

# Bandas prohibidas para rangos de frecuencias en el cristal sónico

Fernández Casafuz, Agustina; Martinez, Luciana; Nuñez Barreto, Nicolás

Laboratorio 5, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

Abril de 2015

## Resumen

Se caracterizó un cristal sónico de 10x10 tubos de aluminio en términos de los band-gaps (bandas prohibidas) presentes en él para un rango de frecuencias audibles. Esto se realizó para distintas configuraciones en la disposición del par parlante-micrófono respecto del cristal, cambiando así la periodicidad del cristal según la dirección de medición: horizontal o diagonal. Primero se caracterizó dicho par, obteniendo una respuesta no lineal con la frecuencia y muy ruidosa. Por este motivo se utilizó un Lock-in Stanford SR830 en las mediciones. En cada configuración se comparó el efecto de recubrir o no con gomaespuma el cristal, para evitar reflexiones y ruido indeseados, y se obtuvo un band-gap entre 7 y 9 kHz en la primer configuración (dirección horizontal), pero no se pudo definir concretamente un band-gap en la segunda configuración. Además se realizó un defecto dentro del cristal al remover 4 tubos centrales, volviendo a medir el band-gap en la configuración 1 y además obteniendo una frecuencia de resonancia en  $f=(8,3 \pm 0,1)kHz$  dentro del band-gap midiendo directamente dentro del defecto.

## 1. Introducción

Los cristales sónicos son arreglos periódicos de estructuras dispersoras inmersas en un fluido, cuyas dimensiones son comparables con la longitud de onda del sonido en el medio. Para esto, al ser  $c = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$  la velocidad de la luz en un medio de densidad  $\rho$  y constante elástica B, si se utilizan arreglos de cilindros de acero inmersos en el aire, la diferencia de densidades entre ambos ocasionará una gran reflectividad de las ondas incidentes dada por una gran diferencia entre las impedancias asociadas (del orden de  $10^5$  si se considera tubos de acero en aire) [1].

Se puede modelar al problema considerando esta gran diferencia de impedancias mediante la ecuación 1.

$$\frac{1}{B} \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} - \bar{\nabla} \cdot \left( \frac{1}{\rho} \bar{\nabla} p \right) = 0 \quad (1)$$

Esta ecuación, de propagación del sonido en fluidos, considera a las estructuras como fluidos con densidad alta; aproximación que se cumple, ya que, si tomamos las mismas de acero,  $\rho_{acero} = 7850kg/m^3$ , mientras que  $\rho_{aire} = 1,2kg/m^3$ , es

decir, hay 3 órdenes de magnitud de diferencia.

Proponiendo soluciones estacionarias y utilizando la estructuración periódica de  $\rho$  y B, se obtienen los modos de Bloch, dados por la ecuación 2.

$$p(\vec{r}) = e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}} \sum_{\vec{G}} p_{\vec{k}, \vec{G}} e^{i\vec{G} \cdot \vec{r}} \quad (2)$$

Allí,  $\vec{G}$  son vectores de la red, y  $\vec{k}$  es el vector de onda de Bloch. Con éstas dos ecuaciones se halla una ecuación de autovalores para  $p_{\vec{k}, \vec{g}}$  dada por 3.

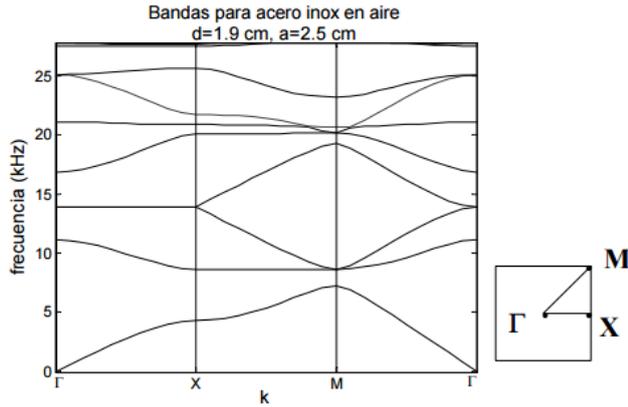
$$\sum_{\vec{G}} [\omega^2 b_{\vec{G}-\vec{G}'}^{-1} - \rho_{\vec{G}-\vec{G}'}^{-1} \cdot (\vec{k} - \vec{G}) \cdot (\vec{k} + \vec{G}')] p_{\vec{k}, \vec{G}} \quad (3)$$

Considerando una red de cilindros, los coeficientes están dados por la ecuación 4.

$$\rho_{\vec{G}}^{-1} = \begin{cases} \frac{\rho_h}{\rho_c} f + (1-f), & \text{para } |G| = 0 \\ (\frac{\rho_h}{\rho_c} - 1) 2f \cdot \frac{J_1(|\vec{G}|r_0)}{|\vec{G}|r_0}, & \text{para } |G| \neq 0 \end{cases}$$

Allí,  $J_1$  es la función de Bessel de orden 1 (proveniente de la simetría de los cilindros), y  $f = \pi r_0^2/a^2$  es un factor de llenado que incluye a la periodicidad  $a$  y  $r_0$  el radio de los cilindros.

Numéricamente, la ecuación 3 es resoluble mediante una rutina de Matlab, la cual se puede hallar en [3]. En la figura se grafica el diagrama de bandas para una red cuadrada de tubos de acero de diámetro 1,9 cm y de período 2,5 cm.



**Figura 1:** Diagrama de bandas para una red cuadrada de tubos de acero de 1,9 cm de diámetro y período 2,5 cm, obtenida mediante una rutina de Matlab

Allí se muestra un comportamiento particular: la existencia de bandas prohibidas de frecuencias; es decir, el dispositivo está actuando como un filtro de bandas de frecuencias [2]. Una entre 7 y 9 kHz, y otra a partir de los 27 kHz. Allí, la transmisión del sistema tiende a cero. Uno de los objetivos del trabajo es, justamente, contrastar dichos valores de banda teóricos con experimentales variando parámetros del cristal y observando los cambios en dicha banda.

## 2. Desarrollo experimental

El dispositivo armado fue un cristal sónico construido con 100 tubos (10x10) de aluminio de 1,9 cm de diámetro y 30 cm de alto, huecos, sostenidos cada uno por una torreta de aluminio y atornillados a una mesa óptica, como se aprecia en la figura 2.



**Figura 2:** Diseño experimental utilizado. Se colocó el cristal entre el micrófono y el parlante, alimentado en primer lugar por un generador de funciones (al parlante) y adquirido por un osciloscopio (al micrófono), y luego reemplazándolos por un Lock-in conectado a ambos.

Para las mediciones de los bands-gaps se utilizó un juego de parlantes-micrófono Genius, con la limitación de la frecuencia de corte del micrófono, 18 kHz. Al generar una señal eléctrica sobre el parlante, éste emite una onda sonora que luego es recibida por el micrófono y convertida a una señal eléctrica que puede ser medida con un instrumento como el osciloscopio o el Lock-in.

Para la adquisición de los datos se utilizó primero un osciloscopio Tektronix modelo TDS1002B conectado al micrófono junto con un generador de funciones Tektronix modelo AFG3001 conectado al parlante, barriendo un rango de frecuencias de 2 kHz a 14 kHz (debe ser menor a 18 kHz ya que ésta es la frecuencia de corte del micrófono utilizado). Posteriormente se reemplazaron el osciloscopio y el generador de funciones por un amplificador Lock-In Stanford Research Systems SR830, a modo de analizar de qué forma se puede mejorar la adquisición. El Lock-In tiene la ventaja de poder realizar barridos conectándolo al parlante, y al mismo tiempo adquirir la señal recibida por el micrófono. Se espera que éste sea un mejor método, ya que el Lock-in filtra parte del ruido proyectando la señal recibida sobre la enviada. Además, ya que se quiere medir la función de transferencia del sistema, para obtenerse con el osciloscopio sería necesario hallar la envolvente de la señal adquirida. En el caso del Lock-in, éste puede proveer el voltaje RMS de la señal recibida, por lo cual simplificaría el trabajo. En ambos casos se conectaron los instrumentos de medición a la Pc para su adquisición mediante el programa Labview. En el caso de Lock-in se conectó mediante una placa GPIB y se utilizó el programa de Labview SR830

para configurar el rango de frecuencias y el tiempo de los pasos.

## 2.1. Caracterización del par parlante-micrófono

En principio, antes de estudiar el comportamiento sobre el cristal, se caracterizó al instrumental.

Primero colocamos al parlante y al micrófono a una distancia mínima de  $(2,5 \pm 0,2)cm$  y a una altura fija de  $(14 \pm 0,2)cm$  sobre la mesa óptica, alimentando con el generador al parlante con una señal sinusoidal y leyendo la señal recibida en el osciloscopio conectado al micrófono. De esta forma podíamos en principio ver si el micrófono respondía a cambios de sonidos y que las fluctuaciones de la señal no se debieran solo al ruido del instrumental. Como estabamos usando la mesa óptica, como precaución cubrimos el cristal, que no estabamos utilizando, con goma espuma para evitar las reflexiones.

Se realizaron barridos de frecuencia con el generador, pero como la señal recibida era muy ruidosa, además de que la determinación de la envolvente de la señal se tornó imposible debido justamente al mencionado ruido. Es por ello que decidimos cambiar el par generador-osciloscopio por el Lock-in. Luego medimos la señal eléctrica del micrófono para diferentes distancias entre el parlante y el micrófono realizando un barrido de frecuencias con el Lock-in, tratando de recrear las condiciones en las que se iba a encontrar el cristal posteriormente. De esta forma podíamos estudiar la amplitud de la señal en función de las frecuencias y la distancia, y tener señales de base sin el cristal.

Para la configuración del Lock-in, usamos una señal sinusoidal de  $0,1 V_r.m.s$  para realizar los barridos de frecuencia en un rango de 2 kHz a 14 kHz, a veces variando el rango por 1 o 2 kHz. Además, el tiempo de integración fue de 30 ms, teniendo en cuenta que la señal de frecuencia mas baja (2 kHz) tenía un período de 0,5 ms y los pasos entre cada medición fue de 300 ms. El tiempo de integración debía ser mucho mayor que la frecuencia mas baja, pero menor que el tiempo entre los pasos. La escala de voltaje utilizada fue entre  $200y500\mu V$  dependiendo de la medición.

## 2.2. Estudio de los band-gaps

Para el estudio del band gap sobre el cristal, se colocó el juego de parlante-micrófono en diversas ubicaciones y se realizó con el Lock-in el barrido de frecuencias, midiendo el módulo (RMS) de la señal electrica recibida en función de las frecuencias. Debido al hecho de que la onda recorra caminos distintos puede ocasionar un cambio en las frecuencias que no pasan (frecuencias prohibidas), es decir, en el band gap, se utilizaron dos configuraciones diferentes. Se colocó el parlante y el microfonos enfrentados:

- Configuración 1: En dirección horizontal en el medio del cristal (entre el quinto y sexto tubo) como muestra la figura 1.
- Configuración 2: En dirección diagonal ,es decir en dos vértices opuestos del cristal.

La altura del parlante y del micrófono fue de 14 cm en todas las mediciones, de esta forma los instrumentos se hallaban a mitad de largo de los tubos y se evitaban efectos de borde. Por otro lado se colocaban ambos a menos de 3 cm cercanos al cristal, sin hacer contacto pero que tampoco influyeran los efectos de borde (es decir, que la onda sonora se transmitiera solo en el aire por mucha distancia). Hay que considerar que estas dos configuraciones tienen diferente separación entre los tubos y la onda recorre distinta distancia en el cristal. Estos valores se encuentran en la tabla 1 e indicados en la figura 3.

Dirección	Distancia	Longitud	Período
horizontal	$(28 \pm 0,2)$	22,4	2,43
diagonal	$(36 \pm 0,5)$	31,7	3,44

**Tabla 1:** Distancia (cm) entre el micrófono y el parlante en ambas direcciones con los parámetros (longitud y período) del cristal. Las distancias entre instrumentos fueron medidas por nosotros, los parámetros tomados de trabajos anteriores [4].



**Figura 3:** Dirección horizontal y diagonal en las que se realizaron las mediciones, indicando los parámetros del cristal.

A su vez, a estas configuraciones se les colocó una plancha de gomaespuma en la parte superior a modo de analizar si ésta reduce el ruido externo y las reflexiones de las ondas que se propagan hacia arriba producidas por el cambio de interfaz entre los cilindros y el aire que existe sobre éstos, comparando las mediciones en las que ésta no se colocó. Adicionalmente se realizaron mediciones con gomaespuma en los costados, y además con un diseño de gomaespuma lo suficientemente grande como para cubrir todo el montaje.

Las mediciones de voltaje en función de frecuencia sobre estas configuraciones se compararon en el análisis con las mediciones de base realizadas sin el cristal puesto (a iguales distancias correspondientes según la dirección horizontal o diagonal e igual altura).

Finalmente, retiramos los 4 tubos centrales del cristal, agregándole de esta forma un defecto al mismo, apreciable en la figura 4, a modo de ver si existe un cambio en el band gap, es decir, si éste origina que ciertas frecuencias se reflejen y no pasen, o bien si sucede lo contrario, es decir si algunas frecuencias que antes no pasaban, ahora lo hacen. Para estudiar esto, se midieron de dos formas, colocando al parlante y al microfono:

- Enfrentados en la dirección horizontal, con el microfono afuera, como en la configuración 1.
- Con el microfono dentro del cristal, centrado lo mejor posible en defecto de forma simétrica para el entorno de tubos.



**Figura 4:** Defecto introducido en el cristal. Se retiraron los 4 tubos centrales a modo de analizar el cambio en el band-gap, y la existencia de resonancias dentro del mismo.

### 3. Resultados y análisis

#### 3.1. Caracterización del parlante-microfono

Generamos con el Lock-in un barrido de frecuencias en un rango entre 2 y 14 Hz en el parlante y medimos la respuesta de la señal eléctrica en el microfono. Realizamos estas mediciones para siete distancias distintas entre el parlante y el microfono, a una altura fija de 14 cm.

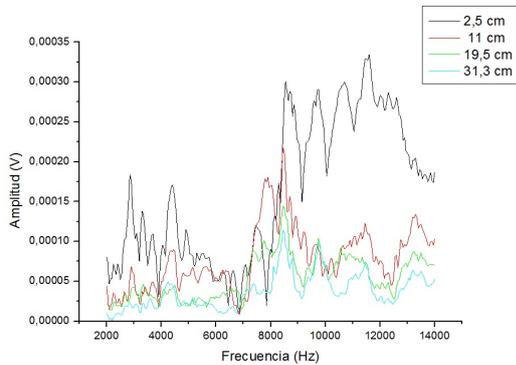
Distancias entre el parlante y el microfono
$(2, 5 \pm 0, 2)$
$(11, 0 \pm 0, 2)$
$(19, 5 \pm 0, 2)$
$(24, 0 \pm 0, 2)$
$(28, 0 \pm 0, 2)$
$(31, 3 \pm 0, 2)$
$(40, 0 \pm 0, 2)$

**Tabla 2:** Distancias entre el parlante y el microfono medidas con cinta métrica; el error proviene de que los instrumentos no son puntuales.

La distancia entre el parlante y el microfono está medida con un error de 0,2 cm, considerando que los instrumentos no se tratan de cuerpos puntuales. La altura está medida con la altura del microfono (modificada por el pie), y se lo intentó alinear con el parlante. La altura elegida es la uti-

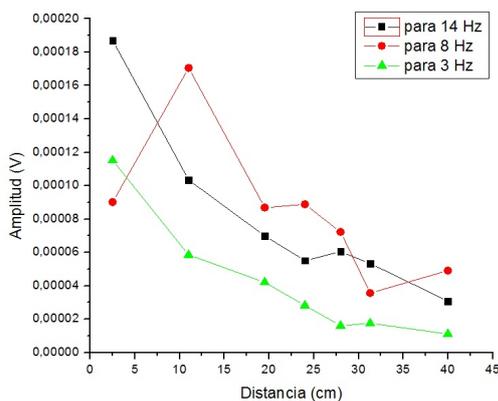
lizada en toda la experiencia.

A continuación se muestra en la figura 5 lo que medimos para 4 distancias entre 2,5 cm y 31,3 cm. Realizamos los mismos gráficos para el resto de las distancias de la 2, pero mostramos sólo estas señales para que no se superpongan.



**Figura 5:** Amplitud (voltaje RMS) en función de las frecuencias (Hz) para cuatro distancias entre el parlante y el micrófono.

Como se puede ver, la amplitud de la señal que mide el micrófono depende de la distancia y de la frecuencia. La dependencia con la distancia se debe a que el sonido en el aire se propaga como una onda esférica (la amplitud decae con la distancia). Por otro lado la dependencia con la frecuencia tiene que ver con la conversión de la señal sonora a eléctrica que hace micrófono y no con el fenómeno físico de interés. Como el comportamiento de la frecuencia es no lineal, para poder hacer un análisis a frecuencia fija y estudiar la dependencia solo con la distancia, se tomaron para tres valores fijos: 3 kHz, 8 kHz y 14 kHz y se graficó la amplitud en función de la distancia como muestra la figura 6

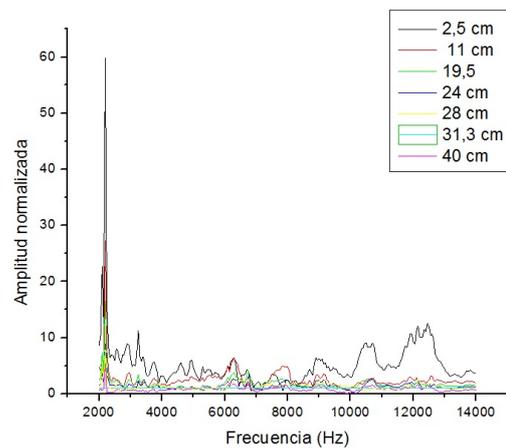


**Figura 6:** Amplitud (voltaje RMS) en función de las distancias (cm) entre el micrófono y el parlante para tres frecuencias fijas.

El comportamiento de la señal muestra para las frecuencias de 3 y 14 kHz que decae con la distancia, como era lo esperado. Pero muestra un comportamiento más complicado para 8 kHz por lo que decidimos realizar hacer un segundo método para entender el comportamiento del instrumental.

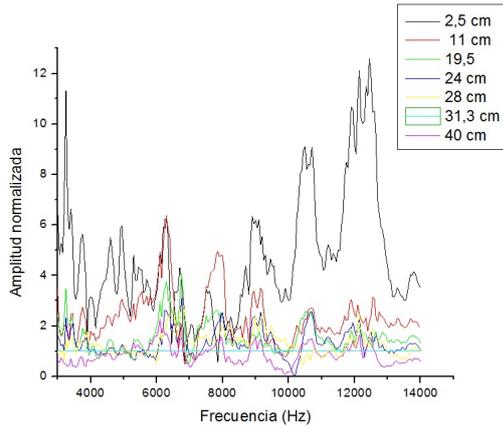
En este método, normalizamos las señales obtenidas con la señal en la distancia 31,3 cm que parecía ser la más estable con las frecuencias y la señal era no nula en la mayor parte del barrido. De esta forma suponiendo que la señal medida por el micrófono se puede expresar como una separación de variables  $A(f, x) = F(f) \cdot D(x)$ , siendo  $x$  la distancia y  $f$  la frecuencia, al normalizar la señal a una distancia fija con otra nos estaríamos desprendiendo de la dependencia con la frecuencia, obteniendo una amplitud relativa dependiente de la distancia solamente.

En la figura 7, podemos ver cómo queda la normalización. La misma presenta un pico pronunciado en 2 kHz debido a que la señal era casi nula para la distancia 31,3 cm en esa frecuencia.



**Figura 7:** Amplitud normalizada en función de las frecuencias para las 7 distancias.

Un zoom de la normalización entre el rango de 3 kHz y 14 kHz se puede apreciar en la figura 8; analizamos sobre estos valores para evitar la fluctuación en 2 kHz.



**Figura 8:** Amplitud normalizada en función de las frecuencias entre 3kHz y 14 kHz para las siete distancias.

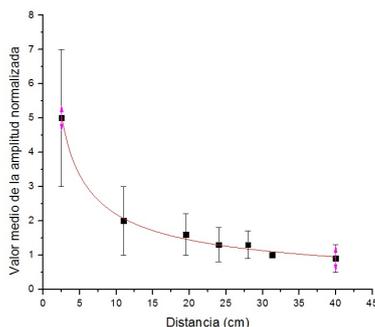
Como podemos ver, la señal para cada distancia todavía presenta variaciones a distintas frecuencias, lo cual vamos a asignar como ruido como parte del error instrumental.

Realizamos estadística en cada caso, obteniendo el valor medio y a la desviación estándar como error.

Distancia	Valor medio	Desviación estándar
$(2,5 \pm 0,2)$	5	2
$(11,0 \pm 0,2)$	2	1
$(19,5 \pm 0,2)$	1,6	0,6
$(24,0 \pm 0,2)$	1,3	0,5
$(28,0 \pm 0,2)$	1,3	0,4
$(31,3 \pm 0,2)$	1	0
$(40,0 \pm 0,2)$	0,9	0,4

**Tabla 3:** Valores medios de la amplitud normalizada con la desviación estándar para cada distancia.

Con los datos de la tabla 3, realizamos la figura 9.



**Figura 9:** Valores medios de la señal normalizada en función de la distancia

En resumen, cualitativamente el comportamiento es como las frecuencias de 3 kHz y 14 kHz de la figura 6, pero al normalizar podemos analizar la respuesta del micrófono independiente de la frecuencia, considerando que las desviaciones de la señal a distancias fijas provienen del ruido del instrumento.

En 9 se hizo el ajuste del tipo:  $f(x) = ax^b$  y se obtuvo  $a = 8,8$ ,  $b = -0,6$ .

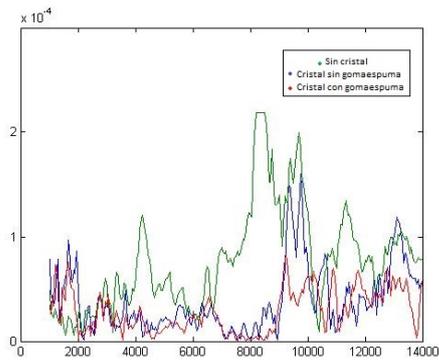
De acuerdo al exponente  $b$  del ajuste, la señal parecería ser la superposición de una onda cilíndrica y una esférica, lo cual se corrobora con que el sonido en el aire se propaga como una onda esférica.

### 3.2. Estudio de los bands-gaps

Como vimos en la caracterización del parlante-micrófono, el micrófono depende de forma no lineal de las frecuencias. Por lo que a la hora de medir los band-gaps obtenidos al poner el cristal entre el parlante el micrófono, necesitamos comparar la señal obtenida con la señal de base a la misma distancia e igual rango de frecuencias sin el cristal puesto.

#### 3.2.1. Con parlante y el microfonos enfrentados en una dirección horizontal en el medio del cristal.

A continuación en la figura 10, graficamos la señal de base y la señal con el cristal para una distancia de  $(28 \pm 0,2)cm$  entre el micrófono y el parlante puestos en la dirección horizontal. Como dijimos en el procedimiento experimental, se cuidó que los parlantes y el micrófono estuvieran a menos de 1 cm del cristal (pero no pegado a los tubos) para evitar efectos de borde. En el gráfico también comparamos el efecto de la goma espuma sobre el techo y las paredes del cristal en contacto directo para evitar las reflexiones.



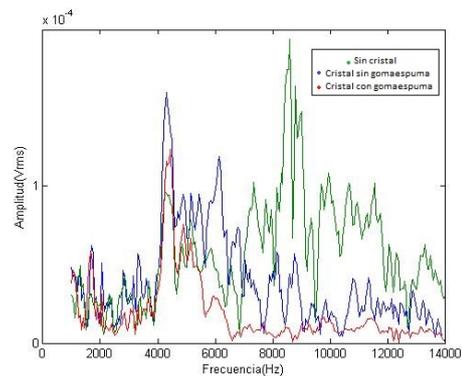
**Figura 10:** Amplitud (voltaje RMS) en función de las frecuencias (Hz) para la señal de base sin el cristal (verde), con el cristal de por medio (azul) y el cristal con gomaespuma cubriéndolo (rojo).

En la figura 10, comparando la señal de base y las señales con el cristal de por medio, puede verse una clara disminución de la amplitud en el rango de frecuencias entre 7 kHz y 9 kHz, siendo este un posible band-gap, coincidente con el modelo teórico presentado en la introducción. Por otro lado, puede verse una mayor atenuación en ese rango de frecuencias por el efecto de la goma espuma, lo que nos hace pensar que se trataría de un band-gap porque el efecto del cristal sobre la señal se ve aumentado al evitar los efectos de borde (la transición entre el aire y los tubos de metal) con la gomaespuma.

Otro criterio posible para establecer band-gaps de forma más precisa, es realizar un mayor número de mediciones de la experiencia, y utilizando normalizaciones con esta distancia fija para desprenderse de la dependencia con la frecuencia, hacer estadística para determinar el error del ruido de la señal. De esta forma, teniendo un error de la señal más claro, se puede encontrarse más band-gaps ya que podría ser que la señal sea considerada nula para nuestro instrumento aún cuando mida  $10^{-5}V$  rms de amplitud.

### 3.2.2. Con parlante y el microfonos enfrentados en dos vértices opuestos del cristal (en dirección diagonal).

En la figura 11, graficamos la señal de base y la señal con el cristal para una distancia entre el micrófono y el parlante de  $(36 \pm 0,5)$  enfrentados en la dirección diagonal. Volvemos a comparar el efecto de la gomaespuma sobre el cristal.



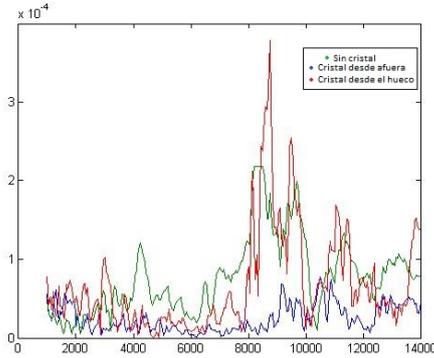
**Figura 11:** Amplitud (voltaje RMS) en función de las frecuencias (Hz) para la señal de base sin el cristal (verde), con el cristal de por medio (azul) y el cristal con gomaespuma cubriéndolo (rojo).

Aquí si miramos la curva con gomaespuma vemos que hay un rango muy grande para el cual hay frecuencias atenuadas entre 6,5 kHz y 14 kHz para el caso de con y sin goma espuma, lo cual dificultaría la determinación del band-gap. Sin embargo notamos diferencias con la atenuación de la señal de base para la configuración anterior de la figura 10. Una causa de esto es que la distancia entre los tubos es mayor en la dirección diagonal (geoméricamente,  $\sqrt{2}$  veces mayor), por lo que el período también lo es y esto varía las bandas prohibidas. Por otro lado las condiciones de borde entre las dos configuraciones no son iguales. Mientras que en el caso de la primer configuración como los instrumentos se encontraban enfrentados en una dirección horizontal, la onda incidente se encontraba con tubos en sus costados; en cambio en esta nueva configuración, los instrumentos a sus costados próximos no tienen tubos porque se encuentran en los vértices del cristal.

Una posible ampliación del estudio de esta configuración podría ser construir un cristal cuadrado con periodicidad  $\sqrt{2}$  veces mayor que el usado y relizar las mediciones en la dirección horizontal, como en la primera configuración. De esa forma es posible comparar la relación del período con los band-gaps para iguales condiciones de contorno y por otro lado evaluar como influye el contorno al medir en la dirección diagonal (con los instrumentos en vértices opuestos) con igual período que en la dirección horizontal.

### 3.2.3. Band-gap con defecto 2x2 sacando cuatro tubos en el centro del cristal.

En este caso estudiamos el defecto en el cristal midiendo la señal con el parlante y el micrófono enfrentados en la dirección horizontal desde afuera del cristal (a la distancia de 28 cm) y midiendo con el micrófono adentro del hueco. Comparamos estas señales con la señal de base sin el cristal en la figura 12.



**Figura 12:** Amplitud (voltaje RMS) en función de las frecuencias (Hz) para la señal de base sin el cristal (verde), con el cristal con el defecto medido desde afuera (azul), con el cristal con el defecto con el micrófono en el hueco (rojo). Se aprecia una resonancia dentro del hueco para una frecuencia no transmitida fuera.

Por un lado comparando la señal de base (verde) y la señal con el cristal medido desde afuera (azul) podemos ver que la señal disminuye notablemente en el rango entre 6 y 8,5 kHz, siendo éste un band gap para esta configuración. Se puede apreciar que se ubica en frecuencias menores a configuraciones anteriores.

Sin embargo, la señal roja, obtenida mediante la colocación del micrófono dentro del defecto, presenta amplitudes no nulas dentro de este rango, principalmente entre 7,8 y 8 kHz, donde se ve claramente una frecuencia de resonancia para  $f=(8,3 \pm 0,1)kHz$ . Entre 6 y 7,8 kHz se puede apreciar una señal de aproximadamente la mitad de voltaje que la señal de base, cuando si se ve dicho rango con el micrófono fuera la señal se ve claramente atenuada. Esto nos dice que las frecuencias que no se transmiten fuera del cristal, es decir, las frecuencias dentro de la banda prohibida, resuenan dentro del defecto, con una frecuencia de

resonancia marcada, sin transmitirse hacia afuera del cristal, quedando atrapado el campo sonoro en el defecto. Esto sucede ya que el campo sonoro en dicho defecto está irradiando en todas direcciones, lo cual genera reflexiones que a su vez presentan un fenómeno de interferencia de las ondas entre sí, con un máximo en la anterior frecuencia de resonancia. Sería conveniente un estudio más exhaustivo sobre dicho fenómeno, por ejemplo, variando el tamaño del defecto.

## 4. Conclusiones

Se contó con un cristal sónico con 100 tubos de acero equiespaciados formando una estructura cuadrada de dimensiones del orden de la longitud de onda del sonido en el aire, de modo que éste actúa como filtro de bandas. Se hallaron diversos band-gaps para distintas configuraciones parlante-micrófono.

En principio, se caracterizó el instrumental parlante-micrófono conectados al Lock-in, analizando la dependencia con la frecuencia y la distancia. Sabiendo que el sonido se propaga en el aire como una onda esférica, la amplitud debía decaer con la distancia pero ser independiente de la frecuencia, sin embargo vimos que la respuesta del micrófono tiene un comportamiento no lineal con la frecuencia. Debido a esto a la hora de medir los band-gaps es necesario comparar la amplitud de la señal atravesando el cristal con la amplitud de una señal de base con los instrumentos puestos a igual distancia.

Teniendo esto en cuenta, para la configuración en la dirección horizontal de los instrumentos se contrastó el resultado del band-gap con el modelo teórico, obteniéndose un gap entre 7 y 9 kHz, consistente con el mismo. Si bien la determinación de este rango no fue numérica, es claro la existencia de una banda prohibida en ese rango ya que se compararon mediciones con gomaespuma en distintos lugares, las cuales funcionan de buena forma absorbiendo el sonido y evitando reflexiones. Para una mejor determinación, sería conveniente la adquisición de mayor número de mediciones para poder hacer estadística y cuantificar el ruido.

Para la configuración en la dirección diagonal no se pudo determinar el band-gap, pero se observó una atenuación de la amplitud diferente a la configuración anterior. Esto puede deberse a que el período es más grande, pero también hay que

tener en cuenta efectos de borde. Para determinar esto conviene repetir la experiencia, comparando los instrumentos puestos en diagonal con los instrumentos puestos en horizontal con igual período (alterando el dispositivo).

Finalmente se retiraron los 4 tubos centrales del cristal para crear un defecto en el mismo, observándose un corrimiento del rango del gap. Pero lo interesante es que al colocar el micrófono dentro del hueco se observó, en primer lugar, frecuencias no filtradas dentro del band gap, y en segundo lugar, para una de esas frecuencias

$((8, 3 \pm 0, 1)kHz)$  se aprecia una clara resonancia. Una posible interpretación de esto es que se está dando un fenómeno de interferencia del campo sonoro, al emitir en todas las direcciones dentro del hueco, con una frecuencia central perteneciente al band-gap; es decir, para esta frecuencia, las reflexiones internas son máximas, y, como es de esperarse, su transferencia es nula. Es necesario un análisis más exhaustivo de este fenómeno para llegar a más conclusiones, como de qué forma modelarlo, y las características de esta interferencia.

## Referencias

- [1] *Cristales sónicos*, Laboratorio 5, Depto. de Física, FCEyN, UBA.  
[http://users.df.uba.ar/bragas/Labo5\\_1er2011/Practica%20de%20Cristales%20Sonicos.pdf](http://users.df.uba.ar/bragas/Labo5_1er2011/Practica%20de%20Cristales%20Sonicos.pdf)
- [2] Lonni, Aurélien *Focalización del sonido mediante estructuras periódicas tridimensionales*, Universidad Politécnica de Valencia, Gandia, 2011  
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/14133/>
- [3] [http://users.df.uba.ar/bragas/Labo5\\_1er2011/sonicbands.m](http://users.df.uba.ar/bragas/Labo5_1er2011/sonicbands.m)
- [4] *Cuaderno de Cristales sónicos*, Laboratorio 5, Depto. de Física, FCEyN, UBA, 2do cuatrimestre 2013, Grupo 2: Fernandez Arancibia y Pose
- [5] *Medición de la brecha entre bandas de un cristal sónico*, Laboratorio 5, Depto. de Física, FCEyN, UBA, Babino, Carabedo y Rodríguez  
[http://www.tandar.cnea.gov.ar/~sacanel1/Labo5/files/Cristales%20Sonicos\\_Babino\\_Carabedo\\_Ro](http://www.tandar.cnea.gov.ar/~sacanel1/Labo5/files/Cristales%20Sonicos_Babino_Carabedo_Ro)