DOI 10.20504/opus2025.31.30

Guitarra impresa en 3D: entre luthería tradicional y fabricación digital

Carolina **Espinoza**
https://orcid.org/0000-0003-4046-0944
(Universidad de Chile, Facultad de Artes/ Departamento de Sonido, Santiago, Chile)

Claudio **Adasme**
https://orcid.org/0000-0002-6859-0225
(Universidad de Chile, Facultad de Artes/ Departamento de Sonido, Santiago, Chile)

Aarón **Montoya**
https://orcid.org/0000-0001-9901-8224
(Universidad Diego Portales, UDP/ Escuela de Diseño, Santiago, Chile)

José **Baeza**
https://orcid.org/0009-0005-1903-6876
(Instituto Profesional Duoc UC/ Escuela de Diseño, Santiago, Chile)

Resumen: Se presentan los primeros resultados de una investigación sobre el diseño y fabricación de una guitarra impresa en 3D. En particular, se introduce y analiza un modelo modular optimizado para su producción en impresoras de escritorio de tamaño estándar. El objetivo es visibilizar el modelo, reflexionando sobre el proceso de diseño digital y las técnicas de fabricación aditiva, enfatizando sus intersecciones y diferencias clave con la luthería tradicional. Para ello, esta investigación se sitúa en el contexto actual, exponiendo el estado del arte sobre la aplicación de la fabricación digital en la construcción de guitarras. Luego, se detallan las decisiones de diseño, materiales y fabricación que guiaron el desarrollo del modelo, entre ellas la modularidad y dimensiones. Se exponen las principales virtudes y falencias del modelo, y se proponen cambios a implementar en una segunda versión. Finalmente, se presentan reflexiones sobre futuras exploraciones y los impactos esperados en la luthería local y en investigaciones relacionadas con la respuesta vibroacústica de instrumentos de cuerda. Es importante enfatizar que este trabajo se centra en los aspectos estructurales del modelo, los cuales deben optimizarse antes de abordar el estudio del timbre del instrumento. No se incluye un análisis vibroacústico de la guitarra, el que es parte de trabajos en desarrollo.

Palabras clave: guitarra impresa en 3D. fabricación aditiva. diseño modular. luthería postdigital.

3D-Printed Guitar: Intersections between Traditional Lutherie and Digital Fabrication

Abstract: This article presents initial results from a research project on the design and fabrication of a 3D-printed guitar. Specifically, it introduces and analyzes a modular model optimized for production with standard desktop printers. The objective is to make the model known while reflecting on the digital design process and additive manufacturing techniques, emphasizing their key intersections and differences with traditional lutherie. To this end, the study situates itself in the current context by outlining the state of the art in the application of digital fabrication to guitar construction. It then details the design, materials, and manufacturing decisions that guided the development of the model, including modularity and dimensions. The article identifies the main strengths and weaknesses of the model and proposes changes to be implemented in a second version. Finally, it reflects on future explorations and the anticipated impacts on local lutherie and on research into the vibroacoustic response of string instruments. It should be noted that this work focuses on the structural aspects of the model, which must be optimized before addressing the instrument's timbral qualities. A vibroacoustic analysis of the guitar is not included here, as it forms part of ongoing research.

Keywords: 3D-printed guitar. additive manufacturing. modular design. postdigital lutherie.

ESPINOZA, Carolina; ADASME, Claudio; MONTOYA, Aarón; BAEZA, José. Guitarra impresa en 3D: cruces entre luthería tradicional y fabricación digital. *Opus* (Assoc. Nac. Pesqui. Pós-Grad. Música), Vitória, v. 31, e253130, p. 1-22, 2025. http://dx.doi.org/10.20504/opus2025.31.30
Recebido em 28/2/2025, aprovado em 5/8/2025, publicado em 24/11/2025

Las problemáticas globales como el cambio climático, la sobreexplotación de recursos naturales y las consecuentes regulaciones medioambientales han dificultado cada vez más el acceso a maderas tradicionalmente utilizadas en la fabricación de instrumentos musicales como la guitarra acústica. Tanto los fabricantes artesanales como la industria enfrentan el desafío de replantear sus diseños, explorar nuevos materiales y reducir su impacto ambiental, adaptando sus técnicas ante la creciente escasez de maderas con propiedades acústicas, mecánicas y estéticas específicas (Gibson, 2019). Un ejemplo pionero de adaptación se remonta a 1965, cuando la compañía C.F. Martin lanzó el modelo D-35 ante la inminente escasez del palorrosa de Brasil. Esta guitarra acústica introdujo un fondo de palorrosa de tres piezas en lugar de dos, permitiendo el aprovechamiento de cortes más pequeños de madera con nudos u otros defectos (Gibson; Warren, 2016). Este caso ilustra cómo la innovación en el uso de materiales puede surgir como respuesta a la disponibilidad de recursos, balanceando tradición y sostenibilidad en la fabricación de instrumentos.

Por otra parte, la variabilidad intrínseca de la madera impone un desafío extra en la construcción consistente de guitarras. Un estudio clave sobre la variación de las propiedades de maderas utilizadas para placas armónicas de guitarras y violines es presentado por Viala (Viala; Placet; Cogan, 2020), cuyos resultados serán analizados en secciones posteriores. En su trabajo se concluye que para maderas de un mismo tipo (Abeto Europeo) se observan variaciones en densidad de un 25%, mientras las constantes elásticas varían en más de un 100%. Debido a esta variabilidad, incluso si dos guitarras son fabricadas por el mismo luthier, con idéntica técnica y geometría, utilizando madera del mismo árbol, los timbres resultantes pueden diferir significativamente (Gonzalez *et al*., 2022, p. 1). La combinación de escasez y variabilidad no sólo dificulta la construcción reproducible de instrumentos, sino que también impacta directamente su estudio vibroacústico. Lo anterior, dada la imposibilidad de afirmar que en dos guitarras prácticamente idénticas sólo se ha modificado una variable aislada con miras a su caracterización. Esto decanta en investigaciones centradas en elementos particulares de instrumentos como la guitarra, aislados entre sí. Lo anterior se refleja en resultados que rara vez cristalizan en instrumentos funcionales, donde los efectos de la aplicación de los conocimientos desarrollados puedan medirse a través de cambios tímbricos de un instrumento real.

En este contexto, esta investigación propone la fabricación de una guitarra impresa en 3D, funcional, mediante la cual sea posible abordar dos desafíos: (1) el desarrollo y caracterización de materiales alternativos para la construcción sostenible de guitarras, y (2) la generación de modelos de producción rápida con características reproducibles, adecuados para estudios acústicos y vibracionales. Estos modelos permiten tanto analizar la respuesta acústica de piezas aisladas, como también caracterizar experimentalmente el sonido de los instrumentos modificados. Para ello, se explora el diseño y fabricación de guitarras mediante modelamiento por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés), una de las tecnologías más comunes de impresión 3D y que funciona extruyendo un filamento termoplástico capa por capa, que será detallada más adelante. Este proceso de exploración plantea múltiples desafíos, que abarcan desde la implementación técnica hasta la reflexión sobre las implicancias de esta nueva aproximación al diseño y fabricación de instrumentos musicales, donde el diálogo entre la fabricación digital y tradicional resulta fundamental.

1. Sostenibilidad, reproducibilidad y caracterización: desafíos de la luthería y la acústica musical actual

En función de enfrentar los cambios en la disponibilidad de maderas, como también de proponer estrategias para realzar atributos sonoros particulares de determinados cordófonos, en las últimas décadas se han explorado nuevos materiales para la construcción de instrumentos de cuerda, incorporando maderas alternativas a las tradicionales (Bennett, 2016), pero también materiales sintéticos como laminados a alta presión (Phillips; Lessard, 2012), kevlar (Çiçekçioğlu; Alaskan, 2024. Cuzzucoli; Garrone, 2020, p. 202–207), entre otros compuestos (Bucur, 2016, p. 845–873. Damodaran; Lessard; Suresh Babu, 2015. Duerinck *et al*., 2018. Phillips; Lessard, 2012). En particular, los materiales sintéticos aportan tanto en la búsqueda de opciones para una luthería sostenible, como también a enfrentar la variabilidad intrínseca de la madera.

Como se ha mencionado, además de la escasez, la variabilidad de la madera representa un reto adicional para la fabricación consistente de guitarras. Viala *et al*. (2020) estudiaron las propiedades físicas (densidad) y mecánicas (elasticidad y amortiguación) del abeto europeo (*Picea abies*), material ampliamente utilizado en la construcción de tapas armónicas de guitarras y violines. A través de métodos acústicos no invasivos, analizaron cortes con distintos niveles de calidad y encontraron variaciones del módulo de elasticidad longitudinal E_L entre 8.7 GPa y 17.6 GPa, con densidades $\boldsymbol{\rho}$ entre 0.4 g/cm³ y 0.5 g/cm³. Es decir, una variación superior al 100% en el módulo de elasticidad para una diferencia del 25% en la densidad. En la práctica, estas fluctuaciones afectan directamente la fabricación de instrumentos, ya que modifican la respuesta vibracional y dificultan la obtención de un comportamiento acústico reproducible.

La combinación de escasez y variabilidad genera un panorama desafiante no sólo para la fabricación reproducible de guitarras, sino también para su estudio desde una perspectiva acústica y vibracional. Diferentes investigaciones han intentado reconocer los parámetros más influyentes en la respuesta vibroacústica de guitarras, identificando a la placa armónica como un elemento fundamental en el timbre del instrumento. Vía método de elementos finitos[1] (FEM) y aplicando validaciones experimentales, se ha estudiado la influencia de la variabilidad natural de la madera y de cambios climáticos en la respuesta vibratoria de placas armónicas de guitarras españolas, evidenciando que las constantes elásticas de la madera E_L, E_R y G_{LR} son las más influyentes en la dinámica de la tapa, seguidas por la influencia de los cambios en la humedad relativa, la densidad de la madera y del varetaje (Viala *et al*., 2021). Por otra parte, se ha mostrado numéricamente que la influencia de la variabilidad material y climática tendrían un menor impacto en el comportamiento dinámico de placas armónicas que los patrones del varetaje (Viala; Placet; Cogan, 2021). Siguiendo esta línea, se ha propuesto un método numérico y experimental que permite emparejar el comportamiento acústico de placas armónicas de guitarra construidas con materiales ligeramente diferentes, a partir de la optimización del sistema de barras (Brauchler *et al*., 2023). Por otro lado, a través de estudios experimentales se ha identificado la influencia de las condiciones de contorno en la respuesta vibratoria de placas armónicas. Lo anterior, a través de estudios sistemáticos de los cambios en la respuesta vibracional de la placa en diferentes etapas de la construcción del instrumento (Elejabarrieta; Ezcurra; Santamarıá, 2000. Stanciu *et al*., 2022).

[1] Para más detalles visitar https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method.

Un estudio reciente, en que resultados numéricos obtenidos a partir del método de elementos finitos (FEM) alimentaron algoritmos de síntesis sonora, ha permitido escuchar la respuesta acústica de guitarras *archtop* simuladas que difieren en las propiedades físicas y mecánicas de sus placas armónicas: densidad, espesor y rigidez (Gonzalez *et al.*, 2024). Los resultados apuntan a la posibilidad de compensar los efectos de las propiedades intrínsecas del material utilizado en la construcción de la placa armónica a partir del control de su espesor.

Como puede observarse de la literatura revisada, la complejidad acústica de la guitarra ha llevado a que muchas investigaciones recurran a modelos simplificados, varios de ellos centrados en el estudio de la tapa armónica de manera desacoplada del resto del instrumento. Dependiendo del enfoque, estos análisis pueden ser experimentales o puramente numéricos. Esta estrategia responde a la dificultad de tratar la influencia de la heterogeneidad de la madera en la respuesta vibroacústica de guitarras en términos científicos: la imposibilidad de aislar variables individuales de manera experimental obliga a recurrir a simplificaciones extremas para aproximarse a un control adecuado. Lo anterior significa que en muchos casos jamás escuchamos, salvo gracias a sonidos sintetizados, la influencia sonora de aplicación de los conocimientos desarrollados en la fabricación de instrumentos. En ese sentido, cabe cuestionarnos cuán significativos se vuelven estos resultados con relación a la luthería artesanal y si efectivamente se transforman en aportes que apunten al desarrollo de la práctica.

2. Técnicas de fabricación digital y aplicación en guitarras

Ante los desafíos anteriormente mencionados, las técnicas de fabricación digital han emergido como una alternativa para el diseño y producción de instrumentos musicales funcionales, ofreciendo nuevas posibilidades tanto en términos de materiales como de control sobre las propiedades estructurales y acústicas. Existen dos grandes tipos de procesos de manufactura digital: la fabricación sustractiva y la fabricación aditiva. La primera consiste en la eliminación de material (metal, madera, polímeros, etc.), mediante tecnologías como el desbaste, corte láser, corte vía *router* CNC[2], corte por chorro de agua, entre otros. En general las técnicas tradicionales de fabricación de instrumentos musicales se basan en técnicas manuales sustractivas (uso de gubias, sierras, cepillos), y han ido implementando poco a poco el uso de técnicas digitales como el corte *router* CNC. Por otro lado, las técnicas aditivas se basan en la fusión de material polimérico utilizando tecnologías de modelado por deposición fundida (FDM), mediante las cuales los cuerpos se van construyendo capa por capa. Este tipo de fabricación permite crear estructuras internas y externas complejas, difíciles o imposibles de desarrollar mediante técnicas sustractivas. Ambos procesos de manufactura presentan pros y contras, principalmente relacionados con el acabado superficial, la optimización de material, tiempos de fabricación y tamaños de trabajo permitidos (Fabricación aditiva frente a sustractiva, 2022).

Un estudio interesante en torno a la aplicación de tecnologías digitales en la fabricación de instrumentos es expuesto por Amit Zoran (Zoran, 2011), quien presenta un prototipo de flauta de concierto modular impresa en 3D. En el artículo, se reflexiona en torno a las posibilidades de diseño que abre la fabricación aditiva, exponiendo una propuesta conceptual de trompeta cuya fabricación sería imposible vía técnicas tradicionales, pero que mediante impresión 3D se vuelve absolutamente viable.

[2] Para más detalles, visitar https://wiki.ead.pucv.cl/CNC_Router.

Otra mirada interesante, ligada a la inclusión de las tecnologías de fabricación digital en la generación de instrumentos en diferentes nichos comerciales, es dada por Simian (Simian, 2023). En su artículo plantea que actualmente la producción de instrumentos musicales se divide entre la luthería artesanal y la fabricación industrial masiva, dejando un espacio intermedio sin explotar, donde las tecnologías digitales, en particular la producción por fabricación aditiva, podrían posicionarse.

Algunos ejemplos de investigaciones en torno a la aplicación de fabricación digital en la construcción de instrumentos musicales corresponden a la fabricación y evaluación cualitativa y cuantitativa de boquillas impresas mediante técnicas aditivas para instrumentos de viento en reemplazo de las tradicionales de bronce (Bacciaglia; Ceruti; Liverani, 2019; 2021). Por otro lado, a partir de manufactura aditiva, se han construido y caracterizado acústicamente flautas de titanio (Kolomiets *et al*., 2021). Un caso interesante de reconstrucción de un instrumento histórico, la corneta renacentista, es presentado por Savan y Simian (Savan; Simian, 2014), quienes además reflexionan sobre las posibilidades que abre esta técnica en el estudio y restauración de instrumentos patrimoniales. En el caso de instrumentos de cuerda, destaca el desarrollo del Modular F-F-Fiddle (Modular Fiddle • OpenFab PDX, [*s. d.*]), el Hovalin V5 (Hovas, [*s. d.*]), y ukeleles impresos en 3D (Qian *et al*., 2019. Riefer; Tai; Wang, 2022).

En el caso de aplicaciones específicamente desarrolladas para la guitarra, destacan trabajos en que se ha explorado la mecanización vía corte *router* CNC de placas armónicas. Se ha probado numérica y experimentalmente que es posible modificar la densidad $\boldsymbol{\rho}$ y los módulos elásticos E_L y E_R en placas de madera utilizadas para la fabricación de instrumentos a partir de patrones periódicos de agujeros. Estos patrones son definidos a partir de una celda unidad con diferentes propiedades geométricas, que determinan el comportamiento de la placa completa (Espinoza *et al*., 2022. Gonzalez *et al*., 2022). En la Fig. 1 se muestra un diagrama de Ashby donde se presentan las constantes elásticas E_L y E_R de diferentes maderas en función de la densidad $\boldsymbol{\rho}$ (elipse rosa y naranja, respectivamente). Los puntos rojos corresponden a las propiedades de una placa de madera de Abeto Engelmann, madera tradicionalmente utilizada en la fabricación de placas armónicas de guitarras. Los paralelepípedos azul y verde indican respectivamente las variaciones de E_L y E_R efectivos posibles al aplicar la técnica de agujeros periódicos. Estos resultados sugieren que, de querer utilizar un material alternativo, se debería elegir una madera de alta densidad y módulos elásticos. Dado lo anterior, al remover material para reducir la densidad efectiva no se comprometería la elasticidad efectiva necesaria para la construcción de instrumentos funcionales. Si bien estos resultados fueron probados experimentalmente en placas rectangulares, aún no se hay evidencia de su aplicación y utilidad en la construcción de guitarras u otro tipo de instrumento musical.

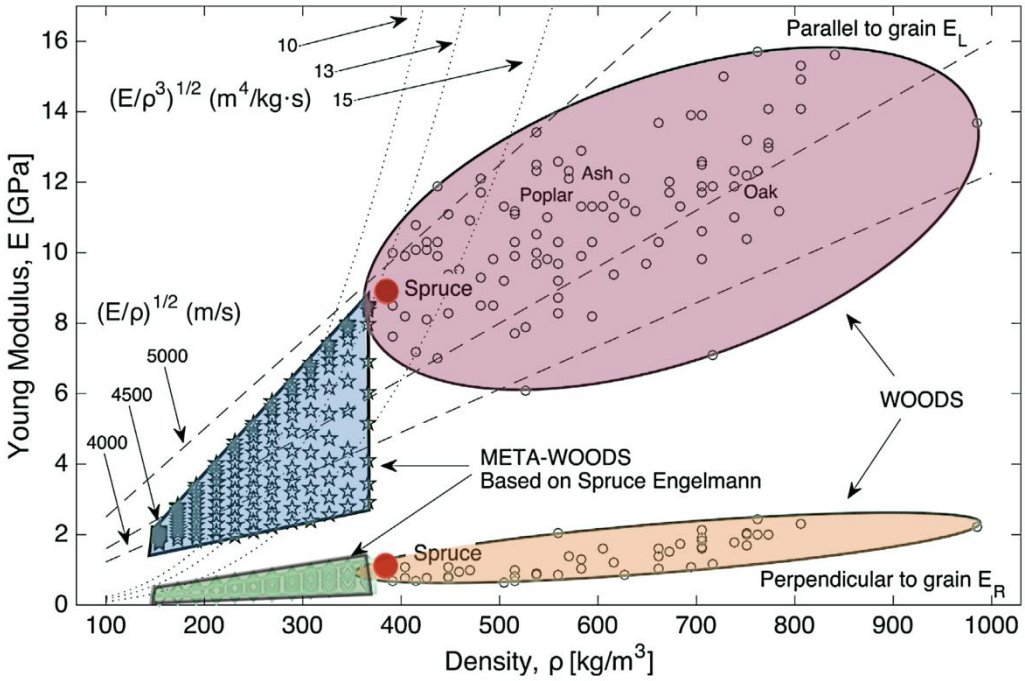

Fig. 1: Diagrama de Ashby. Los paralelepípedos indican las propiedades posibles al mecanizar placas de Abeto Engelmann con elipses de diferentes características. Adaptado de Gonzalez *et al*. (2022).

Maderas modificadas con la técnica descrita anteriormente fueron aplicadas en simulaciones numéricas de placas armónicas de guitarra (Lercari *et al*., 2022). En tal caso no se realizaron agujeros, sino perforaciones con una profundidad menor al espesor de las placas originales. En la Fig. 2 (a) se muestra el diseño de las placas modificadas con patrones de elipses en el lóbulo inferior. La Fig. 2 (b) exhibe el modelo de la guitarra diseñada en el software Fusion 360[3]. En (c-d) se muestra el nivel de presión sonora de la tapa al simular su medición a 1 m de distancia y las diferencias entre las placas mecanizadas y la original (sin mecanizar). Finalmente en (e) se muestra la distribución de esfuerzos de von Misses al simular la tensión de las cuerdas aplicada en el puente de cada tapa. Los resultados de esta investigación muestran que existen variaciones en el comportamiento mecano-acústico de la guitarra, pero no son concluyentes en cuanto a la integridad estructural y propiedades sonoras atribuidas a estas modificaciones, evidenciando la necesidad de estudios experimentales que profundicen en estos hallazgos.

[3] Para más detalles, visitar https://www.autodesk.com/mx/products/fusion-360.

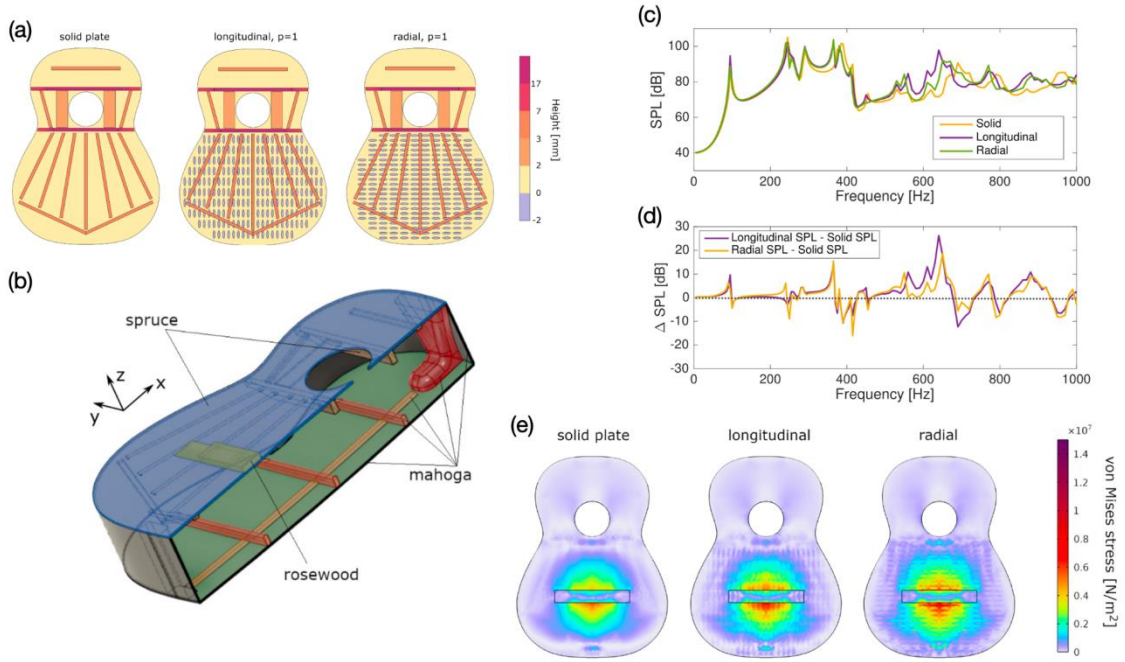

Fig. 2: (a-b) Modelos digitales de placas modificadas y caja de resonancia. (c-d) Resultados numéricos de los cambios en los niveles de presión sonora de las placas mecanizadas y sin mecanizar. (e) Distribución de esfuerzos simulada. Adaptado de Lercari *et al.* (2022).

Respecto al uso de técnicas aditivas como la impresión 3D, se han desarrollado investigaciones en torno a la influencia de la dirección de impresión en la respuesta vibratoria de placas armónicas de guitarras acústicas (Burgos-Pintos *et al.*, 2023; 2024). En particular, en ambos trabajos se ha concluido que direcciones de impresión en dirección paralela a las cuerdas favorece el movimiento en toda la superficie de la tapa, similar a la transmisión de vibraciones en la madera natural.

Los artículos anteriormente exhibidos sobre aplicaciones de técnicas digitales en guitarras refuerzan la necesidad de apuntar a la fabricación de instrumentos funcionales que permitan estudiar los cambios tímbricos producidos por ellas.

3. Modelado digital de una guitarra modular

En el contexto presentado anteriormente, se decide diseñar y fabricar una guitarra acústica que apunta a avanzar en dos objetivos: (1) el desarrollo y caracterización de materiales alternativos, como PLA[4] (Ácido poliláctico, bioplástico) y PLA+ (PLA con agregados para mejorar sus propiedades mecánicas), para la construcción sostenible de guitarras utilizando técnicas digitales de fabricación, y (2) la generación de modelos de guitarras de producción rápida con características reproducibles, adecuados para estudios acústicos y vibracionales. La propuesta de diseño de la guitarra impresa en 3D debía cumplir con la restricción de ser fabricable utilizando una impresora 3D de escritorio, con un volumen de impresión estándar de 220 mm × 220 mm × 220 mm. Esto impuso limitaciones en la segmentación de

[4] Para más detalles, visitar https://es.wikipedia.org/wiki/Ácido_poliláctico.

las piezas, la orientación de impresión y la elección de materiales, con el fin de asegurar que cada componente pudiera ser manufacturado sin comprometer su integridad estructural. Además, se estableció como objetivo que esta primera versión pudiera ser completamente ensamblable, minimizando el uso de adhesivos y facilitando su reproducción por parte de personas sin mayor experiencia en fabricación de instrumentos. Lo anterior implicó el desarrollo de un diseño modular que permitiera ensamblar las diferentes secciones sin afectar la estabilidad estructural del instrumento. Finalmente, el modelo debía ser funcional en términos musicales, permitiendo su afinación en la configuración estándar de una guitarra (Mi - La - Re - Sol - Si - Mi). En la Fig. 3 se observa una vista exterior de la guitarra modelada.

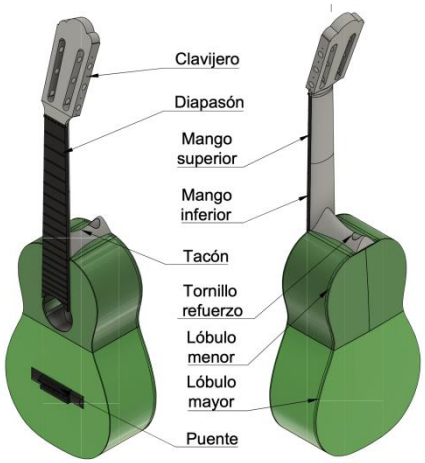

Fig. 3: Vista exterior de la guitarra modelada con los nombres de sus partes principales. El modelo a diseñar debía cumplir con diversos requisitos: (1) ser fabricable en impresoras de tamaño estándar, (2) ser ensamblable con el uso de la menor cantidad de adhesivos, (3) ser funcional en términos musicales.

En cuanto a la escala del instrumento, se eligió un largo vibrante de 480 mm, correspondiente a una guitarra de escala 1/4. Este tipo de guitarra está diseñada para niños y niñas de entre 5 y 8 años, lo que la convierte en una opción adecuada para la enseñanza musical temprana. La elección de esta escala también respondió a las restricciones de fabricación anteriormente mencionadas, optimizando el diseño para su impresión en una impresora 3D de escritorio, sin comprometer la ergonomía ni la funcionalidad del instrumento.

Para definir la forma del cuerpo, se tomó como referencia una guitarra modelo Torres de 1886 (Courtnall, 2007), caracterizada por su diseño clásico y equilibrio acústico. Se buscó que el lóbulo mayor del cuerpo pudiera imprimirse íntegramente dentro del volumen de trabajo de una impresora estándar. A partir de esta restricción y del largo vibrante de 480 mm, se mantuvieron las proporciones generales de la guitarra. En la Fig. 4 se muestran detalles de las dimensiones del instrumento diseñado.

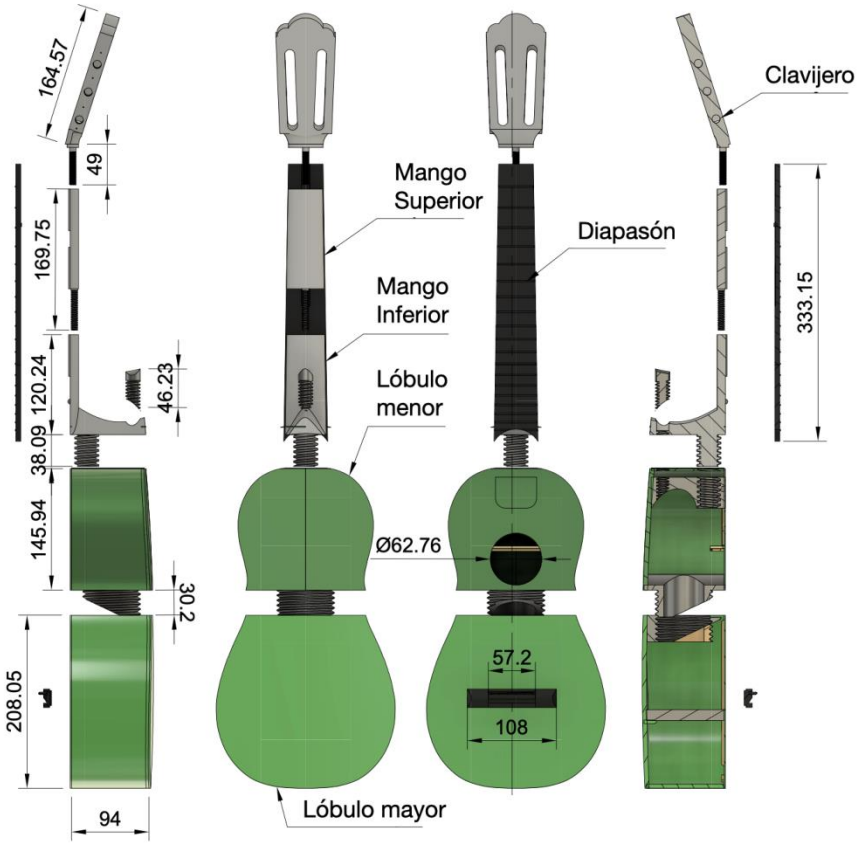

Fig. 4: Principales dimensiones del instrumento diseñado. Se observan las uniones en rosca entre los diferentes módulos.

Es importante notar que en este modelo se privilegia la movilidad del lóbulo mayor por sobre el lóbulo menor, que se ha demostrado menos influyente en la radiación acústica del instrumento (Lercari *et al*., 2022). Esta decisión se tomó inspirada en la fabricación tradicional de algunos cordófonos latinoamericanos como el charangón con golpeador, instrumento de dimensiones similares al propuesto, en que el lóbulo superior es prácticamente rígido al ser cubierto con una madera más rígida y densa que la utilizada en la placa, y con espesores de hasta tres veces el espesor de la placa armónica.

Para los ensambles, se utilizaron principalmente uniones roscadas. Lo anterior, con el objetivo de minimizar el uso de adhesivos, en particular cianoacrilato, que suele emplearse en la unión de componentes impresos en 3D. Se esperaba que este enfoque permitiera una mayor precisión en el ensamblaje y facilitara el mantenimiento y modificación del instrumento (ver Fig. 4). Estas uniones se implementaron en los siguientes puntos clave: (a) entre el lóbulo mayor y el lóbulo menor, (b) entre el lóbulo menor y el mango inferior, (c) entre el mango inferior y el mango superior y (d) entre el mango superior y el clavijero. El uso de roscas en estos puntos asegura un ensamblaje firme y estable, permitiendo además el desmontaje y reensamblaje del instrumento si fuese necesario. Como veremos más adelante, la unión que trajo mayor disenso entre quienes tuvieron acceso a este modelo correspondió a la unión entre lóbulos. Lo anterior, por generar una cavidad de aire que podría afectar el sonido del instrumento.

Finalmente, algunas piezas requerían ser fijadas de manera permanente para garantizar la estabilidad y funcionalidad del instrumento. Estas incluían: (a) el puente, (b) la cejuela, (c) el diapasón. Para estas piezas, se diseñaron guías de encastre para asegurar su correcta alineación durante el ensamblaje. El objetivo de estas guías fue facilitar la precisión en la ubicación de componentes críticos para la afinación y la acción de las cuerdas, minimizando la posibilidad de errores en el montaje.

4. Elección del material y de parámetros de impresión

Se decidió utilizar PLA+ para la fabricación del instrumento. Se caracterizaron la densidad y las constantes elásticas asociadas a probetas fabricadas siguiendo dos patrones de impresión. Lo anterior es recomendable antes de comenzar cualquier exploración con FDM, pues, aunque existen valores tabulados de estos parámetros, éstos dependen del filamento utilizado (marca, aditivos, entre otros) y de las condiciones ambientales en que éste ha sido almacenado (humedad). La medición de módulos elásticos se realizó utilizando ensayos de tracción en piezas fabricadas inmediatamente después de sacar el filamento de sus embalajes originales. Los patrones de impresión correspondieron a rellenos al 100% de: (a) fibras longitudinales "L" (en dirección a la tracción) y (b) fibras transversales "T" (perpendiculares a la tracción). Los ensayos de tracción se realizaron utilizando la norma ASTM D638[5], con probetas Tipo IV. El equipamiento utilizado correspondió a una máquina Instron[6], y los ensayos se realizaron a 50 mm/s. Se obtuvo una densidad ρ = (1039 +/- 214) kg/m^3 y módulos elásticos E_L = (2.05 +/- 0.03) GPa, E_T = (1.83 +/- 0.04) GPa. Estas mediciones resultaron fundamentales para determinar el espesor de la placa armónica, con el fin de compensar mediante su grosor la baja elasticidad longitudinal comparada con la elasticidad de maderas típicas como el Abeto Engelmann (entre 9 GPa y 15 GPa). Lo anterior, que corresponde a una técnica tradicional utilizada por las y los luthieres para compensar la variabilidad de la madera, está dentro de los resultados numéricos mencionados con anterioridad (Gonzalez *et al*., 2023).

Respecto a los parámetros de impresión, el diámetro estándar de una boquilla de impresora (0.4 mm) impuso restricciones críticas en el diseño de piezas. Para garantizar la precisión dimensional y la integridad estructural, se definieron espesores de pared y componentes como múltiplos enteros de este valor (0.4 mm, 0.8 mm, 1.2 mm, etc.). Esta estrategia minimiza irregularidades en la extrusión del filamento, reduce defectos superficiales y asegura una distribución homogénea del material. Por ejemplo, en elementos como el mango y la tapa armónica, los espesores se ajustaron a 1.6 mm (4×0.4 mm), balanceando rigidez y peso sin comprometer la capacidad de impresión.

Para la orientación de las fibras impresas, se optó por seguir las direcciones de las fibras en las maderas utilizadas en la construcción tradicional de instrumentos musicales. Por ejemplo, la dirección principal de la deposición de material de la tapa armónica en el presente estudio se orienta de manera longitudinal y paralela al eje mayor de la guitarra (Ver Fig. 5). Esto entra en resonancia con resultados experimentales mencionados anteriormente (Burgos-Pintos *et al*., 2023; 2024). Por otra parte, la dirección de impresión de las piezas críticas se alineó con los ejes de carga predominantes para maximizar su resistencia. En el caso del mástil se priorizó la orientación longitudinal respecto a la

[5] Para más detalles, visitar https://store.astm.org/d0638-14.html.

[6] Para más detalles, visitar https://www.instron.com/es/.

impresora (eje Y de la impresora), paralela a la tensión ejercida por las cuerdas. Esta disposición aprovecha la anisotropía inherente de los materiales termoplásticos, donde la resistencia a la tracción es mayor en la dirección de las fibras extruidas.

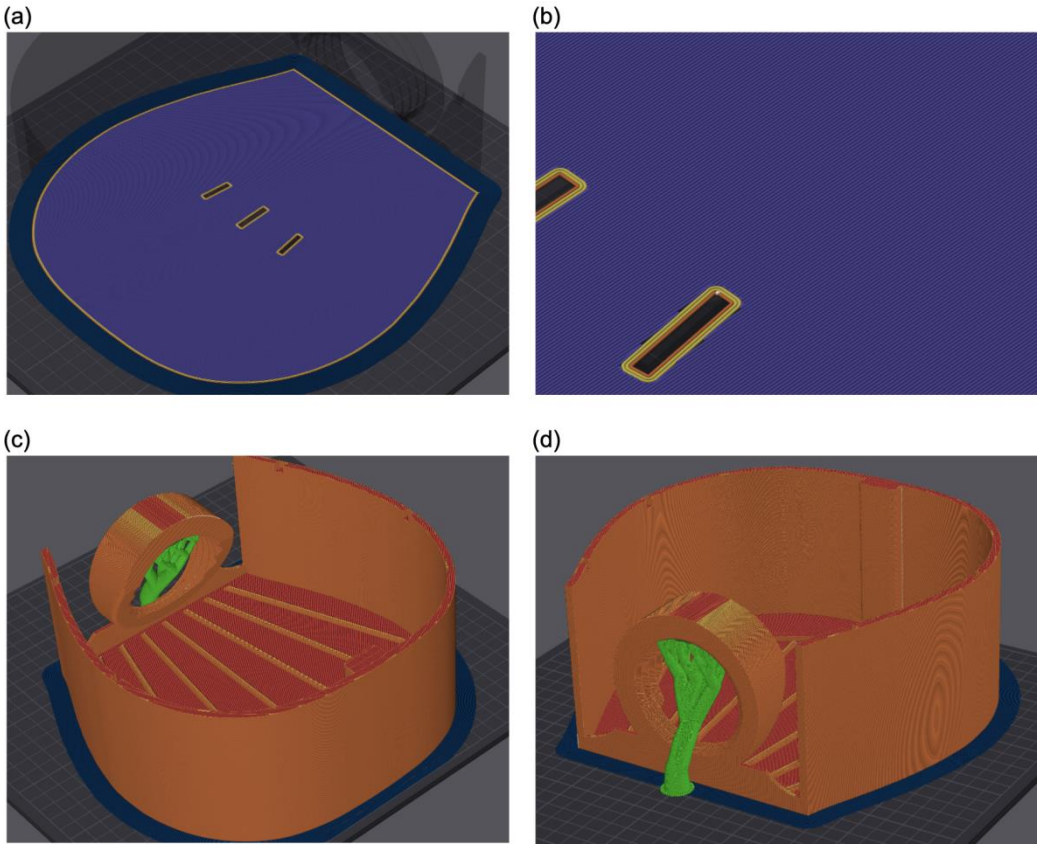

Fig. 5: Orientación de la dirección de impresión y soportes. (a) La dirección de impresión de fibras en la placa armónica se orienta paralela al eje mayor del instrumento. (b) Vista en detalle. (c-d) En verde, soportes orgánicos para optimizar material, tiempo de impresión y evitar soportes adheridos a la placa armónica.

Otro aspecto importante de los cuidados de impresión fue la orientación de las piezas. Ésta se optimizó para reducir la dependencia de estructuras de soporte, las cuales incrementan el consumo de material y tiempo de post procesamiento. Se estableció un ángulo máximo de voladizo de 50°, determinado mediante pruebas iterativas que evaluaron la adherencia entre capas y la estabilidad geométrica. En componentes como el cuerpo y el clavijero, esta limitación angular permitió imprimir superficies inclinadas sin deformaciones significativas. No obstante, en elementos con geometrías complejas, como roscas internas cuyo eje coincide con la dirección de impresión, se implementaron soportes de tipo orgánico[7]. Estos soportes, generados mediante algoritmos de malla adaptativa, optimizan la distribución del material de soporte, facilitan su remoción y preservan la precisión de las características roscadas.

[7] Para más detalles, visitar https://wiki.bambulab.com/en/software/bambu-studio/support.

Finalmente, en cuanto a la funcionalidad de las roscas de ensamble, se aseguró que los hilos roscados tuvieran un ancho mínimo de 0.4 mm, correspondiente al diámetro estándar de la boquilla de la impresora. Además, para garantizar un ajuste adecuado y evitar fricciones excesivas o juegos indeseados, se aplicaron tolerancias de holgura en un rango de 0.25 mm a 0.4 mm, tanto en las roscas internas como en las uniones por encastre.

5. Fabricación y ensamble del instrumento

Los tiempos de fabricación varían de impresora a impresora. En esta investigación se utilizaron impresoras de las marcas Creality[8] (Ender 3V3 KE) y Bambu Lab[9] (A1, A1 Mini y X1 Carbon Combo), con tiempos de impresión totales que variaron entre 40 y 50 horas. En la Fig. 6 se muestra parte del proceso de impresión utilizando una impresora Bambu Lab A1, mientras que en la Fig. 7 se muestran resultados finales de piezas impresas. Una vez obtenidas las piezas, fue necesario limpiar cada una de ellas para eliminar soportes. El proceso de limpieza es particularmente importante en el caso de las uniones roscadas, ya que los excesos de filamento pueden impedir el correcto ensamblaje. En la Fig. 8 se muestran registros de una sesión de ensamble de guitarras. Los tiempos necesarios para ensamble varían entre 4 y 6 horas, dependiendo del estado de las piezas impresas. Puede observarse que en el proceso de ensamble se utilizan varias herramientas propias de la fabricación artesanal de instrumentos.

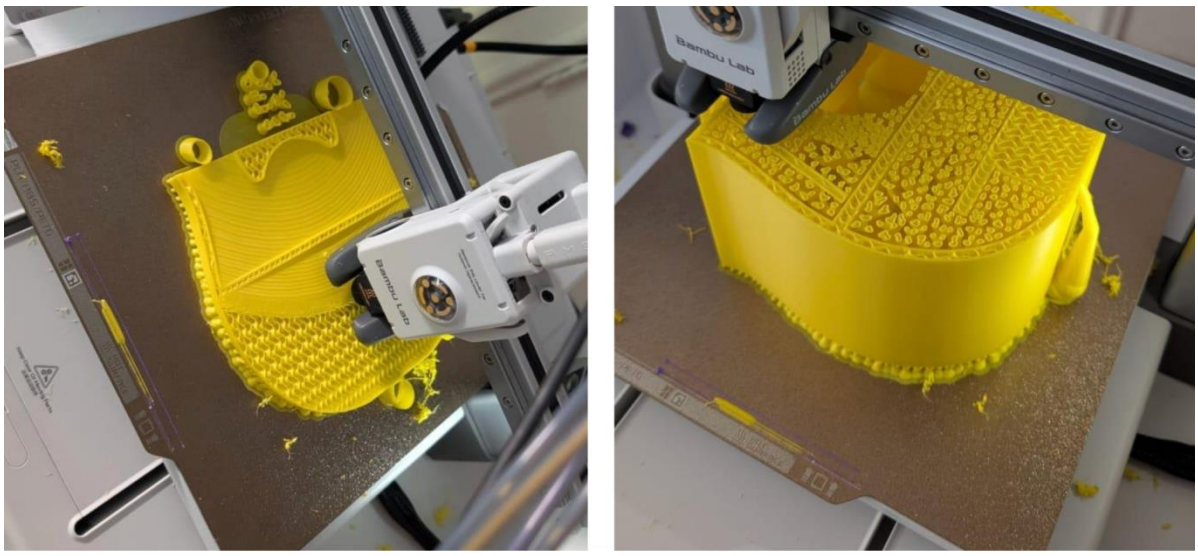

Fig. 6: Impresión de lóbulo menor en impresora Bambu Lab A1. Se observan detalles del patrón de relleno.

[8] Para más detalles, visitar https://www.creality.com/.

[9] Para más detalles, visitar https://bambulab.com.

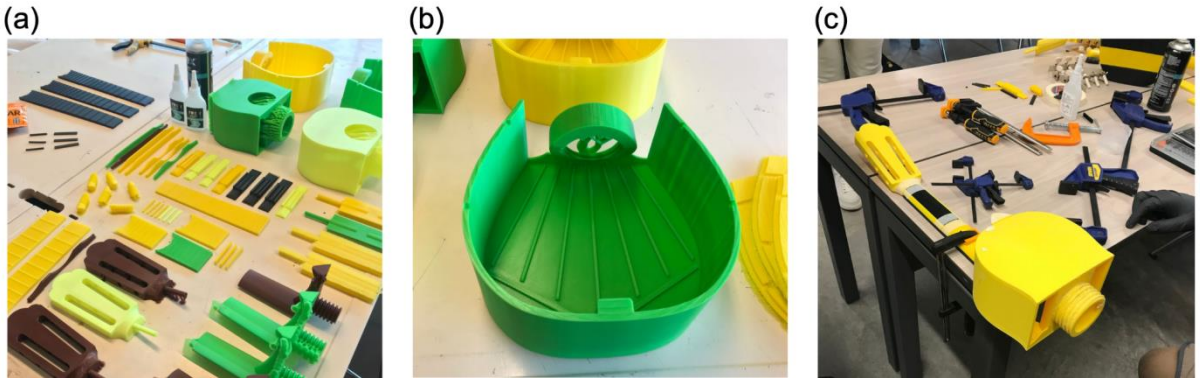

Fig. 7: (a) Módulos para guitarra impresa. (b) Lóbulo inferior sin tapa posterior. (c) Lóbulo superior ensamblado a mango y pala.

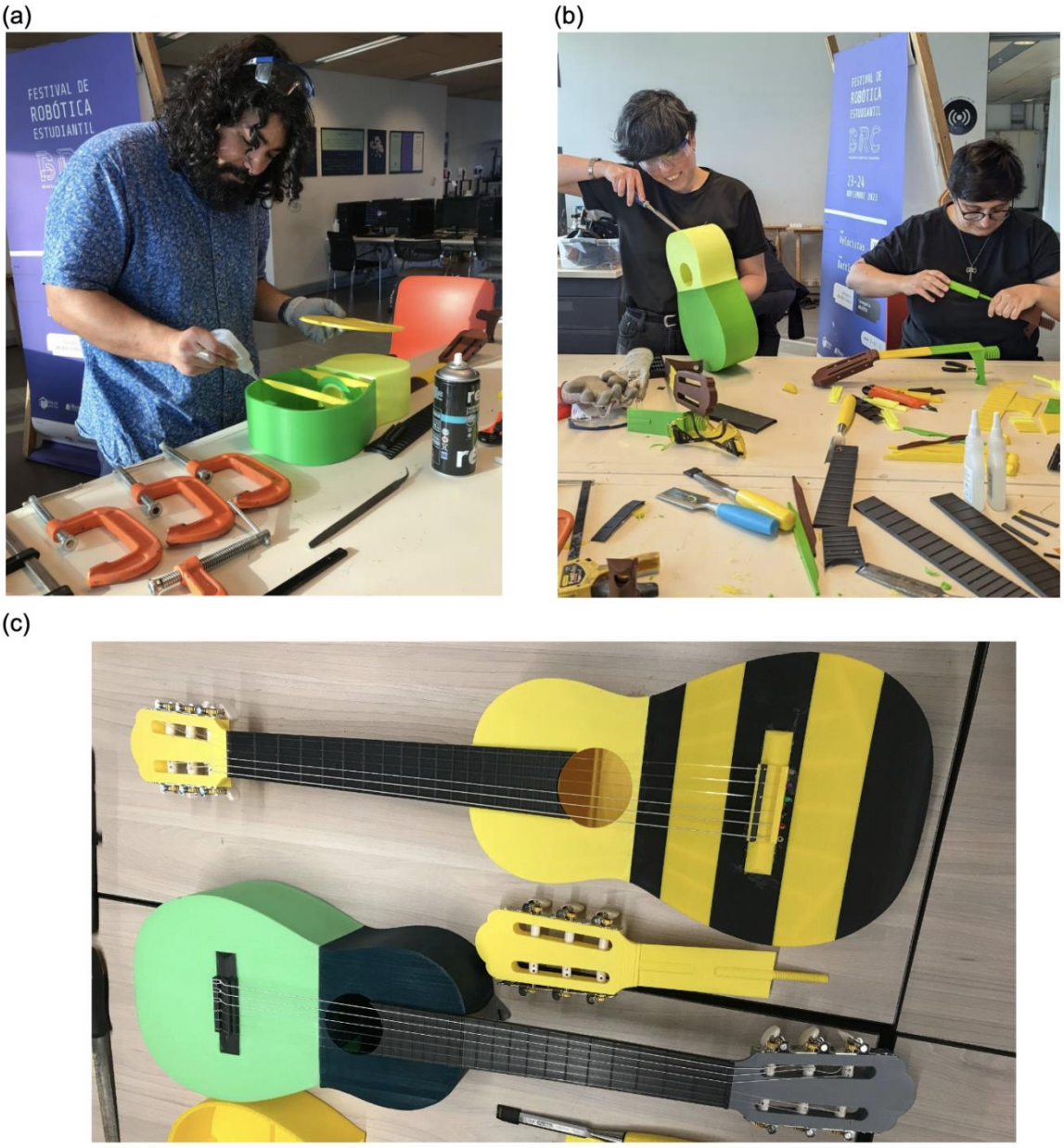

Fig. 8: Sesión de ensamble de guitarras en el Fablab de la Universidad de Chile y Fábrica Digital O'Higgins. (a) Pegado de placa posterior utilizando cianoacrilato. (b) Trabajo en limpieza de excesos para ensamble de roscas. (c) Guitarras ensambladas y encordadas.

6. Evaluaciones del instrumento impreso y propuestas para el futuro

Gracias a las sesiones de fabricación y ensamble de guitarras impresas se identificaron una serie de aspectos a mejorar en futuras iteraciones del diseño propuesto. Es importante destacar que estas sesiones se realizaron con grupos externos al equipo de investigación inicial, con el fin de detectar y evaluar problemas en los procesos de laminación, impresión y ensamble de las guitarras. De manera más precisa, el modelo fue abierto en primera instancia a un público de cincuenta participantes, entre ellos luthieres, *makers* y aficionados a la fabricación digital. Posteriormente, se realizaron rondas virtuales de asesoría con tres grupos de trabajo, que llevaron adelante procesos independientes de fabricación de guitarras. Lo anterior nos permitió observar una serie de aspectos a optimizar en futuras versiones del modelo.

Respecto al modelo, las uniones roscadas presentaron complicaciones tanto en el proceso de impresión, limpieza y ensamble, además de ser cuestionada la implicancia acústica de la rosca de unión entre lóbulos. Otro punto crítico correspondió a la dependencia de las calibraciones avanzadas en impresoras 3D, ya que la replicabilidad del modelo se vio afectada por variaciones entre las calibraciones de las distintas impresoras utilizadas. Los puntos clave correspondieron a la calibración de los pasos/mm de los motores paso a paso[10] y a la regulación del flujo de material. Desviaciones en la calibración de pasos en los motores generaron interferencias en roscas, las que requirieron postprocesado manual. En cuanto al flujo, inconsistencias en la extrusión provocaron sobrellenado o subllenado en uniones críticas.

Durante el proceso de ensamble, los problemas iniciales en las uniones roscadas fueron subsanados mediante postprocesamiento con adhesivos. En general, debieron realizarse diversos procesos de limpieza de piezas y extracción de soportes utilizando herramientas manuales, prolongando excesivamente en ciertos casos los tiempos de fabricación.

Posterior a la fabricación, hubo un período de evaluación cualitativa y cuantitativa de los instrumentos fabricados. En este trabajo se dejarán fuera las cuantitativas, por tratarse de trabajo en proceso. En cuanto a la integridad estructural de los instrumentos, las roscas diseñadas para evitar adhesivos presentaron deformaciones por flexión bajo cargas de tensión generadas por las cuerdas (entre 60 N y 80 N). Esto se atribuye a dos factores principales: (a) geometría y tolerancia de las roscas, y (b) orientación de impresión. Las roscas con diámetro mínimo de 0.4 mm y tolerancias de 0.25 mm – 0.4 mm, aunque compatibles con impresoras de escritorio, no ofrecen suficiente resistencia mecánica ante cargas cíclicas. Lo anterior favorece a la concentración de esfuerzos en las uniones y, por lo tanto, a la deformación plástica en partes críticas del instrumento. Por otra parte, la deposición de material en eje perpendicular a la dirección de carga genera planos de debilidad entre capas, reduciendo la resistencia a la tracción comparada con orientaciones alineadas a la dirección de carga.

Pese a las observaciones anteriores, el prototipo demostró temporalmente capacidad para: (a) mantener la afinación estándar (Mi La Re Sol Si Mi) bajo tensiones de cuerdas de hasta 80 N, validando su estabilidad mecánica básica y (b) permitir la realización de estudios científicos y pruebas de percepción auditiva, facilitando la evaluación objetiva y subjetiva de sus propiedades musicales. Tras aproximadamente dos meses de construcción, se evidenciaron arqueos del mango de las guitarras impresas que dificultaron su afinación, subiendo la acción y poniendo en riesgo su funcionalidad. Por otra parte, los cambios de temperatura favorecieron la deformación plástica del instrumento, principalmente al pasar de invierno a verano sin un adecuado control de las condiciones ambientales. Lo anterior sugiere la

[10] Para más detalles, visitar https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_paso_a_paso.

necesidad de reforzar puntos como el mango y el punto de unión entre el puente y la placa armónica. Sobre esto, se hicieron pruebas preliminares añadiendo refuerzos de barras de carbono, pero su estabilidad aún no ha sido comprobada en un período de tiempo y condiciones comparables.

Finalmente, una observación general a la ergonomía del instrumento fue la dificultad de ejecución debida al escalamiento de las dimensiones del mago. Si bien se trata de una guitarra cómoda para niñas y niños entre 5 y 8 años, no lo es para intérpretes de mayor edad, disminuyendo la versatilidad del instrumento. Se identificaron como puntos claves el espesor del mango, la separación entre cuerdas y el tamaño de los trastes. Dadas las observaciones anteriores, se realizaron diversas propuestas para una futura versión del modelo, las que se resumen a continuación:

(a). **Simplificación del ensamblaje:** En futuras versiones se reemplazarán las uniones roscadas por sistemas de encastre modular, reduciendo la dependencia de soportes de impresión y facilitando el montaje. No obstante, el uso estratégico de cianoacrilato en uniones críticas seguirá siendo necesario para garantizar estabilidad bajo tensión. Una propuesta alternativa de ensamblaje fue aplicada en el diseño de un charango (Ver Fig. 9). En este modelo, se incluyeron barras que por un lado facilitan el proceso de ensamble y por otro, aportan estructuralmente a la estabilidad del instrumento. Se propone la fabricación de estas barras a partir de filamentos de carbono o de barras de carbono disponibles comercialmente.

(b) **Diseño orientado a ergonomía y escalabilidad:** Aunque el modelo mantendrá su escala 1/4, se incorporará un mango con dimensiones estandarizadas (ancho y grosor similares a guitarras convencionales) para mejorar la adaptación a usuarios de diferentes edades. Este cambio apunta a aumentar la versatilidad del instrumento.

(c) **Refuerzo estructural basado en simulación:** Se integrarán simulaciones computacionales basadas en método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) para predecir y mitigar deformaciones causadas por la tensión de las cuerdas, apuntando a la optimización de la geometría interna del mástil y del cuerpo. Estas simulaciones, además de ser útiles para análisis estructurales, podrán aportar en la predicción del comportamiento vibratorio de las guitarras modeladas, apoyando el objetivo de utilizar estos instrumentos con el fin de mejorar nuestra comprensión de las implicaciones sonoras de determinados cambios estructurales, previo a las fases de construcción.

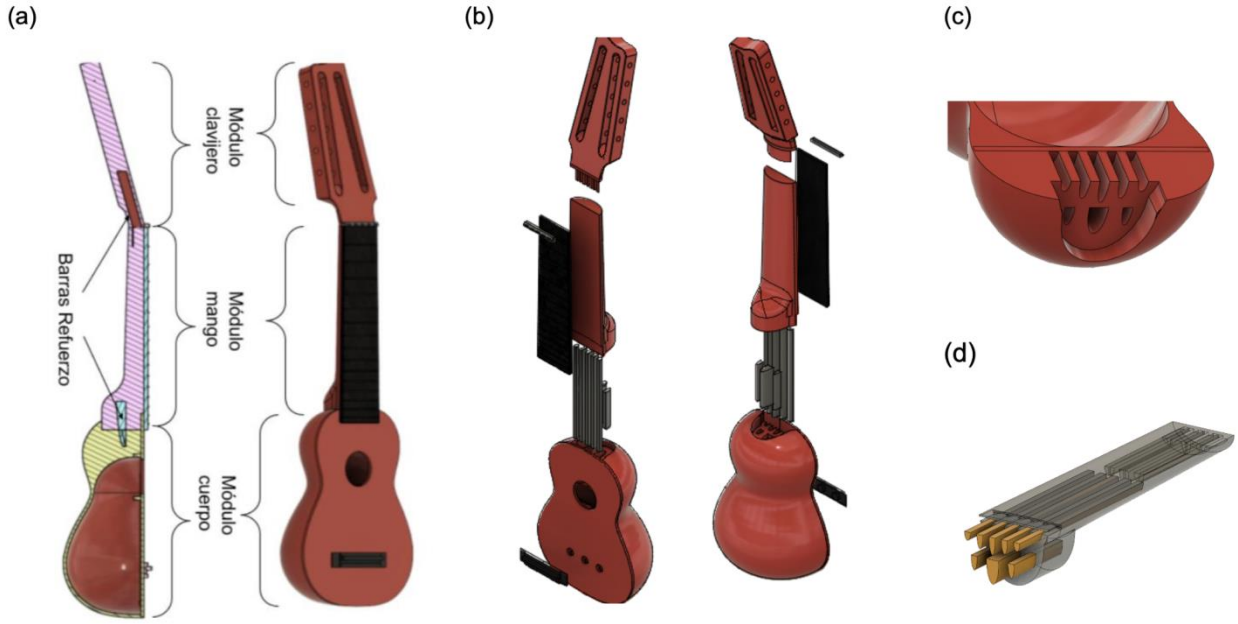

Fig. 9: Diseño de charango para impresión 3D utilizando barras de ensamble alternativas a las roscas. (a) Diseño del instrumento. (b) Vista de las uniones. (c-d) Detalle de los puntos de conexión.

Discusiones y conclusiones

La luthería ha evolucionado a lo largo de la historia acompañando los avances en materiales y herramientas, impulsada por una combinación de factores económicos, culturales y tecnológicos. Desde las primeras guitarras hechas completamente a mano con maderas locales hasta la integración de metales, plásticos y resinas en los procesos modernos, las y los luthieres han demostrado una notable capacidad de adaptación. Este proceso de incorporación ha permitido ampliar las posibilidades de diseño y construcción, optimizando recursos y explorando nuevas sonoridades, y ha sido fundamental ante la necesidad de apuntar a materiales alternativos que permitan una luthería sostenible frente a los cambios en la disponibilidad de materias primas tradicionales. Por otro lado, durante los últimos años, y gracias a los avances en técnicas de simulación numérica, métodos experimentales y técnicas de síntesis sonora, desde la vereda científica ha sido posible explorar cuáles son los factores más influyentes en la producción sonora de instrumentos como la guitarra, generando propuestas que apuntan a la posibilidad de diseñar y construir instrumentos con propiedades sonoras determinadas por el público objetivo. Sin embargo, los conocimientos desarrollados rara vez han cristalizado en instrumentos funcionales y se han estancado en la caracterización de la respuesta vibratoria de partes aisladas de los instrumentos estudiados. En el caso de la guitarra, la pieza clave ha sido la placa armónica. El estancamiento en el proceso de traspaso de conocimientos desde el laboratorio al taller de luthería se ha debido principalmente a la imposibilidad de construir instrumentos con idénticas propiedades sonoras, en que sea posible asegurar que un cambio tímbrico particular se debe a la aplicación de un método determinado en la construcción de la placa armónica y no a la variabilidad intrínseca del conjunto de materiales acoplados para la fabricación del resto del instrumento. Lo anterior abre la pregunta sobre cuánto se están integrando a cultoras y cultores artesanales al quehacer investigativo, facilitando el traspaso de conocimientos de manera bidireccional.

Durante el desarrollo de la investigación presentada en este artículo se abordó la idea de fabricar guitarras mediante técnicas digitales, las que pudieran aportar tanto al desarrollo de una luthería sostenible como al de la acústica musical orientada al estudio de cordófonos. Se propuso un modelo de guitarra modular a escala 1/4, con piezas ensamblables mediante uniones roscas, apta para ser fabricada en impresoras 3D de tamaño estándar. El modelo se basó en un diseño tradicional, la guitarra Torres de 1886, el que sentó las bases de la guitarra moderna. En función de la modularidad y de asegurar una estructura estable, este modelo fue fusionado con la tradición de cordófonos latinoamericanos con golpeador, de tamaños similares al instrumento propuesto. En estos instrumentos, el lóbulo menor de la placa armónica es cubierto por una madera rígida. Este paso fue fundamental para mejorar la integridad estructural del instrumento impreso. Lo anterior es una clara muestra del sincretismo no sólo entre tradiciones, sino también entre tradición y nuevas tecnologías.

El proceso de fabricación y ensamble de las guitarras impresas estuvo siempre acompañado de la aplicación de herramientas y técnicas heredadas de la artesanía: la limpieza de piezas se realizó a través de formones y cepillos, se aplicaron prensas para el proceso de pegado de placas y diapasón, se utilizaron herramientas tradicionales para el ajuste final de la acción y afinación del instrumento. De alguna manera, este trabajo ayudó a eliminar la idea de que el proceso de fabricación digital carecía de vínculos con procesos artesanales, evidenciando la necesidad de crear cruces virtuosos entre las diferentes técnicas, sustractivas y aditivas, manuales y digitales.

El resultado del modelo propuesto fue la fabricación de una serie de guitarras acústicas impresas. Los instrumentos impresos permitieron observar falencias y virtudes del diseño. Entre los aspectos a mejorar, se hizo evidente la necesidad de eliminar las uniones roscas y buscar alternativas para dar mayor integridad estructural al instrumento, aportando además a la simplificación de la fabricación y construcción. A lo anterior se sumó un fuerte cuestionamiento a la influencia que una de las roscas en particular, la que une los lóbulos, podía generar en la respuesta acústica de las guitarras. Se apuntó además a la relación entre ergonomía y versatilidad del instrumento, ya que, si bien se trata de guitarras aptas para la ejecución por parte de niñas y niños de 5 a 8 años, se vuelve incómoda para públicos de mayor edad. Finalmente, se hizo evidente la necesidad de implementar métodos de simulación numérica con el objetivo de tener ideas previas del comportamiento estructural y vibracional de los modelos propuestos.

Entre los aspectos a destacar, fue posible fabricar instrumentos completamente funcionales en términos estructurales y musicales. Las guitarras acústicas construidas cumplieron con los requisitos de modularidad y posibilidad de ensamble, y los tiempos totales de fabricación fueron siempre menores a 60 horas, muy por debajo de los tiempos necesarios para la construcción tradicional del instrumento. En términos económicos, la fabricación de una guitarra tiene un valor aproximado de 30 USD, tomando en cuenta el uso de 1 kg de filamento y la adquisición de clavijas y cuerdas, y sin considerar la valorización de las horas de trabajo. Por otra parte, durante el tiempo en que las guitarras se mantuvieron estructuralmente estables, se pudieron realizar estudios acústicos, mecánicos y perceptuales preliminares, hoy en fase de análisis. Lo anterior apunta al cumplimiento del objetivo de crear una herramienta para usos creativos, pero también orientada al estudio acústico de instrumentos musicales.

Hasta el momento, queda pendiente un punto no menos importante en la fabricación de instrumentos musicales: la profundización en sus aspectos estéticos visuales. Entendiendo a los instrumentos como objetos culturales que comunican no sólo a partir de sus sonidos, sino también a

partir de sus formas y terminaciones, planteamos este aspecto como un objetivo a cubrir en futuros pasos de la investigación.

Finalmente, es importante destacar que el presente trabajo ha integrado en sus procesos de desarrollo a profesionales del diseño, las ciencias y el estudio de los materiales, junto a luthieres locales que han aportado con su experiencia y conocimientos encarnados a solucionar y proyectar falencias y virtudes del modelo. Además, se ha trabajado con intérpretes musicales que han probado los instrumentos entregando retroalimentación sobre sus atributos sonoros, ergonómicos y estéticos. Por último, se ha puesto énfasis en la discusión de resultados en ponencias abiertas a la comunidad de luthieres nacionales, con el fin de abrir discusiones en torno a los procesos de investigación desarrollados. Si bien el instrumento propuesto necesariamente debe ser repensado, a partir de esta primera exploración se abre la posibilidad de efectivamente llegar instrumentos funcionales, reproducibles, que sean tanto un aporte al desarrollo de una luthería sostenible, como también para el desarrollo de conocimientos relacionados con la producción sonora de cordófonos.

Contribuciones

Todas las y los autores han participado activamente de la discusión de los resultados y han revisado y aprobado la versión final del artículo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a Roberto Hernández Céspedes, luthier nacional y reconocido Maestro Artesano de la Región Metropolitana de Chile, por su apoyo constante en los procesos de investigación y diseño de instrumentos de cuerda. Al equipo del Laboratorio de Acústica Musical y Luthería PostDigital (LAÚD) por las constantes discusiones en torno al proyecto, sus avances y alcances. Proyecto financiado por Agencia ANID, FONDECYT INICIACIÓN 2024, Folio 11240044.

Referencias

BACCIAGLIA, Antonio; CERUTI, Alessandro; LIVERANI, Alfredo. A Design of Experiment Approach to 3D-Printed Mouthpieces Sound Analysis. *Progress in Additive Manufacturing*, [*s. l.*], v. 6, n. 3, p. 571–587, 2021.

BACCIAGLIA, Antonio; CERUTI, Alessandro; LIVERANI, Alfredo. Evaluation of 3D Printed Mouthpieces for Musical Instruments. *Rapid Prototyping Journal*, [*s. l.*], v. 26, n. 3, p. 577–584, 2019.

BENNETT, Bradley C. The Sound of Trees: Wood Selection in Guitars and Other Chordophones. *Economic Botany*, [*s. l.*], v. 70, n. 1, p. 49–63, 2016.

BRAUCHLER, Alexander; GONZALEZ, Sebastian; VIERNEISEL, Manuel; ZIEGLER, Pascal; ANTONACCI, Fabio; SARTI, Augusto; EBERHARD, Peter. Model-Predicted Geometry Variations to Compensate Material Variability in the Design of Classical Guitars. *Scientific Reports*, [*s. l.*], v. 13, n. 1, p. 12766, 2023.

BUCUR, Voichita. *Handbook of Materials for String Musical Instruments*. Cham (Suiza): Springer International Publishing, 2016.

BURGOS-PINTOS, Álvaro; FERNÁNDEZ-ZACARÍAS, Francisco; MAYUET, Pedro; HERNÁNDEZ-MOLINA, Ricardo; RODRÍGUEZ-PARADA, LUCÍA. An Analysis of the Displacements in 3D-Printed PLA Acoustic Guitars. *Polymers*, [*s. l.*], v. 16, n. 15, p. 2108, 2024.

BURGOS-PINTOS, Álvaro; FERNÁNDEZ-ZACARÍAS, Francisco; MAYUET, Pedro; HERNÁNDEZ-MOLINA, Ricardo; RODRÍGUEZ-PARADA, Lucía. Influence of 3D Printing Direction in PLA Acoustic Guitars on Vibration Response. *Polymers*, [*s. l.*], v. 15, n. 24, p. 4710, 2023.

ÇIÇEKÇIOĞLU, Ümit; ALASKAN, Ali Maruf. Investigation of Kevlar Application in Baglama Soundboard and its Effects on Sound Properties. *ARTS: Artuklu Sanat ve Beşeri Bilimler Dergisi*, [*s. l.*], n. 12, p. 131–147, 2024.

COURTNALL, Roy. *Making Master Guitars*. London: Hale, 2007.

CUZZUCOLI, Giuseppe; GARRONE, Mario. The Modern Guitar. *In*: CUZZUCOLI, G, GARRONE, M. (org.). *Classical Guitar Design*. Cham (Suiza): Springer International Publishing, 2020.

DAMODARAN, Ajith; LESSARD, Larry; SURESH BABU, A. An Overview of Fibre-Reinforced Composites for Musical Instrument Soundboards. *Acoustics Australia*, [*s. l.*], v. 43, n. 1, p. 117–122, 2015.

DUERINCK, Tim; KERSEMANS, Mathias; SKRODZKA, Ewa; LEMAN, Marc; VERBERKMOES, Geerten; VAN PAEPEGEM, Wim. Experimental Modal Analysis of Violins Made from Composites. *In:* THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPERIMENTAL MECHANICS, 18, 2018, Belgium. Proceedings of 18th International Conference on Experimental Mechanics. MDPI, 2018, p. 1-7.

ELEJABARRIETA, María Jesús; EZCURRA, Amaya; SANTAMARÍA, Carlos. Evolution of the Vibrational Behavior of a Guitar Soundboard along Successive Construction Phases by Means of the Modal Analysis Technique. *The Journal of the Acoustical Society of America*, [*s. l.*], v. 108, n. 1, p. 369–378, 2000.

ESPINOZA, Carolina; CARRENO, Claudio; CHACRA, Emir; GONZALEZ, Sebastian. MetaWood: Manipulation of the Elastic Properties of Wood Plates by Periodic Hole Patterns. *In:* INTERNATIONAL CONGRESS ON ARTIFICIAL MATERIALS FOR NOVEL WAVE PHENOMENA (METAMATERIALS), 16, 2022, Siena, Italy. Proceedings of 2022 Sixteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials). IEEE, 2022, p. 139-141.

FABRICACIÓN ADITIVA FRENTE A SUSTRACTIVA. [*S. l.*], 2022. Disponible en: https://www.3ds.com/es/make/solutions/blog/additive-vs-subtractive-manufacturing. Acceso el: 27 feb. 2025.

GIBSON, Chris. A Sound Track to Ecological Crisis: Tracing Guitars All the Way Back to the Tree. *Popular Music*, [*s. l.*], v. 38, n. 2, p. 183–203, 2019.

GIBSON, Chris; WARREN, Andrew. Resource-Sensitive Global Production Networks: Reconfigured Geographies of Timber and Acoustic Guitar Manufacturing. *Economic Geography*, [*s. l.*], v. 92, n.4, p. 430-454, 2016.

GONZALEZ, Sebastian; RAU, Mark; ESPINOZA, Carolina; LONGO, Giacomo; ANTONACCI, Fabio; SARTI, Augusto. Sound Synthesis of Geometric and Material Changes in Archtop Guitars: Towards the Timbral Design of Musical Instruments. *In:* INTER-NOISE AND NOISE-CON CONGRESS, 53, 2024, Nantes, France. Conference Proceedings of INTER-NOISE and NOISE-CON, 2024, p. 6294–6303.

GONZALEZ, Sebastian*;* CHACRA, Emir; CARREÑO, Claudio; ESPINOZA, Carolina. Wooden Mechanical Metamaterials: Towards Tunable Wood Plates. *Materials & Design,* [*s. l.*], v. 221, p. 110952, 2022.

HOVAS, The. Hovalin V5. [*S. l.*], [*s. d.*]. Disponible en: https://www.hovalabs.com/blog/hovalin-five/. Acceso el: 11 feb. 2025.

KOLOMIETS, Anastasia; GROBMAN, Jacob Yasha; POPOV, Vladimir V.; STROKIN, Evgeny; SENCHIKHIN, Grigory; TARAZI, Ezri. The Titanium 3D-Printed Flute: New Prospects of Additive Manufacturing for Musical Wind Instruments Design. *Journal of New Music Research*, [*s. l.*], v. 50, n. 1, p. 1–17, 2021.

LERCARI, Mattia; GONZALEZ, Sebastian; ESPINOZA, Carolina; LONGO, Giacomo; ANTONACCI, Fabio; SARTI, Augusto. Using Mechanical Metamaterials in Guitar Top Plates: A Numerical Study. *Applied Sciences*, [*s. l.*], v. 12, n. 17, p. 8619, 2022.

MODULAR FIDDLE • OPENFAB PDX. *In*: OPENFAB PDX. [*s. d.*]. Disponible en: https://openfabpdx.com/modular-fiddle/. Acceso en: 11 feb. 2025.

PHILLIPS, Steven; LESSARD, Larry. Application of Natural Fiber Composites to Musical Instrument Top Plates. *Journal of Composite Materials,* [*s. l.*], v. 46, n. 2, p. 145–154, 2012.

QIAN, Peng; XIAOYU, Niu; SHANRU, Lin; LIANGZHI, Ma; JUNJIE, Ma; SHUMENG, Yu; ZHUO Chen; GONGYUN, Li; SHENGXUE, Fu; JU, Lin. A Comparison on Sound Quality of PLA 3-D Printing Ukulele and Single Board Wooden Ukulele. *In:* MEETING OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, 178, 2019, San Diego, California. Proceedings of Meeting of the Acoustical Society of America, 2019, p. 035007.

RIEFER, Joshua; TAI, Bruce; WANG, Jyhwen. An Investigation in Tone Characteristics of 3D Printed Ukulele Sound Chambers. *In:* SME NORTH AMERICAN MANUFACTURING RESEARCH CONFERENCE, 50, 2022. Manufacturing Letters, 2022, p. 508–515.

SAVAN, Jamie; SIMIAN, Ricardo. CAD Modelling and 3D Printing for Musical Instrument Research: The Renaissance Cornett as a Case Study. *Early Music*, [*s. l.*], v. 42, n. 4, p. 537–544, 2014.

SIMIAN, Ricardo. 3D-Printed Musical Instruments: Lessons Learned from Five Case Studies. *Music & Science*, [*s. l.*], v. 6, p. 20592043231210653, 2023.

STANCIU, Mariana Domnica; ROSCA, Ioan Calin; MIHĂLCICĂ, Mircea; BUCUR, Voichita. Dynamic Response of Wooden Plates in Different Stages of Guitar Manufacturing. *European Journal of Wood and Wood Products*, [*s. l.*], v. 80, n. 4, p. 997–1013, 2022.

VIALA, Romain; PÉREZ, Marco; PLACET, Vincent; MANJÓN, Antonio; FOLTÊTE, Emmanuel; COGAN, Scott. Towards Model-Based Approaches for Musical Instruments Making: Validation of the Model of a Spanish Guitar Soundboard and Characterization Features Proposal. *Applied Acoustics*, [*s. l.*], v. 172, p. 107591, 2021.

VIALA, Romain; PLACET, Vincent; COGAN, Scott. Model-Based Evidence of the Dominance of the Guitar Brace Design over Material and Climatic Variability for Dynamic Behaviors. *Applied Acoustics*, [*s. l.*], v. 182, p. 108275, 2021.

VIALA, Romain; PLACET, Vincent; COGAN, Scott. Simultaneous Non-Destructive Identification of Multiple Elastic and Damping Properties of Spruce Tonewood to Improve Grading. *Journal of Cultural Heritage*, [*s. l.*], v. 42, p. 108–116, 2020.

ZORAN, Amit. The 3D Printed Flute: Digital Fabrication and Design of Musical Instruments. *Journal of New Music Research,* [*s. l.*], v. 40, n. 4, p. 379–387, 2011.

Carolina Espinoza es Doctora en física, música autodidacta y aprendiz de luthería de cordófonos latinoamericanos. Profesora asociada del Departamento de Sonido de la Facultad de Artes de la Universidad de Chile, y Directora del Laboratorio de Acústica Musical y Luthería PostDigital (LAÚD) de la misma institución, espacio dedicado al estudio experimental de instrumentos musicales de fabricación tradicional y digital, con foco en instrumentos latinoamericanos. Sus principales áreas de creación e investigación se posicionan alrededor de la aplicación y caracterización de diversos tipos de materiales en la generación de instrumentos musicales e interfaces sonoras. carolinaaespinozao@uchile.cl

Claudio Adasme es Luthier tradicional y postdigital de cordófonos latinoamericanos. Co-investigador en el Laboratorio de Acústica Musical y Luthería Postdigital del Departamento de Sonido de la Universidad de Chile (LAÚD), y actualmente estudiante de Ingeniería Civil Mecánica en la Universidad de Chile. Una de sus principales líneas de innovación es el sistema de contradiapasón, propuesta que apunta a aumentar la tesitura y número de cuerdas de instrumentos de cuerda como la guitarra, el charango, entre otros. En el ámbito digital, sus principales aportes se encuentran en el área de diseño y fabricación, con énfasis y técnicas aditivas y sustractivas. En el área musical se ha desarrollado de manera autodidacta como compositor e intérprete en piano y contradia (guitarra con sistema de contradiapasón, instrumento de su invención). claudiocarreno@ug.uchile.cl

Aarón Montoya es Profesore asistente en la Escuela de Diseño de la Facultad de Arquitectura, Arte y Diseño de la Universidad Diego Portales y de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile. Estudió ingeniería eléctrica, es magíster en arte electrónico de New York University, y magíster en ciencias y artes de Massachusetts Institute of Technology. Su investigación reciente se concentra en desarrollo de software y hardware de fuente abierta para la creación de instrumentos musicales electrónicos, en inteligencia artificial aplicada a artes y diseño, y en desarrollo de software y hardware para performance en vivo. Actualmente colabora con el Laboratorio de Acústica Musical y Luthería PostDigital (LAÚD), principalmente desarrollando impresiones 3D de cordófonos. aaron.montoya@mail.udp.cl

José Baeza es Estudiante de último año de Diseño Industrial en el Instituto DUOC UC, en Santiago, Chile. Se especializa en diversos oficios, incluyendo tornería en madera, carpintería, orfebrería y técnicas de grabado como xilografía y serigrafía. Su enfoque combina el diseño, la tecnología y los oficios para aportar soluciones creativas y funcionales que generen un impacto positivo. Ha desarrollado diversos proyectos para transformar residuos orgánicos e inorgánicos en productos de diseño, con el objetivo de llevarlos al mercado y potenciar el trabajo de oficios tanto para artesanos como para comunidades. Además, investiga la relación entre la impresión 3D y los instrumentos musicales, explorando su reproducibilidad y calidad sonora. jo.baezab@duocuc.cl

A *Opus* está licenciada sob uma licença CC-BY.