

Diseño de sólido resonador para partes del cuerpo (muslos) por medio de pruebas experimentales
y elementos finitos

Maria Camila Mora Saldarriaga, ✉ macamoris94@gmail.com

Trabajo de Grado presentado Para optar al título de Ingeniero de Sonido

Asesor: Ramiro Esteban Franco Bedoya, Magíster (MSc) en Geofísica



Universidad de San Buenaventura Colombia

Facultad de Ingenierías

Ingeniería de Sonido

Medellín, Colombia

2019

Citar/How to cite [1]

Referencia/Reference [1] M. C. Mora Saldarriaga, "Diseño de solido resonador para partes del cuerpo (muslos) por medio de pruebas experimentales y elementos finitos.", Trabajo de grado Ingeniería de Sonido, Universidad de San Buenaventura Medellín, Facultad de Ingenierías, 2019.



En convenio con Parque Explora Medellín

Bibliotecas Universidad de San Buenaventura



Biblioteca Digital (Repositorio)
<http://bibliotecadigital.usb.edu.co>

- Biblioteca Fray Alberto Montealegre OFM - Bogotá.
- Biblioteca Fray Arturo Calle Restrepo OFM - Medellín, Bello, Armenia, Ibagué.
- Departamento de Biblioteca - Cali.
- Biblioteca Central Fray Antonio de Marchena – Cartagena.

Universidad de San Buenaventura Colombia

Universidad de San Buenaventura Colombia - <http://www.usb.edu.co/>

Bogotá - <http://www.usbbog.edu.co>

Medellín - <http://www.usbmed.edu.co>

Cali - <http://www.usbcali.edu.co>

Cartagena - <http://www.usbctg.edu.co>

Editorial Bonaventuriana - <http://www.editorialbonaventuriana.usb.edu.co/>

Revistas - <http://revistas.usb.edu.co/>

Dedicatoria

Dedico éste trabajo a mi familia que siempre estuvo a mi lado en cada decisión que tomé, en cada proyecto que emprendí y durante mi carrera universitaria apoyándome para llegar hasta el final.

Agradecimientos

Agradezco al profesor Ramiro Esteban Franco por el acompañamiento a lo largo del proceso, por la paciencia y el compromiso que permitió sacar el proyecto adelante. A los profesores Juan David Berrio y Felipe Montoya por su asesoría en diferentes etapas del desarrollo de este trabajo. A mis compañeros Daniel Figueroa y Juan Esteban Otálvaro porque en equipo logramos hacer realidad éste proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
II. JUSTIFICACIÓN	10
III. OBJETIVOS.....	11
A. Objetivo general	11
B. Objetivos específicos	11
IV. ESTADO DEL ARTE.....	12
V. MARCO TEÓRICO	15
A. Vibraciones.....	15
1) Grados de libertad.....	16
B. Densidad espectral de potencia (PSD).....	16
1) Método de Welch's.....	17
C. Frecuencias de menor atenuación.....	19
D. Propagación de vibración en una viga empotrada en ambos extremos.	19
E. Elementos finitos.....	21
VI. METODOLOGÍA	22
A. Fase 1	22
B. Fase 2.....	23
C. Fase 3	24
D. Cronograma	25
VIII. CONCLUSIONES.....	30
REFERENCIAS	31

LISTA DE TABLAS

TABLA I. DIMENSIONES DE LAS PLACAS	27
--	----

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Sistema masa-resorte-amortiguador.....	15
Fig. 2. Cuerpo humano como sistema masa-resorte-amortiguador.....	16
Fig. 3. Viga Empotrada en Ambos Extremos de área transversal A y longitud L.	20
Fig. 4. Metodología.	22
Fig. 5. Fase 1: Medición.....	22
Fig. 6. Esquemas de medición.....	23
Fig. 7. Fase 2: Diseño.....	23
Fig. 8. Fase 3: Simulación.....	24
Fig. 9. Cronograma.....	25
Fig. 10. Respuesta en frecuencia.....	26
Fig. 11. Sólido muslos.....	27
Fig. 12. Resultado simulación parte alta.	28
Fig. 13. Resultado simulación parte media.	28
Fig. 14. Resultado simulación parte baja.	29

RESUMEN

En el presente trabajo se realizaron pruebas experimentales en personas adultas de diferentes contexturas y de género tanto masculino, como femenino, para obtener las frecuencias de menor atenuación para los muslos; teniendo como resultado para la parte alta 83Hz, parte media 91 Hz y parte baja 106 Hz. Posteriormente se realizó el diseño de sólidos resonadores para las frecuencias obtenidas para cada parte de los muslos.

Para obtener los sólidos resonadores, se estudió la solución de la ecuación de onda acústica en una viga empotrada en ambos extremos mediante condiciones iniciales y las condiciones de frontera del sistema. Para validar los resultados se realizó la simulación numérica a partir del método elementos finitos (FEM), de acuerdo a los resultados obtenidos, el diseño de los sólidos resonadores resulta útil para la amplificación de las vibraciones a las frecuencias a las cuales fueron sintonizados.

Palabras clave: Frecuencia de menor atenuación, Sólidos resonadores, Vibraciones, Densidad Espectral de Potencia (DEP).

ABSTRACT

In the present work, experimental tests were carried out on adults of different body types and gender, both male and female, to obtain the frequencies of less attenuation for the thighs; having as a result for the high part 83Hz, middle part 91 Hz and low part 106 Hz. Subsequently, the design of solid resonators was made for the frequencies obtained for each part of the thighs.

To obtain the resonant solids, we studied the solution of the acoustic wave equation in a beam embedded in both ends by initial conditions and the boundary conditions of the system. To validate the results, the numerical simulation was carried out using the finite element method (FEM). According to the results obtained, the design of the resonant solids is useful for the amplification of the vibrations at the frequencies to which they were tuned.

Keywords: Frequency of lower attenuation, Solid resonators, Vibrations, Power Spectral Density (PSD).

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El tacto es considerado como uno de los sentidos más importantes, ya que nos permite reconocer características de los objetos como tamaño, textura, dureza o percibir cambios de presión, temperatura e incluso dolor [1]. En la piel se encuentran cuatro tipos de mecano- receptores que se encargan de convertir las fuerzas físicas en señales neuronales y cada uno cumple una función [2]. Con el paso del tiempo se han desarrollado dispositivos que estimulan el sentido del tacto, como se expone en [3] con el desarrollo de guantes y exoesqueletos, y el uso y desarrollo de dispositivos de comunicación táctil [4].

Las vibraciones en el cuerpo humano fueron estudiadas para analizar los síntomas adversos que generaba como náuseas [5] , trastornos psicológicos y fisiológicos como la reducción del flujo sanguíneo [6], dolores en la espalda baja y el funcionamiento de otros órganos como el sistema reproductor femenino [7] cuando se estaba en una exposición constante. Con el paso del tiempo se propuso utilizar las vibraciones como una herramienta que ayudara al fortalecimiento muscular en las extremidades y en la espalda baja [8], además desarrollar nuevos dispositivos vibro-táctiles capaces de ayudar a personas con diferentes tipos de discapacidades, Como material musical para sordos [9] y para ayudar a personas con discapacidad para tragar [10].

Actualmente con el avance de la tecnología se usa también como una herramienta de entretenimiento tales como los videojuegos donde un simulador de vehículo por medio de vibraciones se puede sentir variaciones de terreno [11], realidad virtual [12] y cine, donde [13] por medio de un guante que funciona como una herramienta para crear y editar contenido audiovisual. Reconociendo el avance de la tecnología y los diferentes usos que se le puede dar a ésta para el entretenimiento, este proyecto busca diseñar un dispositivo que permita transmitir un rango de frecuencias de una pieza musical por medio de transductores vibro-acústicos a los muslos.

II. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de este proyecto hace parte de una colaboración entre la Universidad de San Buenaventura y el Parque Explora de Medellín para desarrollar una nueva experiencia para la sala de música interactiva ubicada dentro del parque. Este proyecto aborda el uso de transductores vibro táctiles y sólidos resonadores para transmitir la música al cuerpo (muslos) por medio de vibraciones. Se espera que la población de la ciudad al igual que visitantes de otras regiones tenga acceso a esta experiencia y puedan disfrutar de la música de una manera diferente.

Este proyecto es viable gracias a al apoyo económico que ofrece el Parque Explora para la adquisición de los dispositivos vibro táctiles, los soportes de madera y el montaje final del diseño, al igual que la Universidad de San Buenaventura hace su aporte con los instrumentos necesarios para las mediciones y pruebas, como los son los acelerómetros, amplificadores y generadores de frecuencia, adicionalmente con el desarrollo de las pruebas objetivas y subjetivas para el diseño y ejecución final del proyecto.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Diseño experimental de un sólido resonador en madera que permita transmitir la música a los muslos por medio de vibraciones.

B. Objetivos específicos

- Prueba experimental con transductor vibro-táctil y acelerómetro ubicado en los muslos para analizar el rango de frecuencias de mayor amplitud que se recibe.
- Con base en la teoría y en los rangos de frecuencia encontrados, diseñar un sólido que servirá como soporte para los muslos que amplifique el rango de frecuencias en partes localizadas.
- Usando modelamiento numérico para repetir el experimento, refinar el diseño del soporte y comparar las frecuencias observadas en el experimento real con las frecuencias obtenidas en la simulación numérica con base en receptores virtuales (acelerómetros).

IV. ESTADO DEL ARTE

Debido a la constante exposición a las vibraciones de personas en diferentes campos laborales tales como la agricultura, construcción y transporte, se han desarrollado diferentes investigaciones para evaluar la forma como estas son transmitidas al cuerpo y que efectos tienen estas sobre la salud [14] [5]. Estas investigaciones dieron paso a la realización de estándares [15] [16], que determinen los efectos de las vibraciones en el cuerpo humano y permitan conocer por medio de mediciones a que cantidad puede estar expuesta una persona para que su salud no se vea afectada.

Los efectos de las vibraciones en personas por largos periodos de tiempo generaban problemas principalmente en la espalda baja [17] y pérdida de fuerza en las manos [18], pero nuevos estudios muestran que la estimulación con frecuencia y amplitud controlada ayudan a mejorar el fortalecimiento muscular y los dolores en las extremidades bajas [8] [19], además del fortalecimiento de los huesos en mujeres postmenopáusicas [20].

Los dispositivos vibro táctiles varían según el uso y la parte del cuerpo a la que van dirigidos

[21], estos se desarrollaron con el fin de apoyar las investigaciones de los efectos de las vibraciones en el cuerpo de manera controlada, adicionalmente, las diferentes distribuciones permiten generar diferentes sensaciones, al igual que las variaciones de forma y de materiales de los transductores vibro táctiles [22].

El uso de dispositivos vibro táctiles permitió a un grupo de investigadores en conjunto con una organización para sordos diseñar un sistema distribuido de transductores ubicados en una silla [9], que permitiera transmitir la música al cuerpo por medio de vibraciones y de esta manera las personas discapacitadas pudieran tener una experiencia sensorial de la música. También se expone el desarrollo de un sistema que permite componer música por medio de vibraciones [23], para luego ser reproducida y que genere una sensación agradable para quien lo escuche, esto nuevamente ayuda a las personas con discapacidades a desarrollar su creatividad y a ser de alguna manera integradas a la sociedad.

El diseño de una chaqueta que permite reproducir diferentes sensaciones tales como calor,

cosquilleo, pequeños golpes y otras interacciones [24], permite mostrar los diferentes usos que se le ha otorgado a los dispositivos vibro táctiles que cada vez aportan más a las nuevas tecnologías de realidad virtual. La incorporación de nuevas tecnologías que permitan al cine y a los videojuegos generar una experiencia cada vez más real ha dado paso a los sistemas vibro táctiles a desarrollar nuevos diseños tales como un guante que le permite al espectador interactuar con el producto audio visual y ser de cierta manera un protagonista más de la historia [13].

La creación de la “Emoti-Chair” como una experiencia multi-sensorial a partir de la cual se inició la composición de música vibro táctil [25], mediante la implementación de talleres con cineastas sordos, los cuales experimentaron con la creación de “vibro tracks” para un clip utilizando un software profesional de edición de películas y con cantantes de ópera, los cuales sintieron su voz a través de la “Emoti-Chair” [26]. Allí se aplicaron conceptos relacionados con la música y los efectos físicos y psicológicos que esta pueda tener en las personas [27].

El uso de diferentes tecnologías combinadas con los fenómenos vibratorios, han generado tecnologías que permiten la interacción del usuario con espacios virtuales. Alvin Wing-Hong Law en [28], diseñó un suelo vibro táctil para la interacción con diferentes espacios virtuales por medio del caminado. Allí se diseña una experiencia interactiva en la cual el usuario puede tener la sensación de caminar por diferentes tipos de suelo mediante la vibración, además de recrear el ambiente mediante sonidos y proyección de gráficos de alta calidad. Este desarrollo se hace a través de transductores vibro táctiles como también sensores de fuerza, los cuales responden a la presión ejercida sobre las placas de las cuales se compone el suelo de la experiencia interactiva [29]. Esto fue posible gracias a estudios previos que se han venido realizando sobre animación computacional y realidad virtual [30].

Para concluir, se puede observar en la literatura que la creación de experiencias interactivas a través de vibro transductores es un campo que poco a poco va siendo explorado, gracias a la implementación de nuevas tecnologías que demandan nuevas experiencias para los usuarios cada vez más innovadoras y que brinden interacciones lo más cercanas a la realidad posible. Además, se debe agregar la poca exploración que ha

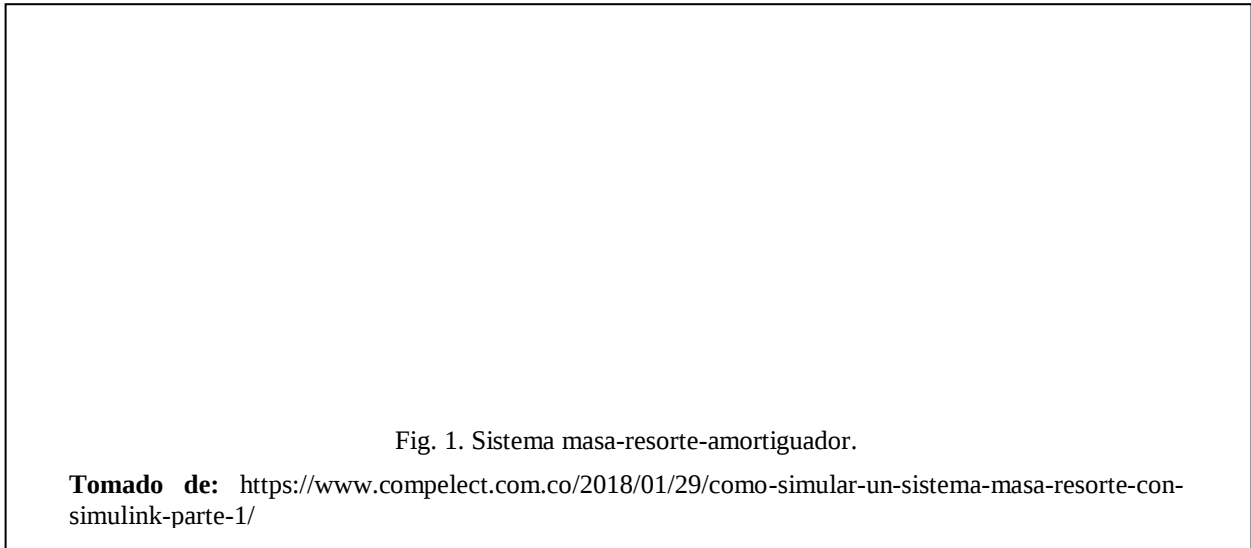
tenido el campo musical en dichas experiencias y desarrollos, lo que se puede ver como una oportunidad de implementación para el proyecto de grado a realizarse, permitiendo la generación de nuevos conocimientos y resultados en esta área a futuro. Se identifica que la mayoría de estudios de uso de vibro transductores se realizan en muslos, los cuales serán abordados de manera profunda en esta tesis de grado, mediante pruebas experimentales y elementos finitos.

V. MARCO TEÓRICO

A. Vibraciones

Las vibraciones se entienden como el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio en un intervalo de tiempo. Los sistemas vibratorios de acuerdo con [31] se pueden modelar como un sistema masa, resorte, amortiguador donde:

- Masa (m): Almacena energía cinética.
- Resorte (k): Almacena energía potencial.
- Amortiguador (B): disipador de energía.



$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{s}{LV}} \quad (7.1)$$

Las vibraciones se pueden clasificar en dos grupos relevantes que son los siguientes:

- **Vibración libre:** El sistema vibra a partir de una perturbación inicial y éste sigue

vibrando por sí mismo.[32]

- **Vibración Forzada:** El sistema vibra debido a una excitación (fuerza) externa por lo general constante.[32]

1) *Grados de libertad*

En [33] se definen los grados de libertad como el número de coordenadas independientes necesarias para determinar la posición de un sistema en un instante de tiempo. El cuerpo humano se puede modelar como un sistema de múltiples grados de libertad o sistema continuo [34], ya que al ser expuesto a una vibración, la energía que esta produce se distribuye por el cuerpo semejando a un sistema de masa-resorte-amortiguador dónde cada parte del cuerpo responde a una frecuencia específica [16].



B. Densidad espectral de potencia (PSD)

Esta función matemática modela la forma en la que el voltaje relativo ($V \cdot \text{Hz}$) de una señal, se distribuye con la frecuencia [35]

La potencia esperada se puede obtener mediante una integración en el dominio de la frecuencia, definiendo el espectro de la densidad de potencia para un proceso estocástico, es decir, que es

una variable aleatoria, mediante la expresión [35]:

$$S_{xx}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E[|X_T(\omega)|^2]}{2T} \quad (7.2)$$

Donde, el numerador hace referencia a la energía de la señal y T un valor de tiempo. La potencia se define como:

$$P_{xx} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega) d\omega \quad (7.3)$$

1) *Método de Welch's*

En el caso de este proyecto se obtuvo la densidad espectral de potencia, mediante el método de P. Welch, el cual permite la reducción del costo computacional, mediante el uso de la FFT (Fast Fourier Transform). Este método consiste en las siguientes etapas [36]:

Partición de la secuencia de datos:

$$x[0], x[1], \dots, x[N-1]$$

En K segmentos:

$$\text{Segmento 1: } x[0], x[1], \dots, x[M-1]$$

$$\text{Segmento 2: } x[S], x[S+1], \dots, x[M+S-1]$$

.

.

.

$$\text{Segmento K: } x[N-M], x[N-M+1], \dots, x[N-1]$$

Donde,

M = Número de puntos en cada segmento.

S = Número de puntos para desplazar entre segmentos.

K = Número de segmentos.

Para cada segmento ($k = 1$ hasta K), calcular la DFT (Discrete Fourier Transform) para las frecuencias $v = i / M$ donde $-(M / 2 - 1) < i <= M / 2$:

$$X_k(v) = \sum_m x[m] \omega[m] \exp(-j2\pi vm) \quad (7.4)$$

Donde,

$m = (k \neq 1)S, \dots, M + (k \neq 1)S \neq 1$

$w[m]$ = La función del ventaneo.

Para cada segmento ($k = 1$ hasta K), se obtiene el valor del periodograma modificado, $P_k(f)$, a partir de la transformada discreta de Fourier:

$$P_k(v) = \frac{1}{W} |X_{k(v)}|^2$$

Donde,

$$W = \sum_{m=0}^M \omega^2[m]$$

Promedio de los valores del periodograma para obtener la estimación de Welch de la PSD:

$$S_x(v) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K P_k(v) \quad (7.5)$$

C. Frecuencias de menor atenuación

Las vibraciones van perdiendo intensidad conforme van avanzando por los tejidos. Esta pérdida por unidad de longitud se denomina atenuación [37].

La atenuación se produce por diferentes factores, como la absorción de las ondas longitudinales por el medio, hasta las diversas reflexiones que puedan producirse por homogeneidad del medio. La atenuación es directamente proporcional a la frecuencia de las vibraciones utilizadas, por lo que debemos esperar una mayor pérdida de intensidad en profundidad, con vibraciones de mayor frecuencia [37]. A partir de esto, se definen las frecuencias de menor atenuación, como aquellas frecuencias a las cuales se presenta una menor resistencia a la propagación de las vibraciones.

D. Propagación de vibración en una viga empotrada en ambos extremos.

Teniendo en cuenta que la dirección de propagación de las vibraciones será longitudinal, debido a que el desplazamiento de la viga será en el mismo sentido de la perturbación. Se procede a darle solución a la ecuación 7.6 en un sólido [38].

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \left(\frac{\rho}{E}\right) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (7.6)$$

Donde,

ρ = Densidad del material.

E = Módulo de Young.

Se observa que esta ecuación depende de variables tanto temporales t como espaciales x y v hace referencia a la velocidad de propagación.

En este caso el sólido es una viga empotrada en ambos extremos como se muestra en la figura 3

Fig. 3. Viga Empotrada en Ambos Extremos de área transversal A y longitud L.

Fuente: Imagen tomada de <https://google.com>

A partir de condiciones iniciales temporales y espaciales, se tiene la solución de la ecuación 7.7, donde el desplazamiento es función de la posición y el tiempo. A continuación las condiciones iniciales para cada extremo de la viga.

Extremo izquierdo.

$$v(0, t) = 0 \text{ (cero desplazamiento)}$$

$$U(0)T(t) = 0$$

$$U(0) = 0$$

Extremo derecho.

$$u(L, t) = 0 \text{ (cero desplazamiento)}$$

$$U(L)T(t) = 0$$

$$U(L) = 0$$

$$v(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[\sin \left(\frac{n\pi x}{L} \right) \right] \left[A_n \sin \left(\frac{n\pi ct}{L} \right) + B_n \cos \left(\frac{n\pi ct}{L} \right) \right] \right\} \quad (7.7)$$

Donde A_n y B_n son constantes que dependen de las condiciones de frontera del sistema, y a partir de éstas se obtiene la frecuencia natural para una viga empotrada en ambos extremos como se puede observar en la ecuación 7.8

$$\omega = K^2 \sqrt{\frac{EI}{A\rho L^4}} \quad (7.8)$$

Donde,

K Constante que depende de los modos de vibración.

E Módulo de Young.

I Momento de inercia.

A Área transversal.

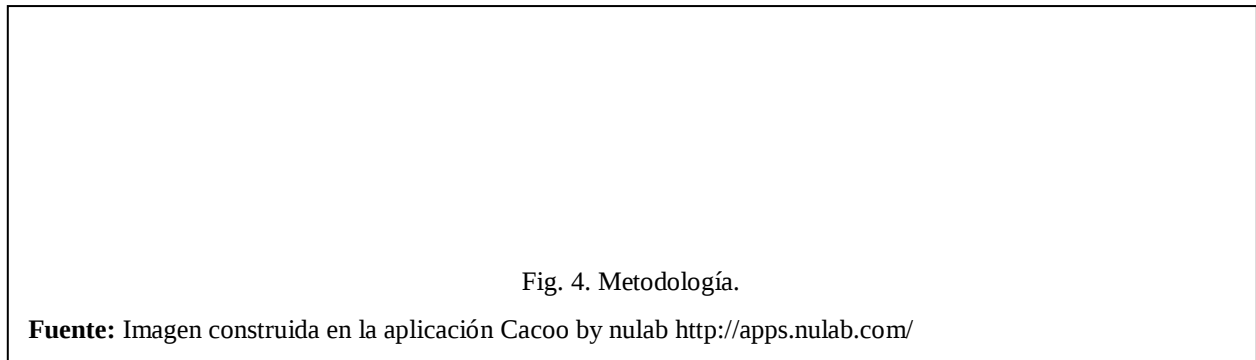
ρ Densidad del material.

L Largo de la viga.

E. Elementos finitos

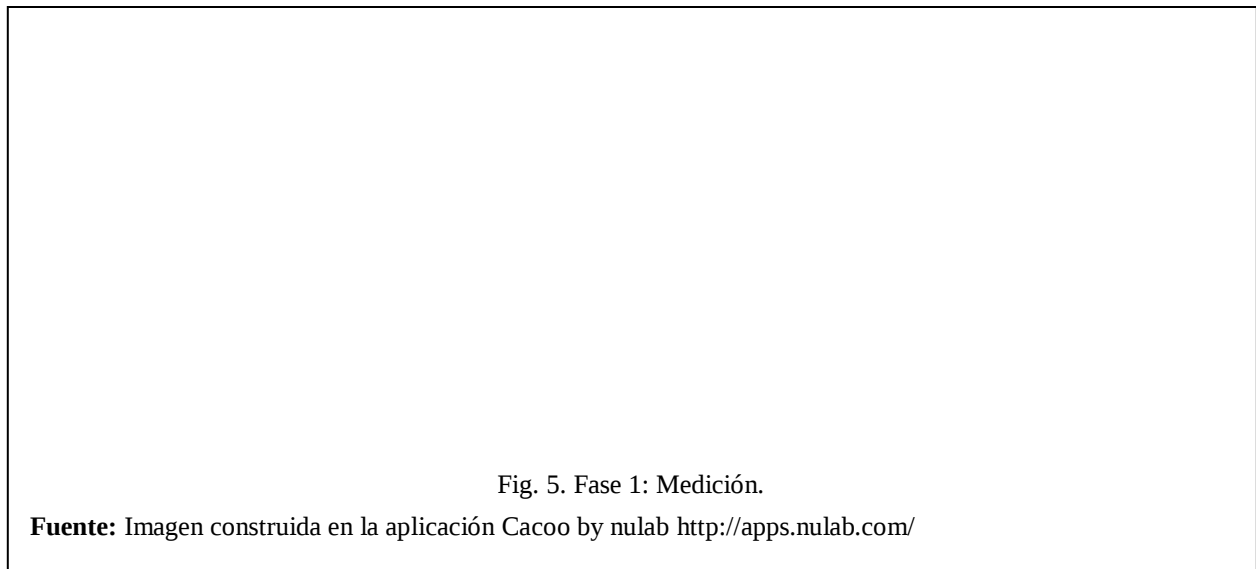
Es un método de aproximación de problemas continuos, de tal forma que se divide en finitas partes o elementos, y la descripción de estas partes viene dadas por un número finitos de parámetros en puntos característicos llamados nodos; estos son los puntos de unión de cada elemento a sus adyacentes. Al interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las funciones de interpolación o funciones de forma [39]. De manera más sencilla podemos decir que este método que se basa en tomar un modelo continuo y transformarlo a un modelo discreto, tomando puntos característicos del mismo. Ahora bien la aplicación de este método se da por lo general en geometrías complicadas donde se necesita saber el comportamiento de determinado parámetro como por ejemplo el desplazamiento en diferentes puntos de un sólido.

VI. METODOLOGÍA



La figura 4 permite tener una idea clara de los procesos realizados para el diseño final del sólido resonador que permita transmitir la música a los muslos por medio de vibraciones.

A. Fase 1



En la figura 5 se muestra el montaje para el desarrollo de las pruebas experimentales con los soportes de vibración. Se usa el programa Reaper con un generador de frecuencia para enviar ruido rosa en rangos de 20 a 200 Hz al vibro-transductor. En la cara opuesta de éste, se ubica un acelerómetro que permite medir la vibración que se transmite a cada parte de



Fig. 6. Esquemas de medición

los muslos.

En la figura 6 Se observan los puntos de medición. Puntos amarillos son los puntos de medición con el acelerómetro, los puntos verdes son la señal de vibración de entrada. Con los datos de aceleración reportados y con los datos medidos de la señal de entrada se procede a calcular el espectro de frecuencia.

Fuente: Imagen tomada de <https://google.com> y editada en Word.

Fig. 7. Fase 2: Diseño

Fuente: Imagen construida en la aplicación Cacao by nulab <http://apps.nulab.com/>

En la figura 7 se observa la fase 2 del proyecto la cual consiste en el diseño del sólido resonador. Para el desarrollo de esta fase es necesario tener un conocimiento de ondas estacionarias en sólidos, luego elegir una geometría que permita ser modificada fácilmente para poder sintonizar las frecuencias obtenidas en la fase 1 y por último elegir los materiales de tal manera que la transmisión de vibración sea la adecuada para cada parte de los muslos.

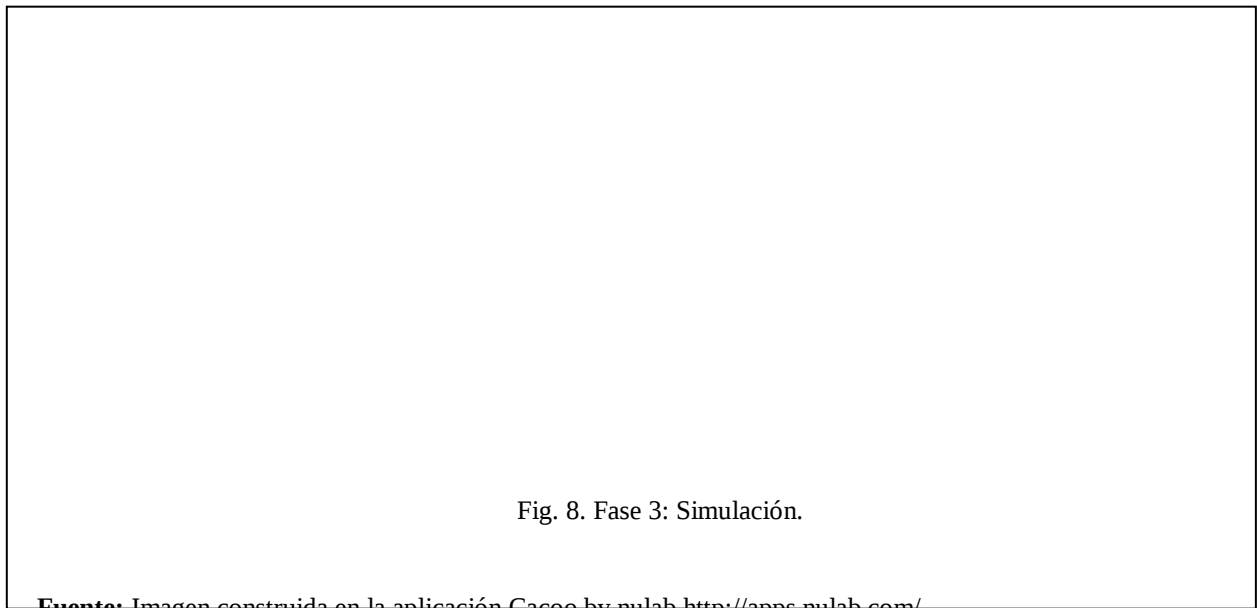


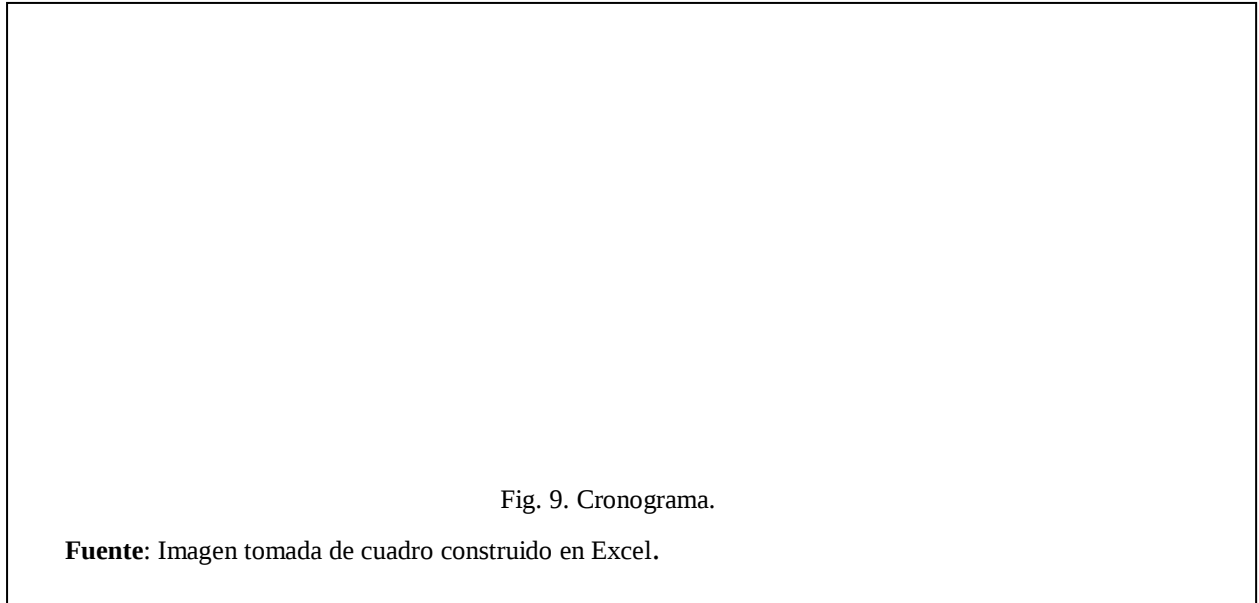
Fig. 8. Fase 3: Simulación.

Fuente: Imagen construida en la aplicación Cacao by nulab <http://apps.nulab.com/>

C. Fase 3

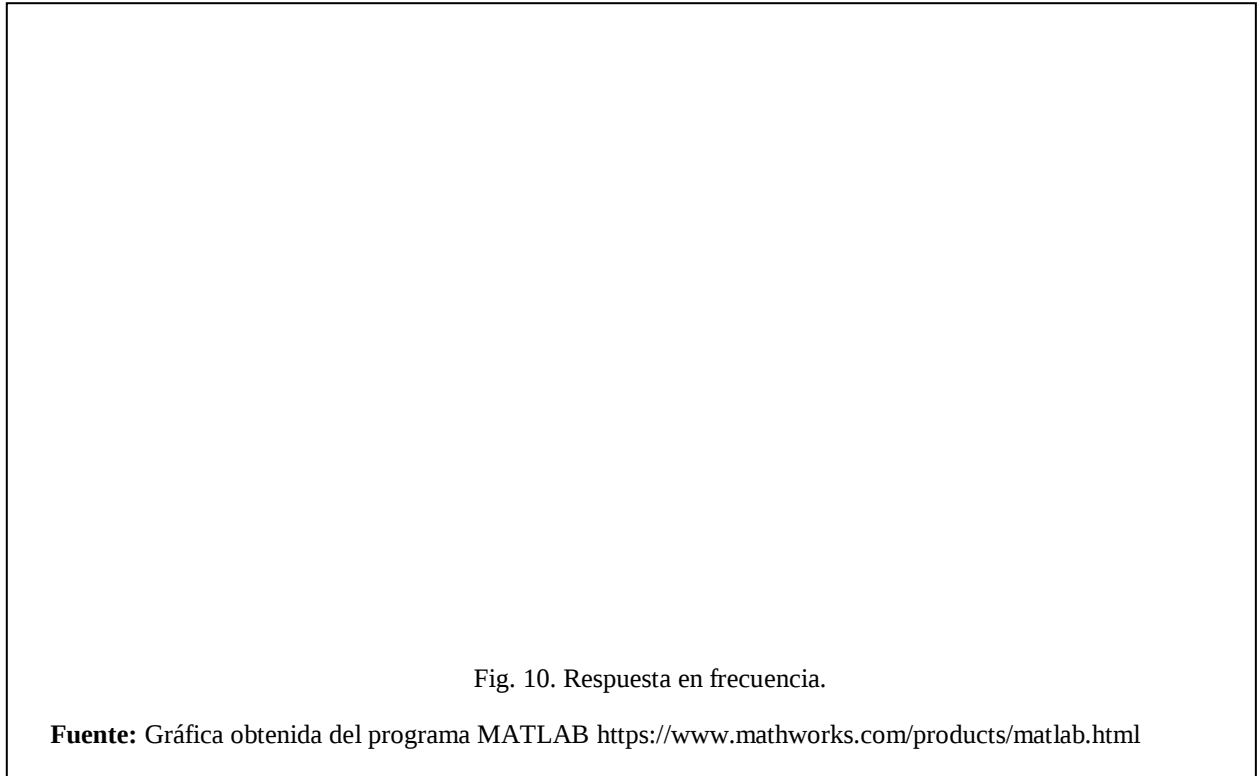
En ésta fase como se muestra en la figura 8 se desarrolla el diseño final del soporte. En primer lugar para el desarrollo de esta fase se debe tener un previo conocimiento del programa de simulación numérica para evaluar el diseño, este programa permite conocer propiedades de materiales y definición de geometrías. Luego de obtener los datos arrojados por la simulación se hace una comparación con los datos obtenidos en las fases anteriores para refinar el diseño y obtener el producto final.

D. Cronograma



VII. RESULTADOS

En la figura 10 se presenta gráficamente la respuesta en frecuencia promedio obtenida para cada parte del muslo



Dado que los picos para cada una de las partes eran similares se decidió tomar tres frecuencias diferentes para cada punto con el fin de tener una sensación de vibración diferente a lo largo del muslo por esto las frecuencias escogidas fueron para la parte baja 106 Hz, parte media 91 Hz y parte alta 83 Hz

Con las frecuencias de resonancia obtenidas se comenzó a diseñar los sólidos a partir de la solución de la Ecuación 7.7 y la elección de la geometría del sólido (figura 3) fueron diseñadas mediante la Ecuación 7.8 unas placas (sólido resonador), las cuales permiten amplificar las vibraciones de la música por medio de transductores vibro táctiles. Los

materiales elegidos fueron acero para la base y duraluminio para las placas. Posteriormente se realizaron los diseños de la estructura a la cual serán fijadas las placas y también un soporte en madera que permita distribuir el peso de las personas. Las Dimensiones de las placas se pueden observar en la Tabla I.

TABLA I. DIMENSIONES DE LAS PLACAS

Muslos		
Parte	Largo x Ancho x Espesor	
Parte Baja	15 x 5 x 0,05	
Parte Media	14 x 5 x 0,04	
Parte Alta	14 x 5 0,03	

Fig. 11. Sólido muslos.

Fuente: Imagen construida en el software de diseño AutoCAD de <https://latinoamerica.autodesk.com>

En la figura 11 se observa el diseño final del sólido, se debió considerar los materiales tanto de los soportes como el de las placas para que no se alteraran las frecuencias a las cuales habían sido sintonizadas, seleccionando el acero (color rojo) para las bases y el duraluminio (color gris) para las placas, este último fue seleccionado gracias a su facilidad de manejo y a su pureza al ser una aleación del aluminio, ya que este factor podría afectar el comportamiento de las placas. Por otra parte, no deben ser del mismo material ya que se comportaría como un único sólido y también alteraría el comportamiento del diseño para cada placa, por último se adicionó la madera (Color

café) para distribuir el peso de las personas.

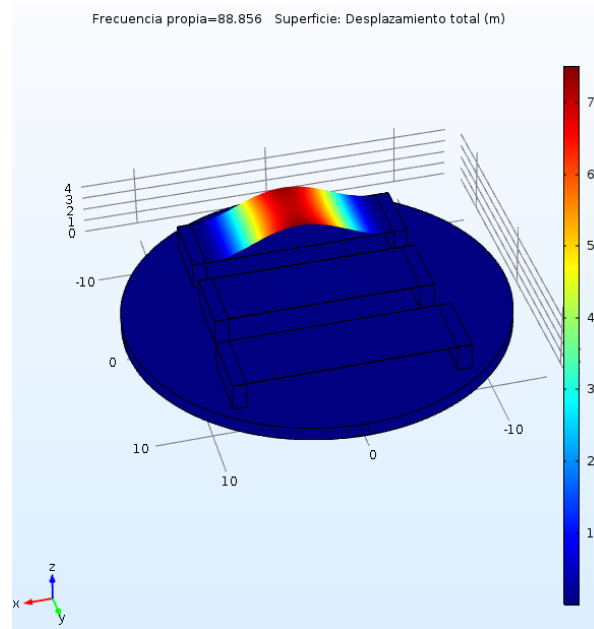


Fig. 12. Resultado simulación parte alta.

Fuente: Imagen construida en el software de modelamiento y simulación COMSOL Multiphysics <https://www.comsol.com/>

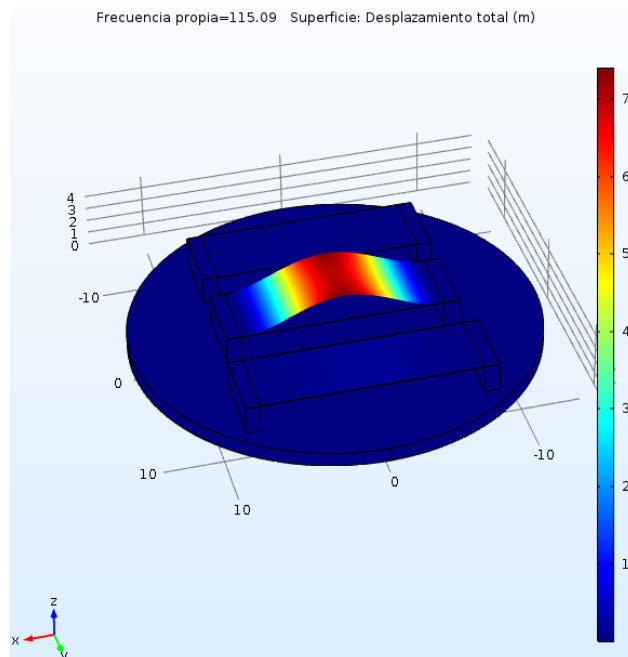
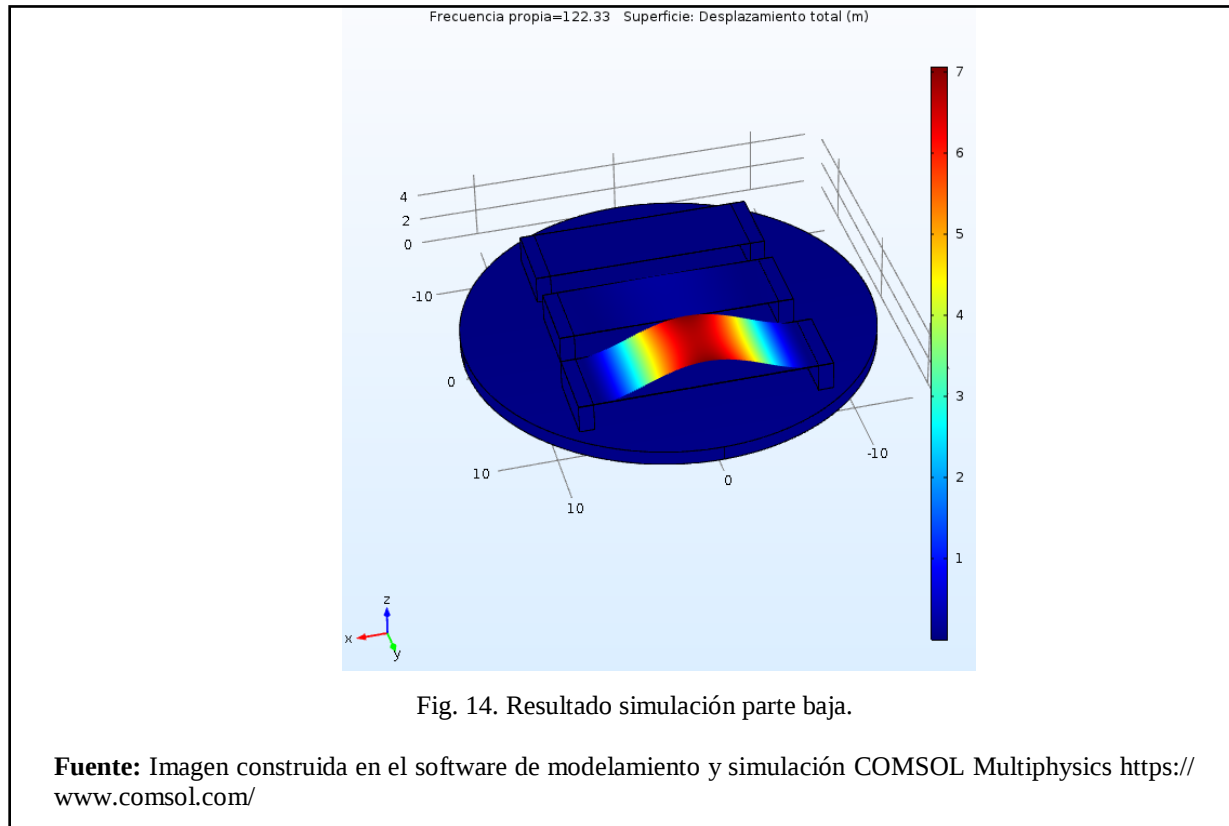


Fig. 13. Resultado simulación parte media.

Fuente: Imagen construida en el software de modelamiento y simulación COMSOL Multiphysics <https://www.comsol.com/>



A partir de las simulaciones observadas en las figuras 12, 13 y 14, se puede observar que los resultados hallados teóricamente no difieren en gran medida de los valores obtenidos mediante simulación numérica. Aunque se puede observar un comportamiento característico en las simulaciones, donde para las placas de las frecuencias más bajas los resultados eran más cercanos, mientras que para las placas de las frecuencias más altas, los resultados divergen un poco más, esto puede deberse a la malla seleccionada en el momento de la simulación.

VII. CONCLUSIONES

A partir de mediciones de vibración con acelerómetros, se logró encontrar las frecuencias de menor atenuación para los muslos.

Al resolver la ecuación de onda para un sólido de dimensión finita, se lograron encontrar frecuencias fundamentales de vibración, estas frecuencias dependían tanto de la geometría como de las propiedades físicas del material, de tal modo que se pudo hacer una combinación de ambas variables para sintonizar los sólidos con frecuencias que coincidieran con las frecuencias halladas para los muslos.

Al realizar los diseños, se encontró una relación directamente proporcional entre la frecuencia y el espesor; y una relación inversamente proporcional entre la frecuencia y el largo de las placas.

REFERENCIAS

- [1] Significados “EL TACTO.” 2015. [Online]. Available: <https://www.significados.com/tacto/>
- [2] Psicoactiva, “Psicobiología de los sentidos: el Tacto.” [Online]. Available: <https://bit.ly/2tgwifd>
- [3] “II Congreso Internacional sobre Domótica, Robótica y Teleasistencia para Todos,” 2007.
- [4] O. Bazán and R. Velázquez, “Dispositivos Electrónicos para Comunicación Táctil con el Pie,” pp. 894–897, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [5] D. R. Smith and P. A. Leggat, “Whole-Body Vibration Health effects, measurement and minimization,” *American society of safety professionals*, 2005.
- [6] P. P. rer nat Alwin Luttmann Dr-Ing Matthias Jäger Dra med Barbara Griefahn, med sc Gustav Caffier med Falk Liebers Dipl-Ing Ulf Steinberg, and T. Solasaari Pekki, “Serie pro- tección de la salud de los trabajadores N° 5 Prevención de trastornos musculoesqueléticos en el lugar de trabajo,”
- [7] M. Bovenzi, “Health effects of mechanical vibration.,” *Giornale italiano di medicina del lavoro ed ergonomia*, vol. 27, no. 1, pp. 58–64, 2005.
- [8] M. Cardinale and J. Wakeling, “Whole body vibration exercise: are vibrations good for you?,” *British journal of sports medicine*, vol. 39, pp. 585–9; discussion 589, sep 2005.
- [9] R. Jack, A. Mcpherson, and T. Stockman, “Designing Tactile Musical Devices with and for Deaf Users: a Case Study,” *Proc. of the International Conference on the Multimedia Experience of Music*, no. 2006, pp. 1–7, 2015.
- [10] C. L. Ludlow, N. Morgan, G. Dold, S. Lowell, “Device for volitional swallowing with a substitute sensory system,” U.S. Patent 8449445 B2, 2013.
- [11] M. H. Loper III, “Shaker control device,” U.S. Patent 5203563 A, 1993.

- [12] E. J Shahoian, K. M Martin, B. M Schena, D. F Moore, “Vibrotactile haptic feedback devices,” U.S. Patent 6693622 B1, 2004.
- [13] K. Yeongmi, C. Jongeun, O. Ian, and R. Jeha, “Exploring Tactile Movies: An Initial Tactile Glove Design and Concept Evaluation,” *IEEE MultiMedia*, pp. 1–1, 2015.
- [14] M. J. Griffin, *Handbook of Human Vibration*. Elsevier Science, 1990.
- [15] I. Standard, “ISO 2631-1 Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of human exposure to whole body vibration,” vol. 2010, 1997.
- [16] I. Standard, “ISO 2631-5:2004(en), Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks,” 2004.
- [17] T. Hansson, M. Magnusson, and H. Broman, “Back muscle fatigue and seated whole body vibrations: an experimental study in man,” *Clinical Biomechanics*, vol. 6, pp. 173–178, aug 1991.
- [18] L. E. Necking, G. Lundborg, and J. Friden, “Hand muscle weakness in long-term vibration exposure.,” *Journal of hand surgery (Edinburgh, Scotland)*, vol. 27, pp. 520–5, dec 2002.
- [19] C. M and P. M. H, “The effects of whole body vibration on humans: dangerous or advantageous?,” *Acta physiologica Hungarica*, vol. 90, no. 3, pp. 195–206, 2003.
- [20] S. M. Verschueren, M. Roelants, C. Delecluse, S. Swinnen, D. Vanderschueren, and S. Boonen, “Effect of 6-Month Whole Body Vibration Training on Hip Density, Muscle Strength, and Postural Control in Postmenopausal Women: A Randomized Controlled Pilot Study,” *Journal of Bone and Mineral Research*, vol. 19, pp. 352–359, dec 2003.
- [21] M. B. J. P, Z. G. A, and C. R. W, “Vibrotactile transduction and transducers,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 121, pp. 2970–2977, may 2007.
- [22] S. Choi and K. J. Kuchenbecker, “Vibrotactile display: Perception, technology, and

- applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 9, pp. 2093–2104, 2013.
- [23] E. Gunther, “Skinscape: A tool for composition in the tactile modality,” *Source*, p. 118, 2001.
- [24] F. Arafsha, K. M. Alam, and A. El Saddik, “Design and development of a user centric affective haptic jacket,” *Multimedia Tools and Applications*, vol. 74, pp. 3035–3052, may 2015.
- [25] A. C. North and D. J. D. J. Hargreaves, *The social and applied psychology of music*.
- [26] M. Karam, C. Branje, G. Nespoli, N. Thompson, F. A. Russo, and D. I. Fels, “The emoti-chair,” in *Proceedings of the 28th of the international conference extended abstracts on Human factors in computing systems - CHI EA '10*, (New York, New York, USA), p. 3069, ACM Press, 2010.
- [27] K. J. K. J. Donnelly, *The spectre of sound : music in film and television*. BFI, 2005.
- [28] A. Wing and H. Law, “A Vibrotactile Floor for Enabling Interaction through Walking in Virtual Spaces,” tech. rep., 2010.
- [29] B. Richardson, K. Leydon, M. Fernstrom, and J. A. Paradiso, “Z-Tiles,” in *Extended abstracts of the 2004 conference on Human factors and computing systems - CHI '04*, (New York, New York, USA), p. 1529, ACM Press, 2004.
- [30] A. W. Law, B. V. Peck, Y. Visell, P. G. Kry, and J. R. Cooperstock, “A multi-modal floor-space for experiencing material deformation underfoot in virtual reality,” in *2008 IEEE International Workshop on Haptic Audio visual Environments and Games*, pp. 126–131, IEEE, oct 2008.
- [31] C. M. J, *Handbook of noise and vibration control*. John Wiley, 2007.
- [32] S.Rao, “Fundamentos de Vibraciones,” in *VIBRACIONES MECANICAS*, 2012.
- [33] P. Mario and J.-M. Vallhonrat Bou, *Dinamica estructural : teoria y calculo*. Reverte, 1991.

- [34] F. S. Crawford and J. T. D’Alessio, *Ondas*. Reverte, 1994.
- [35] U. de Navarra, “Procesos Estocásticos en Teoría de la Señal.”
- [36] J. Otis M. Solomon, “PSD Computations Using Welch’s Method,” tech. rep., Sandia National Laboratories, Estados Unidos, 1991.
- [37] J. A. Martínez, J. Vitola, S. P. Sandoval, “Fundamentos teórico-básicos del ultrasonido.” 2007.
- [38] T. Irvine, “LONGITUDINAL NATURAL FREQUENCIES OF RODS AND RESPONSE TO INITIAL CONDITIONS,” 2009.
- [39] E. Frias Valero, *Aportaciones al estudio de máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de elementos finitos*. PhD thesis, 2004.