para la detección de neutrinos en telescopios submarinos. Para ello, se presenta un estudio sistemático con un transductor plano, contrastando los resultados de modelos analíticos y numéricos con medidas experimentales utilizando diferentes tipos de señales, tales como senos y sweeps paramétricos.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los neutrinos, son partículas fundamentales en la estructura del universo, producidas durante el decaimiento de elementos radiactivos. Tienen una masa 200.000 veces más pequeñas que la del electrón y no poseen carga eléctrica. Los neutrinos se comportan de forma diferente según la partícula cargada a la que estén asociados, clasificándose en tres tipos: neutrino electrónico, asociado al electrón; neutrino muónico asociado al muón y neutrino tauónico asociado a la partícula tau.

La mayoría de los neutrinos que están actualmente en el universo fueron originados alrededor, de 15 billones de años después del Big Bang, desde entonces el universo se expande y enfría, y la enorme cantidad de neutrinos existentes es lo que forma el llamado *fondo de radiación cósmica de neutrino*. El Sol es una fuente importante de producción de neutrinos, que se crean

en su interior por desintegración radiactiva, emitiendo  $2 \cdot 10^{38}$  neutrinos por segundo donde sólo  $4 \cdot 10^{10}$  por segundo y  $\text{cm}^2$  se reciben en la Tierra. También se forman durante fenómenos atmosféricos o nacimientos y muertes de estrellas, así como de explosiones de supernovas. Otros neutrinos se producen constantemente en las centrales nucleares y aceleradores de partículas [1].

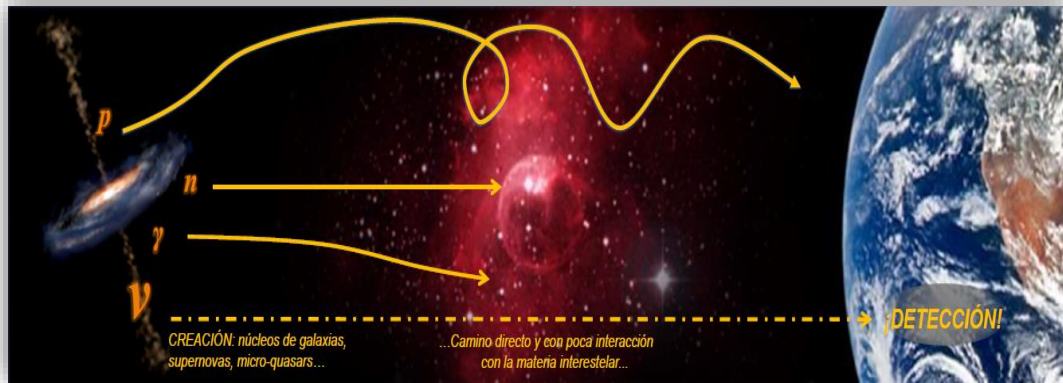


Fig. 1 Imagen del recorrido de ciertas partículas en el universo y su interacción con la Tierra. (Fuente: Ivan Felis, Tecnologías acústicas para la detección de materia oscura, tesis doctoral, 2017).

Los neutrinos, al no interactuar electromagnéticamente, no pueden ser detectados fácilmente. Consecuentemente, los neutrinos llegan a la Tierra sin sufrir ninguna desviación ni interacción, tal como se observa en la *figura 1*, ofreciendo información de la localización de la fuente que los genera, permitiendo así estudiar aquellos procesos donde los campos gravitatorios y electromagnéticos son muy intensos.

Para poder detectar los neutrinos se han creado los telescopios submarinos de neutrinos que poseen un sistema de detección óptica muy sensible a la señal luminosa generada en su interacción con la materia. Por ejemplo, si un neutrino con suficiente energía interacciona en un núcleo de un medio denso, el leptón resultante viajará a través del agua a una velocidad más rápida que la luz en ese medio; cuando esto sucede el leptón emite un destello llamado la luz de Cherenkov, siendo una onda de choque luminica que permite detectarlo. Esta luz característica, es detectada mediante fotomultiplicadores repartidos en grandes estructuras que forman arreglos lineales [2]. La amplitud de la señal recibida permite conocer la energía de la partícula detectada así mismo, a partir de las coincidencias en la detección de un suceso entre distintos fotomultiplicadores, reconstruir la trayectoria de la partícula detectada.

La acústica se encuentra presente en los telescopios de neutrinos, pues ayuda al posicionamiento y a la detección de estas partículas. Esta idea fue estudiada por Askaryan, en 1957 y se basa en que cuando un neutrino interactúa en un medio denso, ya sea agua o hielo, se produce una cascada hadrónica depositando alrededor del 25% de la energía que posee en un pequeño volumen de agua con forma cilíndrica de unos 10 m de longitud y pocos centímetros de diámetro. La gran deposición de energía en este volumen tan pequeño hace que el medio se caliente de forma casi instantánea generando un pulso acústico de forma bipolar con una emisión directiva alrededor de  $1^\circ$ . La frecuencia de esta señal tipo pulso es de aproximadamente 20 kHz [3].

El grupo de investigación en *Acústica Aplicada a la Detección de Astropartículas* de la UPV, está desarrollando un calibrador acústico para el telescopio de neutrinos KM3NeT. Para ello, se realiza en primer lugar, un estudio de señales acústicas a través de técnicas de correlación que permiten caracterizar de forma adecuada el transductor estudiado en cuestión; dichas magnitudes a caracterizar serán la directividad, la variación de voltaje y atenuación [4].

En este artículo se muestran los resultados de los primeros estudios teóricos y experimentales en esta línea de actuación.

## 2. EL EFECTO PARAMÉTRICO

Cuando una señal acústica de frecuencia dada interactúa en un medio no lineal, se forman frecuencias secundarias que son suma y resta de las frecuencias originales. Este fenómeno fue estudiado por primera vez por Westervelt, que explicó que cuando una onda con una frecuencia portadora se modula en amplitud por otra de baja frecuencia, [5] el medio es el encargado de demodular la onda dando como resultado otro tipo de frecuencias diferentes no presentes en la emisión relacionado con la frecuencia moduladora. A esto se le conoce como *efecto paramétrico*.

Si la onda emitida presenta una frecuencia portadora alta (*haz primario*), ésta se absorbe rápidamente en el medio permitiendo que las bajas frecuencias, diferencias, que se forman (*haz secundario*) se propaguen a mayores distancias. Como bien es sabido, las altas frecuencias tienden a ser muy directivas, a diferencia de lo que sucede con las bajas frecuencias, que son más omnidireccionales. Sin embargo, una de las características fundamentales del efecto paramétrico, es que las bajas frecuencias que se generan, poseen una directividad bastante estrecha, comparable con la del *haz primario*.

Estudios teóricos han determinado que la forma de la señal del *haz secundario*, es la segunda derivada de la envolvente al cuadrado de la señal emitida, siendo su amplitud proporcional al cuadrado de la del *haz primario*. La forma de la onda del *haz secundario* viene determinada por la siguiente ecuación:

$$p(x, t) = \left(1 + \frac{B}{2A}\right) \frac{p^2 S}{16\pi\rho c^4 \alpha x} \frac{\delta^2}{\delta t^2} \left[f\left(t - \frac{x}{c}\right)\right]^2 \sim \frac{\delta^2}{\delta t^2} f^2 \quad (1)$$

Donde  $S$  es el área de la superficie vibrante del transductor,  $f(t-x/c)^2$  es la envolvente de la modulación,  $x$  es la distancia a la fuente y  $t$  es el tiempo,  $B/A$  es el parámetro de no linealidad del medio,  $\rho$  la densidad,  $c$  la velocidad del sonido y  $\alpha$  el coeficiente de absorción en el medio. Por lo tanto la onda resultante  $p(x, t)$  será proporcional a la segunda derivada de la envolvente al cuadrado de la señal emitida [5].

## 3. DESARROLLO DE LAS MEDIDAS

Se presenta un estudio de señales con las que se han medido y analizado para un transductor emisor plano, caracterizándolo a través de las magnitudes de directividad, atenuación y variación de voltaje. En primer lugar, se realiza un modelo numérico en Comsol Multiphysics y un modelo analítico (pistón plano) en Matlab de la directividad, para la frecuencia portadora (*haz primario*)  $f_p=200$  kHz y se comparan con las medidas experimentales.

En segundo lugar, se lleva a cabo un análisis de las medidas realizadas; dicho análisis se desarrolla, en primer lugar, correlando la señal enviada grabada con la recibida y así obtener el *haz primario*. En segundo lugar, se correla la segunda derivada de la envolvente al cuadrado de la señal enviada grabada con la señal recibida filtrada a bajas frecuencias, para obtener el *haz secundario* o la señal paramétrica en cuestión.

## 4. INSTRUMENTAL DE MEDICIÓN

Todas las medidas se han realizado en un tanque de agua de tamaño  $1.12 \times 0.96 \times 0.51$  m<sup>3</sup>, siendo el elemento emisor el transductor plano Airmar P19 con una frecuencia de resonancia

de 200 kHz y una sensibilidad en emisión (TVR) de 167 dB re  $\mu\text{Pa/V}$  @ 1 m, que será la empleada como la frecuencia portadora modulada ( $f_p$ ). Como receptor se tiene el transductor ITC 1032 con una sensibilidad en recepción (RVR) de -194 dB re  $1\text{V}/\mu\text{Pa}$  y una frecuencia de resonancia en 33 kHz, sensible a las bajas frecuencias que se quieren detectar. Se emplea una frecuencia de muestreo  $f_s=20\text{ kHz}$ .

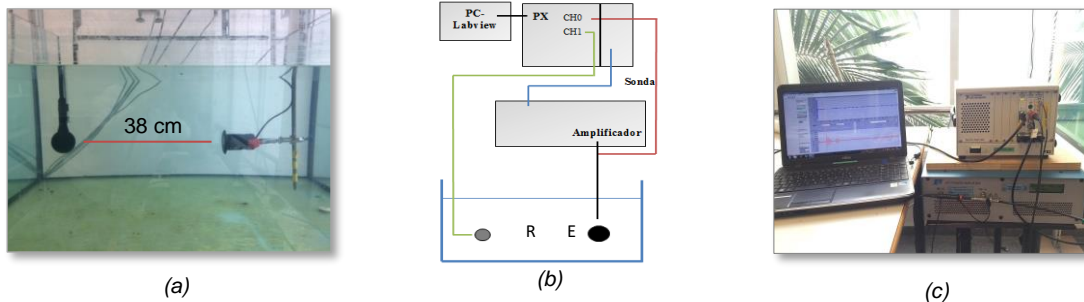


Fig. 2 Montaje experimental. (a) A la derecha, emisor Airmar P19 a la izquierda receptor ITC1032; (b) Esquema de conexionado; (c) instrumental de medición.

La figura 2a muestra el montaje donde la distancia entre el emisor y el receptor es de 38 cm. El movimiento del transductor receptor se realiza con el motor EvoDrive ST-23 a través de un sistema programado en LabView. En la figura 2b y 2c se observa el esquema de conexionado donde el transductor emisor se conecta a través del PXI National Instruments 5412 amplificando la señal con el amplificador 2100L RF de E&I. La recepción de la señal se realiza a través del mismo PXI National Instruments con la tarjeta 5102.

## 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Después de realizar varias pruebas con diferentes tipos de señales tales como senos y sweeps paramétricos a diferentes frecuencias y duraciones, se presentan en el siguiente artículo dos señales en cuestión. En primer lugar, se presentan los resultados de un seno paramétrico con frecuencia portadora  $f_p=200\text{ kHz}$ , frecuencia moduladora  $f_m=30\text{ kHz}$ , y con una duración de 167  $\mu\text{s}$ ; en segundo lugar, se estudia un sweep paramétrico con  $f_p=200\text{ kHz}$ , frecuencias moduladoras de 4 kHz hasta 40 kHz, con una duración de 1 ms.

A continuación se presentan las señales enviadas y recibidas de las dos señales como son el seno de 30 kHz a 167  $\mu\text{s}$  y el sweep paramétrico de 4 a 40 kHz de 1 ms.

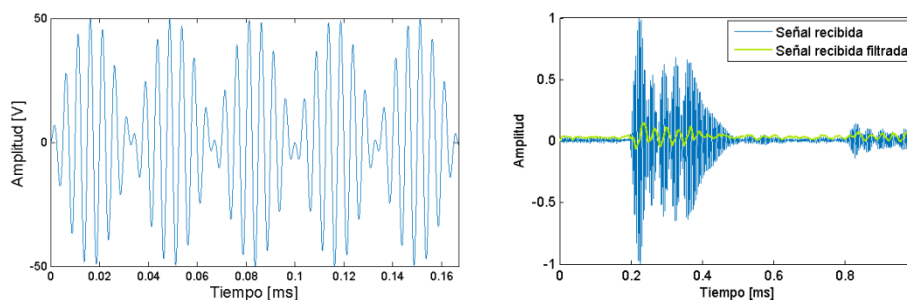


Fig. 3. Seno paramétrico de 30 kHz. A la izquierda señal enviada grabada, a la derecha señal recibida (azul) y señal recibida filtrada en bajas frecuencias (verde).

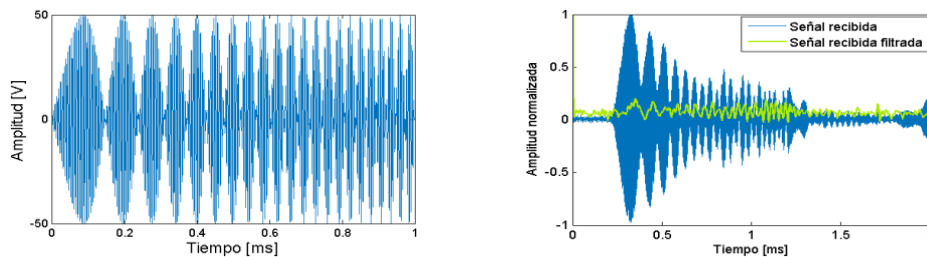


Fig. 4. Sweep paramétrico de 4 - 40 kHz 1 ms. A la izquierda señal enviada grabada, a la derecha señal recibida (azul) y señal recibida filtrada en bajas frecuencias (verde).

En la figura 5 se observa que el modelo tanto analítico como numérico concuerdan perfectamente con el medido experimentalmente para el haz primario.

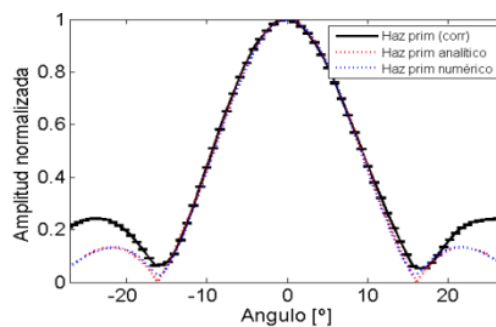


Fig. 5. Comparación del haz primario experimental con el simulado numéricamente y analíticamente.

Una vez obtenidas las medidas, se lleva a cabo una comparación de la medida experimental del haz primario con  $f_p=200$  kHz con la simulada numéricamente en Comsol Multiphysics y la simulada analíticamente, con Matlab.

La señal recibida es filtrada en bajas frecuencias por un filtro pasa banda y se multiplica por un factor de 20 para que pueda ser visualizada en la gráfica.

Finalizadas las medidas con las señales paramétricas para la caracterización del transductor Airmar P19, y en aras de corroborar el efecto no lineal en las señales recibidas, se realizan los siguientes estudios y ajustes correspondientes:

- **Estudios de directividad:** se analizan tanto el haz primario como el haz secundario. En este último caso las medidas se ajustan a la suma de dos contribuciones, la de la directividad de la frecuencia diferencia (baja frecuencia) y de la frecuencia portadora (alta frecuencia), según la expresión:  $A \cdot D_{\text{alta}} + B \cdot D_{\text{baja}}$ , donde A y B son la contribución de ambas directividades teóricas en el rango angular de las medidas realizadas.

- **Estudio de atenuación:** variando la distancia, x, entre emisor y receptor desde 15 a 55 cm, en pasos de 4 cm. El ajuste de estos resultados es:  $a \cdot x^{-b}$ , donde el parámetro b es la unidad para el haz primario (decaimiento hiperbólico, despreciando la absorción), y toma valores menores para el haz secundario.

- **Estudios de variación de voltaje:** emitiendo desde 200 mV hasta 1 V en pasos de 100 mV, se estudia la amplitud recibida, V. El ajuste se realiza según la expresión:  $A \cdot V^2 + B \cdot V + C$ , donde A es prácticamente nula para el haz primario (comportamiento lineal) y toma valores no nulos para el haz secundario (comportamiento parabólico).

A continuación se presentan las gráficas explicadas anteriormente para las señales estudiadas.

Seno paramétrico de 30 kHz a 167 us

Sweep paramétrico de 4-40 kHz a 1 ms

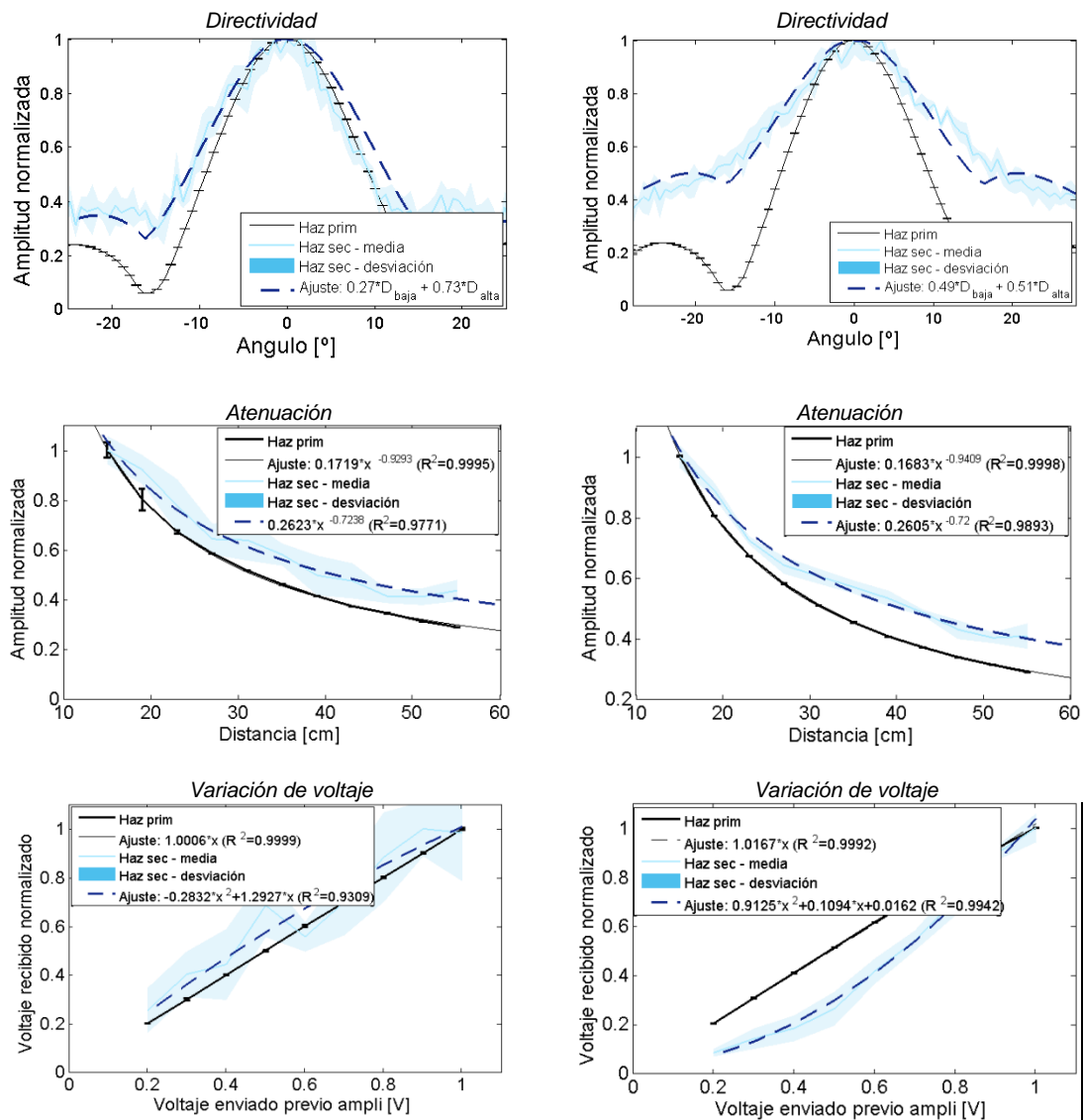


Fig. 6 Gráficas de directividad, atenuación y variación de voltaje para un seno y sweep paramétrico.

Para la directividad se puede observar que el patrón de la misma para ambas señales, muestran claramente la evidencia del efecto paramétrico del haz secundario, presentando una directividad similar a la del haz primario. En la siguiente tabla se puede observar lo dicho anteriormente.

TIPO DE SEÑAL	HAZ PRIMARIO	HAZ SECUNDARIO	AJUSTE	
	Ángulo de apertura	Ángulo de apertura	Baja Frec.	Alta Frec.
Seno paramétrico	± 9°	± 11°	0.27	0.73
Sweep paramétrico	± 9°	± 15°	0.49	0.51

Tabla 1. Descripción de los valores de ajuste y ángulo para la directividad de las señales medidas.

Respecto a la atenuación se tiene que éstas son parecidas para las dos señales. Las amplitudes tanto del haz primario como del secundario aumentan a medida que aumenta la distancia, se logra ver la generación paramétrica donde para el sweep, el exponente del ajuste para el *haz secundario* es menor que es lo que se espera, siendo de 0.7 y para el *haz primario* de 0.9 con una desviación de  $\pm 0.05$ . Para el seno paramétrico los valores son parecidos a los del sweep con una desviación menor de  $\pm 0.1$ .

Para la variación de voltaje, se observa claramente que existe una no linealidad para el *haz secundario* a medida que se aumenta la tensión. Existe una mayor claridad del haz secundario en la señal tipo sweep.

## 6. CONCLUSIONES

La generación de las señales paramétricas es un método adecuado cuando se quieren obtener haces de baja frecuencia directivos, como son en este caso, para la generación acústica del neutrino que trabaja alrededor de los 20 kHz.

Es mucho más claro estudiar el comportamiento paramétrico a través de señales tipo sweep, ya que al ser un ancho de banda frecuencial hay más facilidades para su detección debido a que el pico de correlación será más estrecho a diferencia del seno que se trata de una solo frecuencia.

Aunque los experimentos han sido realizados en un tanque con dimensiones pequeñas diferentes a las reales, los resultados obtenidos en estos estudios previos muestran una respuesta positiva.

## Bibliografía

- [1] Silvia Adrian Martínez, Design and Development of an Acoustic Calibrator for Deep-Sea Neutrino Telescopes and First Search for Secluded Dark Matter with ANTARES, Universitat Politècnica de València. Gandia: Tesis Doctoral, 2015.
- [2] Ivan Felis Enguix. Tecnologías acústicas para la detección de materia oscura. Universitat Politècnica de València. Gandia: Tesis Doctoral, 2017.
- [3] María Saldaña y et al., «Transducer Development and Characterization for Underwater Acoustic Neutrino Detection Calibration,» Sensors, 2016.
- [4] Ivan Felis Enguix. Estudio y análisis del efecto paramétrico en aire y de los efectos de interponer una capa de material tras el transductor. Universitat Politècnica de València. EPSG. Gandia: TFM, 2012.
- [5] María Saldaña Coscollar. Acoustic System Development for Neutrino Underwater Detectors. Universitat Politècnica de València. Gandia: Tesis Doctoral, 2017.