

DISEÑO E IMPRESIÓN 3D DE UN AMPLIFICADOR PASIVO EN ARCILLA

Santiago Puerta Martínez
Sebastián Valencia Vélez

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE DISEÑO INDUSTRIAL
PROGRAMA DE DISEÑO INDUSTRIAL
MEDELLÍN
AÑO 2024**

Diseño e impresión 3D de un amplificador pasivo en arcilla

Santiago Puerta Martínez
Sebastián Valencia Vélez

Trabajo de grado para optar al título de Diseñador Industrial

Asesores

ALEJANDRO ALBERTO ZULETA GIL
Ingeniero de materiales, Magister y Doctor en ingeniería

ANA MARIA LOTERO ARIAS
Diseñadora Industrial, Esp.

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE DISEÑO INDUSTRIAL
PROGRAMA DE DISEÑO INDUSTRIAL
MEDELLÍN
AÑO 2024**

Diseño e impresión 3D de un amplificador pasivo en arcilla

Santiago Puerta, Sebastián Vélez

Facultad de Diseño Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Sede Medellín, Circular 1 N° 70-01, Medellín, Colombia

Resumen

Este artículo presenta una investigación centrada en el diseño y la fabricación de amplificadores de sonido pasivos a través de la impresión 3D en cerámica. La investigación parte de la identificación de referentes biomiméticos, específicamente las cuevas, la sección áurea del caracol y el cráneo del mono aullador, cuyas morfologías optimizadas para la propagación del sonido sirven como base para el desarrollo de nuevas formas acústicas. Estas morfologías se comparan con prototipos elaborados en material polimérico PLA para evaluar sus propiedades acústicas. El objetivo es analizar las diferencias en la capacidad de amplificación y proyección del sonido entre los dos materiales, contribuyendo así a la creación de soluciones sostenibles y eficientes para mejorar el rendimiento acústico en dispositivos de audio. La investigación destaca la importancia de la biomimética en el diseño acústico y su potencial para innovar en el ámbito de la ingeniería de sonido sin depender de fuentes de energía externas.

Abstract

This article presents research focused on the design and manufacture of passive sound amplifiers through 3D printing in ceramics. The research starts from the identification of biomimetic references, specifically caves, the golden section of the snail and the skull of the howler monkey, whose morphologies optimized for sound propagation serve as a basis for the development of new acoustic forms. These morphologies are compared with prototypes made of PLA polymer material to evaluate their acoustic properties. The objective is to analyse the differences in sound amplification and projection capability between the two materials, thus contributing to the creation of sustainable and efficient solutions for improving acoustic performance in devices

Palabras clave: Amplificador; Biomimética; Impresión; Acústica; Cerámica

1. Introducción

En entornos cerrados, como oficinas y salas de conferencias, los desafíos acústicos pueden disminuir la claridad del sonido, afectando la comunicación. Debido a que los teléfonos móviles se utilizan ampliamente para reproducir audio, surge la necesidad de optimizar su rendimiento acústico

sin depender de energía eléctrica. La creación de un amplificador de sonido pasivo, inspirado en métodos biomiméticos como formas naturales, podría mejorar la propagación del sonido en estos espacios. El uso de materiales como la cerámica o el PLA podría proporcionar una solución sostenible para mejorar la experiencia auditiva sin añadir dispositivos electrónicos adicionales. Sin embargo este tipo de dispositivos tienen limitaciones en relación con la potencia y la calidad del audio, como en la distribución de frecuencias de brillo, altos y medios.

Según estudios realizados por Fleming y Saglinda H. Roberts. (2019), este tipo de soluciones propone mejorar la funcionalidad de los dispositivos de audio y responde a la creciente demanda de productos que equilibran rendimiento y sostenibilidad. Al usar la biomimética como herramienta de diseño y los materiales cerámicos como medio de fabricación, este proyecto tiene una alternativa innovadora y práctica que podría redefinir la concepción del audio pasivo en el futuro. Además, la biomimética permite aprender de la eficiencia estructural y funcional de sistemas naturales, lo que se traduce en la creación de amplificadores que optimizan el sonido de manera más efectiva. La integración de principios biomiméticos en el diseño no solo promueve la sostenibilidad, sino que también facilita un enfoque interdisciplinario que combina conocimientos de biología, ingeniería y diseño. Este enfoque se alinea con el marco planteado por Araujo, Magalhães. (2023), quienes destacan la capacidad de la biomimética para ofrecer soluciones sostenibles dentro del entorno construido, promoviendo la reflexión sobre la relación entre el diseño y la sostenibilidad. Esto es similar a las tendencias observadas en la arquitectura y el diseño urbano, donde la biomimética se aplica para crear soluciones que imitan la complejidad de los ecosistemas naturales, contribuyendo a una sociedad más sostenible y funcional Uchiyama, Blanco, & Kohsaka. (2020).

Estudios sobre materiales cerámicos y sus propiedades acústicas, como el realizado por Tulshibagwale, N., Brodник, N., Muir, C., Hilmas, A., Kiser, JD, Smith, CE, Almansour, AS, Presby, MJ y Daly, S. (2024), subrayan que las características de la cerámica, como su rigidez y fragilidad, influyen significativamente en su capacidad de amplificar y transmitir sonido. Gracias a su estructura cristalina, las cerámicas producen una resonancia que optimiza la propagación sonora. Al aplicar estas propiedades en el diseño de amplificadores pasivos, se puede mejorar la calidad del sonido sin recurrir a energía eléctrica, logrando un equilibrio entre rendimiento acústico y sostenibilidad. Además en el diseño de estas morfologías, es crucial el control del grosor y la estructura, debido a la fragilidad de la cerámica. Se debe pensar en diseños con el grosor adecuado para evitar grietas, pero también para optimizar el sonido. Las paredes delgadas podrían amplificar mejor los sonidos agudos, mientras que las más gruesas manejarían mejor los sonidos graves, proporcionando una experiencia acústica más equilibrada.

Objetivo General

El propósito de este trabajo es diseñar un amplificador de sonido pasivo bioinspirado fabricado en material cerámico impreso. Para esto se hizo un análisis de rendimiento acústico sin necesidad de energía adicional, aprovechando las propiedades físicas de las cerámicas, que ofrecen alta densidad y rigidez para reflejar mejor las ondas sonoras. La biomimética, al emular formas naturales optimizadas para la propagación del sonido, como las conchas de caracol, busca maximizar la amplificación pasiva mediante un diseño geométrico eficiente. Esto proporciona una solución sostenible y económica para mejorar dispositivos de audio, con aplicaciones prácticas en entornos domésticos y comerciales

2. Materiales y métodos

La investigación y selección de los referentes para el desarrollo de amplificadores de sonido pasivos se llevó a cabo mediante un análisis de material bibliográfico que incluyó artículos científicos, páginas web, blogs y libros. Esta recopilación de información permitió identificar tres referentes biomiméticos: el cráneo del mono aullador (A), una sección de cueva (B) y una sección de la concha del caracol (C). Las características acústicas de cada uno fueron sistemáticamente organizadas en matrices comparativas, que facilitaron la evaluación de su desempeño en variables como reflexión del sonido, resonancia y atenuación del sonido exterior.

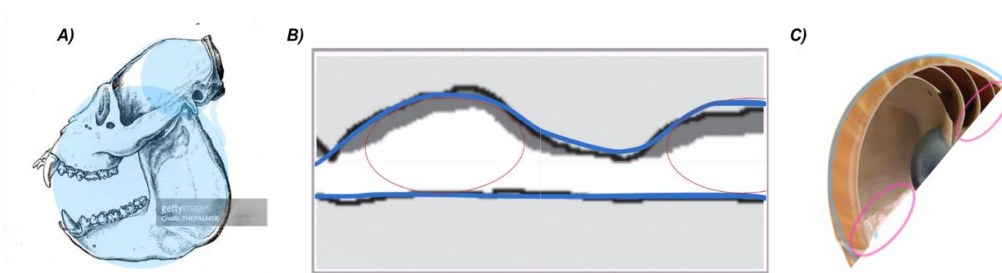


Figura 1. Selección de referentes biomiméticos. Imágenes de internet intervenidas.

Estas matrices no solo permitieron identificar cuál referente se comportaba de manera más favorable, sino que también consideraron otros factores esenciales para el desarrollo de los prototipos, como la similitud de los materiales con la cerámica y las formas geométricas derivadas de los referentes naturales. Este enfoque metodológico no solo fortalece la base científica de la investigación, sino que también ofrece un marco estructurado para la creación de prototipos acústicos, integrando tanto la teoría como la práctica en el diseño. Al final, la elección de estos referentes biomiméticos se convierte en un punto de partida esencial para la mejora de la eficiencia acústica de los dispositivos diseñados, aprovechando al máximo las propiedades inherentes de los materiales seleccionados.

Para desarrollar el objetivo de analizar las características sensoriales y medir la capacidad de los prototipos 3D en la percepción del sonido, se llevaron a cabo entrevistas participativas con usuarios de diferentes edades para conocer sus experiencias auditivas y expectativas, mediante pruebas de sonido donde los participantes escuchan distintos tipos de sonidos con varias intensidades. Durante estas pruebas, se midió la percepción del volumen, claridad y confort acústico. Además, la implementación de cuestionarios y observaciones directas permitió recoger datos cualitativos y cuantitativos para evaluar el desempeño de los prototipos.

Este trabajo de prototipado se inició mediante entrevistas a expertos en audición, música y acústica en "La Cabaña del Recuerdo" en Envigado. Durante estas interacciones, se obtuvieron recomendación sobre referentes acústicos artificiales, tales como cajas de resonancia y radiolas. Con un enfoque biomimético, se llevó a cabo un análisis de las morfologías de estos referentes para aprovechar sus características acústicas. Las formas resultantes fueron modeladas utilizando el software Rhinoceros. Posteriormente, los modelos fueron previsualizados y ajustados en Simplify para su preparación a la impresión 3D en cerámica.

Se realizaron impresiones de varios modelos de la estructura del caracol y de la cueva, empleando cerámica y PLA, con el fin de comparar la propagación del sonido en ambos materiales. Para evaluar el rendimiento acústico de los prototipos, se llevaron a cabo pruebas funcionales con un sonómetro y un medidor de decibeles en un dispositivo móvil (DecibelX). Se utilizaron dos materiales en la impresión 3D: arcilla y PLA, lo que permitió realizar una comparación más precisa de las morfologías propuestas. Esta evaluación ayudó a realizar un análisis comparativo por medio de una matriz entre las propiedades del material cerámico y su capacidad para aumentar los decibelios (dB) en comparación con un celular sin amplificador y con el material polimérico.

Instrumento de medición de medición	Distancia de la fuente (cm)	Nivel de sonido sin amplificador (dB)	Nivel de sonido con amplificador (dB)	Ganancia de sonido (dB)	Observaciones
Decibel x App					
Sonómetro					

Figura 2. Matriz comparativa para resultados en pruebas de medición, para PLA y Cerámica.

3. Resultados y discusión

Para seleccionar los referentes acústicos adecuados, se evaluaron diversos elementos de la naturaleza, de los cuales se eligieron tres que mejor se ajustaban a los objetivos del proyecto. La justificación de estos referentes se basó en un análisis exhaustivo utilizando matrices comparativas que consideraban variables clave, como las cualidades acústicas, las formas geométricas y la similitud de los materiales con la cerámica. De este análisis surgieron tres referentes biomiméticos: el cráneo del mono aullador, las cuevas y la concha del caracol.

Luego de identificar estos referentes, se llevó a cabo un análisis más detallado de sus características geométricas para implementarlas en modelos CAD. El desarrollo de estos modelos fue un proceso minucioso que implicó la observación y la adaptación de las formas naturales seleccionadas, cumpliendo con los requerimientos establecidos para ajustarlos a las limitaciones técnicas de la impresión 3D. El diseño de las formas pasó por varias iteraciones, durante las cuales se optimizaron tanto la geometría como los materiales, además de ajustarse el tiempo de impresión para lograr un equilibrio entre funcionalidad y eficiencia.

Como resultado del análisis biomimético, se seleccionaron tres referentes clave para el desarrollo del proyecto acústico: el cráneo del mono aullador, conocido por generar sonidos agudos en un rango específico de frecuencias, lo que lo convierte en un modelo eficiente para amplificación de sonidos en esos rangos; las cuevas, cuyas paredes curvas dispersan el sonido de manera uniforme, creando una reverberación suave; y la concha del caracol, cuya estructura espiralada actúa como una cámara de resonancia, amplificando el sonido de manera eficiente. Estos referentes fueron seleccionados por sus características acústicas óptimas y su aplicabilidad al proyecto de amplificación pasiva.

Muchachos, realizar la modificación del artículo agregando que la modelación, además de considerar las características morfológicas de la cueva, se apoyó en el uso de ecuaciones sinusoidales, las cuales obedecen a ondas acústicas que permiten, de alguna manera, controlar la calidad del sonido.

$$Y = A \sin\left(\frac{2\pi}{L}x + C\right) + D + Ex$$

Este tipo de ecuaciones, comúnmente empleadas en acústicas, permite modelar la forma de una cueva al representar de manera matemática las ondulaciones e irregularidades naturales que caracterizan sus perfiles. Cada parámetro controla aspectos como la amplitud de las protuberancias (A), L determina la distancia entre ellas, C ajusta su posición, D establece un nivel base, y Ex permite modificar la inclinación de la cueva. Esta ecuación permitiría representar geometrías que simulan procesos como la erosión, la acumulación de minerales y las formaciones naturales de estalactitas y estalagmitas.

Además, esta ecuación tiene componentes que son típicos para describir funciones matemáticas de ondas, presentes de manera común en acústica, ya que las ondas sonoras se describen mediante funciones seno o coseno, y representan oscilaciones periódicas

Relación con la calidad de audio:

- Modificación de brillos o agudos:
 - El parámetro A, que representa la amplitud de la onda, puede estar relacionado con la intensidad de las altas frecuencias (agudos) en el audio. En términos acústicos, los brillos dependen de las frecuencias altas que generan ondas de menor longitud de onda. En el diseño del parlante, se puede usar esta amplitud para contornear las superficies que reflejan y amplifican las ondas sonoras altas.
- Modificación de bajos:
 - El término L (longitud de onda) está inversamente relacionado con la frecuencia. Una mayor longitud de onda (valores más grandes de L) corresponde a frecuencias más bajas, lo que se traduce en mejores bajos. En un parlante pasivo, estas frecuencias pueden ser amplificadas al diseñar formas resonantes específicas que maximicen estas longitudes de onda.
- Volumen o potencia sonora:
 - La amplitud A también puede vincularse al volumen. Una mayor amplitud indica un desplazamiento más grande en la onda acústica, lo que significa un sonido más potente. Este parámetro podría justificar áreas más amplias o resonadores en el diseño del parlante para amplificar la potencia sonora.

Relación con el diseño morfológico del parlante:

- Forma basada en la ecuación:
 - Superficies onduladas o curvas diseñadas para optimizar la propagación de ondas acústicas.
- La función planteada representa ondas periódicas que pueden alinearse de acuerdo con la modificación de los valores. Diseñar contornos del parlante en función de esta ecuación permitiría mejorar la resonancia de frecuencias bajas (bajos) al usar superficies más amplias con curvaturas adaptadas.
 - Minimizar la distorsión en frecuencias medias y altas, gracias al control del flujo de ondas reflejadas
- Optimización de agudos y dispersión: Superficies curvas basadas en C y A pueden dispersar mejor las frecuencias altas, contribuyendo a un sonido más brillante.

Percepción del sonido en usuarios:

Para comprender la percepción del sonido en diferentes usuarios, se llevó a cabo un estudio participativo con un grupo de personas de diversas edades, desde 22 hasta 45 años. La prueba consistió en reproducir sonidos con diferentes intensidades medidas en decibelios (dB) a través de audífonos, evaluando la capacidad de cada individuo para tolerar estos niveles sonoros durante un periodo determinado. Los resultados mostraron una clara relación inversa entre la intensidad del sonido (dB) y el tiempo que los participantes podían soportar la exposición.

La información sobre el aumento de decibelios y su percepción en relación con los amplificadores de sonido pasivos se fundamenta en principios acústicos generales. Según la *Acoustic Society of America* (ASA), un incremento de 3 dB es apenas perceptible, mientras que un aumento de 10 dB se percibe como una duplicación del volumen. La literatura sobre ingeniería de sonido indica que el diseño estructural de amplificadores pasivos puede lograr aumentos en el sonido de entre 3 y 10 dB, dependiendo del enfoque y los materiales utilizados. Estos principios son vitales para comprender cómo el oído humano no percibe el volumen de manera lineal; estudios indican que un aumento de 10 dB se interpreta comúnmente como el doble de volumen. Este análisis es fundamental para el diseño y evaluación de amplificadores de sonido pasivos, contribuyendo al entendimiento de cómo optimizar su rendimiento acústico.

Las morfologías propuestas para los prototipos no solo son interactivas y fáciles de usar, sino que también destacan por su atractivo estético, lo que genera un alto nivel de interés en los usuarios al utilizarlas. Esta combinación de funcionalidad y diseño asegura que el producto cumpla eficazmente su propósito acústico, mientras invita a la participación activa y el disfrute sensorial. Todo esto fue validado gracias a pruebas de percepción realizadas con diferentes usuarios, lo que permitió ajustar y perfeccionar tanto la estética como la experiencia auditiva del producto.

Para el desarrollo de los prototipos, se basaron en la geometrización de las formas de los referentes biomiméticos seleccionados. A partir de estas referencias, se crearon modelos 3D que reflejan las formas de las fuentes naturales estudiadas. Durante el proceso, hubo desarrollos exitosos, pero también fracasos debido a factores como el estado de la arcilla, la forma seleccionada y otras variables que influyeron en la estabilidad y el desempeño de los prototipos. Estos desafíos permitieron refinar el enfoque para obtener mejores resultados las siguientes impresiones.



Figura 3. Algunos de los factores de fallo en la impresión 3D en arcilla.

El primer modelo impreso fue el del cráneo del mono aullador, el cual presentó problemas durante el proceso de impresión. La morfología diseñada incluía un ducto por el cual se propagaría el sonido, pero al momento de la impresión, el ducto no tenía un soporte adecuado debido a su diseño en voladizo, lo que provocó que el material se deformara y gotease en esa sección. Además, las dimensiones del modelo resultaron ser demasiado grandes, lo que complicó aún más la estabilidad de las paredes del ducto, afectando la integridad de la pieza en tres intentos de impresión.

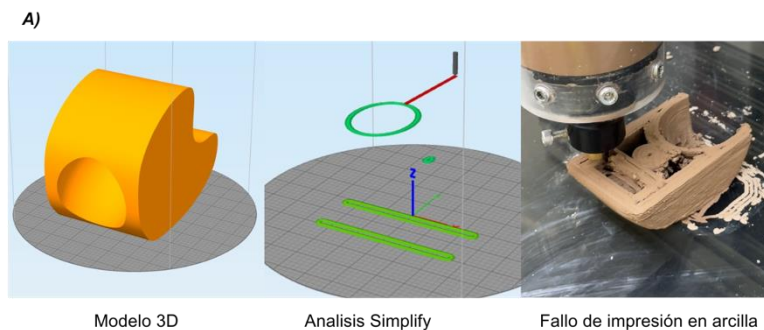


Figura 4. Proceso de desarrollo de prototipado.

Luego se procedió a trabajar con el siguiente prototipo, basado en la forma del caracol. Este pasó por tres diferentes diseños para su impresión, pero en todos se presentó el mismo problema: partes en voladizo que impedían que el material se sostuviera correctamente. En el último diseño, se optó por dividir la estructura en dos partes, lo que eliminaba los voladizos y permitía una impresión más eficiente. Posteriormente, ambas piezas se unirían en el mismo lugar donde se realizó la división, logrando un diseño más estable y funcional.

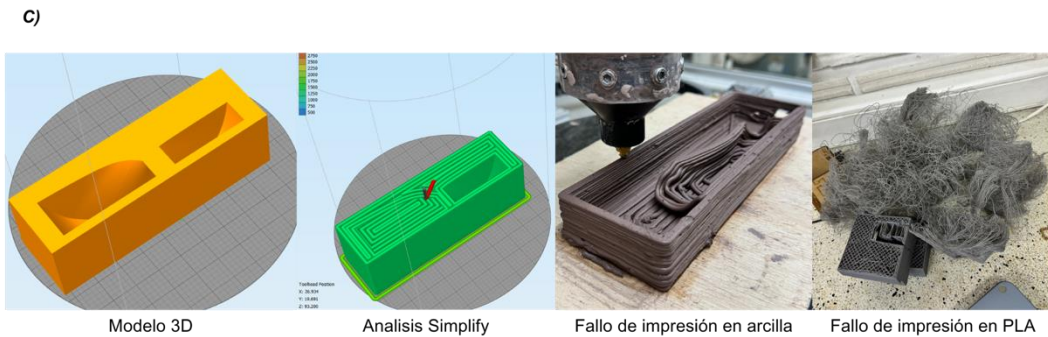


Figura 5. Proceso fallido de desarrollo del prototipo sección del caracol.

Finalmente, se diseñó e imprimió un modelo basado en la morfología de una cueva, obteniendo los mejores resultados de impresión en el proyecto. El prototipo se imprimió en dos partes: la estructura principal y una parte lateral que, al ensamblarse, proporcionó mayor rigidez y estabilidad al modelo. Tras ensamblar las piezas, se realizaron pruebas acústicas utilizando un sonómetro y un medidor digital. Estas pruebas compararon la propagación del sonido en un celular, en el prototipo de arcilla y en el de PLA, evidenciando diferencias significativas en el rendimiento acústico entre los materiales.



Figura 6. Proceso de prototipado del referente de la sección de cueva.

4. Conclusiones

A lo largo de la investigación, se determinó que tanto la forma geométrica como el material de fabricación tienen una influencia crucial en la propagación y amplificación del sonido en los amplificadores pasivos. Se observó que las estructuras morfológicas óptimas, en combinación con materiales específicos, como la arcilla y el PLA, mejoran significativamente el rendimiento acústico. Este análisis comparativo resaltó cómo el diseño y el material trabajan en conjunto para maximizar la eficacia del dispositivo, lo que permite optimizar la calidad del sonido sin necesidad de componentes electrónicos adicionales.

El análisis morfológico de referentes naturales, como las cuevas, el caracol y el cráneo del mono aullador, reveló que las formas curvas y complejas de estas estructuras son eficaces para optimizar la dispersión y amplificación del sonido. Estas características permiten una mejora acústica sin la necesidad de energía externa, lo que subraya el potencial de aplicar principios biomiméticos en el diseño de amplificadores pasivos. Estas formas naturales, al ser emuladas en el desarrollo de prototipos, pueden aumentar la eficiencia acústica de los dispositivos diseñados para amplificación sonora.

El proceso de impresión del modelo basado en la morfología del cráneo del mono aullador presentó dificultades debido a las secciones en voladizo, complicando su fabricación. A lo largo de la investigación, se comprobó que tanto la forma geométrica como el material de los amplificadores pasivos influyen decisivamente en la propagación y amplificación del sonido. Los resultados demostraron que la combinación de estructuras morfológicas óptimas y materiales como la arcilla y el PLA mejora notablemente el rendimiento acústico, optimizando la calidad del sonido sin requerir energía externa.

La densidad de las paredes del amplificador es fundamental para la proyección del sonido. Una mayor densidad mejora la resonancia y la calidad acústica, lo que permite que el sonido se proyecte de manera más efectiva. Por lo tanto, la selección de materiales y el diseño son aspectos clave para optimizar el rendimiento del audio pasivo.

Referencias

- Fleming, R., & Roberts, S.H. (2019). *Sustainable Design for the Built Environment* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315159300>
- Tulshibagwale, N., Brodник, N., Muir, C., Hilmas, A., Kiser, JD, Smith, CE, Almansour, AS, Presby, MJ y Daly, S. (26 de abril de 2024). "Emisión acústica en compuestos de matriz cerámica". *ASME. *Aplica. Mec. Rev.** Julio de 2024; 76(4): 040801. <https://doi.org/10.1115/1.4064763>
- Huang, X., Cui, Z., Liu, C., Liu, Y., Fang, D., Xu, Z., & Zhang, D. (2021). Additive manufacturing of 3D functional structures by electrohydrodynamic printing. *Frontiers in Materials*, 8, Article 518886. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.518886>
- Uchiyama, Yuta, Eduardo Blanco, and Ryo Kohsaka. 2020. "Application of Biomimetics to Architectural and Urban Design: A Review across Scales" *Sustainability* 12, no. 23: 9813. <https://doi.org/10.3390/su12239813>
- Sá, A.A.M.d.; Viana, D.M. Design and Biomimicry: A Review of Interconnections and Creative Potentials. *Biomimetics* **2023**, 8, 61. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8010061>
- Koo, D. J., Chitwoode, D. D., & Sanchez, J. (2008). Violent victimization and the routine activities/lifestyle of active drug users. *Journal of Drug Issues*, 38, 1105-1137. Retrieved from <http://www2.criminology.fsu.edu/~jdi/>
- ChatGPT. (22 de octubre de 2024). Respuesta a una consulta sobre la percepción del sonido en dB. OpenAI. <https://chat.openai.com/>
- ChatGPT. (2024, octubre 22). Redacción asistida sobre diseño de amplificadores pasivos. OpenAI. <https://chat.openai.com/>