

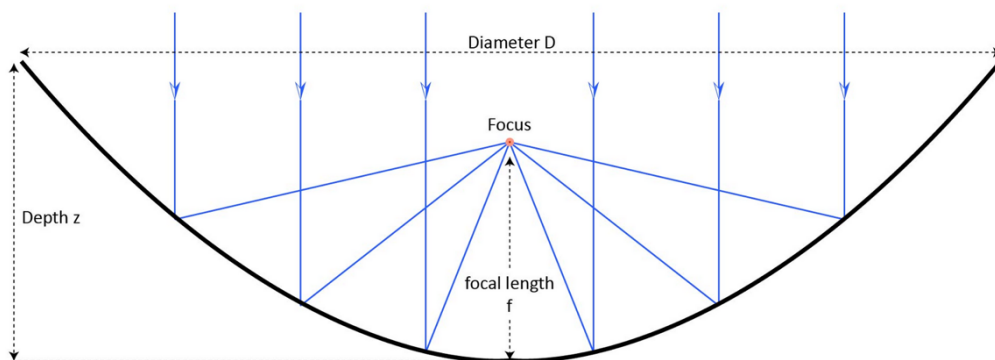
Construcción de hidrófono direccional.

Introducción.

Nos vamos a basar en los estudios de micrófonos direccionales parabólicos, un micrófono parabólico consiste en un elemento micrófono montado en el foco de un reflector parabólico. El reflector aumenta el rango de recogida del micrófono de dos maneras:

1. Proporciona *ganancia acústica* para los sonidos que llegan a lo largo del eje reflector de la simetría.
2. Lo que es más importante, la ganancia acústica disminuye a medida que el ángulo de llegada del sonido se desvía del eje de la simetría. Este atributo se llama *directividad*, y es la clave de la recogida a larga distancia porque atenúa el ruido fuera del eje que compete con el sonido objetivo.

Esto es posible porque, como se muestra en la Figura 1, un reflector parabólico (o dish) tiene la propiedad de que una onda de sonido golpeándola desde la dirección en el eje, independientemente de dónde en el plato golpear se reflejará en un punto focal específico determinado por la forma del plato. Por lo tanto, si se monta un elemento de micrófono en ese punto focal, recibirá toda la potencia acústica recibida por todo el plato, lo que resulta en una significativa ganancia acústica y una directividad:



- Directivity $D = \text{Gain } G = \varepsilon \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$, often expressed in dB as the Directivity Index = $10 \log(\text{Directivity})$, where ε is an efficiency parameter (typically 0.5 - 0.7)
 - Focal length $f = \left(\frac{D}{16z} \right)^2$
 - Half-power beamwidth $B = \left(\frac{k\lambda}{D} \right)$, where k is about 70 degrees
- Wavelength λ , diameter D , and depth z are all in the same units

Figure 1: Sounds arriving along a parabolic reflector's axis of symmetry are concentrated at its focus

Necesidad de una equiparación de la frecuencia

Según la Figura 1, la ganancia de un micrófono parabólico varía inversamente con el cuadrado de la longitud de onda (y por lo tanto directamente con el cuadrado de la frecuencia) del sonido que se captura. Esto significa que un micrófono parabólico actúa como un filtro de paso alto de primer orden, con una respuesta que se eleva a 6 dB por octava con una frecuencia cada vez mayor:

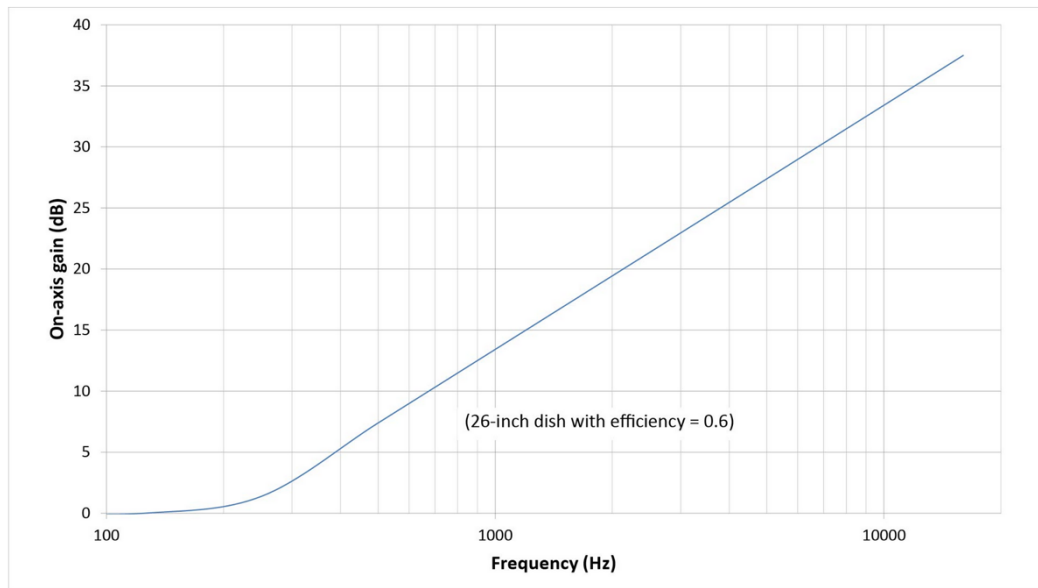


Figura 2: Ganancia en el eje versus frecuencia para un micrófono parabólico típico

Consideraciones de diseño del micrófono parabólico

Además del diámetro de plato de suma importancia, hay otras tres consideraciones en la elección de un plato (reflector) para un micrófono parabólico:

- La relación de plato de longitud focal-diámetro (f/D)
- La precisión de la forma parabólica del plato
- La suavidad de la superficie interior del plato

La relación f/D

Como se muestra anteriormente en la Figura 1, la longitud focal de un verdadero plato parabólico se puede encontrar como $f = D^2 / 16d$, donde D es el diámetro del plato y d es la profundidad del plato. La forma de un plato parabólico está completamente determinada por la relación de longitud focal a diámetro, f/D , que

oscila entre alrededor de 0,2 y 0,6. Como se muestra en la Figura 10, un plato parabólico profundo tendrá una corta longitud focal y una pequeña relación f/D , mientras que un plato poco profundo tendrá una larga longitud focal y una gran relación f/D :

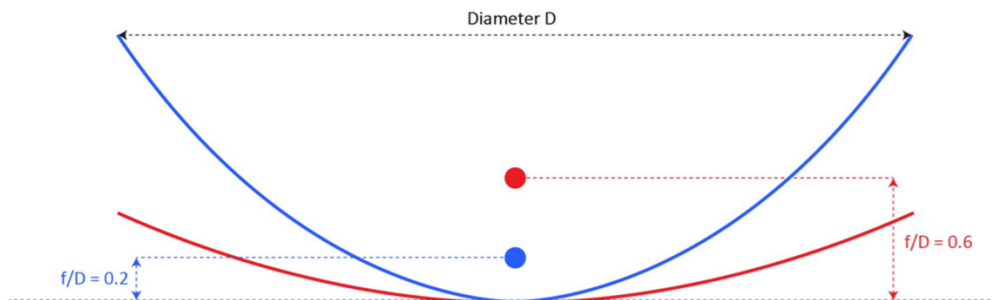


Figura 3 : Dos platos parabólicos con diferentes relaciones f/D

Para aplicar estos conocimientos a nuestro diseño de hidrófono tenemos que tener en cuenta:

1. Velocidad del sonido

- **En el aire:** La velocidad del sonido es de aproximadamente **343 m/s** (a 20°C), lo que significa que las ondas sonoras se propagan más lentamente.
- **En el agua:** La velocidad del sonido es mucho mayor, alrededor de **1500 m/s** en agua salada. Esto permite que las ondas sonoras viajen más rápido y se propaguen más lejos.

Esto implica que los sonidos se dispersan más rápidamente y a mayores distancias bajo el agua, lo que podría hacer que el hidrófono tenga un alcance mayor. Sin embargo, la mayor velocidad también puede modificar la forma en que las ondas sonoras se enfocan en un micrófono parabólico.

2. Atención de las ondas acústicas

- **En el aire:** Las ondas acústicas tienden a disiparse rápidamente en el aire debido a la resistencia al movimiento del sonido (impedancia acústica del aire), lo que limita la distancia de captación.
- **En el agua:** El agua tiene una mayor densidad y una impedancia acústica mucho más alta, lo que permite que las ondas acústicas se mantengan más

concentradas y viajen más lejos. Esto favorece una captación de sonido más precisa y de mayor alcance.

3. Refracción y propagación

- **En el aire:** Las ondas sonoras se propagan de manera relativamente directa, siguiendo la geometría de la parábola del micrófono, por lo que el diseño de la parábola será más eficiente para sonidos dentro de un rango específico de frecuencias.
- **En el agua:** El comportamiento de las ondas acústicas cambia debido a la diferencia en densidad entre el agua y el aire. Las ondas acústicas pueden sufrir **refracción** cuando pasan entre los dos medios, lo que podría afectar la dirección y la forma en que se enfocan en el micrófono. Esto puede requerir ajustes en el diseño del hidrófono para optimizar su rendimiento bajo el agua.

4. Frecuencia y absorción

- **En el aire:** Las frecuencias más altas se disipan más rápidamente debido a la mayor absorción en el aire.
- **En el agua:** Las frecuencias más bajas, como las que emiten los cetáceos (por ejemplo, los cachalotes), se mantienen mejor en el agua. Sin embargo, algunas frecuencias más altas pueden ser absorbidas por el agua dependiendo de su temperatura, salinidad y profundidad.

5. Direccionalidad y eficiencia

- **En el aire:** El micrófono parabólico está optimizado para captar sonidos en un área específica, aprovechando la acústica del aire. La eficiencia depende de la profundidad de la parábola y la distancia al foco.
- **En el agua:** La alta densidad del agua puede hacer que el sonido se enfoque más rápidamente, lo que significa que el diseño de la parábola deberá ser ajustado para capturar mejor los sonidos a distancias más largas. Además, el agua puede reducir las interferencias externas, lo que puede mejorar la calidad del sonido captado por el hidrófono.

Resumen:

- **En el aire:** Los micrófonos parabólicos están limitados por la velocidad de propagación del sonido y la disipación rápida de las ondas acústicas. Sin embargo, son eficientes para capturar sonidos en distancias relativamente cortas.

- **En el agua:** Los micrófonos parabólicos pueden tener un alcance mayor y una mayor eficiencia en la captura de sonidos debido a la mayor velocidad de propagación del sonido y menor dispersión de las ondas acústicas. No obstante, la refracción y la densidad del agua podrían requerir ajustes en el diseño.

Diseño de un hidrófono para localizar cachalotes

Características de los clics de ecolocalización:

- **Frecuencia:** Los clics de ecolocalización de los cachalotes tienen frecuencias que pueden variar entre **10 kHz y 200 kHz** o incluso más altas, dependiendo del contexto y la especie. Son sonidos muy agudos y de corto rango.
- **Duración:** Son sonidos muy breves, con duraciones que pueden ser de fracciones de milisegundos.

Comportamiento en el agua:

- **Propagación más eficiente:** Los clics de ecolocalización, debido a su alta frecuencia, se propagan mucho mejor en el agua que en el aire. El agua tiene una mayor densidad y una menor absorción de sonidos de alta frecuencia en comparación con el aire, lo que les permite viajar a distancias mucho mayores.
- **Mejor captación a larga distancia:** Debido a la mayor velocidad del sonido en el agua (aproximadamente 1500 m/s), los clics pueden viajar a través del agua más rápidamente y con mayor precisión. Esto permite que un hidrófono parabólico sea muy efectivo para captar estos sonidos, incluso a largas distancias.
- **Reflexión y eco:** Los clics de ecolocalización pueden reflejarse en objetos o en el fondo marino, lo que genera ecos que permiten a los cachalotes obtener una "imagen" de su entorno. Un hidrófono bien diseñado puede captar estos ecos, lo que proporciona información detallada sobre la ubicación de los objetos que el cachalote está detectando.

Para optimizar el diseño de una parábola dirigida a captar los clics de ecolocalización de los cachalotes, es importante considerar varias variables, como la frecuencia de los sonidos, el diámetro de la parábola y la distancia al foco. Dado que los clics de ecolocalización tienen frecuencias muy altas (entre 10 kHz y 200 kHz), el enfoque de la parábola debe ser adecuado para esas frecuencias.

Cálculo de la profundidad óptima (h) de la parábola

Para sonidos de alta frecuencia como los clics de los cachalotes, la profundidad de la parábola es clave para una captación precisa. Dado que los clics son señales de frecuencia alta, la parábola debe ser capaz de enfocar esas frecuencias de manera efectiva. Para esto, la relación entre el diámetro de la parábola y su profundidad juega un papel importante.

Fórmula para la profundidad (h) y el foco (f):

La fórmula básica para la profundidad de una parábola, considerando un enfoque eficiente de frecuencias altas, es aproximadamente:

$$h = \frac{d^2}{16f}$$

Donde:

- d es el diámetro de la parábola (en este caso, 30 cm).
- f es la distancia al foco (el lugar donde se coloca el micrófono).

Cálculo basado en un diámetro de 30 cm

Para un diámetro de **30 cm** y con un enfoque en frecuencias altas (como los clics), la distancia al foco debería estar en torno a 5,625 cm (como calculamos anteriormente).

Entonces, la profundidad óptima de la parábola se calcularía de esta manera:

$$h = \frac{30^2}{16 \times 5,625} = \frac{900}{90} = 10 \text{ cm}$$

Profundidad de 10 cm para un diámetro de 30 cm:

Este valor de **10 cm** es una buena aproximación para optimizar la captación de los clics de ecolocalización de los cachalotes. Este diseño permite que las ondas acústicas de alta frecuencia se enfoquen de manera eficiente en el micrófono, lo que es crucial para captar los clics con alta precisión.

Consideraciones adicionales:

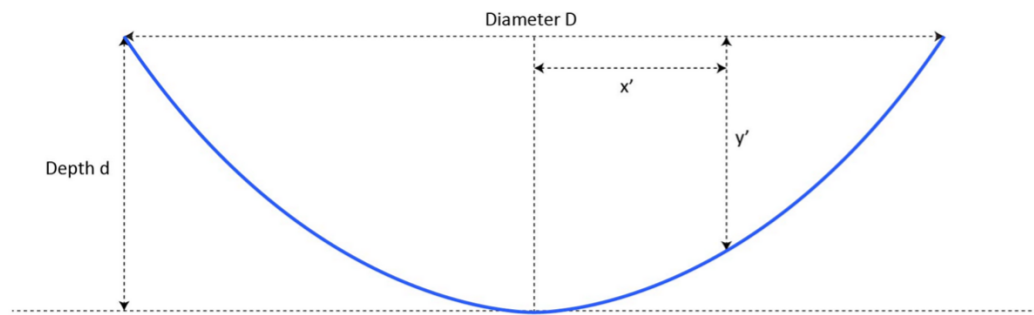
- **Frecuencias altas:** Si buscas mejorar aún más la precisión en la captura de estos sonidos de alta frecuencia, se podría experimentar con una parábola más profunda o ajustar ligeramente la distancia al foco.
- **Material de la parábola:** Asegúrate de usar materiales que no interfieran con la propagación del sonido, especialmente si la parábola se utiliza bajo

el agua. Materiales como el plástico o los compuestos ligeros y resistentes son ideales.

Cómo se verifica que un plato sea realmente parabólico?

Dependiendo de la fuente de su plato parabólico, usted ya podría estar razonablemente seguro de que tiene una forma verdaderamente parabólica. Pero si no estás seguro, hay tres maneras de decir:

- Se puede hacer un chequeo rápido tomando algunas medidas del plato y comparándolas con lo que se esperaría de un verdadero plato parabólico.



- Step 1: measure the diameter D and depth d of the dish
- Step 2: assuming the dish is parabolic, calculate the focal length $f = D^2/16d$
- Step 3: measure a depth y' at a radial distance x' from the vertex of the dish
- Step 5: use the parabola equation $y = x^2/4f$ to find the expected y when $x = x'$
- Step 6: compare the expected y found in step 5 with the measured y'
- Step 7: repeat steps 3 - 6 for at least one other radial distance
- Step 8: if each y is roughly equal to the corresponding y' , the dish is parabolic

Figure 4: Measuring a dish to see if it's parabolic

- Si el plato brilla, puede utilizar el *método de la linterna*.

Si el plato que tenemos es muy brillante, entonces el método de la linterna es una manera fácil de verificar que es verdaderamente parabólico. Sólo tienes que colocar la lente de una linterna dentro del plato y muévelo a lo largo de la línea central, mientras mira el plato en el eje. Si el plato es parabólico, podrás encontrar un punto focal afilado en el que la superficie de plato entero se ilumine de repente uniformemente.

Construcción y uso de un hidrófono direccional de bajo coste.

Para el desarrollo de este prototipo vamos a utilizar un hidrófono [H2d de Aquarian](#).

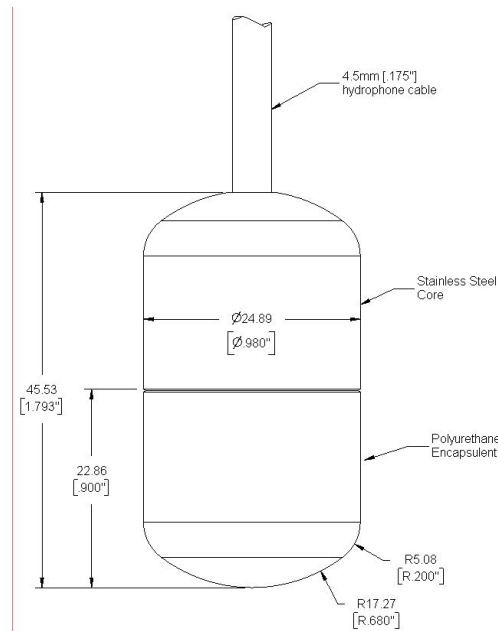


Figura 5, dimensiones H2D Aquarian hidrófono.

El mástil es de pvc de fontanería y el soporte del hidrófono y la parábola están contruidos en plástico PLA.

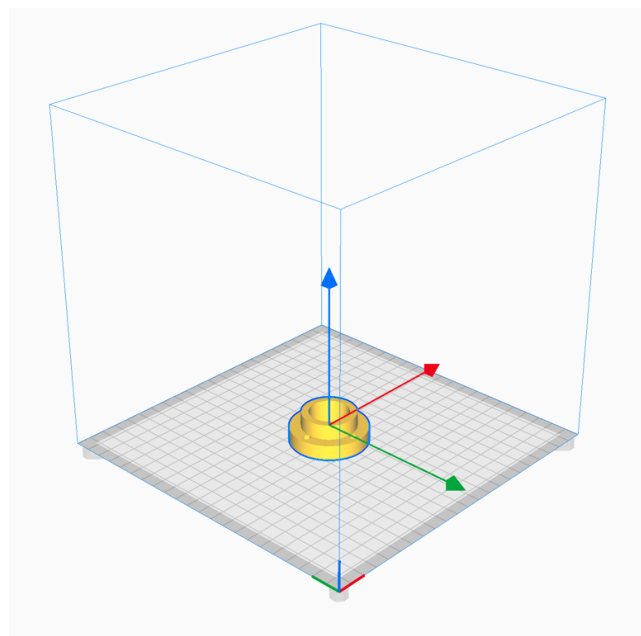


Figura 6, soporte hidrófono.

Diseñados mediante autocad e imprimidos según los datos que hemos calculado, como la impresora 3D. Como el tamaño para imprimir de 30 cm es superior a las dimensiones de impresión hemos dividido la parábola en cuatro sectores.

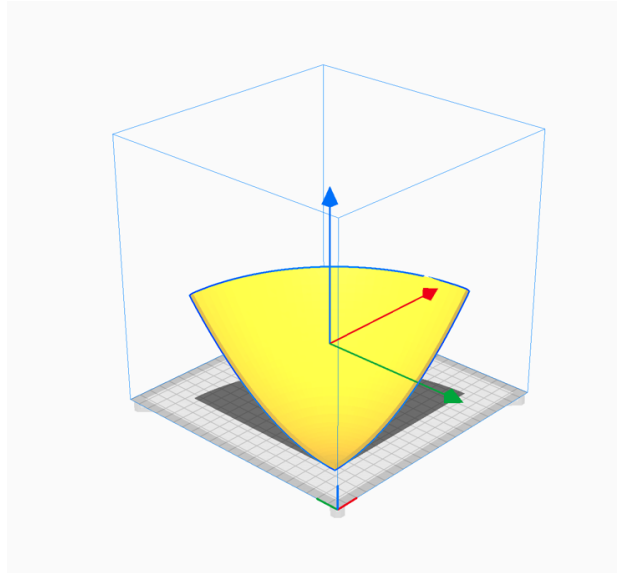


Figura 6, sector de la parábola.

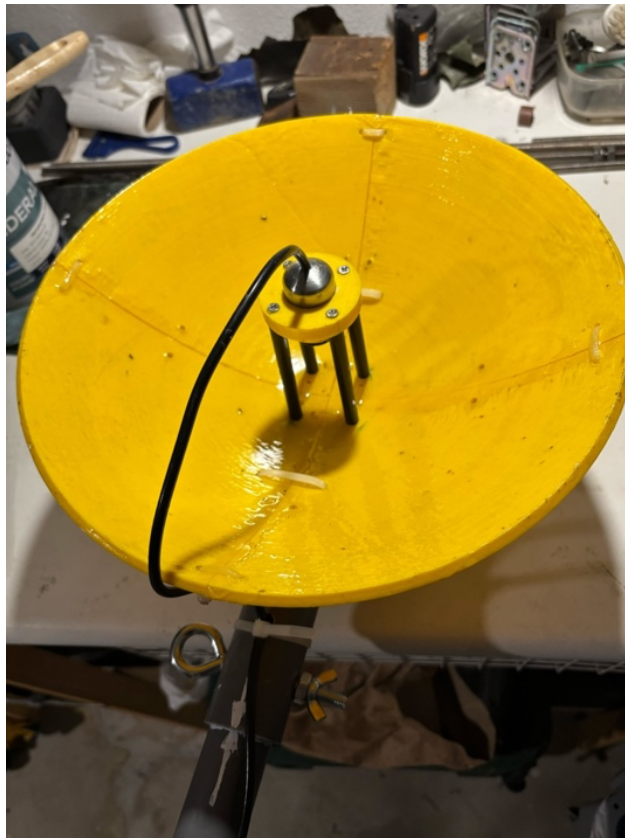


Foto 1, hidrófono colocado en la parábola.



Foto 2, Detalle de la colocación del mástil que se puede quitar para su transporte.



Foto 3, Brújula en el mástil para determinar el rumbo de los clic localizados.