

Prospectiva de diseño de dispositivos acústicos activos con metamateriales. Técnicas origami

Prospective design of active acoustic devices with metamaterials. Origami techniques

Fredy Alberto Alzate Arias¹

¹Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín. Docente de la Facultad de Artes y Humanidades. Email: fredyalzate@itm.edu.co

 OPEN ACCESS



Copyright:

©2022. La revista *Ingenierías USBmed* proporciona acceso abierto a todos sus contenidos bajo los términos de la licencia creative commons Atribución no comercial SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

Tipo de artículo: Investigación.

Recibido: 28-02-2021.

Revisado: 05-05-2021.

Aprobado: 14-09-2021.

Doi: 10.21500/20275846.4495

Referenciar así:

F. A. Alzate Arias, "Prospectiva de diseño de dispositivos acústicos activos con metamateriales. Técnicas origami," *Ingenierías USBMed*, vol. 13, n^o. 2, pp. 35-47, 2022.

Disponibilidad de datos:

todos los datos relevantes están dentro del artículo, así como los archivos de soporte de información.

Conflicto de intereses:

los autores han declarado que no hay conflicto de intereses.

Editor: Andrés Felipe Hernández.
Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia.

Resumen. Este trabajo presenta una mirada integral en bases de datos académicas sobre proyectos relacionados con estructuras y dispositivos acústicos activos inspirados en metamateriales y en formas creadas a partir de patrones de la naturaleza. Su objetivo es dar una mirada a los diferentes escenarios que resultan de proyectos innovadores en acústica arquitectónica y hacer un aporte a la vigilancia tecnológica y al estado del arte de tales estructuras y dispositivos. Así, se elabora un informe detallado que recoge la situación actual de la producción científica en este campo en Colombia y el resto del mundo en términos de los materiales, la ingeniería civil, la física y el diseño, conjugando ciencia, arte, tecnología e innovación como los principales focos del grupo de investigación de la Facultad de Artes y Humanidades del Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín.

Palabras Clave. Metamateriales, Acústica arquitectónica, Origami, Cinética, Plegado, Diseño.

Abstract. This paper presents a comprehensive look at academic databases on projects related to active acoustic structures and devices inspired by metamaterials and shapes created from patterns in nature. Its objective is to take a look at the different scenarios that result from innovative projects in architectural acoustics, as well as to contribute to technological surveillance and the state of the art of said devices. In this way, a detailed report is prepared that collects the current state of scientific production in this field in Colombia and the rest of the world in terms of materials, civil engineering, physics and design, combining science, art, technology and innovation as the main focuses of the research group of the Faculty of Arts and Humanities of Medellín's Instituto Tecnológico Metropolitano.

Keywords. Metamaterials, Architectural Acoustics, Origami, Kinetics, Folding, Design.

I. Introducción

Los metamateriales¹ son sustancias diseñadas artificialmente que exhiben propiedades que van más allá de las que se encuentran en los materiales naturales. Este término fue acuñado en 1999 por Walser así: “Es un compuesto macroscópico periódico y sintético que tiene una arquitectura celular tridimensional, diseñado para producir una combinación optimizada, no disponible en especie, de dos o más respuestas a una solicitud específica” [1]. Entre sus características se destacan las siguientes:

- Son materiales naturales clásicos cuyas propiedades se pueden adaptar fácilmente según la geometría, la forma o el tamaño de los elementos constituyentes.
- Son macro-compuestos formados por células elementales o patrones definidos por los denominados “meta-átomos”, que pueden tener simetría periódica, aunque esta debe ser mucho más pequeña que la longitud de onda de la radiación con la que interactúan.
- Son materiales especialmente creados en laboratorios, con propiedades elásticas, acústicas y electromagnéticas que dependen más de la geo-estructura métrica que de la estructura molecular, es decir, de su composición.

A partir de 2000, la investigación sobre los metamateriales ha recibido un nuevo impulso. En 2008 se creó un metamaterial acústico de estructura simple, pero con una masa de dinámica negativa que no cumplía con las leyes sobre la densidad de masa de la atenuación del sonido en el rango de los 100 a los 1000 Hz, debido a que en los débiles módulos elásticos de la membrana se producían oscilaciones, incluso a bajas frecuencias, que dañaban el sistema. Cabe anotar que para mejorar la disipación de estas frecuencias es necesario aumentar la densidad dentro del material, aunque aún no hay avances concretos para absorberlas.

En este contexto, y debido a la complejidad de investigar estructuras tan pequeñas, se ha considerado la posibilidad de trabajar en estructuras más grandes a través de paneles absorbentes y resonadores acústicos con propiedades cinéticas —de movimiento—. Las más similares a las estructuras periódicas existentes en la naturaleza son las generadas con técnicas origami [2]. Muchas de estas aplicaciones tienen en su estructura un movimiento plegado similar al producido, entre otros, por los insectos, las flores, los panales y las aves, que son impulsados por cargas mecánicas —fuerzas y momentos— aplicadas externamente por medio de motores y bisagras que permiten variar las áreas de reflexión de las ondas sonoras y combinar las estructuras de manera flexible para cambiar algunos de los parámetros acústicos —por ejemplo, el tiempo de reverberación y las relaciones energéticas la claridad de la voz y de la música en las salas—. A partir de estas condiciones se ha emprendido una exploración para el

desarrollo de este tipo de proyectos y dispositivos, con el propósito de que contribuyan a generar nuevas hipótesis en las fases posteriores de desarrollo, sirvan como alternativas de innovación en el campo de la acústica arquitectónica cinética y generen nuevos conocimientos y patentes que fortalezcan la producción y el impulso de las empresas.

La propuesta de esta investigación es explorar a nivel macro la técnica origami como una especie de metamaterial, haciendo claridad en el sentido de que, aunque no cumple estrictamente con su definición, sí permite dimensionarlo como un nuevo material o dispositivo acústico, ya que su construcción se basa en patrones que se repiten y son producidos por ecuaciones geométricas precisas. Adicionalmente, podría decirse que la investigación se acerca a una geometría fractal, muy similar a la usada en las antenas de radio-propagación para lograr grandes anchos de banda, que, al tener aplicación en las ondas electromagnéticas, podría usarse en las ondas mecánicas, en este caso las acústicas.

La técnica origami se utiliza tanto en el campo estructural para aumentar la eficiencia mecánica como en el cinemático —para permitir la activación del movimiento—. En esta investigación también se estudia y evalúa su efectividad en la acústica, transformada mediante resonadores o paneles aplicados para variar el tiempo de reverberación en las salas o absorbiendo frecuencias problemáticas que perjudiquen su inteligibilidad. En este contexto es necesario identificar la geometría más adecuada para este propósito. Los principios geométricos del origami no son invención del hombre en su totalidad: provienen de formas encontradas en la naturaleza: hojas delgadas, alas de insectos u otras estructuras finas en las que el grosor por sí solo no puede alcanzar la rigidez necesaria y es necesario el pliegue para aumentar la resistencia general sin aumentar el peso.

Se abren así nuevas posibilidades para el diseño, la cinemática, la acústica y la arquitectura, que potencializarán la producción de nuevos registros y patentes que fortalezcan y alimenten la denominada “triple hélice” —universidad-empresa-Estado—, en miras a que la región del departamento de Antioquia (Colombia) sea un centro de innovación en esta área multidisciplinar.

II. Evolución de los conocimientos en los dispositivos acústicos inspirados en los metamateriales

En este apartado se hace inicialmente una búsqueda en las bases de datos y buscadores académicos como Scopus, Clarivate Web of Science y la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (The World Intellectual Property Organization, WIPO) [2] que muestran evidencias interesantes respecto a los metamateriales aplicados en el campo de la acústica.

La Figura 1 muestra, en el período 1946-2019, un incremento de las publicaciones relacionadas con nuevos

¹ Meta: “más allá”, prefijo proveniente del griego.

compuestos como los nanomateriales y los metamateriales, señal de la importancia de la creación de nuevos centros de desarrollo tecnológico.

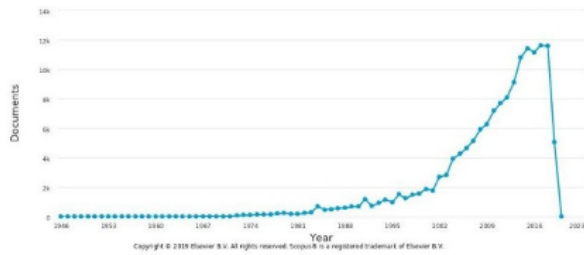


Figura 1. Publicaciones relacionadas con la creación de nuevos materiales —nanomateriales y metamateriales— (1946–2019) [3]

La Figura 2 muestra la distribución de las principales áreas temáticas de investigación de nuevos materiales acústicos —nanomateriales y metamateriales—. La mayor parte de las aplicaciones se orientan a la ingeniería de materiales, un campo lleno de oportunidades para la industria moderna.

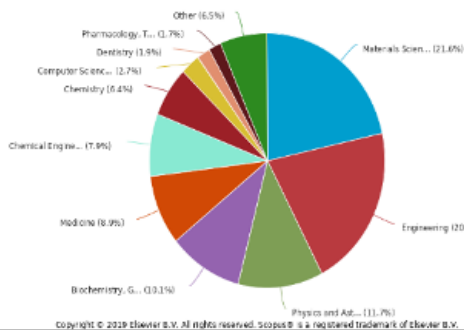


Figura 2. Áreas temáticas de investigación de nuevos materiales —nanomateriales y metamateriales— [3]

La Figura 3 muestra, por países, la distribución de la investigación de nuevos materiales acústicos. Estados Unidos y la República Popular China lideran el listado, con aplicaciones, en su mayoría, desarrolladas para la industria militar.

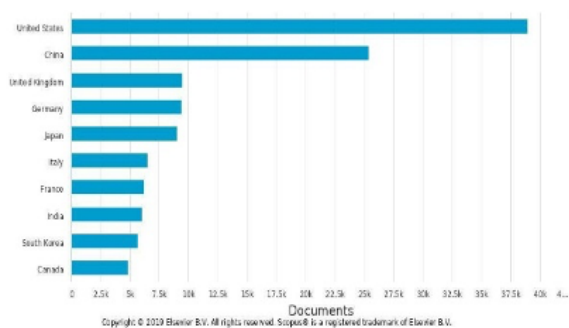


Figura 3. Distribución por países de la investigación de nuevos materiales acústicos [4]

Las investigaciones que lideran los tópicos de la acústica y nuevos materiales son divulgadas y consulta-

dos principalmente a través de bases de datos en *Science Direct*, [5]. La Tabla 1 muestra, por revista, el número de publicaciones en el período 2009-2019 por áreas, cabe resaltar que la acústica tiene amplias aplicaciones y las investigaciones de nuevos materiales han aumentado los últimos años.

Tabla 1. Número de publicaciones relacionadas con la acústica, control de ruido y nuevos materiales (2003-2018) [6]

Total de publicaciones por área	
Physics and Astronomy	3434
Engineering	3053
Materials Science	1089
Medicine	532
Computer Science	530
Environmental Science	465
Mathematics	307
Arts and Humanities	291
Earth and Planetary Sciences	252
Health Professions	206
Energy	197
Chemical Engineering	167
Chemistry	162
Biochemistry, Genetics and Molecular Biology	117
Agricultural and Biological Sciences	89
Multidisciplinary	60

La Figura 4 muestra el aumento progresivo de los artículos e investigaciones relacionados con el tratamiento del ruido acústico en el período 2005-2019.

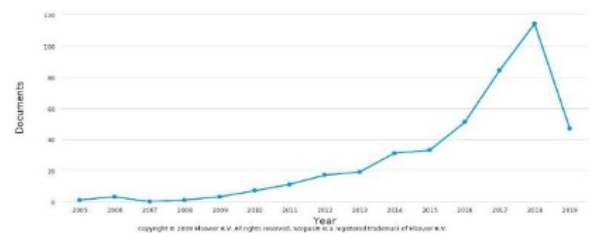


Figura 4. Publicaciones relacionadas con el tratamiento del ruido acústico (2005-2019) [7]

La Figura 5 muestra las diferentes áreas de aplicación relacionadas con el tratamiento del ruido acústico.

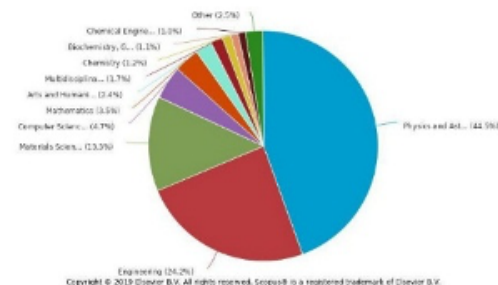


Figura 5. Áreas temáticas de las aplicaciones relacionadas con el tratamiento del ruido acústico [8]

Para hallar las publicaciones relacionadas con el diseño de dispositivos acústicos activos que puedan plegarse, se hace una búsqueda en las bases de datos mencionadas con la ecuación *acústica + origami + plegado* (*acoustics + origami + folded*), como se muestra en la Figura 6. El período evaluado es 2009-2019. Cabe aclarar que el término “plegado” (*folded*) restringe la búsqueda y arroja pocos trabajos.

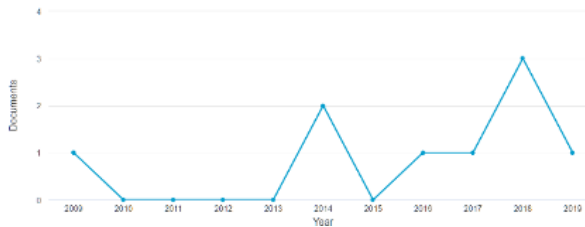


Figura 6. Número de publicaciones relacionadas con el diseño de dispositivos acústicos basado en técnicas origami (2009-2019) [9]

Las investigaciones que se muestran en la Figura 7 están orientadas al campo de la ingeniería de materiales y a la física en general, y son áreas de investigación relativamente nuevas.

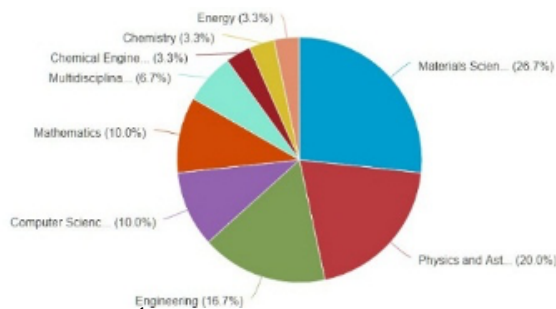


Figura 7. Áreas temáticas de las aplicaciones de dispositivos acústicos basados en técnicas origami [10]

La Figura 8 muestra los países líderes en investigaciones de dispositivos acústicos basados en técnicas origami. Estados Unidos comanda el listado, seguido de la República Popular China y Colombia, este último con un trabajo aplicado a la arquitectura.

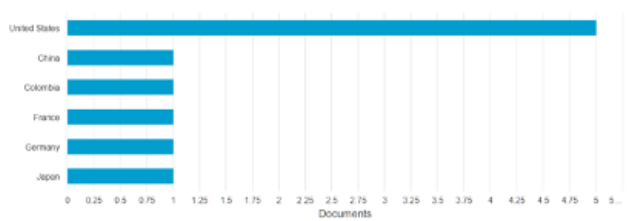


Figura 8. Investigaciones y aplicaciones, por países, de dispositivos acústicos basados en técnicas origami [11]

La búsqueda de artículos relacionados con el desarrollo de metamateriales acústicos basados en la técnica origami en el período 2015-2019, que se muestra

en la Figura 9, se hizo a partir de las palabras claves *acoustics + metamaterials + origami*, y evidencia un ligero aumento de ellos en 2019.

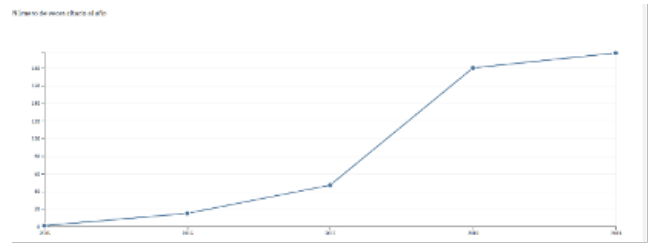


Figura 9. Artículos relacionados con el desarrollo de metamateriales acústicos basados en la técnica origami (2015-2019) [12]

La Figura 10 muestra, por países, el número de publicaciones relacionadas con el desarrollo de metamateriales acústicos basados en la técnica origami en el período 2015-2019. La mayoría de ellas enfatizan el control del ruido en las máquinas y las aplicaciones aeroespaciales.



Figura 10. Países líderes en la publicación de artículos relacionados con el desarrollo de metamateriales acústicos basados en la técnica origami (2015-2019) [13]

Una pesquisa más detallada con la ecuación *acoustics + metamaterials + origami* para el período 2010-2020p, que se muestra en la Figura 11, evidencia mayor investigación en el área de los metamateriales acústicos y en la cantidad de artículos publicados.

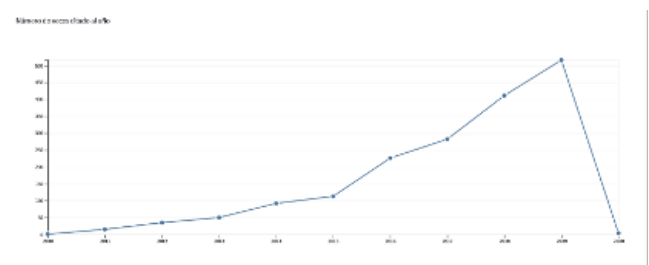


Figura 11. Artículos relacionados con el desarrollo de metamateriales acústicos basados en la técnica origami (2010-2020p) [14]

La Figura 12 muestra, por países, el número de publicaciones relacionadas con el desarrollo de metamateriales acústicos basados en la técnica origami en el

que caracterizan y desarrollan nuevos materiales y dispositivos para el control del ruido.

La Figura 17 muestra la cantidad de patentes registradas relacionadas con los metamateriales acústicos en el período 2010-2019. En comparación con la Fig. 16, se evidencia una mayor producción, debido a que incluye aplicaciones en la aeronáutica y la acústica militar. Cabe anotar que ninguna de las patentes está asociada a los dispositivos aplicados al control de la reverberación en las salas.



Figura 17. Patentes registradas en el campo de la producción de metamateriales acústicos (2010-2019) [20]

La Figura 18 muestra los países líderes en el registro de patentes relacionadas con los metamateriales acústicos en el período 2010-2019. El primer lugar lo ocupa Estados Unidos, seguido de las oficinas de patentes y de las patentes europeas; estas últimas se caracterizan por la investigación y el desarrollo de nuevos materiales.



Figura 18. Patentes registradas en el campo de la producción de metamateriales acústicos por países (2010-2019) [21]

La siguiente opción de búsqueda de patentes es la de aquellas basadas en la técnica origami. Los productos elaborados con ella son usados frecuentemente como estructuras de ornamentación arquitectónica. Para este propósito se procede a usar las palabras claves *origami + arquitectura*. Los resultados para el período 2010-2019, que se muestran en la Figura 19, dejan ver una mayor cantidad de patentes en comparación con las búsquedas anteriores, aunque no están dirigidas a la acústica de teatros o salas, sino a la decoración de espacios modernos con conceptos geométricos, patrones repetitivos y apariencia angulosa.

La Figura 20 muestra las patentes registradas en el campo de los dispositivos ornamentales para la arquitectura basados en la técnica origami en el período 2010-2019. El líder es Estados Unidos, seguido de una oficina de patentes independiente denominada Tratado de Cooperación en materia de Patentes (Patent Cooperation Treaty, PCT).



Figura 19. Patentes registradas en el campo de los dispositivos ornamentales para la arquitectura basados en la técnica origami (2010-2019) [22]

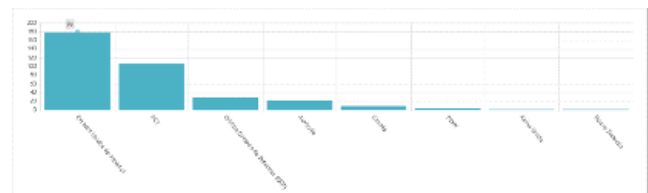


Figura 20. Patentes registradas, por países, en el campo de los dispositivos ornamentales para la arquitectura basados en la técnica origami (2010-2019) [23]

IV. Estado del arte

A. Las estructuras origami

La técnica origami involucra un alto nivel de matemáticas que permite su combinación con la ingeniería de diseño para crear dispositivos tecnológicos y mecanismos robóticos instalados en estructuras activas plegables y expandibles. Así, la hipótesis que se presenta en este trabajo es multidisciplinar, razón por la cual puede suscitar un amplio interés en los profesionales de distintas ramas del conocimiento.

B. Algunos hallazgos

La investigación llevada a cabo por Schenk y Guest en la Universidad de Cambridge [26] se centró en las estructuras dobladas, en particular la de tipo *shell* (cáscara) plegado, consistente en un delgado caparazón corrugado anclado a un segundo patrón en meso-escala, compuesto por una repetición de celdas. La base y la escala local están formadas por conchas delgadas cuyos bordes están conectados por pliegues rígidos. Su comportamiento es bien interesante, ya que la unidad individual en la escala tiene la capacidad de manifestar transformaciones globales a la manera de una curvatura gaussiana.

De hecho, se ha demostrado que es posible describir el comportamiento mecánico general de una estructura origami a partir de las deformaciones de las unidades individuales; por tanto, se ha llegado a establecer que, en su ausencia, el comportamiento de la mecánica dominante de toda la estructura depende exclusivamente de la geometría base utilizada en lugar del material adoptado para su construcción, sin que este sea de ninguna manera sensible a las imperfecciones en el patrón de flexión.

Schenk, Allwood y Guest [24], [25] evaluaron diferentes métodos de fabricación hasta alcanzar la técnica más adecuada para la construcción de este tipo de estructuras de acero: la flexión a presión con gas frío o el plegado a presión de gas frío. De estos hallazgos aún quedan pendientes investigaciones en diferentes áreas: la combinación del análisis cinemático con modelos reales, la hipótesis de grandes deformaciones de los pliegues fuera del plano —incluyendo el análisis de fatiga— y las cualidades de absorción de impacto de las estructuras.

La investigación llevada a cabo por Tachi en la Universidad de Tokio se centró en estructuras origami desplegables, firmes y gruesas, compuestas por losas rígidas y flexibles, aplicando un modelado de formas tridimensionales a partir de patrones planos y de la composición de unidades elementales. Mediante la introducción de mallas cuadriláteras que pueden desarrollarse bidireccionalmente, es decir, que son capaces de plegarse en la parte superior en dos direcciones posibles para obtener formas tridimensionales, Tachi desarrolla cilindros y discos plegables, planos y rígidos, cuyo comportamiento aún puede asimilarse al de las superficies teóricas sin espesor.

En una entrevista para la revista *Approach* en 2013, Tachi explica que los métodos computarizados de hoy permiten producir modelos de forma libre de una manera racionalmente menos restrictiva y compleja, lo que ha suscitado un mayor interés de arquitectos e ingenieros que trabajan en la técnica origami. Freeform Origami [26] aplica una metodología inversa para generar un patrón bidimensional a partir de una Figura 3D importada. Y Origamizer [27] es un software que usa un método de diseño computarizado para obtener un modelo de plegado tridimensional a partir de un elemento plano, como se muestra en la Figura 21.

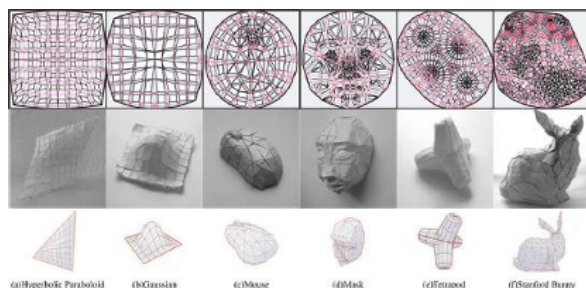


Figura 21. Origami realizado con el software Origamizer [28]

La investigación llevada a cabo por Buri y Weinand en la Escuela Politécnica Federal de Lausana [29] se centró en las estructuras de placas plegables construidas con madera laminada cruzada —comúnmente llamada “multicapa”—, aplicando un proceso de diseño de patrones origami que genera superficies doblemente corrugadas a partir de dos líneas poligonales: perfil transversal y perfil corrugado. Este enfoque combina

la experimentación intuitiva y el análisis racional para proporcionar un método de diseño capaz de crear modelos de placas corrugadas utilizando software 3D. La investigación sobre estas estructuras se ha extendido al estudio de las propiedades mecánicas con el uso de dispositivos electrónicos, conectando diversas unidades a través de experimentos a gran escala. Buri y Weinand [30] afirman que el interés por la implementación del método de diseño de estos perfiles a través del software paramétrico [31] está creciendo, ya que este acelera el proceso de modelado y permite combinar la fase de diseño con la de cálculo.

La investigación llevada a cabo en el campo de la acústica por Yang en la Universidad de Melbourne [32] se centró en un método computacional de búsqueda de patrones para integrar el diseño paramétrico del origami y la ingeniería acústica, a fin de encontrar la mejor forma geométrica para una sala de conciertos. Su trabajo, que describe la aplicación de este método para un recinto de este tipo en Japón, consta de una fase de diseño paramétrico en un software de origami y otro de simulación acústica para la optimización de los parámetros acústicos. El resultado final arroja una forma geométrica optimizada que satisface tanto el diseño arquitectónico como las condiciones acústicas. Este método es valioso para generar nuevas posibilidades de formas arquitectónicas, al pasar de un proceso tradicional de creación a un proceso de búsqueda de estas.

Para aplicar estructuras similares a un edificio es necesario desarrollar un sistema de integración del aislamiento térmico y del revestimiento exterior, incluyendo los techos, y la eliminación del agua lluvia. Es así como la investigación llevada a cabo por Samuelsson y Vestlund en el Departamento de Mecánica Aplicada de la Universidad de Gotemburgo, Suecia [31], se centró en un método de diseño paramétrico para estructuras plegadas con patrones de origami, a fin de tener una mejor comprensión del comportamiento mecánico asociado a los diferentes patrones, para posteriormente diseñar y probar soluciones para la realización de estructuras optimizadas dobladas que mejoren la respuesta estructural.

Una vez los modelos de origami generados digitalmente a través de herramientas de modelado paramétrico fueron comparados con los procesos geométricos y los de simulación física, los autores pudieron concluir que estos últimos son más adecuados para esta finalidad, ya que alcanzan con figuraciones intermedias con patrones complejos muy similares a la realidad [33].

Resulta interesante la investigación llevada a cabo por Thota y Wang [34] centrada en la construcción de una barrera sónica de origami compuesta por cilindros unidos a una hoja. Esta propuesta brinda propiedades de bloqueo del sonido ajustables para la aplicación en la atenuación de espectros complejos como el ruido de

tráfico. El plegado de la hoja de origami transforma la periodicidad de las inclusiones en diferentes redes o configuraciones de Bravais, conformando una red hexagonal que conduce a un ajuste drástico que produce características de dispersión.

En relación con la selección de los materiales de absorción del sonido para este tipo de dispositivos, estos deben cumplir con las siguientes propiedades: ligeros, ignífugos, rígidos, fáciles de construir y baratos. Las espumas como el poliuretano, la poliamida y la melamina cumplen con estas características; la melanina, en particular, es usada con frecuencia en razón de su estructura, que se caracteriza por una gran cantidad de burbujas de gas atrapadas en todo su volumen. La investigación de Iterrante [35] enfatiza la aplicación de este material, ya que contiene celdas periódicas que se pueden modificar para conformar matrices denominadas “metamateriales acústicos”.

La técnica origami ha alcanzado gran auge tanto en el campo de la fabricación como en de la arquitectura, en virtud de sus propiedades cinéticas —también llamadas “activas”, por contar con sistemas automáticos de control— y sus formas elegantes y geométricas. Las posibilidades de aplicar procesos creativos siguiendo reglas geométricas precisas y la capacidad de combinar forma y movimiento de manera funcional han motivado a muchos investigadores. Si el pliegue del papel o del prototipo se reemplaza con una bisagra, y el papel con un panel de material rígido, podrían utilizarse en conjunto con sistemas de control automático o robótico para el manejo de la reverberación en las salas. No es difícil imaginar la gran cantidad de aplicaciones posibles de esta arte y técnica. A diferencia de las estructuras con barras, paneles y sin motores, el origami se puede usar para obtener superficies continuas sin ensamblar diferentes partes, optimizando el proceso constructivo, el transporte y el costo, a expensas del tiempo de diseño. De hecho, el diseño con origami que da forma y movimiento es difícil de controlar con las aplicaciones informáticas profesionales contemporáneas.

La propuesta para diseñar resonadores y paneles absorbentes plegables con movimiento debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

En el proceso de diseño de este origami aplicado es muy difícil para el diseñador controlar la forma para que se ajuste a los contextos de diseño mientras se conservan las funcionalidades necesarias de los patrones originales. Por lo tanto, sin un conocimiento suficiente en sistemas de diseño inteligentes, los diseños resultantes terminarían en una simple copia y pegado de un patrón de origami existente o un diseño ‘inspirado en el origami’ que no está usando sus propiedades de manera funcional [35], [36].

Es así como mayor parte de los diseños existentes inspirados en origami analizados en esta investigación solo usa copias de patrones conocidos. La idea, entonces, es investigar una variedad de posibilidades con las herramientas disponibles. Cuando se diseña este tipo de superficies es necesario controlar la forma y el movimiento con los demás dispositivos —llámense electrónicos o mecánicos—, sin perder al mismo tiempo la capacidad de desarrollo; por tanto, se deben considerar reglas matemáticas o geométricas que aumentan la complejidad y el consumo de tiempo del proceso.

V. software existente para diseñar origami

Los arquitectos, diseñadores, ingenieros y artistas interesados en el origami han desarrollado sus propias herramientas para perfilarlo. Entre ellos se destaca Resh, el pionero de la informática aplicada al origami.

El diseño es una especie de circuito de retroalimentación entre el artista y el entorno [...]. La computadora realmente puede acelerar este tipo de circuito (diseño) y ayuda mucho a la creatividad [...]. La computadora es como un medio para la exploración y un medio para la expresión [37].

El uso del computador no solo optimiza y acelera el proceso de diseño, sino que abre nuevas posibilidades en un entorno creativo.

La investigación de Foschi [38] sobre los diferentes programas de software diseñados para este fin señala que Lang fue el primero en desarrollar una aplicación informática independiente para generar patrones de pliegues de origami llamada Treemaker [39]. Como fue mencionado, Tachi desarrolló varias piezas de software para analizar y diseñar geometrías de origami con patrones plegables no planos o para analizar el movimiento de plegado de cualquier patrón plegable rígido: Freeform Origami [40], Origamizer [41] y Rigid Origami Simulator [42], que permiten a los usuarios desarrollar, modificar y analizar modelos de origami con interfaces 2D y 3D intuitivas [43]. Por su parte, Mitani [42] desarrolló Oriref y Orirevo, diseñados para crear origami con reflejos [48] y revoluciones en 3D [44]; y Oripa, un software para diseñar patrones de origami planos que devuelven su configuración plegada. Finalmente, Tess es un software para diseñar teselaciones de origami [45]. Y Origami Simulator [45], desarrollado por Ghassaei, muestra en animación el despliegue de un patrón de origami directamente en el navegador de internet.

Todas las aplicaciones anteriores simplifican el diseño de geometrías y mecanismos inspirados en el origami para ser utilizados en la fabricación de elementos para la arquitectura. Aunque son herramientas útiles, requieren numerosas operaciones de exportación e importación para poder utilizarlas en un flujo de trabajo profesional real, y este flujo de archivos puede causar

la pérdida de datos al mover el modelo de un software a otro. Algunos investigadores están trabajando para tratar de resolver parcialmente este problema mediante la creación de una extensión de archivo específica para origami. Esta innovación, que podría revolucionar el diseño de estos patrones plegados, es una extensión de archivo llamada “fold” por Demaine. Cabe anotar que en el repositorio de GitHub, esta extensión se define como “FOLD (Origami Flexible)”.

Al diseñar con origami, los arquitectos a menudo necesitan controlar las formas de manera dinámica, y no todos ellos están especializados en el uso de aplicaciones avanzadas de animación 3D. Aunque los casos de arquitectura estática son más numerosos que los de arquitectura cinética, estos últimos son los de mayor interés para este trabajo, ya que se trata de modificar las formas para alcanzar tiempos de reverberación diferentes y objetivos acústicos e inteligibilidad acústica eficientes. Más allá de las propiedades cinemáticas y mecánicas del origami utilizadas como herramientas para mejorar las funcionalidades de los proyectos, el objetivo puntual aquí es el campo del tratamiento acústico.

VI. diseño con superficies plegadas – Observaciones críticas

A partir de la literatura revisada y los datos analizados, se observa que los proyectos a pequeña escala son más comunes que aquellos de escala arquitectónica, más aún si utilizan aplicaciones acústicas de origami u otro tipo de patrones similares. Sumado a esto, en los proyectos de gran tamaño, las superficies continuas típicas propias de los diseños de origami presentan problemas en la resistencia mecánica de las juntas, el peso de las estructuras y las dimensiones de las bisagras que podrían reemplazar los pliegues. Además, los mecanismos de origami pueden tener partes robóticas móviles que son más costosas y difíciles de instalar y requieren más tiempo de diseño y mantenimiento en comparación con los proyectos estáticos. Por último, en los diseños de pequeño tamaño se pueden crear prototipos utilizando directamente los modelos físicos en lugar de pasar por simulaciones digitales y, por el contrario, para proyectos a gran escala, la precisión necesaria es mucho mayor y por tanto los modelos digitales de las superficies plegadas son necesarios. Esto dificulta el flujo de trabajo, porque para poder simular digitalmente la animación de plegado del origami, el diseñador debe lidiar con la cinemática del mecanismo específico que está tratando de perfilar [46]. Se requiere, entonces, una comprensión profunda de las teorías del origami, los modelos matemáticos y el diseño en 3D.

Como referencia se toma el proceso de diseño similar al esquematizado en la Figura 22. Este proceso seguiría generalmente una secuencia lineal de pasos, que comienza desde la idea hasta el objeto final, pasando por el boceto, el dibujo técnico —2D y el modelo 3D—

y el prototipo [47]. Sin embargo, el prototipo preliminar no considera el grosor de los paneles, circunstancia que complica el diseño y que termina posponiéndose cuando se construye uno más avanzado, preciso y rígido. Sin embargo, los prototipos tanto preliminares como avanzados no son suficientes para probar cada aspecto del proyecto, ya que el material de sus paneles puede tener una elasticidad diferente en comparación con el objeto final. Además, la capacidad del plegado rígido es difícil de verificar a través del uso exclusivo de modelos físicos: es necesario caracterizarlos y simularlos en un software acústico teniendo en cuenta el recinto en el que van a ser instalados; así, una digitalización del prototipo allí puede ayudar a hacer un análisis preciso de estos aspectos [48]. Por tanto, hay que verificar cuidadosamente el diseño, sobre todo la función para la cual debe aplicarse, sea esta un difusor o un panel; los diseños son diferentes y las estructuras puede causar que el objeto final no tenga la capacidad y la flexibilidad necesarias y presenten un plegado rígido imperfecto y colisiones pasadas por alto [49]. Así, una vez verificado el comportamiento real del prototipo avanzado, el diseñador tendría que actualizar y, eventualmente, implementar el análisis del modelo matemático o el modelo discreto desarrollado previamente; por estas razones, el proceso de diseño ya no solo es lineal [50].

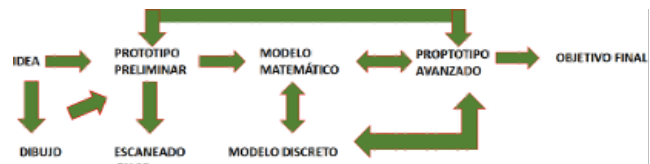


Figura 22. Ejemplo del proceso de diseño de un dispositivo creado con la técnica origami plegable [50]

A. Teselaciones de origami y modelo propuesto. El patrón de origami Miura-ori

El patrón Miura-ori, que se muestra en la Figura 23, se basa en el pliegue inverso; consiste en una serie de paralelogramos establecidos en espiga para alternar pliegues de valle y de aguas arriba en ambas direcciones. De esta manera parece simétrico con respecto a una dirección y periódico en ambas, y por tanto, es divisible fácilmente en bandas. El Miura-ori muestra un comportamiento inverso en el plano y fuera de él; de hecho, mientras está en la fase de compresión, la tracción tiene un coeficiente de Poisson negativo, y en la de flexión y torsión se vuelve positivo. Este patrón se presta fácilmente para completar el plegado y el desplegado, siendo a la vez rígido-plegable y plano-plegable. Durante la fase plana de la flexión, para mantener las caras rígidas, es suficiente adoptar la forma de paralelogramo, mientras que en el caso de las deformaciones fuera del plano, para evitar sí vienen a crear una distorsión de las caras, se inserta el llamado “pliegue neutral”, que

divide los paralelogramos en triángulos indeformables. Esta solución mejora el comportamiento local y aumenta la flexibilidad a nivel global, porque genera dos DD adicionales en cada vértice. Dada su versatilidad y simplicidad formal, el Miura-ori se presta muy bien para fines estructurales.

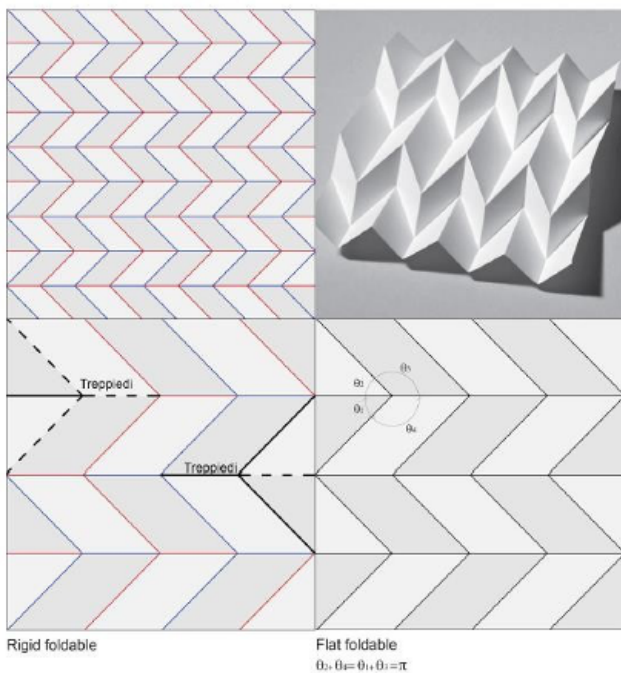


Figura 23. Patrón de origami Miura-ori [50]

VII. Conclusiones

Los resultados de la búsqueda en las bases de datos muestran un escenario prospectivo interesante, ya que las posibilidades de investigación en este campo son ilimitadas. Colombia claramente no aparece como líder de este tipo de investigaciones, señal de que le faltan más programas de pregrado y posgrado que relacionen la arquitectura con la acústica y potencialicen proyectos e investigaciones de doctorado relacionados con los dispositivos acústicos activos como una línea innovadora. Aun así, esta carencia debe asumirse como un área potencial de nuevo conocimiento; el país está viviendo transformaciones en ciencia y tecnología que abren los espacios para llenar estos vacíos y explorar nuevos horizontes. Esta investigación hace un llamado a las redes de conocimiento y a los grupos de investigación de múltiples disciplinas y de diferentes universidades para gestionar nuevas propuestas y dar un impulso a la denominada triple hélice universidad-empresa-Estado, teniendo en cuenta que la Acústica reúne a profesionales de la construcción, los arquitectos, los diseñadores, los ingenieros de sonido, los ingenieros mecánicos, los físicos y, como si fuera poco, fortalecería la ciencia de los materiales, en este caso del Instituto Tecnológico Metropolitano.

Como primera fase se investigó sobre los trabajos y las patentes registradas con el tema de los metamateriales acústicos; sin embargo, la indagación muestra un nuevo horizonte, debido a que los metamateriales estudiados aún están en fase de pruebas en los laboratorios con apenas unos cuantos proyectos aplicados a la industria. En otras palabras, el campo de investigación es muy nuevo, razón por la cual se propone ir avanzando en el tema de dispositivos más grandes y con más proyección en la actualidad como son los resonadores y paneles construidos con técnicas de algoritmos desarrollados a partir del origami. Cabe resaltar que se pretende desarrollar dispositivos acústicos denominados activos, es decir, con sistemas de control automático, ya que el aporte innovador es el manejo del dispositivo por parte del usuario para cambiar las características y objetivos acústicos de una sala o teatro.

El panorama no es fácil, ya que se requieren recursos, niveles de ensamble complejos y herramientas digitales diseñadas específicamente para el modelado del origami. Diseñar con esta técnica es difícil: no es lo mismo hacer y jugar con formas en un papel que llevarlas a complejas estructuras movibles. Se requiere mano de obra especializada que pueda construir estructuras tipo origami a escala arquitectónica. Adicionalmente, esta área de la arquitectura cinética tiene mayores costos de realización y mantenimiento que la arquitectura estática convencional.

Esta investigación plantea una amplia variedad de soluciones y necesidades en las salas y teatros donde el problema del ruido acústico sea muy sensible, al igual que el producido por los vehículos automotores. Así, se vislumbra un escenario de oportunidades que deben ser aprovechadas, con la ventaja de que los materiales también representan un reto enorme, ya que deben estar en coherencia con los sistemas de la nueva construcción de línea verde-ecológica que tenga un fuerte impacto en la salud auditiva, visual y paisajística de las ciudades.

Referencias

- [1] R. Walser, "Metamaterials: What are they? What are they good for?," ene. 2000.
- [2] "WIPO - Search International and National Patent Collections". https://patentscope.wipo.int/search/en/result.jsf?_vid=P10-L5B9XI-82878 (accessed June 7, 2019).
- [3] "Scopus - Analyze search results". <https://scopus.bibliotecaitm.elogim.com/term/analyzer.uri?sid=f92d0e0bdd5bafb137f428f41c13be35&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28acoustics++metamaterials+nanomaterials%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=53&count=7&analyzeResults=Analyze+results&txGid=16f5a0d320ad451bb028fedb0d988f15> (accessed May 16, 2019).

- [4] “Scopus - Analyze search results”. <https://scopus.bibliotecaitm.elogim.com/term/analyzer.uri?sid=39d348ee250df998cc73d949b8cddfc8&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28acoustics++materials%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=35&count=80940&analyzeResults=Analyze+results&txGid=475d8e8395612e632983b3068e786e1a> (accessed May 20, 2019).
- [5] “ScienceDirect Search Results - Keywords (materials acoustics)”. <https://sciencedirect.bibliotecaitm.elogim.com/search?qs=materials%20acoustics&years=2003%2C2004%2C2005%2C2006%2C2007%2C2008%2C2009%2C2018%2C2017%2C2016%2C2015%2C2014%2C2013%2C2012%2C2011%2C2010&articleTypes=FLA&sortBy=relevance&publicationTitles=271440&lastSelectedFace=t=publicationTitles> (accessed June 7, 2019).
- [6] “Scopus - Document search results”. <https://scopus.bibliotecaitm.elogim.com/results/results.uri?sort=plf-f&src=s&st1=acoustics++AND+materials++AND+noise&sid=353ba33aa82f014c50e026dc7896c4c4&sot=b&sdt=b&sl=50&s=TITLE-ABS-KEY%28acoustics++AND+materials++AND+noise%29&origin=searchbasic&editSaveSearch=&yearFrom=Before+1960&yearTo=Present> (accessed July 7, 2019).
- [7] “Scopus - Analyze search results”. <https://scopus.bibliotecaitm.elogim.com/term/analyzer.uri?sid=513058b33fa3cdacd83338d8f8731e8d&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28acoustics+panels+noise%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=37&count=3472&analyzeResults=Analyze+results&txGid=f0e5c2f110ccc9cbce18f68f9c383594> (accessed May 24, 2019).
- [8] “Scopus - Analyze search results”. <https://scopus.bibliotecaitm.elogim.com/term/analyzer.uri?sid=f432f78bb8622fb777103db09bfbdb0&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28Acoustics+and+panels%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=35&count=7906&analyzeResults=Analyze+results&txGid=8c9ba5666cab7dbc8b3cfd016e6f20c> (accessed May 25, 2019).
- [9] “Scopus - Document search results”. <https://scopus.bibliotecaitm.elogim.com/results/results.uri?sort=plf-f&src=s&st1=origami+acoustics&sid=33d374daffc103b360e9a3ad606af6cf&sot=b&sdt=b&sl=32&s=TITLE-ABS-KEY%28origami+acoustics%29&origin=searchbasic&editSaveSearch=&yearFrom=Before+1960&yearTo=Present> (accessed June 7, 2019).
- [10] “Scopus - Analyze search results”. <https://scopus.bibliotecaitm.elogim.com/term/analyzer.uri?sid=60d2b163e3c397db07502e7ceb2fccf0&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28origami+folded+acoustics%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=39&count=11&analyzeResults=Analyze+results&txGid=6d4b15dbd99a0625b6692527e055603d> (accessed May 13, 2019).
- [11] “Scopus - Analyze search results”. <https://scopus.bibliotecaitm.elogim.com/term/analyzer.uri?sid=c7e795144faed70b5f055b88bf062332&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28origami+panel+acoustics%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=38&count=7&analyzeResults=Analyze+results&txGid=e185430da7998338902091b86750e43a> (accessed May 14, 2019).
- [12] “Scopus - Document search results”. <https://scopus.bibliotecaitm.elogim.com/results/results.uri?sort=plf-f&src=s&st1=origami++architectural+geometry&sid=0a16d1c1f15117de1cc89234aee6d30b&sot=b&sdt=b&sl=46&s=TITLE-ABS-KEY%28origami++architectural+geometry%29&origin=searchbasic&editSaveSearch=&yearFrom=Before+1960&yearTo=Present> (accessed June 8, 2019).
- [13] “Scopus - Analyze search results”. <https://scopus.bibliotecaitm.elogim.com/term/analyzer.uri?sid=0a16d1c1f15117de1cc89234aee6d30b&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28origami++architectural+geometry%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=46&count=39&analyzeResults=Analyze+results&txGid=8de4da2290832e5ae1b2236f0c02a041> (accessed June 8, 2019).
- [14] “Scopus - Document search results”. <https://scopus.bibliotecaitm.elogim.com/results/results.uri?sort=plf-f&src=s&st1=metamaterials+acoustics&sid=715a1bca93a42908f79df5b09c9024d1&sot=b&sdt=b&sl=38&s=TITLE-ABS-KEY%28metamaterials+acoustics%29&origin=searchbasic&editSaveSearch=&yearFrom=Before+1960&yearTo=Present> (accessed June 7, 2020).
- [15] “Scopus - Analyze search results”. <https://scopus.bibliotecaitm.elogim.com/term/analyzer.uri?sid=715a1bca93a42908f79df5b09c9024d1&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28metamaterials+acoustics%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=38&count=3460&analyzeResults=Analyze+results&txGid=73d3f72662e040249175e177eee7a6df> (accessed June 7, 2020).
- [16] “Scopus - Document search results”. <https://scopus.bibliotecaitm.elogim.com/results/results.uri?sort=plf-f&src=s&st1=acoustic+metamaterials+resonator&sid=62ff9286413a9c8fd79469f1c0ca6257&sot=b&sdt=b&sl=47&s=TITLE-ABS-KEY%28acoustic+metamaterials+resonator%29&origin=searchbasic&editSaveSearch=&yearFrom=Before+1960&yearTo=Present> (accessed June 9, 2020).
- [17] “Scopus - Document search results”. <https://scopus.bibliotecaitm.elogim.com/results/results.uri?sort=plf-f&src=s&st1=metamaterials+acoustics+origami&sid=8a446aa1d280c011d6d8903c53dc060d&sot=b&sdt=b&sl=46&s=TITLE-ABS-KEY%28m>

- etamaterials+acoustics+origami%29&origin=se
archbasic&editSaveSearch=&yearFrom=Before+
1960&yearTo=Present (accessed June 6, 2020).
- [18] “Scopus - Analyze search results”. <https://scopus.biblioteca.uitm.edu.my/term/analyzer.uri?sid=8a446aa1d280c011d6d8903c53dc060d&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28metamaterials+acoustics+origami%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=46&count=25&analyzeResult.s=Analyze+results&txGid=dfce0edd4e066583197151a673a210bf> (accessed June 6, 2020).
- [19] “OMPI - Búsqueda en las colecciones de patentes nacionales e internacionales”. https://patentscope.wipo.int/search/es/result.jsf?_vid=P21-L3AN78-25698 (accessed May 15, 2019).
- [20] “WIPO - Search International and National Patent Collections”. https://patentscope.wipo.int/search/en/result.jsf?_vid=P21-L3ANF7-27516 (accessed May 16, 2021).
- [21] “WIPO - Search International and National Patent Collections”. https://patentscope.wipo.int/search/en/result.jsf?_vid=P21-L3ANJT-28555 (accessed May 20, 2019).
- [22] “WIPO - Search International and National Patent Collections”. https://patentscope.wipo.int/search/en/result.jsf?_vid=P21-L3ANMC-29031 (accessed May 21, 2019).
- [23] “WIPO - Search International and National Patent Collections”. https://patentscope.wipo.int/search/en/result.jsf?_vid=P12-L3AQ1B-59073 (accessed May 22, 2019).
- [24] M. Schenk y S. Guest, “Origami folding: A structural engineering approach”, presented at the 10th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2011, Asquigrán, Alemania, Sept. 25–30, 2011. Available <http://www2.eng.cam.ac.uk/~sdg/preprint/5OSME.pdf>.
- [25] M. Schenk, J. M. Allwood y S. D. Guest, “Cold gas-pressure folding of Miura-ori sheets”, presented at the 10th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2011, Asquigrán, Alemania, Sept. 25–30, 2011. Available: <http://www2.eng.cam.ac.uk/~sdg/preprint/MiuraForming.pdf>.
- [26] T. Tachi, “Generalization of rigid foldable quadrilateral mesh origami”, presented at the International Association for Shell and Spatial Structures (ASS) Symposium 2009, Valencia, España, Sept. 28 – Oct. 2, 2009. Available: https://iam.tugraz.at/workshop_rijeka/wp-content/uploads/2012/09/RigidFoldableQuadMeshOrigami_tachi_IASS2009.pdf.
- [27] Tachi Lab, “Software. Freeform Origami”. Available <https://origami.c.u-tokyo.ac.jp/~tachi/software/>.
- [28] E. Demaine y T. Tachi, “Origamizer: A practical algorithm for folding any polyhedron”, presented at the 33rd International Symposium of Computational Geometry, Brisbane, Australia, Jul. 4–7, 2017. <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.SoCG.2017.34>.
- [29] M. Giodice, “Modellazione parametrica e comportamento meccanico di superfici adattive in architettura: Analisi e sperimentazione”. Ph. D. dissertation, Sapienza Università di Rom, 2017. Available: <https://core.ac.uk/display/127586956?recSetID=>.
- [30] H. Buri e Y. Weinand, “ORIGAMI - Folded Plate Structures, Architecture”, presented at the 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, Japón, June 2–5, 2017.
- [31] X. Yang, “Adaptive acoustic origami”. M.S. Thesis, Universidad de Melbourne, 2017. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=RKOUUnJ6HL4&feature=share>.
- [32] Z. Y. Wei, Z. V. Guo, L. Dudte, H. Y. Liang y L. Mahadevan, “Geometric mechanics of periodic pleated origami,” *Physical Review Letters*, vol. 110, n.º. 21, 2013. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.215501>.
- [33] C. Samuelsson y B. Vestlund, “Structural folding. A parametric design method for origami architecture”. M.S. Thesis, Chalmers University of Technology, Gotemburgo, Suecia, 2015. Available: <https://odr.chalmers.se/handle/20.500.12380/222002>.
- [34] M. Thota y K. W. Wang, “Reconfigurable origami sonic barriers with tunable bandgaps for traffic noise mitigation,” *Journal of Applied Physics*, n.º 122, 2017. <https://doi.org/10.1063/1.4991026>.
- [35] E. Demaine y T. Tachi, “Origamizer: A practical algorithm for folding any polyhedron”, presented at the 33rd International Symposium of Computational Geometry, Brisbane, Australia, Jul. 4–7, 2017. <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.SoCG.2017.34>.
- [36] T. Tachi y T. C. Hull, “Self-foldability of rigid origami,” *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 9, n.º 2, Apr., 2017. <https://doi.org/10.1115/1.4035558>.
- [37] R. Resch y E. Armstrong, “The Ron Resch paper and stick film”, 1992 [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=imlMspPKfNo>.
- [38] R. Foschi, “Algorithmic modelling of folded surfaces. Analysis and design of folded surfaces in architecture and manufacturing”. Ph. D. dissertation, Alma Mater Studiorum, Universidad de Boloña, 2019. <https://doi.org/10.6092/unibo/amsdottorato/8871>.

- [39] Robert J. Lang Origami TASON, “TreeMaker” [Online]. Available: <https://langorigami.com/article/treemaker/>.
- [40] Tachi Lab, “Software. Freeform Origami” [Online]. Available: <https://origami.c.u-tokyo.ac.jp/~tachi/software/>.
- [41] E. Demaine y T. Tachi, “Origamizer: A ractical algorithm for folding any polyhedron”, presented at the 33rd International Symposium of Computational Geometry, Brisbane, Australia, Jul. 4-7, 2017. <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.SoCG.2017.34>.
- [42] P. Wang-Inverson, R. J. Lang and M. Yim (eds.), *Origami 5. Proceedings to the Fifth International Meeting of Origami Science, Mathematics and Education*, Ciudad de Nueva York, NY: AK Peters / CRC Press, 2011.
- [43] T. Tachi y T. C. Hull, “Self-foldability of rigid origami,” *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 9, n° 2, Aprl., 2017. <https://doi.org/10.1115/1.4035558>.
- [44] J. Mitani y T. Igarashi, “Interactive design of planar curved folding by reection”, presented at the 19th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, Pacific Graphics, Kaohsiung, Taiwán, Sept. 21-23. Available: <https://www.jst.go.jp/erato/igarashi/publications/001/PG2011.pdf>.
- [45] Origamisimulator.org [Online]. Available <http://apps.amandaghassaei.com/OrigamiSimulator/>.
- [46] R. Foschi, “Algorithmic modelling of folded surfaces. Analysis and design of folded surfaces in architecture and manufacturing”. Ph. D. Thesis, Alma Mater Studiorum, Universidad de Boloña, 2019. <https://doi.org/10.6092/unibo/amsdottorato/8871>.
- [47] J. M. Gattas y Z. You, “Design and digital fabrication of folded sandwich structures,” *Automation in Construction*, n° 63, pp. 79-87, March, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.002>.
- [48] G. Epps, “RoboFold and Robots.IO,” *Architectural Design*, vol. 84, n° 3, pp. 68–69, 2014. <https://doi.org/10.1002/ad.1757>.
- [49] R. Foschi, “Algorithmic modelling of folded surfaces. Analysis and design of folded surfaces in architecture and manufacturing”. P.h. D. dissertation, Alma Mater Studiorum, Universidad de Boloña, 2019. <https://doi.org/10.6092/unibo/amsdottorato/8871>.
- [50] M. Giodice, “Modellazione parametrica e comportamento meccanico di superfici adattive in architettura: Analisi e sperimentazione”. P.h. D. dissertation, Sapienza Università di Roma, 2017. <https://core.ac.uk/display/127586956?recSetID=>.