

CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS
DEL FUNCIONAMIENTO DE
UNA PLACA DE CHLADNI

Realizado por Amalia Gallego Carracedo
Coordinado por Gregorio Rosa Palacios
Realizado en el IES. Arquitecto Ventura Rodríguez.
2021/22

CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA PLACA DE CHLADNI

Amalia Gallego Carracedo

Coordinador: Gregorio Rosa Palacios

Este trabajo ha sido realizado en el programa de Bachillerato

de investigación del IES. Arquitecto Ventura Rodríguez

Boadilla del Monte (Madrid), noviembre 2021.



Construcción y análisis del funcionamiento de una placa de Chladni por Amalia Gallego Carracedo se distribuye bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional.

Para ver una copia de esta licencia, visita <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no habría sido posible sin las aportaciones de muchas personas que me han ayudado no solo en la elaboración del proyecto en sí, sino a mantener la cabeza fría y poner unos límites a mi curiosidad.

En primer lugar deseo expresar mi agradecimiento al IES Arquitecto Ventura Rodríguez, por su organización tanto del programa de excelencia como la de este proyecto.

A continuación agradezco al tutor y coordinador de este proyecto: a mi profesor de física, Gregorio Rosa Palacios, ya que no ha podido ponerle más atención y darle más apoyo a mi trabajo. Gracias por poner mis ideas en orden.

Seguidamente doy las gracias a todos los profesores que organizaron talleres para la preparación de este proyecto, así como a mi anterior tutora y profesora de física María Paz Rosado Gómez, por escuchar mis primeras ideas de temas y por prestarme el libro de física que me ha servido de apoyo durante todo el proceso.

También me gustaría agradecer a mi familia, por brindarme apoyo emocional, por recordarme que el descanso también es importante y por escuchar mis incesantes quejas sobre el proyecto y sobre bachillerato. Especialmente me gustaría agradecer a mi padre, quien ha participado activamente en el trabajo ayudándome a construir la placa de Chladni y leyendo mis documentos para encontrar fallos; y a mi hermana, quien me ha ayudado a recortar las infinitas fotos del anexo y ha participado en algunas correcciones del documento escrito.

Por último, agradezco a todos mis amigos y compañeros de clase, por acompañarme en este estresante camino y aportar ideas y críticas constructivas cuando más lo necesitaba, especialmente a mi amiga de la infancia Paula Vela Hidalgo, quien ha pasado horas hablando conmigo mientras trabajábamos en nuestros proyectos y resolvíamos nuestras dudas mutuamente.

MUCHAS GRACIAS A TODOS.

RESUMEN

La cimática es un fenómeno vibratorio producido por las ondas sonoras, por el cual éstas se hacen visibles, formando patrones geométricos en distintas superficies. Uno de los instrumentos utilizados para la visualización de este fenómeno es la placa de Chladni, inventada por Ernst Chladni en el siglo XVIII. Desde entonces, muchos científicos de todo el mundo han seguido los estudios de este fenómeno, que cada vez son más complejos y específicos.

En este trabajo, se ha construido una placa de Chladni económica, con el fin de analizar su funcionamiento a través de distintas experimentaciones configuradas mediante distintos parámetros, como son: la frecuencia reproducida, la forma de la placa o el tipo de grano utilizado para formar las figuras.

Con ello hemos podido concluir que, a pesar de su desconocimiento, la placa de Chladni es un utensilio muy útil en distintos campos, como la construcción de instrumentos musicales o la enseñanza. Además, se han observado muchas relaciones entre los patrones formados y los parámetros establecidos, por lo que en este sentido, esta línea de estudio tiene mucho futuro y probablemente pueda llevar a grandes avances científicos. El sonido, su influencia en el ser humano, en su entorno y la posibilidad de transportar energía, tienen aún muchas posibilidades de investigación.

ABSTRACT

Cymatics is a vibrational phenomenon produced by sound waves which are made visible by creating geometric patterns on a variety of surfaces. One of the machines used for the visualization of this phenomenon is the Chladni plate, invented by Ernst Chladni in the 18th Century. Since then, many scientists from all over the world have pursued the study of this phenomenon, which is becoming increasingly complex and specific throughout the years.

In this project, a low-cost Chladni plate has been built, to use for the analysis of its functioning, conducting different experiments determined by different variables such as the frequency of the sound reproduced through the speaker, the plates' form, or the type of grain used to create patterns on the plate.

All in all, we can conclude that, despite the lack of awareness about this phenomenon, the Chladni plate is a very useful machine in many ways such as the construction of musical instruments or education. Also, many correlations between the patterns created and the modified variables have been noted, therefore this line of research has a bright future and probably will lead to great scientific advances. Sound, its influence on humanity and on our surroundings and the possibility of transporting energy, has jet many unknown possibilities.

ÍNDICE

▶ AGRADECIMIENTOS	5
▶ RESUMEN	7
▶ ABSTRACT	7
▶ INTRODUCCIÓN	10
▶ MARCO TEÓRICO	12
1. CIMÁTICA	12
▶ <i>Placa de Chladni</i>	
2. MOVIMIENTOS VIBRATORIOS	12
▶ <i>Movimiento armónico simple</i>	
▶ <i>Movimiento oscilatorio amortiguado y forzado</i>	
3. ONDAS	13
▶ <i>Características y clasificación de ondas mecánicas</i>	
▶ <i>Ondas armónicas</i>	
▶ <i>Ondas sonoras y cualidades del sonido</i>	
4. FENÓMENOS ONDULATORIOS DE INTERÉS	15
▶ <i>Interferencia y pulsaciones</i>	
▶ <i>Ondas estacionarias y resonancia</i>	
▶ MARCO PRÁCTICO	17
1. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	17
2. PREPARACIÓN	18
▶ <i>Materiales y presupuesto</i>	
▶ <i>Construcción y calibración de la placa de Chladni</i>	
3. MÉTODO Y PROCEDIMIENTO	20
▶ <i>Experimentaciones principales</i>	
▶ <i>Experimentaciones secundarias</i>	
4. OBSERVACIONES Y RESULTADOS	25
▶ CONCLUSIONES	28
1. USOS DE LA PLACA DE CHLADNI	28
2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	28
▶ BIBLIOGRAFÍA	29

INTRODUCCIÓN

“El científico no estudia la naturaleza porque sea útil; la estudia porque se deleita en ella, y se deleita en ella porque es hermosa. Si la naturaleza no fuera bella, no valdría la pena conocerla.” - Henri Poincaré

El sonido es un fenómeno vibratorio peculiar aunque común en nuestras vidas, producido por cambios bruscos y consecutivos de presión en el aire. De ahí, nuestros oídos, gracias a una compleja estructura de huesecillos y filamentos del sistema auditivo, captan esas minúsculas vibraciones, esos pequeños cambios de presión en el aire, y los transforman en pulsos eléctricos que, de nuevo, son ondas que nuestro cerebro es capaz de comprender y transformar en información[1].

Como podemos observar, tan solo en el simple hecho de escuchar algo tan leve como el latido de tu propio corazón, intervienen una serie de complejos procesos derivados de ondas, oscilaciones¹ y vibraciones del medio. Estamos rodeados de ellas: el sonido, las olas del mar o incluso el movimiento de un muelle entre otros. Sin embargo, pocas personas conocen realmente el impacto que estas ondas tienen en nuestras vidas y menos aún conocen el funcionamiento de las mismas.

La cimática, es uno de los fenómenos vibratorios del sonido que poca gente conoce. El estudio de este fenómeno comenzó mucho antes de su descubrimiento oficial: hace unos 1000 años en África. Allí los africanos usaban las pieles de los tambores para predecir los eventos futuros espolvoreándolos con tierra y golpeándolos, observando la distribución de los granos a cada golpe[2].

Más tarde, en el siglo XV, el propio Leonardo da Vinci anotó en su libreta sus observaciones sobre una mesa con polvo, que al ser golpeada, producía montículos organizados de ese mismo polvo. En el siglo XVI Galileo Galilei, fue el primero en descubrir la razón de este fenómeno, al experimentar con una placa de latón, un cincel y unos granos, dándose cuenta de que, los lugares en los que se formaban líneas paralelas al rozar el cincel y la placa, eran zonas nodales²[3].

Posteriormente, en pleno siglo XVIII, Ernst Chladni, estudió y dibujó los patrones que vio en su investigación, probablemente guiado por los anteriores experimentos de Robert Hooke, documentando sus hallazgos al mundo y poniéndole su nombre al instrumento que diseñó para ello: la placa de Chladni[2]. Fue tan revolucionario su descubrimiento, que Napoleón financió una competición a la Academia francesa de ciencias, con el fin de encontrar una explicación matemática al fenómeno. Fue entonces, exactamente en 1816, cuando Sophie Germain, una matemática autodidacta, se llevó el Premio Extraordinario de las Ciencias, al darle una explicación matemática al

¹ Oscilación: Movimiento repetido en torno a una posición de equilibrio.

² Zonas nodales: Zonas con vibración nula producidas en una superficie por ondas estacionarias bidimensionales.

comportamiento de las superficies elásticas, explicando así los patrones cimáticos observados durante los siglos anteriores y convirtiéndose en una de las figuras más importantes de la acústica³[4].

Tras ella, siguieron muchos científicos de renombre como Michael Faraday o John William Strutt. Pero no fue hasta 1972, cuando Hans Jenny eligió la palabra *Kymatic* (cimática), del griego *kuma* que significa onda, para referirse a estos fenómenos[5].

Y así, poco a poco, llegamos a donde nos encontramos hoy en día, aún sin mucha información sobre este tema, la cimática es un fenómeno cuya comprensión se encuentra aún en desarrollo.

³ Acústica: Parte de la física que trata de la producción, control, transmisión, recepción y audición de los sonidos, ultrasonidos e infrasonidos.

MARCO TEÓRICO

“Si quieres hallar los secretos del universo, piensa en términos de energía, frecuencia y vibración.” – Nikola Tesla

1. CIMÁTICA

La cimática es un fenómeno vibratorio producido por las ondas sonoras, por el cual éstas se hacen visibles, formando patrones geométricos en distintos medios o superficies.

➤ *Placa de Chladni*

La **placa de Chladni** consiste en una lámina de metal unida mediante una barra a un altavoz, sujeto a su vez a un soporte, que al conectarlo a una fuente de sonido (como puede ser un teléfono móvil) transmite las vibraciones a través de la varilla a la lámina de metal, haciendo que las partículas que se coloquen sobre ella se muevan recorriendo la placa mientras forman distintas figuras, según la **frecuencia** con la que vibre.

2. MOVIMIENTOS VIBRATORIOS

Un movimiento vibratorio es aquel en el que una partícula se desplaza de un lado a otro de su posición de equilibrio, repitiendo este movimiento a intervalos regulares de tiempo. A estos movimientos se les llama **oscilaciones** y si éstas son muy rápidas, se denominan **vibraciones**.

➤ *Movimiento armónico simple (MAS)*

Un caso particular de los movimientos vibratorios es el **movimiento armónico simple**. Para que se produzca este tipo de movimiento, el cuerpo en vibración debe estar sometido a una **fuerza de atracción**, con origen en el centro de oscilación⁴, proporcional al desplazamiento⁵ y de sentido contrario a éste, cuyo objetivo es estabilizar el

oscilador de tal forma que éste vuelva a su posición de reposo. La **frecuencia** viene dada por el valor de estas fuerzas.

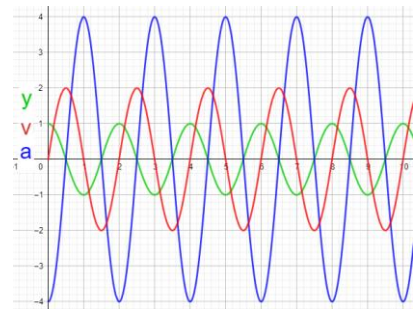


Ilustración 1.2.1 Gráficas de magnitudes del MAS respecto al tiempo. (x, espacio. v, velocidad. a, aceleración.)

La fuerza producida en un MAS es **proporcional** a la distancia del objeto o partícula al punto de equilibrio y dirigida hacia él, de tal forma que siempre que la partícula no esté en su punto de equilibrio, se encuentra desplazándose hacia él.

⁴ *Foco o centro de oscilación:* Punto de origen de las ondulaciones o vibraciones de un sistema.

⁵ *Desplazamiento (MAS):* distancia que separa el objeto del centro de oscilación en cada momento t en un MAS con amplitud A y fase inicial θ_0 . El desplazamiento en el MAS viene dado por la siguiente fórmula:
 $y(x, t) = A \cdot \cos(\omega t + \theta_0)$

Con todo ello podemos concluir, que la **frecuencia** depende de la **constante recuperadora**⁶ del oscilador y de su **masa**, pero no de la amplitud del movimiento.

➤ *Movimiento oscilatorio amortiguado y forzado*

El sistema oscilatorio puede sufrir cambios producidos por fuerzas externas del medio como puede ser el rozamiento⁷ o algún tipo de fuerza adicional.

En caso de que el sistema se vea afectado por la **fuerza de rozamiento**, se producirá un **movimiento oscilatorio amortiguado**. En este tipo de movimiento, la amplitud de onda y, por consiguiente, la velocidad de oscilación disminuye. De esta forma la amplitud de onda decrece exponencialmente con el tiempo hasta que, eventualmente, ambas fuerzas se igualan y el sistema se para. En caso opuesto, es decir, si al sistema se le suministra energía, hablamos de un **movimiento oscilatorio forzado**.

3. ONDAS

Las ondas son las perturbaciones producidas por un movimiento ondulatorio, el cual a su vez, es una forma de transmisión de energía sin transporte neto de materia.

Las **ondas mecánicas** son aquellas que necesitan un **medio material plástico** por el cual ser transmitidas. En el caso de las ondas sonoras, este suele ser el aire.

➤ *Características y clasificación de ondas mecánicas*

Las ondas mecánicas se caracterizan por los siguientes aspectos:

- Amplitud de onda (A): Valor máximo de distancia de las partículas respecto al centro de oscilación. Se mide en metros (m).
- Longitud de onda (λ): Distancia mínima entre dos puntos consecutivos que se hayan en el mismo estado de vibración. Se mide en metros (m).
- Período (T): Tiempo que tarda una partícula en realizar una oscilación completa. Se mide en segundos (s).
- Frecuencia (F): Número de oscilaciones por unidad de tiempo. Se mide en hercios (Hz).

Según la dirección de propagación frente a la dirección del movimiento de las partículas, existen dos tipos de ondas mecánicas:

1. Transversales: Aquellas ondas cuya dirección de propagación es perpendicular a la dirección del movimiento de las partículas. Estas ondas provocan **ondulaciones**, por lo que dependen de la rigidez del material por el que se propaguen.

⁶ *Constante recuperadora*: Escalar que mide la capacidad de un oscilador de devolver el objeto oscilante a su posición de equilibrio.

⁷ *Fuerza de rozamiento*: Fuerza que existe entre dos cuerpos en contacto cuando al menos uno de ellos está en movimiento. Ésta es paralela al movimiento y de sentido contrario.

2. **Longitudinales:** Aquellas ondas cuya dirección de propagación es paralela a la dirección del movimiento de las partículas. Estas ondas provocan **compresiones y dilataciones**.

Como ejemplo, usaremos la propia placa de Chladni. En primer lugar un altavoz consiste en una bobina que envuelve a un imán, a su vez unido a una superficie flexible de forma cónica. La corriente eléctrica que circula por la bobina, induce un campo magnético interactuando con el imán desplazándolo transversalmente. Este movimiento hacia atrás y hacia delante se transmite del cono al aire, creando las ondas sonoras. Estas ondas son **ondas longitudinales tridimensionales agrupadas en frentes de onda⁸ esféricos**.

Ahora, en el caso de la placa de Chladni, el cono está conectado a una varilla de metal, que transmite ese movimiento ondulatorio a la placa enganchada en su otro extremo. Cuando este movimiento llega a la lámina de metal, este se transmite por toda su superficie en forma de **ondas transversales bidimensionales agrupadas en frentes de onda circulares**.

Por lo que podemos concluir que la función de la placa de Chladni es **convertir las ondas longitudinales bidimensionales del altavoz** transmitidas a través de la varilla de metal, **en ondas transversales bidimensionales visibles**.

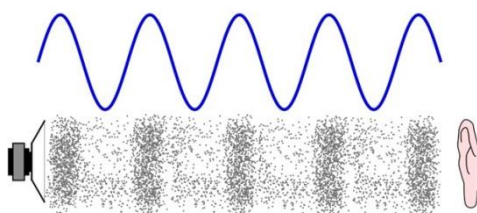


Ilustración 1.3.1 Ondas longitudinales del sonido

(Fuente: Wikimedia Commons)

➤ *Ondas armónicas*

Como indica su nombre, las ondas armónicas son aquellas producidas por un movimiento armónico simple y descritas por una función armónica⁹.

Las ondas pueden propagarse sobre una superficie homogénea¹⁰ e isótropa¹¹, donde el foco emisor será el centro de un frente de onda circular. La dirección de propagación de las ondas es perpendicular al frente y su velocidad es la misma en todas las direcciones radiales.

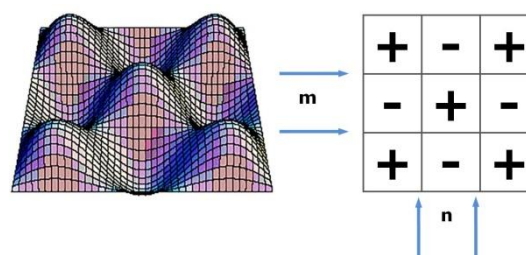


Ilustración 1.3.2 Ondas transversales de la placa de Chladni

(Fuente: Azeheb laboratorios educativos)

⁸ *Frente de onda:* Conjunto de puntos que son alcanzados al mismo tiempo por una onda.

⁹ *Función armónica:* Aquella función continua cuyas dos primeras derivadas son continuas.

¹⁰ Homogénea: Uniforme.

¹¹ Isótropo: De iguales características para toda su extensión.

La energía contenida en un sistema ondulatorio se llama **energía mecánica total** y depende de la velocidad, de la masa del cuerpo y de la amplitud del movimiento.

La **intensidad** de una onda es la energía que atraviesa un punto de la superficie por unidad de tiempo y se mide en $\frac{J}{m \cdot s^2}$ o en $\frac{W}{m^2}$. Mediante una serie de deducciones, podemos concluir que **la amplitud es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del foco emisor**. Esto significa, en el caso del sonido, que cuanta más distancia recorra el sonido, menos se escuchará.

➤ *Ondas sonoras y cualidades del sonido*

Las ondas sonoras son ondas mecánicas longitudinales. Las magnitudes que hemos citado hasta ahora son determinantes en el tipo de sonido que escuchamos cuando se reproduce la onda y son las que permiten al sonido tener cualidades como las siguientes:

- **Intensidad**: El **nivel de intensidad** es la sensación sonora de intensidad que percibimos por nuestros oídos, el volumen del sonido que medimos en decibelios. Se relaciona con la amplitud.
- **Tono**: Permite distinguir agudos y graves. Se relaciona con la frecuencia.
- **Timbre**: Permite distinguir el origen de los sonidos. Esto es posible gracias a que la mayoría de los sonidos no son puros, cada sonido tiene una combinación única de **armónicos**¹², dándole a las ondas formas únicas y distintas del resto.

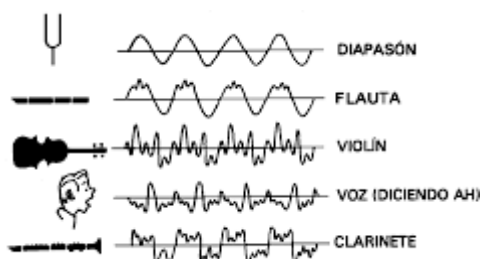


Ilustración 1.3.3 Tipos de ondas según el timbre

(Fuente: <https://rehip.unr.edu.ar/>)

4. FENÓMENOS ONDULATORIOS DE INTERÉS

➤ *Interferencias y pulsaciones*

Las interferencias se producen por la superposición de ondas en un punto y se rige por el **principio de superposición**¹³. Existen dos tipos, la constructiva (la amplitud es máxima en el punto de interferencia por estar ambas ondas en **concordancia de fase**) y la destructiva (la amplitud es nula en los puntos de interferencia al cancelarse las ondas por estar en oposición de fase).

En ocasiones, estas interferencias provocan pulsaciones, que son variaciones periódicas en la amplitud de la onda resultante por la diferencia de frecuencia entre las ondas que la componen, el resultado es una nueva frecuencia de pulsación, que hará que la amplitud varíe.

¹² *Armónicos de una onda*: Ondas cuya frecuencia es un número entero de veces la frecuencia inicial.

¹³ *Principio de superposición*: Cuando un punto es afectado por dos o más ondas simultáneamente, la onda resultante en ese punto es la suma de las ondas originales.

➤ *Ondas estacionarias y resonancia*

Un caso particular de interferencias entre ondas, son las **ondas estacionarias**. Éstas son ondas producidas por la interferencia de dos ondas de igual amplitud, dirección de propagación y frecuencia pero de sentido contrario y en oposición de fase, lo que produce **vientres** (puntos de máxima vibración cuya distancia al foco es 0 o un número par de cuartos de longitud de onda) y **nodos** (puntos cuya distancia al foco es un número impar de cuartos de onda). Como hay puntos que no vibran (nodos), no hay transmisión de energía.

A su vez, podemos encontrar distintos tipos de ondas estacionarias atendiendo a las dimensiones por las que se propaguen. En primer lugar, las ondas estacionarias que se forman en una cuerda fija por sus dos extremos, como en el caso de una guitarra, son ondas estacionarias unidimensionales, ya que se propagan en una sola dirección, sobre la recta que es la cuerda. Sin embargo, nuestro objeto de estudio son las ondas estacionarias que se forman en la placa. Dado que la placa es un plano, las ondas estacionarias que se forman se propagan en dos direcciones, formando frentes de onda circulares bidimensionales.

Si la longitud resultante de una onda estacionaria es igual a una de las dimensiones de un cuerpo bajo su influencia, se produce el fenómeno que conocemos como **resonancia**. La resonancia se produce si un sonido de determinada frecuencia, a la que llamamos **frecuencia de resonancia**, alcanza un cuerpo que sea capaz de emitir esa misma frecuencia. Entonces hablamos de **frecuencia natural** y es la que tienen los cuerpos sin ninguna fuerza de absorción o aportación de energía, cuyo valor queda determinado por las **dimensiones** de dicho cuerpo.

Sin embargo, la mayoría de los objetos no tienen únicamente una frecuencia de resonancia, sino que tienen varias. Estas frecuencias de resonancia, están compuestas por la frecuencia natural del objeto y sus armónicos. Un ejemplo muy visual es la música. En un piano hay varias teclas que corresponden a la nota do, sin embargo hay una diferencia entre ellas y es la frecuencia. El do más cercano al borde derecho del piano es mucho más agudo (tiene mayor frecuencia) que el cercano al borde izquierdo del piano, pero ambos son la misma nota: do, lo que cambia es la **serie armónica** de la nota. Por ejemplo, si tomamos como el primer armónico de do 261,6 Hz, podemos concluir que el segundo armónico tendrá un valor de 523,2 Hz, el tercero de 784,8 Hz y así sucesivamente. Esto explica que la placa tenga más de tres frecuencias resonantes (una por cada medida de la placa: ancho, largo y alto).

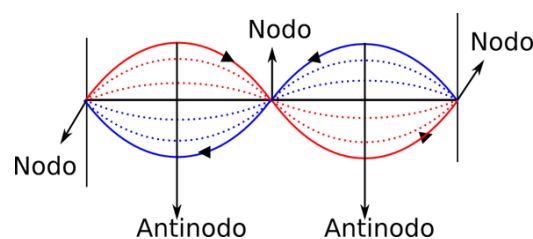


Ilustración 1.4.1 Onda estacionaria. Nodos y vientres o antinodos.

Fuente: <https://www.fisic.ch/>

MARCO PRÁCTICO

“Nada tiende tanto al avance del conocimiento como la aplicación de un nuevo instrumento.” – Humphry Davy (Mentor de Michael Faraday)

1. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Este proyecto consta de dos objetivos principales:

1. Construcción de una placa de Chladni con materiales comunes y económicos.
2. Análisis del funcionamiento de la placa de Chladni según distintos parámetros: Frecuencia, forma de la placa, material de los elementos vibratorios, amplitud de onda, tipo de onda y figuras formadas en ella.

Las hipótesis que marcan el funcionamiento de la placa de Chladni son las siguientes:

- Respecto a la forma de la placa: las figuras que se formarán en la placa, serán obra de la superposición o interferencia de ondas, formando ondas estacionarias en la placa, que a su vez generarán zonas nodales y zonas ventrales. El hecho de cambiar la forma de la placa influye en los patrones creados en la placa ya que cambia la distancia que recorren las ondas antes de reflejarse en los bordes de la placa y producir las ondas estacionarias.
- Respecto al material utilizado: la precisión y rapidez con la que se forman los dibujos serán variables. En ellas influirá la densidad y forma del grano usado, siendo el grano con menor densidad y forma más estable el que de mejores resultados.
- Respecto al nivel de intensidad del sonido: dado que la intensidad sonora se relaciona con la amplitud de la onda y esta es independiente de la frecuencia, al modificar la frecuencia del sonido, la amplitud de onda no cambiará y por tanto la intensidad del sonido no variará y viceversa. La amplitud tendrá algún efecto en los patrones formados en la placa de Chladni: a mayor intensidad del sonido, más precisos serán los patrones de la placa y menos tiempo tardarán en formarse claramente.
- Respecto a la frecuencia reproducida: puesto que cuanto mayor es la frecuencia de oscilación de la placa, más rápido se mueve, a bajas frecuencias, este movimiento será tan lento que apenas se podrán formar patrones visibles. Al contrario, cuanto mayor es la frecuencia, más rápido vibra la placa, hasta que probablemente alcance unos estados de vibración en los que la amplitud de las ondas estacionarias es tan pequeña, que resulta imposible distinguir los vientres de los nodos.

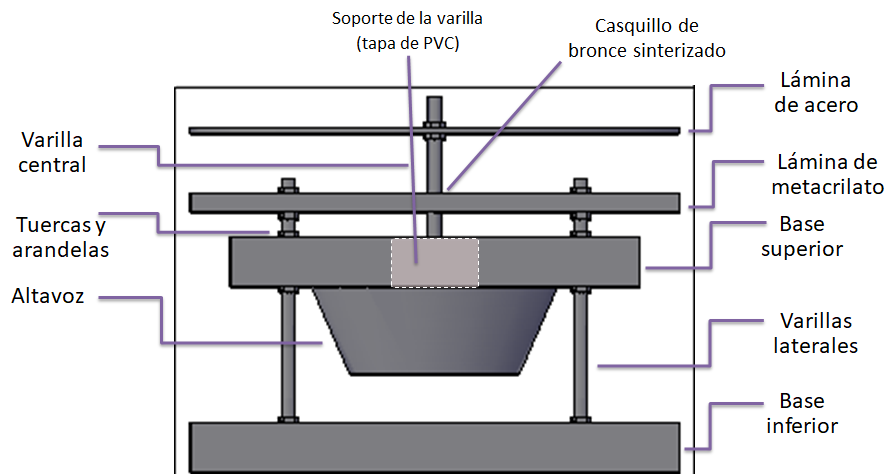


Ilustración 2.1.1 Esquema de la placa de Chladni

2. PREPARACIÓN

➤ *Materiales y presupuesto*

Una de las ideas principales de este proyecto, es encontrar la forma más económica y precisa de observar las figuras de Chladni. Esta placa ha dado muy buenos resultados, comparables a grandes rasgos a los de una placa industrial, a pesar de su poco coste.

En la siguiente tabla podemos observar los materiales utilizados, el precio por cada uno y el precio total de coste, sin contar mano de obra ni herramientas:

Material	Precio x unidad (€)	Cantidad	Precio total (€)
Altavoz	0	1	0
Amplificador	0	1	0
Arandelas 8 mm	0,03	17	0,51
Arena	0	1	0
Casquillo de bronce sinterizado (8 mm)	0,2	1	0,2
Pegamento sellador de tornillos	0,51	1	0,51
Plancha madera 20x20 cm	0	1	0
Plancha madera 25x25 cm	0	1	0
Plancha metacrilato 25x25 cm	0	1	0
Plancha metal 25x50 cm	3,69	2	7,38
Quinoa	2,79	0,5	1,4
Sal	0,22	1	0,22
Serrín	0	1	0
Silicona caliente	0,18	1	0,18
Tapa de tuvo de PVC 36 mm	0,99	1	0,99
Tornillos 25 mm	0	4	0
Tuercas 8 mm	0,07	24	1,68
Varillas 8 mm (1 m)	0,54	1	0,54
TOTAL			13,61

Ilustración 2.2.1 Tabla de materiales y costes de producción de la placa de Chladni

Los materiales cuyo precio no aparece indicado en la tabla son materiales que he recolectado personalmente o que he recogido de los diversos objetos para reciclaje de mi entorno. (Consultar herramientas necesarias en el Anexo I)

****PRECAUCIÓN:** A la hora de construir la placa es muy importante utilizar las protecciones necesarias para evitar accidentes fortuitos.

➤ *Construcción y calibración de la placa de Chladni*

Para construir la placa de Chladni me he basado en el modelo del siguiente vídeo de la plataforma Youtube: <https://youtu.be/hKmPc0Q0kKg>[6] →



A continuación se enuncian brevemente los pasos para su construcción:

1. Elaborar un croquis de la placa y las diferentes piezas a cortar.
2. Medir y dibujar los cortes en las planchas de acero, metacrilato y en las de madera.
3. Cortar las planchas.
4. Cortar la varilla de 8 mm en 5 piezas.
5. Taladrar las piezas de madera, metacrilato y acero.

6. Atornillar el altavoz con el destornillador eléctrico a la pieza superior de madera.
7. Unir las piezas mediante las varillas, tuercas, arandelas, silicona caliente y fijador de tornillos y dejar secar. Usar el nivel para controlar la inclinación.

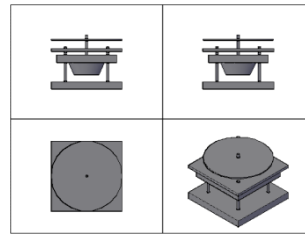


Ilustración 2.2.2 Vistas diédricas de la placa de Chladni

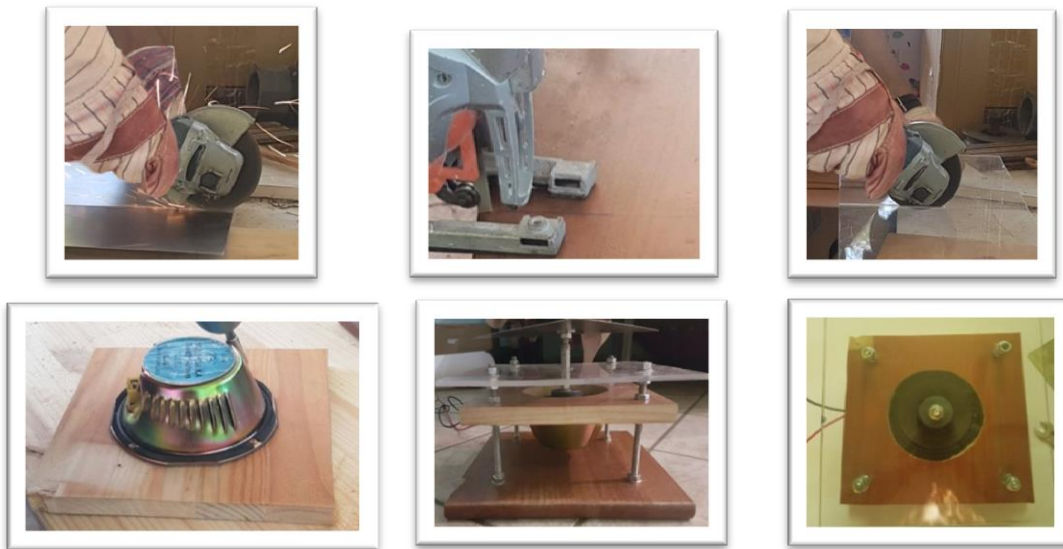


Ilustración 2.2.3 Distintas fases de construcción de la placa de Chladni

Una vez terminada la placa, y conectado el altavoz al amplificador, el siguiente paso es calibrar la placa mediante la observación de los siguientes aspectos:

1. **La alineación de la guía de metacrilato:** Este aspecto es el más importante. De él dependerá la precisión de las figuras que se forman en la placa. Para comprobar si la alineación de la guía de metacrilato es la correcta, se puede reproducir una frecuencia de alta vibración y escuchar si la placa presenta rozamiento entre el casquillo de bronce sinterizado y la varilla de hierro. Si es así, hay que apretar o aflojar las tuercas que sujetan la guía de metacrilato, de tal forma que se deje de escuchar completa o casi completamente el rozamiento. Cuanto menos rozamiento exista en esta parte, mejor funcionará la placa, al evitar lo máximo posible las fuerzas de amortiguación.
2. **La rigidez de la placa de acero:** Este aspecto se refiere a lo apretadas o sueltas que estén las tuercas que sujetan la lámina de metal. Si la placa está suelta, la vibración no se transmitirá bien y la placa se inclinará hacia un lado, mientras que si está tensa, no será un medio lo suficientemente flexible como para que la transmisión de ondas mecánicas sea la idónea. Se tiene que poder girar la placa

sobre su eje con algo de fuerza, es decir, no completamente inmóvil, pero bien fijada al eje.

Vibración a cámara lenta de la placa: <https://youtu.be/wzwBOrCbDZo>



Formación de figuras en la placa: <https://youtu.be/h2IrYnC5xXc>



3. MÉTODO Y PROCEDIMIENTO:

Se han dividido las experiencias a realizar y observar en dos categorías: las experimentaciones principales (aquellas con un único tipo de grano por experiencia) y las experimentaciones secundarias (aquellas con una mezcla de dos tipos de granos por experiencia). Estos experimentos se han realizado mediante cuatro placas de acero distintas: una cuadrada, una circular, una triangular y una mixta entre la cuadrada y la circular.

A su vez, se han utilizado cuatro tipos de granos sobre la superficie de cada placa: quinoa, arena, sal y serrín.

De esta forma la investigación se dará a nivel descriptivo, ya que las variables serán analizadas independientemente con el fin de demostrar su influencia en los patrones cimáticos formados en la placa de Chladni.

NÚMERO	TIPO DE PLACA	MATERIAL	IMPORTANCIA
1	CUADRADA	SAL	PRINCIPALES
2	CUADRADA	ARENA	
3	CUADRADA	QUINOA	
4	CUADRADA	SERRÍN	
5	REDONDA	SAL	
6	REDONDA	ARENA	
7	REDONDA	QUINOA	
8	REDONDA	SERRÍN	
9	TRIANGULAR	QUINOA	
10	TRIANGULAR	SAL	
11	TRIANGULAR	SERRÍN	
12	TRIANGULAR	ARENA	
13	COMPUESTA	QUINOA	
14	COMPUESTA	SAL	
15	COMPUESTA	SERRÍN	
16	COMPUESTA	ARENA	
17	CUADRADA	SAL Y QUINOA	SECUNDARIAS
18	CUADRADA	SAL Y ARENA	
19	CUADRADA	SAL Y SERRÍN	
20	CUADRADA	QUINOA Y ARENA	
21	CUADRADA	QUINOA Y SERRÍN	
22	CUADRADA	ARENA Y SERRÍN	

Ilustración 2.3.1 Numeración de experimentaciones según el material y el tipo de placa usado.

➤ Experimentaciones principales

Las experimentaciones principales engloban una cantidad total de 16 experiencias. Estas experimentaciones son fruto de todas las combinaciones posibles entre los cuatro tipos

de placa (con distintas formas) y los cuatro tipos de granos. A continuación se muestra un gráfico comparando el número de resultados (frecuencias en las que se aprecian **figuras de Chladni** para cada tipo de grano y forma de la placa) respecto a la experiencia realizada:

Comparación n° de resultados respecto a la experiencia realizada

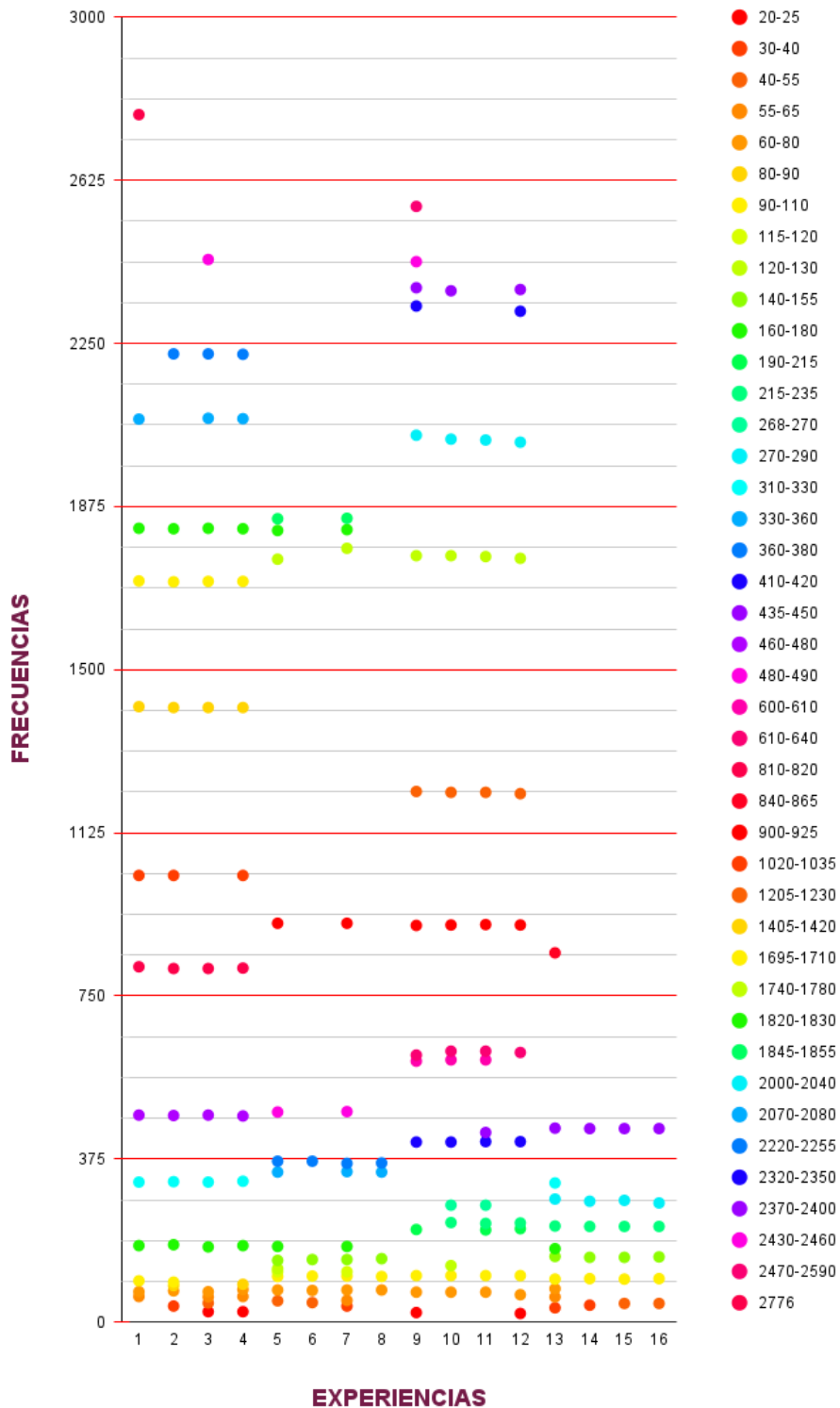







Ilustración 2.3.2 Gráfico de relación entre el número de resultados y las experiencias principales realizadas.

En este gráfico podemos observar, en primer lugar, el número de la experiencia realizada en el eje de abscisas (ilustración 2.4.1 para referencias). En segundo lugar, observamos en el eje de ordenadas, el rango de frecuencias estudiado (0-3000 Hz).

Cada punto representado en el gráfico, corresponde a una frecuencia resonante en la que se han podido observar vibración o una figura de Chladni concreta para cada tipo de placa y para cada tipo de material. Además, cada una de estas figuras de Chladni formadas en la placa, ha sido fotografiada y expuesta en el Anexo II del proyecto. El color de los puntos establece el rango de frecuencias en el que se establece el valor exacto de la frecuencia en el momento en el que se tomó la fotografía.

Fijándonos en la gráfica, destaca el hecho de que los resultados sean parecidos en agrupaciones de cuatro experimentaciones, por ejemplo, las experimentaciones 1, 2, 3 y 4, presentan unos resultados similares, siendo las frecuencias resonantes prácticamente las mismas. Esto es porque la forma de la placa es la misma para estos cuatro casos, lo que varía es el material.

Frecuencia (Hz)	Fotografía	Rango de frecuencias	Observaciones
16			La placa vibra muy lento. No se forman figuras.
24			La placa vibra muy lento. No se forman figuras.
59			
70		70-75	
100		90-100	
110			Parece formar una figura, pero no tiene límites reconocibles.
176		174-189	181 máx. amplitud.

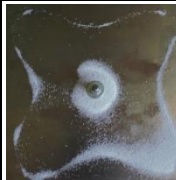





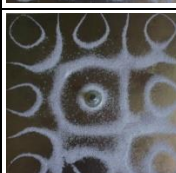
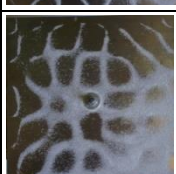

322		320-330	325 máx. amplitud.
476		470-480	475 máx. amplitud.
817		810-820	815 máx. amplitud.
1027		1025-1030	1027 máx. amplitud.
1415		1410-1420	1415 máx. amplitud.
1704		1700-1710	1705 máx. amplitud.
1825		1820-1830	1825 máx. amplitud.
2076		2070-2080	2075 máx. amplitud.
2776		2770-2780	2775 máx. amplitud.
2910	FIN DE PATRONES VISIBLES		

Ilustración 2.3.3 Ejemplo de resultados. Experimentación 1.

➤ *Experimentaciones secundarias*

Las experimentaciones secundarias son un total de 6 experimentaciones realizadas con el fin de comprobar si la placa de Chladni es capaz de separar distintos sólidos. Estas experimentaciones son fruto de todas las combinaciones posibles entre los cuatro tipos de granos, combinándolos de dos en dos, en la placa cuadrada. A continuación se muestra una gráfica comparando el número de resultados respecto a la experiencia realizada. (Ilustración 2.4.4)

En este caso, cada punto del gráfico representa una frecuencia en la que al menos uno de los tipos de granos utilizados en la experimentación, vibra. Los puntos marcados con una estrella negra encima, representan frecuencias para las que **sólo un tipo de grano** ha presentado vibración. Además se han fotografiado varias frecuencias como evidencia de los patrones que formaban ambos materiales, señalando si éstos presentaban alguna anomalía en el posicionamiento relativo de los granos. Todo ello expuesto en el Anexo III del proyecto.

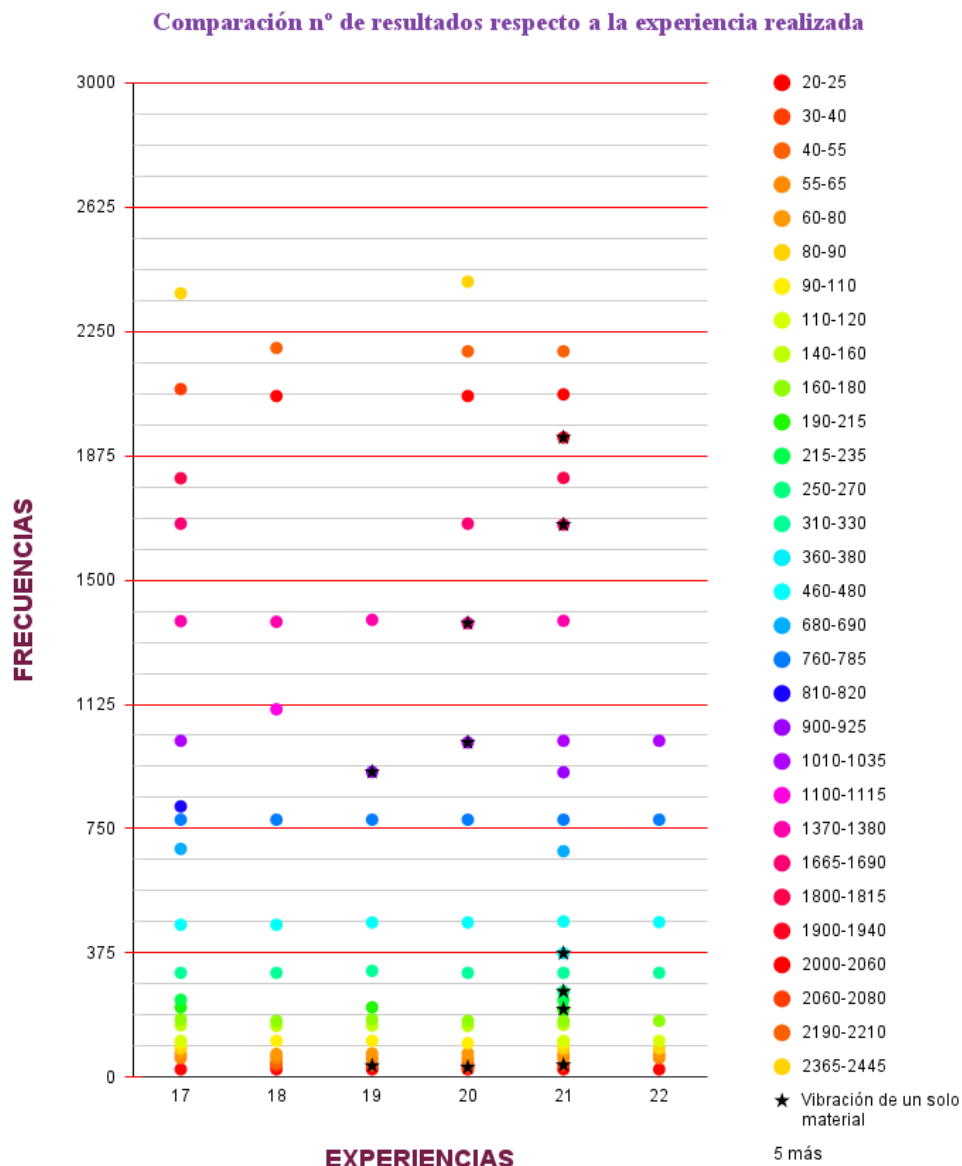


Ilustración 2.3.4 Gráfico de relación entre el número de resultados y las experiencias secundarias realizadas.

4. OBSERVACIONES Y RESULTADOS:

Análisis del funcionamiento de la placa de Chladni

El funcionamiento de la placa de Chladni es el siguiente: Una vez el sonido se reproduce a través del altavoz, se usa una varilla de metal, la cual se fija sólidamente al cono del altavoz en uno de sus extremos y al centro geométrico de la placa en el otro, de tal forma que con cada movimiento del altavoz se mueva la varilla y acabe moviendo la placa con la misma dirección con la que se mueve el cono del altavoz. Esta varilla atraviesa una lámina de metacrilato de cierto espesor, justo antes de sujetarla a la placa de metal, la cual ayuda evitar errores de inclinación momentánea en la placa.

Una vez las ondas longitudinales llegan al extremo de la varilla unido a la plancha de metal, ésta comienza a vibrar, formándose frentes de ondas esféricas que tienen como foco el centro de la placa. Por último, estos frentes de ondas circulares se propagan por toda la placa hacia los bordes de la misma, donde la onda se refleja, cambia de fase y se forman ondas estacionarias al producirse interferencias con las ondas de sentido contrario en oposición de fase.

Estas ondas estacionarias, producen a su vez zonas nodales y zonas ventrales, en las que la vibración de la placa es nula o máxima, respectivamente, formando así las llamadas figuras de Chladni y el objeto de nuestro estudio, en el que destacan las siguientes observaciones:

En primer lugar, observamos que al cambiar la forma de la placa, también cambian algunas frecuencias resonantes debido al cambio en las dimensiones de la misma.

En cuanto a los rangos de frecuencia encontramos que la frecuencia resonante, y la que forma los dibujos con mayor intensidad, es normalmente la frecuencia media del intervalo aproximadamente. Según la frecuencia se acerca a los extremos del intervalo, las figuras de Chladni se van difuminando, hasta que los granos vuelven a estar completamente desordenados. En la experimentación 3, la primera experimentación con quinoa, en la placa cuadrada, observamos por primera vez un fenómeno en el que, no solo podemos “ver” los vientres y nodos de las ondas, sino también cómo al aumentar la frecuencia el dibujo que se formaba en la placa se “expandía” hacia los bordes de ésta hasta que desaparecía. Esto se produce, debido a la resonancia. Además, en las frecuencias resonantes, la intensidad del sonido es significativamente mayor que en las que producen vibraciones normales, ya que la amplitud es máxima en estas frecuencias.

En la recogida de datos también podemos observar cómo hay frecuencias de resonancia, para las cuales no hay una foto de la figura correspondiente. Esto se debe a que para frecuencias muy bajas o muy altas, la velocidad de vibración de la placa es insuficiente o extrema, respectivamente.

Desde que se interrumpe el sonido hasta que la vibración cesa, en un estado agitado, pasan 2,40 segundos aproximadamente. Esto se debe a que al apagar el altavoz, se interrumpe la energía que se le estaba administrando al sistema para que el oscilador no

cese, pero la energía que contiene el sistema en ese momento aún tiene que disiparse hasta que, el sistema se para, siguiendo la Primera Ley de Newton.

Respecto al tiempo de formación de figuras y de reacción de la placa: las figuras tardan de media 3 segundos en formarse. Este tiempo aumenta si es la primera frecuencia que se reproduce en la placa ya que, al encender la placa, el retraso que ocurre desde que se reproduce la primera frecuencia hasta que la onda es constante, es debido a que es necesario un mayor aporte de energía para llegar a ese nivel de energía en el que el oscilador se mantiene constante, puesto que parte de él se perdería intentando estabilizar las fuerzas de rozamiento.

En cuanto a los materiales:

- El primer material utilizado, fue el compuesto iónico NaCl, comúnmente conocido como sal. La sal tiene una densidad de $2,16 \frac{g}{cm^3}$. Además, tiene una humedad del 0,15% y una esfericidad¹⁴ de 0.81 aproximadamente.
- El segundo material utilizado, fue la arena de playa. La arena tiene una densidad de $1,10 \frac{g}{cm^3}$. Además, tiene un porcentaje de humedad de entre un 2 y un 8% y un coeficiente de esfericidad de 0,86 aproximadamente.
- El tercer material utilizado, fue la quinoa. La quinoa tiene una densidad de $1,03 \frac{g}{cm^3}$, un porcentaje de humedad inferior al 10% y un coeficiente de esfericidad de 0.91.
- El cuarto material utilizado, fue serrín. El serrín de madera de pino tiene una densidad de $0,37 \frac{g}{cm^3}$. El porcentaje de humedad para la madera se encuentra entre un 12 y un 18% y el coeficiente de esfericidad para sólidos triturados está entre 0,5 y 0,7.

El mejor material para la experimentación ha resultado ser la arena ya que, a pesar de que no es el material más preciso en cuanto a las frecuencias que es capaz de captar, es el más preciso y rápido a la hora de formar figuras. En la siguiente tabla se muestran los materiales utilizados en las experimentaciones, ordenados de izquierda a derecha de mayor a menor según la observación realizada y la magnitud con la que se relaciona cada una de estas observaciones:

OBSERVACIÓN	MAGNITUD				
Rango de frecuencias	QUINOA	ARENA	SAL	SERRÍN	Esfericidad
Precisión de formación	ARENA	SAL	QUINOA	SERRÍN	Tamaño
Rapidez de formación	SAL	ARENA	QUINOA	SERRÍN	Humedad
Frecuencias resonantes captadas	QUINOA	ARENA	SAL	SERRÍN	Densidad

Ilustración 2.4.1 Tabla de relación entre lo observado en las experimentaciones y las cualidades de los granos

Observando la tabla, podemos relacionar los resultados con algunas de las magnitudes medibles de los granos:

¹⁴ Coeficiente de esfericidad: Factor entre 0 y 1 que indica lo parecido que es un volumen a una esfera.

En primer lugar, la magnitud que toma un gran valor a la hora de estudiar los rangos de frecuencias es la esfericidad de los granos. La esfera es la figura que menor superficie de contacto tendría con la placa, lo que significa que la fuerza de rozamiento con la placa y, consecuentemente, la pérdida de energía sería mínima, por lo que la energía necesaria para que los materiales empiecen a vibrar es menor. Por ello, a mayor esfericidad mayor es el rango de las frecuencias.

Así mismo, mediante las experimentaciones realizadas, podemos encontrar una posible relación entre el tamaño del grano y la precisión con la que se forman las figuras de Chladni en la placa. A mayor tamaño del grano, menor precisión tendrá el trazo de las figuras formadas en la placa. Por ello, la arena, que es el material con el grano más fino de todos los elegidos, sería la más precisa en este sentido. El serrín debería estar a la par que la arena, pero puesto que no era completamente polvo, sino que también contaba con pequeñas virutas de madera, el tamaño de los granos aumenta y por tanto su precisión es mucho menor.

Otra relación sugerente que se puede mencionar es la rapidez de formación respecto al porcentaje de humedad del grano. El agua tiene una propiedad llamada **adhesión** que produce que las moléculas de agua se adhieran a otro tipo de moléculas. Lo que determina lo fuerte que será la adhesión es la energía superficial de los materiales. Para que haya una buena adhesión, la energía superficial de la placa, debe ser mayor a la del material y en este caso lo es. Por lo tanto, cuanto mayor porcentaje de humedad tengan los granos, mayor será el número de moléculas de agua que contienen y mayor será el efecto de este fenómeno entre estas moléculas y las de la placa reduciendo su velocidad.

Por último, la densidad de los materiales influirá en las frecuencias resonantes captadas, de tal forma que, generalmente, los materiales de menor densidad captan más frecuencias que los materiales de mayor densidad, sobre todo en frecuencias altas. Al tener menor densidad, la fuerza que el oscilador tiene que hacer para mover los granos es menor y por tanto, la fuerza recuperadora no tendrá que ser tan prolongada. Esto también explica por qué en las experimentaciones secundarias, muchas veces vibraban ambos materiales y cuanto más distintas eran sus densidades, en más frecuencias vibraba uno de los materiales individualmente.

Además, la densidad también influye en la posición relativa que toma un tipo de granos respecto a otro en las experimentaciones secundarias, posicionándose los materiales menos densos encima o entre medias de los materiales más densos, como en el caso del serrín con la sal en la experimentación 19 o la quinoa con la arena en la 20. Aquellos con una densidad similar, formarán una mezcla homogénea.

CONCLUSIONES

“La forma viene de lo que no la tiene, sólo hay que añadir sonido.”

– John Stuart Reid

1. USOS DE LA PLACA DE CHLADNI:

- Uso didáctico: La placa se puede usar en centros educativos para organizar prácticas de laboratorio de física y visualizar ondas sonoras, pudiendo comprender así las relaciones entre los parámetros de una onda y sus características reales.
- Construcción de instrumentos a mano: Para aquellos talleres de instrumentos hechos a mano, la placa de Chladni (o la idea de la placa de Chladni) puede ser muy útil. A la hora de fabricar instrumentos a mano, por ejemplo un violín o una guitarra, no siempre acaban sonando lo bien que deberían por errores en el corte de las partes de madera. Se ha comprobado que se forman figuras de Chladni en las superficies de los instrumentos de cuerda. Esto significa que, espolvoreando algo por encima de la madera y haciéndola vibrar, podremos ver si las figuras que se forman son iguales que las de una guitarra fabricada industrialmente y, por tanto, corregir los posibles errores que hayan podido surgir mediante la elaboración del instrumento.
- Determinación de frecuencias resonantes en distintos objetos: En el campo de la física, esta placa podría servir para determinar las frecuencias de resonancia de distintos objetos. Lo único que habría que hacer, es espolvorear algo sobre ellos e ir probando frecuencias cerca de él. Esto a su vez podría ser útil para la selección de materiales en la construcción de edificios varios.
- ¿Separación de sólidos?: Como hemos podido comprobar, es posible la separación de sólidos con la placa de Chladni, pero únicamente cuando la densidad de estos sólidos es lo suficientemente distinta como para producir cambios notorios en la sensibilidad de los granos para formar figuras con frecuencias poco resonantes. Por ello, se necesitaría más investigación en este campo para averiguar con certeza si esto es posible o no.

2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:

Ha quedado claro que la placa de Chladni tiene muchas aplicaciones, pero es necesaria mucha más investigación y trabajo para poder llegar a implantar realmente estos usos. Además, el análisis de la placa de Chladni realizado en este trabajo, es muy superficial y poco concreto, ya que únicamente se han utilizado cuatro sólidos para experimentar. Para obtener unos resultados más concluyentes y elaborar correlaciones más específicas entre los granos usados y las observaciones realizadas, se necesita mucha más experimentación. No solo eso, sino que este proyecto tiene aún muchos aspectos a desarrollar y mejorar, como otro tipo de altavoz más potente o láminas de metal de distintos materiales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Propagación del sonido - YouTube». https://www.youtube.com/watch?v=7JVLfNpKQ_Y (accedido jun. 26, 2021).
- [2] Cymasope.com, «Home of the Cymatics», *Cymascope*. <https://www.cymascope.com> (accedido jun. 17, 2021).
- [3] I. E. de la Voz, «Cimática o la visualización del sonido», *Sottovoce*. <https://sottovoce.hypotheses.org/147> (accedido dic. 08, 2021).
- [4] «Sophie Germain (1776-1831) | Vidas científicas», *Mujeres con ciencia*, sep. 19, 2017. <https://mujeresconciencia.com/2017/09/19/sophie-germain-1776-1831/> (accedido dic. 08, 2021).
- [5] «OTHER “CONVERGENCES”: Hans Jenny and Carsten Nicolai Explore Cymatics and Synesthesia», *Rhizome*. <http://rhizome.org/editorial/2008/aug/06/other-convergences-hans-jenny-and-carsten-nicolai/> (accedido dic. 08, 2021).
- [6] «Weekend Projects: Visualizing Sound with a Chladni Plate - YouTube». <https://www.youtube.com/watch?v=hKmPc0Q0kKg> (accedido jun. 26, 2021).
- [7] J. Armero Rovira, J. F. Basarte Lorente, D. J. Castello Castellano, T. García Pozo, y M. J. Martínez de Murguía Larrechi, *Física 2º Bachillerato*. EDEBE, 2009.
- [8] «CHLADNI PROJECT». <http://www.burkhardbeins.de/groups/chladni.html> (accedido jun. 17, 2021).
- [9] «Cymatics »». <http://www.cymatics.co.uk> (accedido jun. 17, 2021).
- [10] «Cymatics | The influence of vibration and sound on human cells». <https://www.delamora.life/cymatics> (accedido jun. 17, 2021).
- [11] Angela Marr Sanchez, «Lechos porosos», 15:22:15 UTC. Accedido: oct. 03, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/angiee1995/lechos-porosos-49605331>
- [12] «Ondas estacionarias en una placa cuadrada: Figuras de Chladni - YouTube». <https://www.youtube.com/watch?v=9pyIHCmgzLE> (accedido jun. 26, 2021).
- [13] «Sound is an aspect of life, but is life an aspect of sound? - YouTube». <https://www.youtube.com/watch?v=VqMI-W8H7T0> (accedido jun. 26, 2021).
- [14] L. R. Canahuire Flores y Y. L. Vilcanqui Chura, «Evaluación del secado de quinua (*Chenopodium quinoa willd*) en un prototipo de lecho fluidizado», *Univ. Nac.*

- Altiplano*, feb. 2010, Accedido: oct. 03, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/3361>
- [15] «Caracterización de astillas y aserrín para una planta de tableros de partículas en Valdivia - PDF Free Download». <https://docplayer.es/29405958-Caracterizacion-de-astillas-y-aserrin-para-una-planta-de-tableros-de-particulas-en-valdivia.html> (accedido oct. 03, 2021).
- [16] P. Carcasi y C. A. Padron Pereira, «Determinación de características físicas en semillas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) mediante procesamiento digital de imágenes», *Rev. Venez. Cienc. Tecnol. Aliment.*, vol. 5, pp. 148-165, dic. 2014.
- [17] «Standing Waves». <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Waves/standw.html> (accedido jun. 26, 2021).
- [18] «Determinación de la porosidad». <https://riunet.upv.es/handle/10251/52102> (accedido oct. 03, 2021).
- [19] «Cohesión y adhesión del agua (artículo)», *Khan Academy*. <https://es.khanacademy.org/science/ap-biology/chemistry-of-life/structure-of-water-and-hydrogen-bonding/a/cohesion-and-adhesion-in-water> (accedido oct. 03, 2021).
- [20] «Capillary Action and Water | U.S. Geological Survey». <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/capillary-action-and-water> (accedido oct. 03, 2021).
- [21] Colcar, «¿Cómo influyen la tensión superficial y la energía superficial en el pegado con adhesivos hotmelt y acuosos?», *Productos Colcar*, mar. 31, 2020. <https://productoscolcar.com/blog-productos-colcar/como-influyen-la-tension-superficial-y-la-energia-superficial-en-el-pegado-con-adhesivos-hotmelt-y-acuosos/> (accedido dic. 15, 2021).
- [22] «PROTOCOLO DE CALIDAD PARA SAL COMUN DE MESA», *Argentina.gob.ar*. <https://www.argentina.gob.ar/> (accedido oct. 03, 2021).
- [23] «Humedad en agregados y control de inventarios», *Comunidad 360*. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/humedad-en-agregados-y-control-de-inventarios-1> (accedido oct. 03, 2021).