



## **Nuevos materiales / nuevas sonoridades. Sincretismo arte-ciencia en la creación de instrumentos musicales utilizando metamateriales**

**New Materials / New Sounds. Art and science syncretism in musical instruments  
development using metamaterials**

**CAROLINA ESPINOZA OÑATE**

Departamento de Sonido, Facultad de Artes, Universidad de Chile / Departamento de  
Física, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile (Chile)

carolinaespinozao@uchile.cl

Recibido: 9 de mayo de 2020

Aceptado: 12 de julio de 2020

### **Resumen:**

*El presente trabajo busca dar a conocer las potencialidades de una investigación multidisciplinar, en que arte y ciencia conversan sincréticamente en torno a la aplicación de metamateriales mecánicos en la modificación o creación de nuevos instrumentos musicales, desplazando la frontera de las cualidades acústicas de los materiales existentes y abriendo paso a nuevas sonoridades.*

*Primero, se introduce el concepto de metamaterial mecánico sintonizable, materiales cuya estructura permite la absorción de bandas de frecuencia ajustables bajo deformaciones. Posteriormente, se muestra la respuesta mecano-acústica de materiales ordinarios, comparada con la de metamateriales mecánicos fabricados con los mismos componentes, pero dotados de estructura. Luego, se expone el comportamiento de los metamateriales a partir de compresiones, mostrando el efecto de aparición y corrimiento de bandas prohibidas. Finalmente, se expone cómo el comportamiento de estos metamateriales mecánicos podría ser utilizado en la modificación de instrumentos musicales, permitiendo nuevas interacciones intérprete-instrumento que expandan sus propiedades sonoras.*

**Palabras Clave:** Instrumentos musicales, metamateriales mecánicos, metamateriales acústicos, acústica musical, sonido, timbre.

**Abstract:**

*The main goal of this work is to show the potential of a multidisciplinary research, in which art and science communicates syncretically around the application of a new type of materials, mechanical metamaterials, in the modification or creation of new musical instruments, displacing the frontiers of the acoustic qualities of existing materials and giving rise to new sound properties.*

206

*First, the concept of tunable mechanical metamaterial is introduced, materials whose structure allow the absorption of adjustable band frequencies under deformations. Subsequently, the mechanical-acoustic response of ordinary materials is shown, compared to that of mechanical metamaterials made with the same components, but endowed with structure. Then, the behavior of compressed mechanical metamaterials is exposed, showing the band gaps generation and shift. Finally, it is expose how the mechanical metamaterial behavior can be used in the modification of musical instruments, allowing new interactions player-instrument that expand their sound properties.*

**Keywords:** Musical instruments, mechanical metamaterials, acoustic metamaterials, musical acoustics, sound, timbre.



## 1. Introducción

En vista de los nuevos instrumentos musicales de fines del siglo XIX, desarrollados a partir de los avances de la electrónica, Bariaux (1995) planteó que la ciencia era capaz de descubrir en la naturaleza un caos sensible, fuente inagotable de creatividad, y que estos productos del laboratorio y de la técnica abrían el camino a posibilidades inauditas de herramientas cada vez mejor adaptadas a la sutileza de la comunicación humana. Esta es una de las tantas reflexiones que surgen en torno a la influencia de los adelantos científicos en la generación de herramientas de creación sonora (Ahrens & Zedlacher, 1996; Byrne, 2017; Kramer, 1988; Pinch & Trocco, 2009). Esta permeabilidad, que parece agudizarse en el siglo XX, pero que en realidad se remonta al origen de los instrumentos musicales (Bowles, 2013; Montagu, 2007), trae como consecuencia que, en su esencia intrínsecamente multidimensional, los instrumentos musicales contengan tanto en su forma como en su materialidad parte de la historia de la evolución científica y tecnológica de las culturas en que se originan y evolucionan.

Los instrumentos musicales mecánicos corresponden a sistemas complejos acústicamente, que físicamente pueden modelarse como una serie de osciladores acoplados, en que las propiedades de los materiales que los componen tienen una fuerte influencia en su sonoridad (Bucur, 2016; Fletcher y Rossing, 1998). Por otro lado, se tiene un nuevo tipo de materiales denominados metamateriales mecánicos, correspondientes a

materiales artificiales con propiedades extraordinarias, que permiten el control de vibraciones que se propagan a través de ellos (Craster y Guenneau, 2013). El abanico de posibilidades que se abre en torno a la aplicación de estos metamateriales en instrumentos musicales resulta evidente y, sin embargo, casi no ha sido explorado.

En esta investigación se propone que, al igual como el desarrollo de la electrónica desplazó las fronteras de la generación sonora, los metamateriales mecánicos, materiales nóveles ubicados dentro de los principales avances de la ciencia en los últimos veinte años y cuyo estudio es un campo emergente de la acústica moderna, desplazarán la frontera de las cualidades acústicas de los materiales existentes, abriendo paso a nuevas sonoridades y vías de interacción sonora (ver figura 1).

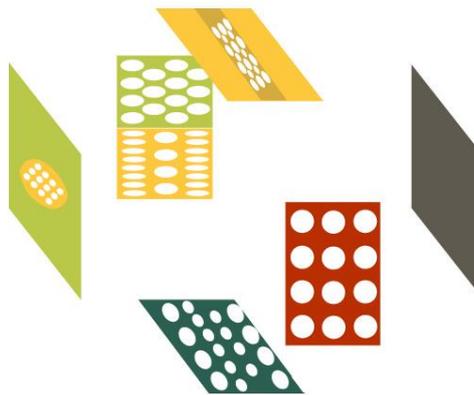


Figura 1. ¿Pueden los metamateriales mecánicos, combinados y ensamblados con otros materiales, generar respuestas acústicas hasta ahora inexistentes?

## 2. Metamateriales mecánicos

Los metamateriales mecánicos son materiales híbridos heterogéneos, racionalmente diseñados con el fin de alcanzar propiedades extraordinarias que surgen de la combinación de su estructura y su composición, cuyos parámetros materiales efectivos van más allá de los pertenecientes a los componentes clásicos que los constituyen (Muamer et al., 2019). La popularidad de los metamateriales mecánicos se expandió de la mano de los avances en la fabricación aditiva, que ha hecho posible su manufacturación a diferentes escalas de manera relativamente simple y a bajo costo (Tong, 2018). Algunos metamateriales mecánicos, también llamados metamateriales acústicos, corresponden a materiales artificiales que permiten la manipulación de propiedades dispersivas de vibraciones: por ejemplo, bajo ciertas condiciones de deformación, pueden presentar bandas de absorción en que la propagación de ondas queda prohibida (Deymier, 2013). La presente investigación se centra en el estudio de metamateriales mecánicos sintonizables, que exhiben bandas prohibidas, cuyas posiciones en el espectro de

frecuencias varían al ser deformados (Overvelde et al., 2012; Singamaneni & Tsukruk, 2010).

La hipótesis principal de esta investigación es que al acoplar un metamaterial mecánico sintonizable a una superficie vibrada, éste absorberá la energía de las componentes situadas en su banda prohibida. La diferencia respecto a materiales ya existentes, es que estos metamateriales podrían deformarse una vez acoplados, variando la posición de la banda prohibida y eliminando otros componentes de la vibración, transformándose en una especie de filtro de sintonización mecánica. Al aplicarse a un instrumento musical, este filtro podría ser controlado por el intérprete, expandiendo sus propiedades interpretativas. Para avanzar en esta hipótesis, el primer paso ha sido fabricar metamateriales mecánicos y caracterizar su respuesta mecano-acústica a diversos niveles de deformación (compresión). Los metamateriales estudiados corresponden a bloques de silicona con agujeros equi-espaciados que forman una red periódica (ver figura 2), donde las ondas mecánicas que los atraviesan pueden interactuar por efectos de dispersión, cuando las longitudes de onda son del orden de las longitudes características de su estructura, o por efectos de resonancia en caso de longitudes de onda mayores.



Figura 2. Metamaterial fabricado a base de una doble composición elastomérica de silicona Zhermack elite Double 22, utilizando el método propuesto por Bintein et al. (2018).

### 3. Método experimental

A continuación, se detallan aspectos técnicos de la fabricación de los metamateriales y de su caracterización mecano-acústica.

#### 3.1 Fabricación de metamateriales

Se fabrican y estudian metamateriales basados en modelos existentes (Overvelde et al., 2012; Singamaneni & Tsukruk, 2010). En la figura 2 se muestra un ejemplo de metamaterial mecánico a base de una doble composición elastomérica de silicona marca

Zhermack, tipo Elite Double 22, fabricado utilizando la técnica propuesta en por Bintein et al. (2018).

Los especímenes fabricados y sus dimensiones principales son los esquematizados en la figura 3. En la figura se muestra (a) Material M1 de prueba, correspondiente a un bloque sólido de silicona, (b) Metamaterial M2 de iguales dimensiones que M1, pero con una distribución periódica de agujeros, (c) un segundo metamaterial, M3. El ancho de M1 y M2 es  $A=14$  mm, mientras que el ancho de M3 es  $A=19$  mm.

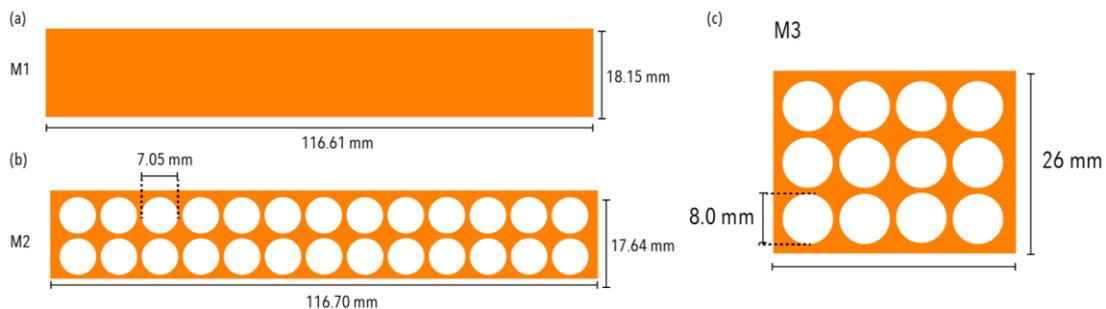


Figura 3. Materiales caracterizados en esta investigación: (a) Muestra sólida de silicona M1. (b, c) Metamateriales M2 y M3 con diferentes geometrías.

### 3.2 Caracterización mecano-acústica de los metamateriales fabricados

Para obtener la respuesta en frecuencia a excitaciones mecánicas de cada muestra, se obtiene el espectro de potencia acústica de cada una de ellas a través de la técnica de espectroscopía de resonancia acústica. El montaje experimental utilizado es el mostrado en la figura 4. Una señal de barrido sinusoidal es enviada por el analizador de espectros (Stanford System SR780) en un rango de frecuencia de 50 Hz a 1000 Hz. Este rango es escogido de manera experimental tras mediciones de prueba. La señal es amplificada por un amplificador de potencia (Gemini XGA5000) que activa un vibrador mecánico (PASCO SF 9324), el cual excita el metamaterial. Un acelerómetro (PCB 356A14) posicionado en la cara contraria a la excitación, es conectado a un acondicionador de señales (PCB 408E09) y recibe la respuesta del metamaterial, enviándola de vuelta al analizador de espectros, donde es generado el espectro de potencia acústica. El espectro es finalmente almacenado en un computador para posteriores análisis. Tanto el vibrador como el acelerómetro son acoplados a los metamateriales utilizando la misma silicona con que estos últimos son fabricados.

Para comparar la respuesta acústica de un material ordinario y un metamaterial mecánico fabricado con los mismos componentes, se llevan a cabo mediciones con condiciones de borde libre (sin deformación), en que se utiliza el montaje y método experimental anteriormente detallado, posicionando la muestra a analizar sobre el vibrador. Para

mediciones de respuesta acústica bajo deformaciones, el metamaterial es ubicado en una prensa mecánica mediante la cual se van realizando distintos niveles de compresión.

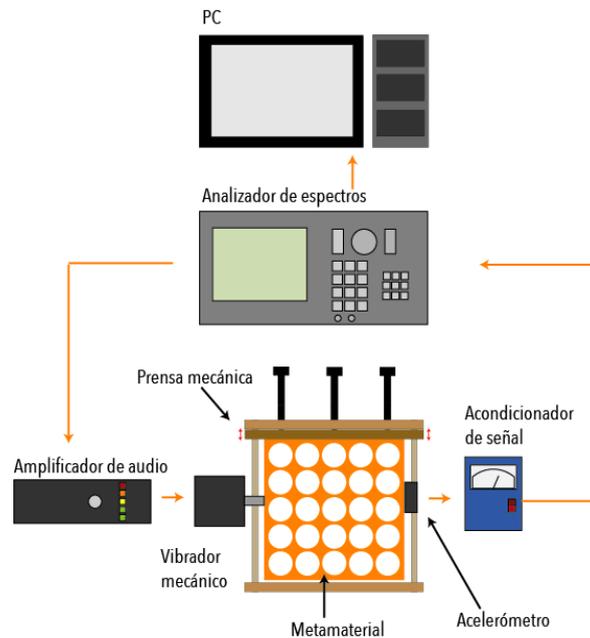


Figura 4. Configuración experimental para la caracterización de los metamateriales estudiados. Los equipos utilizados corresponden a: analizador de espectros Stanford System SR780, amplificador de potencia Gemini XGA5000, vibrador mecánico PASCO SF 9324, acelerómetro PCB 356A14, acondicionador de señales PCB 408E09, prensa mecánica y computador.

## 4. Resultados

A continuación, se presentan los detalles particulares de las mediciones realizadas y los espectros obtenidos.

### 4.1 Muestras M1 y M2: el efecto de la estructura en metamateriales

El protocolo de obtención de espectros acústicos para las muestras M1 y M2 fue el siguiente: se utilizó el montaje detallado en la sección anterior y la figura 4, sin hacer uso de la prensa mecánica, ya que no se llevaron a cabo deformaciones. El vibrador mecánico se posicionó haciendo contacto con una de las caras de área 116.70 mm x 19 mm, mientras que el acelerómetro fue acoplado en la cara opuesta.

En la figura 5 se muestran los espectros de potencia de las muestras M1 y M2 sin deformación. En el caso de la muestra M1, que no corresponde a un metamaterial, se ve un comportamiento uniforme. En el caso del metamaterial M2, de iguales dimensiones, además de existir una menor transmisión de energía, se pueden ver tres bandas de absorción en torno a los 312 Hz, 647 Hz y 990 Hz.

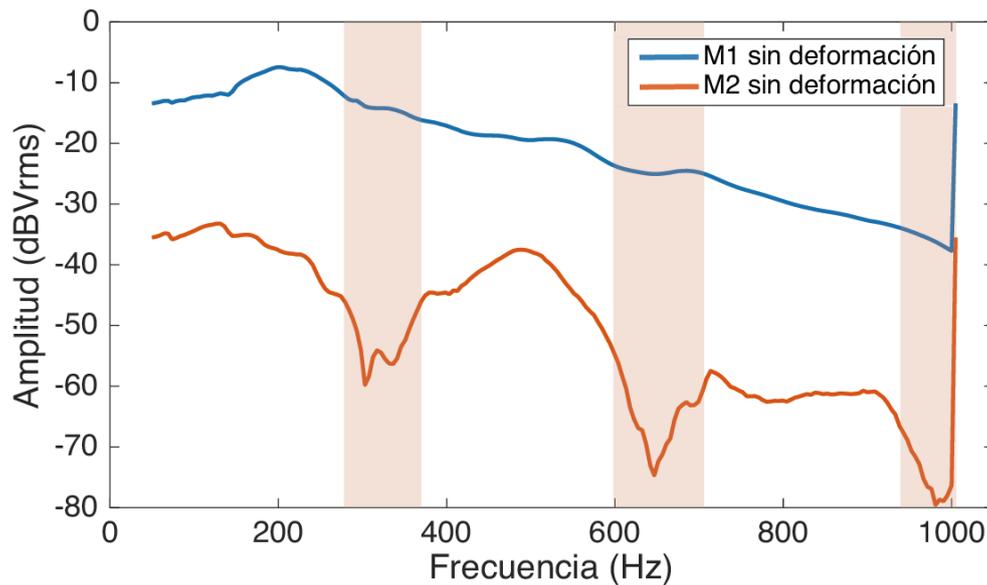


Figura 5. Espectros de potencia acústica de las muestras M1 y M2 con condiciones de borde libre. Se observa que la respuesta acústica del material M1 sin deformación no presenta bandas prohibidas, mientras que la respuesta del metamaterial M2, de igual geometría, pero con agujeros periódicos muestra tres bandas prohibidas alrededor de los 312 Hz, 647 Hz y 990 Hz.

#### 4.2 Muestra M3: comportamiento bajo deformaciones

Para obtener los espectros acústicos a diferentes grados de deformación (compresión) de la muestra M3 se llevó a cabo el siguiente protocolo: la muestra fue posicionada en la prensa mecánica, utilizando exactamente el montaje de la figura 4. Primero, se obtuvo el espectro acústico sin deformación. Luego, se adquirió tras compresiones de la muestra en un 5% y un 7%.

En la figura 6 se muestran los resultados. Sin deformación, la muestra exhibe lo que parecen ser dos bandas, alrededor de los 380 Hz y los 880 Hz. Se observa que al comprimir la muestra en un 5% aparecen dos bandas alrededor de los 560 Hz y 950 Hz. Tras la compresión en un 7%, las bandas se encuentran en torno a los 460 Hz y los 980 Hz.

### 5. Análisis y discusión

A partir de los resultados obtenidos, se observa la influencia de la estructura de los metamateriales mecánicos en la respuesta en frecuencias a las vibraciones aplicadas, originando la aparición de bandas prohibidas visibles al realizar medidas con condiciones de borde libre en las muestras M1 y M2. Se observa además que efectivamente la compresión a distintos niveles de los metamateriales mecánicos genera un corrimiento de las bandas. Entre el material M3 sin deformación y deformado al 5%, el corrimiento absoluto fue de un 32% para la primera banda, y de un 7% en la segunda. Entre el material

deformado al 5% y el material deformado al 7%, el corrimiento absoluto fue de un 18% para la primera banda y un 3% para la segunda.

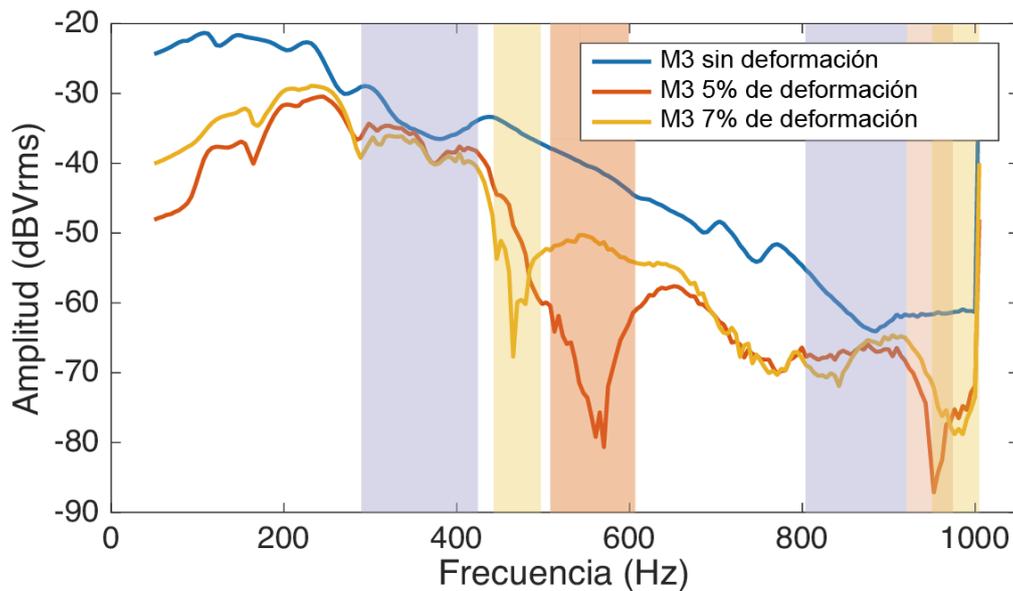


Figura 6. Espectro de potencia acústica en la muestra M3. El metamaterial exhibe lo que parecen ser dos bandas en su estado sin deformación, alrededor de los 380 Hz y 880 Hz. Se observan a 5% de deformación dos bandas prohibidas en torno a los 560 Hz y 950 Hz. Tras la compresión en un 7%, las bandas se encuentran en torno a los 460 Hz y los 980 Hz.

## 6. Nuevos materiales / Nuevas sonoridades

La pregunta obvia que se genera a partir de los resultados y análisis desarrollados es cómo estos metamateriales mecánicos podrían contribuir a la modificación o creación de instrumentos musicales. En pasos posteriores de esta investigación se propone aplicar los metamateriales mecánicos sintonizables fabricados y caracterizados en la modificación de idiófonos, instrumentos musicales en que el sonido es originado por la vibración de su cuerpo y no de cuerdas, membranas o columnas de aire (von Hornbostel & Sachs, 1914). En esta clasificación entran las cajas chinas, los cántaros y el cajón peruano, entre muchos otros. En el caso particular del cajón peruano, en su versión criolla, sus primeros dos modos normales varían entre los 200 Hz y 350 Hz (Llimpe & Moreno, 2000). ¿Qué sucede si se acopla un metamaterial mecánico como M2 a alguna de sus caras? Una hipótesis es que, a partir de una deformación/sintonización adecuada, éste tendría la capacidad de absorber las componentes vibracionales en tal banda de frecuencia que se propagan por el cuerpo del instrumento, modificando su timbre. ¿Sería este un efecto deseable? Eso dependería de la manera en que la sonoridad resultante quisiera ser usada dentro de una pieza musical. Por supuesto, la siguiente etapa de este estudio es caracterizar acústicamente el resultado timbrístico de instrumentos musicales modificados utilizando diferentes métodos de acoplamiento.

En la figura 7 se esquematizan diferentes formas de incorporar metamateriales como los estudiados en la fabricación de idiófonos. Se ejemplifica además cómo podrían aplicarse esfuerzos en distintas direcciones y con diferentes intensidades, los que se traducirían en deformaciones de los metamateriales. Lo anterior no es otra cosa que nuevas formas de interacción intérprete-instrumento.

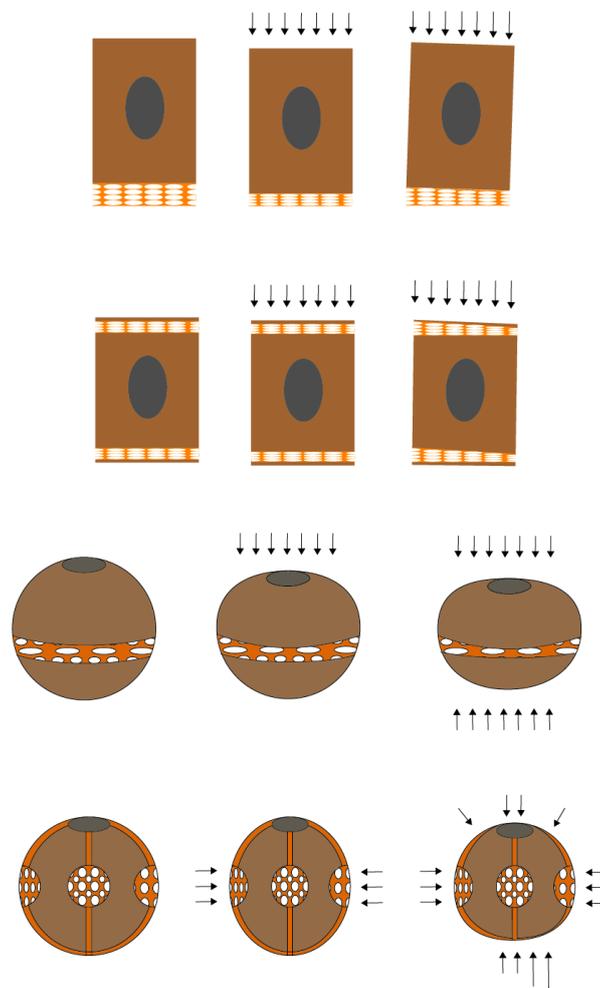


Figura 7. Ejemplos de la aplicación de metamateriales mecánicos sintonizables a idiófonos. Se proponen diferentes formas de deformar/sintonizar los metamateriales a partir de nuevas maneras de interacción intérprete/instrumento.

## 7. Reflexiones finales

En la historia del origen y evolución de los instrumentos musicales, existen numerosos ejemplos de cómo desarrollos científicos materializados en avances tecnológicos les han sido transferidos desde diversas áreas (Montagu, 2007). Las transferencias no necesariamente son directas, y necesitan de cierto grado de creatividad que permita adaptar estos avances a necesidades específicas, además de la voluntad de abrir posibilidades reales de utilización de estas tecnologías. Edmund Bowles, en su artículo

titulado “El impacto de la tecnología en instrumentos musicales” (1999), describe cómo mejoras en minería y metalurgia a fines de la Edad Media, entre ellas la fundición de metales, la aparición del martillo hidráulico y de diversas tecnologías de procesamiento, contribuyeron a expandir las propiedades sonoras de la trompeta gótica, que al carecer originalmente de una boquilla refinada producía un sonido estridente con una tesitura bastante limitada. Describe también cómo, en ciertos casos, bases culturales retrasaron la puesta en práctica de avances en la modificación de instrumentos musicales.

Que los metamateriales mecánicos estudiados logren un impacto en los instrumentos musicales requiere, en primer lugar, de su posicionamiento como una alternativa tecnológica cuyas potencialidades sean pensadas e investigadas con tal fin, y en segundo lugar, de una mentalidad abierta que permita que los cambios que devengan de su uso sean adoptados por cultores, luthiers, intérpretes y compositores.

### **Agradecimientos**

Agradecimientos especiales a Alonso Arancibia y Gabriel Cartes, estudiantes de la carrera de Ingeniería en Sonido en el Departamento de Sonido de la Facultad de Artes de la Universidad de Chile, quienes han desarrollado una de sus prácticas profesionales bajo mi supervisión y obtenido importantes resultados relacionados con esta investigación. A Claudio Falcón, Investigador Patrocinador de mi proyecto de Postdoctorado, en cuyo marco hemos realizado este trabajo, y al proyecto de Postdoctorado Fondecyt #3200239.

**Bibliografía**

- Ahrens, C., y Zedlacher, I. (1996). Technological Innovations in Nineteenth-Century Instrument Making and Their Consequences. *The Musical Quarterly*, 80 (2), pp. 332–340. <https://doi.org/10.1093/mq/80.2.332>
- Bariaux, D. (1995). Hacia los límites de la ciencia y del arte: los instrumentos musicales acústicos y electroacústicos. *Revista Musical Chilena*, 49 (184), pp. 39-46.
- Bintein, P.-B. Decoster, N., Levy, V. y Terwagne, D. (2018). Part II: Molding and casting 2D Mechanical metamaterials. [17 de junio de 2020] Recuperado de [http://fab.academany.org/2018/labs/fablalbulb/ga\\_digital\\_mechanics.html](http://fab.academany.org/2018/labs/fablalbulb/ga_digital_mechanics.html)
- Bowles, Edmund A. (1999) The Impact of Technology on Musical Instruments. Cosmos Club. [17 de junio de 2020] Recuperado de <https://web.archive.org/web/20131019103635/http://www.cosmosclub.org/web/journals/1999/bowles.html>
- Bucur, V. (2016). *Handbook of Materials for String Musical Instruments*. Suiza: Springer.
- Byrne, D. (2017). *How Music Works*. Estados Unidos: McSweeney's.
- Craster, R.V. y Guenneau, S. (2013) *Acoustic Metamaterials*. New York, Estados Unidos: Springer.
- Deymier, P. A. (2013). *Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals*. Berlín, Alemania: Springer.
- Fletcher, N.H. y Rossing, T.D. (1998). *The physics of musical instruments*. New York, Estados Unidos: Springer.
- Kramer, J. D. (1988). *The Time of Music: New Meanings, New Temporalities, New Listening Strategies*. Estados Unidos: MacMillan Publishing Company.
- Llimpe, C. y Moreno J. (2000). Estudio preliminar teórico-experimental de las características acústicas del cajón peruano. En *Proceedings Acústica 2000*. Madrid.
- Montagu, J. (2007). *Origins and Development of Musical Instruments*. Estados Unidos: Scarecrow Press.
- Muamer, K., Graeme, W. M., Martin V. H., y Martin W. (2019). 3D metamaterials. *Nature Reviews Physics*, 1, pp. 198–210.
- Overvelde, J. T. B., Shan, S., y Bertoldi, K. (2012). Compaction through buckling in 2D periodic, soft and porous structures: effect of pore shape. *Advanced Materials*, 24(17), pp. 2337–2342.
- Pinch, T., y Trocco, F. (2009). *Analog Days*. Estados Unidos: Harvard University Press.
- Singamaneni, S., y Tsukruk, V. V. (2010). Buckling instabilities in periodic composite polymeric materials. *Soft Matter* 6 (22), p. 5681.
- von Hornbostel, E. M., y Sachs, C. (1914). Systematik der Musikinstrumente: ein Versuch. *Zeitschrift für Ethnologie*, 46, pp. 553-590.