

## PONENTE

**76/85**

## TÍTULO

**Prototipo acústico adaptable. Para espacios multifuncionales**

## AUTOR

**Constanza Ipinza Olatte, Aldo Hidalgo Hermosilla**

*Universidad de Santiago. Constanza Ipinza Olatte. Arquitecta Universidad de Santiago de Chile 2010. Ha realizado estudios en flauta travesera y composición musical en la Universidad Católica de Chile 2011; Máster en Ingeniería Acústica en la Edificación y el Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Madrid, 2013; Diplomada en Arte Sonoro por la Facultad de Artes de la Universidad de Chile, 2014. Actualmente se desempeña como profesora en la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Santiago. Ha relacionado su ejercicio profesional, la investigación y el desarrollo de instalaciones artísticas con el arte sonoro, la acústica de los espacios y la arquitectura.*

*constanza.ipinza@usach.cl*

*Universidad de Santiago. Aldo Hidalgo Hermosilla. Arquitecto Universidad de Chile 1982. Ha realizado Perfeccionamiento en Teorías de la Arquitectura en la Universidad de Roma, Sapienza en 1990; Magister en Teoría e Historia del Arte, Universidad de Chile, 2001. Doctor en Filosofía mención Estética y Teoría del Arte. Universidad de Chile, 2011. Desde 1993 es académico de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Santiago y entre 2011 y 2015 ha sido director. Ha publicado en diversas revistas en Chile y el extranjero.*

*aldo.hidalgo@usach.cl*

## Prototipo acústico adaptable. Para espacios multifuncionales. Adaptive acoustic prototype. For multipurpose spaces \_Constanza Ipinza Olatte, Aldo Hidalgo Hermosilla

### METODOLOGÍA

*“Una arquitectura líquida, en vez de una arquitectura sólida, será aquella que sustituya la firmeza por la fluidez y la primacía del espacio por la primacía del tiempo” (Solá-Morales, 2001:26)*

Una antigua pregunta da origen a esta ponencia: ¿Se puede dar forma al tiempo en la arquitectura? El arquitecto Solá-Morales, en su ensayo “Arquitectura Líquida” afirma que, desde Vitruvio, la arquitectura ha sido comprendida como un saber y una técnica ligados a lo permanente. En su análisis histórico de la arquitectura, con relación a la forma del espacio construido y a los modos de uso, propone los términos sólido, viscoso y líquido como estímulo para pensar los espacios de manera más fluida y más dinámica, acordes al habitar contemporáneo. Contrapone así una alternativa a la solidez del material y al espacio estable tradicionales, cuyas condiciones y límites son fijos.

En Chile por ejemplo, los espacios dedicados a las artes, la cultura y el conocimiento, en su mayoría albergan múltiples actividades que demandan condiciones acústicas particulares, pero, a menudo el diseño de ellos solo ha respondido al uso más frecuente del espacio sin considerar las necesidades dinámicas de confort acústico de otros eventos. Uno de ellos son los espacios multifuncionales, los cuales acogen una diversidad de acontecimientos que exigen distintos calibres o afinaciones dependiendo del tiempo de reverberación, absorción y transmisión del sonido. Siguiendo esta reflexión, nuestro proyecto de Prototipo Acústico Adaptable [PAA], que estamos desarrollando desde el año pasado, busca dar respuesta a esta problemática graduando la dimensión sonora y acústica en el espacio-tiempo en escenarios de múltiples acontecimientos. Consideramos así, el sonido en su dimensión material, geométrica y temporal a través de una metodología de investigación que se aborda a través del diseño, con herramientas y procesos propios de la disciplina. El objetivo es la creación de una piel modular flexible que sea capaz de calibrar la acústica de los espacios según sus distintos usos.

#### Metodología. Investigación en Diseño.

Metodológicamente nos basamos en el modelo DRM a Design Research Methodology de la investigadora Lucienne Blessing, quien valida el oficio del diseño como un proceso sistemático y reflexivo cuyo objetivo es “la formulación y validación de modelos y teorías sobre el fenómeno del diseño, así como el desarrollo y validación de soportes fundados en estos modelos y teorías, para mejorar la práctica del diseño” (2009:9). El valor principal de la investigación, a través del diseño, es que el modelo a explorar es también el instrumento de investigación per sé, que conecta la metodología científica con la práctica empírica y creativa del diseño proyectual.

Las cuatro etapas del método la hemos aplicado de la siguiente forma: En la primera de ellas, Definición de Criterios, se establecieron modelos de referencia (situación inicial) y de impacto (situación deseada), para definir el propósito de la investigación, los criterios mensurables y las expectativas de contribución del diseño. Al revisar la bibliografía de acústica arquitectónica y del estado del arte de la acústica variable, encontramos referencias claves para nuestro análisis inicial, como el prototipo Resonant Chamber del grupo RVTR y la Universidad de Michigan, el sistema acústico AQflex de Niels Werner y las estrategias de modificación espacial (volumen y materialidad) aplicadas en el Centro Cultural Nave de Smiljan Radic, la Sala de Conciertos Bing de Ennead arquitectos y el Espacio de Proyección del edificio IRCAM de Renzo Piano. Esta información nos permitió cotejar influencias, evaluar posibilidades materiales y analizar otras estrategias acústicas dinámicas, con el fin de robustecer el marco teórico de la propuesta.

En la segunda etapa, Estudio Descriptivo I, teniendo claridad de los objetivos y el foco de la investigación, se realizó el análisis empírico de factores que direccionan el diseño hacia un dispositivo acústico flexible. Para ello, se experimentó con geometrías plegadas que evidenciaron dos configuraciones de apertura y cerramiento para modificar la difusión del sonido y la absorción acústica. En esta etapa se proyectó un sistema flexible capaz de modificar sustancialmente las condiciones impuestas. Sin embargo, el problema que observamos fue la escasa posibilidad de ocultar las superficies y, por ende, la poca variabilidad de la absorción sonora.

Estas configuraciones nos condujeron a estudiar sistemas cinéticos de apertura y cerramiento tridimensional creados por Ron Resch en sus dispositivos geométricos de secciones articuladas. Mediante el desplazamiento y la rotación de estos volúmenes se modifica drásticamente la geometría, pues expone u oculta las superficies flexibilizando la respuesta acústica

del dispositivo. Nuestra decisión fue utilizar uno de estos sistemas poliédricos articulados como base del diseño del prototipo.

En la tercera etapa, Estudio Prescriptivo, se buscó optimizar el diseño en sí. Ya teníamos una base empírica de referencia y surgieron otros desafíos correspondientes a decisiones técnicas y de factibilidad constructiva. Se evaluó la dimensión del módulo, su eficacia estructural, la fijación al muro, el espesor de los materiales, los grados de libertad de la torsión con que opera el mecanismo y la bisagra necesaria para articular los volúmenes. La materialidad de esta última permitió definir el dispositivo en tres posiciones de variación acústica para su posterior evaluación.

Finalmente, en la última etapa correspondiente al Estudio Descriptivo II, se validó el prototipo a través de mediciones acústicas que permitieron aproximarnos a las primeras hipótesis. La medición in situ, apoyado por un laboratorio especializado de la Universidad de Santiago, consistió en evaluar la influencia del prototipo en la variación del tiempo de reverberación en las tres configuraciones declaradas. No obstante, debido al tamaño de la muestra (0.64 m<sup>2</sup>), la medición realizada simuló una aproximación del comportamiento acústico del prototipo. Comparando el tiempo de reverberación en las diversas posiciones, se observaron variaciones acústicas en relación a los rangos de frecuencias medidos en tercios de octava.

### Proyecciones

Finalmente, queremos comentar que la investigación por diseño nos ha permitido concebir y sistematizar un prototipo a través de esta metodología (no lineal), que requiere de iteraciones para optimizar su factibilidad técnica. Los resultados que hemos presentado son aquellos obtenidos durante el año 2016. Ahora, estamos trabajando en aspectos no abordados anteriormente, como son la mecanización y el sistema de anclaje del módulo, que nos ha devuelto a la etapa del Estudio Prescriptivo en vista de su mejora y posterior validación.

Además, la respuesta acústica obtenida señala que, al replicar el módulo se podrían obtener variaciones importantes en el tiempo de reverberación y en las diversas interacciones entre sonido y usuario. No obstante, queda aún por evaluar una muestra representativa de mayor tamaño, para obtener coeficientes de absorción sonora y ángulos de reflexión en condiciones de laboratorio.

Proyectándonos, la situación deseada de facilitar la experiencia sonora confortable en cada uno de los escenarios posibles en salas polivalentes culturales y educativas, significaría adaptar el espacio a la situación habitada y no al contrario, donde son las personas quienes deben adaptarse a los recintos.

## TEXTO DE REFERENCIA (Publicado en rita\_07)

### Palabras clave

Arquitectura líquida, acústica variable, prototipo, Ron Resch, investigación, diseño.

Liquid architecture, variable acoustics, prototype, Ron Resch, research, design.

### Resumen:

Este artículo presenta la primera etapa de la investigación "Prototipo Acústico Adaptable –para espacios multifuncionales–", desarrollado en la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Santiago de Chile. El objetivo de ella ha sido diseñar y construir un dispositivo de geometría articulada que permita calibrar la acústica del espacio, en función de las necesidades de recepción de los usuarios.

Se revisa la base teórica de la propuesta a partir del concepto de arquitectura líquida, que en su fundamentación pretende incorporar la dimensión dinámica del tiempo en la condición material de los espacios. Asimismo, se examina el término acústica variable, que aborda técnicamente la versatilidad del acontecimiento sonoro en un despliegue de técnicas activas o pasivas.

Luego se presenta la metodología a través del diseño, basada en el modelo propuesto por Lucien Blessing, que formula un proceso desde la definición de los criterios, hasta la concreción formal del diseño en la construcción del modelo.

Finalmente, se presentan los parámetros de validación del diseño que apuntan a la prosecución de su desarrollo en una segunda etapa. En ella, el objetivo será optimizar el modelo y mejorar las transformaciones del ambiente acústico material, espacial y temporal, como se ha propuesto.

This paper present the first stage of research "Adaptative Acoustic Prototype –for multifunctional spaces–", developed at the School of Architecture of de University of Santiago de Chile. The main has been to design and build a device of articulated geometry has been developed that allows calibrate the acoustics of the space, depending on users reception needs.

The theoretical basis of the proposal is revides from the concept of liquid architecture, which in its foundation seeks to incorporate dynamic dimension of time in material condition of spaces. We also examine the variable acoustic term, which deals technically with the verality of sound event in a display of active or passive techniques.

Then the research through design metodology is presented, based on the model proposed by Lucien Blessing, which formulates a process from definition of the research criteria until the design and the formal concretion in model construction.

Finally, we present the validation design parameters that aim at the continuation of development in a second stage. The objetive will be to model optimize and to improve the transformations of material, spatial and temporal acoustic enviroment, as it has been proposed.

“Los fluidos, por así decirlo, no se fijan al espacio ni se atan al tiempo.

En tanto los sólidos tienen una clara dimensión espacial pero neutralizan el impacto –y disminuyen la significación– del tiempo”.

Zygmunt Bauman, 2000

### Contexto: hacia la liquidez de la arquitectura

En su ensayo *Arquitectura líquida*, Ignasi de Solà-Morales afirma que la herencia vitruviana de la arquitectura clásica, en su condición material delimitadora del espacio, durante veinticinco siglos ha considerado la disciplina como un saber y una técnica ligados a la permanencia <sup>1</sup>. En efecto, el concepto de arquitectura, comprendido como el soporte físico y material de un sistema de acontecimientos múltiples y diversos, ha respondido tradicionalmente a la construcción del espacio habitado desde esa perspectiva de condiciones permanentes.

Esta realidad, la de la *firmitas* –firmeza– es confrontada en el texto de Solà-Morales con el habitar contemporáneo en donde las experiencias múltiples y los procesos en constante transformación no se abordan ya desde una arquitectura de límites permanentes, sino adaptables. Entonces, se pregunta este autor: ¿Es posible pensar una arquitectura inestable y configuradora del cambio, enfrentada a la contingencia cotidiana en la relación espacio, tiempo y evento?

Solà-Morales expone su reflexión bajo tres escenarios de la situación histórica de la arquitectura utilizando para su definición los términos sólido, viscoso y líquido, para contraponerlos a la tradición vitruviana –sólida– del espacio firme y estable, cuyas condiciones materiales no cambian. Esta realidad más contemporánea y fluida –líquida– invita a pensar la forma construida desde ámbitos de mutabilidad y multiplicidad capaces de acoger en una misma plataforma una diversidad de experiencias sin establecer necesariamente una jerarquía de usos [1]. Según este arquitecto, “Una arquitectura líquida, en vez de una arquitectura sólida, será aquella que sustituya la firmeza por la fluidez y la primacía del espacio por la primacía del tiempo. (...) ya no podemos pensar en recintos firmes, establecidos por materiales duraderos sino en formas fluidas, cambiantes, capaces de incorporar, de hacer físicamente cuerpo no con lo estable sino con lo cambiante, no buscando una definición fija y permanente de un espacio sino dando forma física al tiempo” <sup>2</sup>.

Por otra parte, Bernhard Tschumi en sus transcripciones arquitectónicas de Manhattan <sup>3</sup> ya sugería la necesidad de una versatilidad espacial de la arquitectura contemporánea a partir de la noción del evento como superación de la idea de permanencia, denunciando el problema de concebir el programa arquitectónico en términos de funcionalidad y no de acontecimientos. Plantea, al mismo tiempo, que considerar el concepto de “movimiento” en la génesis del proyecto iría en contra de una definición estática de la arquitectura y, por lo tanto, más cercana a la realidad existente.

Actualmente, 15 años después de las reflexiones que hemos mencionado, nos encontramos en un momento de transición, que probablemente en un futuro nos lleve a un cambio de paradigma hacia nuevas arquitecturas responsivas capaces de difuminar los límites del espacio construido. Por ahora, aún no existen edificios que representen una arquitectura líquida por definición, sin embargo, hace años que se incorporan estrategias dinámicas que permiten afrontar la temporalidad del acontecimiento desde la formalidad material de los proyectos, como la primera fachada dinámica de Jean Nouvel para el manejo de la luz en el Museo del Mundo Árabe en París, el uso de mecanismos cinéticos de los arquitectos Olson Kundig para reconfigurar espacios o la utilización de microalgas en la primera fachada bioreactiva de la casa BIQ, en Hamburgo, para generar sombras dinámicas y energía por biomasa en su interior.

### La investigación exploratoria

La investigación que hemos desarrollado hasta el momento es aplicada y enfrenta la problemática de la rigidez material de la arquitectura en relación a la dimensión sonora, de condición intangible, inaprehensible y mutable en el espacio-tiempo.

El espacio percibido desde esta dimensión, como “esfera acústica” <sup>4</sup>, encuentra su concreción en una cantidad importante de parámetros que condicionan la experiencia sonora del sujeto tanto desde ámbitos específicos de la arquitectura como de otros externos. En el primer caso, en la dimensión del espacio, en su forma y en sus materiales. En el otro, en la psicología, la fisiología y el contexto cultural, es decir, en una integración entre formalidad arquitectónica y sujeto sensitivo.

Tradicionalmente los proyectos acústicos que intervienen en la “esfera acústica” reducen los posibles escenarios sonoros a una solución material y espacial, específica para cada recinto, que no considera las diferencias acústicas que se podrían requerir en un determinado momento.

En Chile, por ejemplo, los espacios dedicados a las artes, la cultura y el conocimiento, albergan una diversidad de actividades que demandan distintas condiciones acústicas según la especificidad de cada una de ellas. A menudo, el diseño de estos es-

pacios multifuncionales, sobre todo los teatros, resuelven la acústica del uso del espacio “más relevante” sin tomar en cuenta los requerimientos de los otros eventos que intervienen en el espacio arquitectónico.

El PAA –Prototipo Acústico Adaptable– que estamos desarrollando en la investigación considera esta premisa como punto de partida. Su relación con el sonido es matérica, geométrica y temporal, a través de una piel modular flexible que se configura y se replica en los muros de un recinto según los usos requeridos. El propósito de incorporar este dispositivo es modificar los espacios y su acústica como respuesta a las necesidades de adaptación entre la emisión del sonido y la escucha de las personas, cambiando la reverberación y la difusión del sonido según el evento. Así, el espacio concebido se convierte en un instrumento musical afinable que genera “esferas acústicas” para cada momento.

### Acústica variable

Wallace Sabine's (1868-1919) fue un físico experimental cuya notoriedad se debe a su contribución en el campo de la acústica arquitectónica. Su investigación se centró en la relación entre materia y espacio e ideó una fórmula matemática capaz de calcular el tiempo de reverberación de un recinto, es decir, la persistencia temporal del sonido en relación al volumen y las propiedades de absorción de los materiales interiores utilizados.

La fórmula de Sabine, para el cálculo del tiempo de reverberación, solo considera las características materiales del espacio, en donde la cualidad reverberante de un recinto depende directamente de su volumen e inversamente a la absorción de los revestimientos interiores.

$$T_{rev} = \frac{0,161 V}{\sum_i S_i \alpha_i} \text{ (s)}$$

Donde:

$V$  = volumen del recinto ( $m^3$ )

$S_i$  = superficie de cada revestimiento interior ( $m^2$ )

$\alpha_i$  = absorción de cada material (sabine)

A partir de la contribución de este científico, en el campo de la acústica se han definido criterios ideales de tiempo de reverberación según los programas de uso arquitectónico de cada recinto [2]. Para lograr un resultado adecuado y confortable de los criterios recomendados, el diseño del tratamiento acústico generalmente es estático y controla un campo limitado de usos.

No obstante, existe una forma de abordar técnicamente una acústica flexible capaz de conseguir cierto grado de versatilidad en los espacios, la que se conoce formalmente como “Acústica Variable” y que permite acondicionar una cantidad específica de actividades satisfaciendo la percepción y el confort ambiental de los usuarios ante diversos escenarios posibles.

En la actualidad existen dos aproximaciones técnicas a la acústica variable de un recinto, que consisten en la técnica activa y la técnica pasiva. La acústica variable activa se basa en el uso de tecnologías para el tratamiento acústico de los recintos, como los sistemas electroacústicos de reverberación asistida, que ofrecen versatilidad en el control acústico de la sala a través de procedimientos de amplificación controlada en tiempo real y que han sido utilizados en Chile en espacios como el Teatro Municipal de Las Condes o la sala multiteatro del Parque Cultural de Valparaíso. Sin embargo, no responden al espacio arquitectónico desde la materialidad y la geometría, presentando algunos inconvenientes como la pérdida del sonido natural y la necesidad de personal especializado permanente para su funcionamiento.

Por otro lado, con la técnica pasiva de la acústica variable, es posible modificar el volumen y la materialidad de los recintos a través del uso de múltiples estrategias arquitectónicas, como la consideración de tabiques móviles, aperturas y cerramientos de cavidades reverberantes o la aplicación de paneles colgantes que varían el volumen de la sala. Algunos ejemplos son el proyecto de investigación aplicada *Resonant Chamber* de la Escuela de Arquitectura de Taubman en Michigan y el grupo RVTR, el cual consiste en un cielo responsivo de geometría dinámica que varía según la intensidad sonora del espacio [3], o los productos de la línea Flexac de Niels Werner, que logran ajustar la reverberación en bajas frecuencias de salas de conciertos para música popular mediante el uso de resonadores neumáticos suspendidos en el cielo [4].

La modificación del espacio también ha sido una estrategia muy utilizada en proyectos de acústica variable pasiva, como el uso de sillas absorbentes telescópicas con capacidad de guardado, que podrían variar tanto el volumen de la sala como la absorción añadida al momento de desplegarse. Un caso reciente, que considera la flexibilidad del espacio a través de estrategias arquitectónicas que influyen en el comportamiento acústico, es el Centro Cultural Nave diseñado por el arquitecto Smiljan Radic para las artes escénicas y experimentales en la ciudad de Santiago de Chile. Este edificio cuenta con un espacio principal conocido como la “sala negra”, que integra graderías retráctiles para adaptar el recinto a una diversidad de aconteci-

mientos posibles de suceder. Asimismo, con una operación de ampliación de esta sala se posibilita la integración de la “sala blanca”, destinada a la danza específicamente, a través de la apertura de un portón corredero que amplía el recinto en 65 m<sup>2</sup>, modificando la percepción espacial, visual y acústica del recinto.

Así también, la “sala de conciertos Bing”, diseñada por la firma de arquitectos Ennead para el Departamento de Música de la Universidad de Stanford, integra dos estrategias de acústica variable que transforman el espacio. La primera, en el perímetro de la sala a través del uso de cortinas móviles que cambian las condiciones de absorción del recinto y, la segunda, con la variación geométrica del escenario mediante seis plataformas móviles que le otorgan versatilidad a las situaciones de conciertos que varían desde la música clásica, el jazz, la música experimental, popular y electro acústica.

Por último, uno de los referentes más antiguos e interesantes que combinan la acústica pasiva de los recintos con un sistema mecánico y de configuración digital que modifica forma, volumen y superficie, es el *Espace du projection* del IRCAM de París diseñado por el arquitecto Renzo Piano (1978), que a través de prismas triangulares giratorios de superficie absorbente, reflectante y difusora, conocidos en módulos de 3 como *Periactos*, regulan la esfera sonora del recinto desde 0,4 segundos a 4 segundos de tiempo de reverberación. Así también, la sala puede cambiar la altura del cielo entre 1,5 m y 10,5 m y generar subespacios con cortinas *roller* absorbentes, lo que le permite usarse como sala de concierto, estudio de grabación o espacio de experimentación acústica según las necesidades [5].

### Metodología. Investigación en Diseño

Considerando lo anterior, y con el objetivo de experimentar una arquitectura dúctil en función de las posibilidades que entrega la acústica variable pasiva, este proyecto se propuso investigar “a través” del diseño un prototipo adaptable y flexible que permitiera dar respuesta a las exigencias sonoras y dinámicas de los espacios multipropósito.

La naturaleza exploratoria y constructiva de esta investigación busca desarrollar conocimientos teóricos, métodos e instrumentos que se cruzan, trasladan y verifican iterativamente. Nigel Cross, investigador en diseño, estipula que el método científico se basa en el análisis y la resolución de problemas de aquello que existe, mientras que el método de diseño es un patrón de comportamiento utilizado en la invención de cosas de valor que aún no existen<sup>5</sup>. El valor principal de la investigación “a través” del diseño es que el modelo que se explora es además el instrumento de investigación *per sé* que conecta el rigor de la metodología científica con la práctica del diseño proyectual.

La metodología utilizada en este caso se basó en el modelo propuesto por la investigadora Lucienne Blessing DRM –*Design Research Methodology*<sup>6</sup>. Organizado en cuatro etapas, este método permite el desarrollo de soportes para el diseño enfocados en la “medición” y definición de criterios cuantificables, las “influencias” que aumentan la comprensión del diseño, los “métodos” para elaborar una teoría de impacto o modelo de referencia y las “aplicaciones” para evaluar su contribución [6].

En la primera etapa denominada “Definición de Criterios”, se identifican los objetivos del proyecto y se establecen las condiciones –mensurables– que contribuyen en el desarrollo del diseño a partir de aspectos específicos y posibles de validar en la etapa de aplicación. Teoría y práctica no están separadas en el proceso e integran los conocimientos científicos de la acústica, los aspectos teóricos de la arquitectura y la técnica de un hacer-pensar propio de la disciplina. El objetivo fue desarrollar un prototipo de piel acústica modular adaptable –planar-plegable en un principio– que, replicado en el espacio, permitiera variar la sonoridad del recinto a partir de un conjunto preestablecido de configuraciones.

En el Estudio Descriptivo I, se observa y analizan las posibilidades formales que nos acercarán al uso dinámico buscado del cual emerge la pregunta sobre ¿cuáles son los parámetros acústicos y de diseño posibles para generar una piel flexible? Inicialmente, se revisó el estado del arte de la acústica variable así como las geometrías asociadas a la física del sonido. Esto condujo a la exploración de plegados que aportaban al menos dos configuraciones, de apertura y cerramiento en su geometría, proyectando paralelamente las posibilidades acústicas de los modelos en relación a los ángulos de incidencia del sonido, su difusión y el tiempo de reverberación variable que se requería a partir del dinamismo de las superficies, que cambiaban sus características técnicas y geométricas [7].

En esta etapa se intentaba encontrar un sistema flexible capaz de modificar sustancialmente las condiciones que nos habíamos autoimpuesto.

El problema que presentaron la mayoría de los plegados fue principalmente una limitada posibilidad de ocultamiento de las superficies y, en consecuencia, una escasa variación de la absorción sonora del módulo.

Ron Resch (1965), matemático, artista y pionero en la investigación del plegado rígido, también indagó sistemas cinéticos de aperturas y cerramientos tridimensionales. Estas exploraciones patentadas como “Dispositivos geométricos de secciones

articuladas relativamente móviles<sup>7</sup>; revelaron oportunidades de desarrollo formal del proyecto a través de un sistema poliédrico articulado compuesto por 16 paralelepípedos oblicuos, que varían su condición geométrica mediante el desplazamiento y la rotación de los volúmenes interconectados [8].

Regularmente, en una investigación se trasladan conocimientos de otros campos que se reinterpretan para generar cruces entre diversas disciplinas, en este caso el arte, la matemática y la acústica. Descubrir este sistema de exploración geométrica presentó nuevas posibilidades no consideradas en la etapa anterior, donde la hipótesis consistía en diseñar una piel planar-plegable para cumplir con la exigencia de flexibilidad de la esfera acústica. El sistema articulado de Ron Resch permite variar drásticamente la geometría del modelo con movimientos de apertura y cerramiento dinámico, que evidencia una flexibilidad en la exhibición u ocultamiento de las superficies, así como la posibilidad de establecer configuraciones o posiciones específicas para la proyección en su uso.

En el Estudio Prescriptivo, se concreta materialmente la propuesta del prototipo y emergen los desafíos que corresponden a las decisiones sobre los materiales que poseen potencial acústico, el mecanismo y la estructura que lo soporta. Además, el modelo demanda una factibilidad constructiva que tiene como pie forzado ser de bajo costo, debido a las exigencias económicas, que significa acondicionar acústicamente un espacio y nuestro espíritu por democratizarlo.

En la torsión o articulación del modelo surgen los desafíos propios del sistema; el espesor del revestimiento, los grados de libertad con que opera el mecanismo, la bisagra que lo articula y las configuraciones capaces de enfrentar nuestro objetivo, una acústica variable [9].

La bisagra es la articulación que unifica el sistema completo y permite la variación tridimensional, sus características consisten en que debe ser resistente, muy delgada y rotar prácticamente 180° para cumplir con los requerimientos del sistema, lo que se resolvió con exploraciones de otros materiales y con construcciones iterativas en escala 1:1. Finalmente, la resolución de la bisagra se solucionó con una malla textil de poliéster cubierta con pvc, de 1 mm de espesor que posee una alta resistencia al desgarro y la rotura [10].

Las dimensiones del prototipo, 120 cm de alto por 80 cm de ancho y una profundidad de 15 cm, dan forma a un módulo replicable, que posee 3 posiciones de aperturas y cerramientos que facilitan el comportamiento acústico flexible [11]. En primer lugar, la construcción material se completa con el prototipado de la exoestructura en MDF cortado en la máquina router CNC, que es articulada por la bisagra textil de pvc en 24 uniones. En segundo lugar, los revestimientos de cartón corrugado doble se componen de caras lisas y caras perforadas recortadas en máquinas de corte láser, donde las caras superiores e inferiores están perforadas al 10% como un resonador múltiple de cavidad<sup>8</sup>. Además, las perforaciones de estas caras son de distinto diámetro para absorber un rango de frecuencias más amplio, estrategia que se potencia con la aplicación de fibra de poliéster al interior de cada poliedro. Igualmente, los revestimientos laterales lisos de cartón corrugado aparecen en el movimiento de apertura y rotación del prototipo, aportando a la distribución espacial y temporal de las ondas acústicas, así como a la reducción de posibles coloraciones, ecos flotantes y focalizaciones sonoras [12].

En la última etapa de la metodología, correspondiente al Estudio Descriptivo II, se validó el prototipo a través de mediciones acústicas que permitieron comprobar las hipótesis desarrolladas en la etapa de definición de criterios. En colaboración con el laboratorio de acústica del Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile, se realizó el ensayo acústico que consistió en evaluar la influencia del prototipo en la variación del tiempo de reverberación en relación a las configuraciones declaradas.

Para realizar el método de ensayo se seleccionaron, dentro de la sala reverberante, tres puntos de ubicación para la fuente sonora omnidireccional y tres para el micrófono de medición, obteniendo en cada posición del micrófono el tiempo de reverberación T20 en las bandas de tercio de octava comprendidas entre 125 Hz y 4000 Hz. Este método se empleó para medir y comparar el tiempo de reverberación del prototipo en cada posición diseñada –CONF01-CONF02-CONF03–, así como las condiciones iniciales de la sala sin la muestra en su interior –SALA VACÍA [13].

## Resultados

Debido al tamaño de la muestra –0,64 m<sup>2</sup>–, la medición realizada consistió en una aproximación al comportamiento acústico del prototipo basado en las diferencias del tiempo de reverberación en sus diversas posiciones. Los resultados obtenidos arrojaron indicios importantes para continuar con el desarrollo de la investigación y el diseño, revelando diferencias acústicas en las 3 posiciones del modelo en relación a los rangos de frecuencias medidos en tercios de octava.

Como se observa en la tabla de resultados [14], el prototipo presenta una mayor absorción de frecuencias bajas en su configuración 1 cerrada o inicial –CONF01–, que se comporta como un resonador múltiple de cavidad selectivo entre las frecuencias

graves de 250 Hz y 315 Hz. Además, en la configuración 3 –CONF03–, surge un resultado que no esperábamos a partir de los 500 Hz, donde el prototipo en su torsión cerrada se vuelve más absorbente en altas frecuencias, lo que suponemos se deba a la aparición de las caras absorbentes posteriores del elemento.

## Proyecciones

El fenómeno del sonido en la arquitectura es una experiencia que evidencia la simultaneidad de los acontecimientos como una realidad dinámica que se desarrolla en el tiempo y que adquiere forma en el espacio. El acontecimiento sonoro no es permanente, incluso cambia sin una intención específica en su uso cotidiano, pero es en la escucha cuando aparece el espacio construido como un facilitador, o no, del mensaje oral, musical e incluso en el silencio.

La investigación, “a través” del diseño que se ha desarrollado, nos ha permitido sistematizar reflexiva y analíticamente el desarrollo del prototipo con resultados emergentes que apuntan hacia su prosecución en vista de su optimización. A partir de los conceptos de la teoría de arquitectura líquida, dúctil actualmente, se fundamentaron los requerimientos técnicos y de diseño hacia la proyección de un espacio construido con límites acústicos flexibles.

La respuesta acústica obtenida en los ensayos advierte que, al replicar el modelo en lugares específicos, se podrían obtener variaciones importantes en el tiempo de reverberación de los recintos, así como en las diversas interacciones entre sonido y usuario. Es decir, la instalación y despliegue del prototipo en un espacio podría conseguir que los recintos se pudiesen recalibrar en función de los usos que en cada caso se requieran, puesto que el prototipo responde dinámicamente en todo el rango de frecuencias audibles, según la configuración adoptada en su cerramiento, apertura o torsión.

No obstante, aún se deben resolver problemas específicos relativos a la factibilidad constructiva. Es necesario revisar el tipo de materiales utilizados y la aplicación del sistema mecánico de anclaje en los muros, el que exige un movimiento simultáneo con grados de libertad en las tres coordenadas cartesianas (x,y,z). Incluso, se podría llegar a integrar una tecnología contemporánea más sofisticada para controlar esa adaptabilidad por medio de un sistema motorizado.

En proyección, las salas multipropósito podrían facilitar una experiencia sonora confortable, única y controlada en un despliegue de usos diversos como la música popular, la música clásica, el teatro o el discurso. De igual modo, los espacios para la enseñanza podrían configurarse con relación a la cantidad de alumnos y sus condiciones auditivas. Es decir, se podría adaptar el espacio a la situación humana y no al contrario, donde es el sujeto quien debe adaptarse a las condiciones de él.

## Notas

<sup>1</sup> SOLA-MORALES, Ignasi. “Arquitectura Líquida”. *DC. Revista crítica arquitectónica*, nº 5-6, 2001, p. 25.

<sup>2</sup> SOLA-MORALES, Ignasi. “Arquitectura Líquida”. *DC. Revista crítica arquitectónica*, nº 5-6, 2001, p. 26.

<sup>3</sup> TSCHUMI, Bernard. *The Manhattan transcripts*. Londres: Academy Group LTD, 1994, pp 7-12.

<sup>4</sup> THÜN, Geoffrey. et al. “Soundspheres: Resonant Chamber”. *Leonardo: The Journal of the International Society of the Arts, Sciences and Technology*, nº 4, vol. 5, 2012

<sup>5</sup> CROSS, Nigel. Designerly ways of knowing: design discipline versus design science. *Design Issues*, nº 3, 2001, pp. 49–55.

<sup>6</sup> Blessing, Lucien. DRM: A Design Research Methodology. *Konstruktionstechnik Und Entwicklungsmethodik*, 2004. Recuperado el 22 de enero de 2016 de: [http://www.tu-berlin.de/fileadmin/fg89/PDFs/Forschung/Flyer\\_Blessing\\_en.pdf](http://www.tu-berlin.de/fileadmin/fg89/PDFs/Forschung/Flyer_Blessing_en.pdf)

<sup>7</sup> Resch, Ron. Patente N° US3201894 A. Highway. *United States Patent Office*, 1965.

<sup>8</sup> Los resonadores múltiples de cavidad son absorbentes selectivos acústicos usados para el tratamiento de frecuencias inferiores a 500 Hz (medias y bajas). Consisten en placas perforadas separadas del muro, que al considerar material absorbente en el interior de la cavidad, permiten obtener una curva de absorción menos selectiva a lo largo del rango de frecuencias audibles.

## Bibliografía

BLESSING, Lucien. *DRM: A Design Research Methodology. Konstruktionstechnik und Entwicklungsmethodik*. Recuperado el 22 de enero de 2016: [http://www.tu-berlin.de/fileadmin/fg89/PDFs/Forschung/Flyer\\_Blessing\\_en.pdf](http://www.tu-berlin.de/fileadmin/fg89/PDFs/Forschung/Flyer_Blessing_en.pdf)

CARRION, Antoni. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Editorial UPC, 1994.

CROSS, Nigel. “Designerly ways of knowing: design discipline versus design science”. *Design Issues*, vol. 17, nº 3, 2001.

RESCH, Ron; AMSTRONG, Elmer. *The Ron Resch Paper an Stick Film* (video compilatorio de trabajos desde 1960 a 1966), 1992. Recuperado el 22 de enero de 2016: <https://vimeo.com/36122966>

SOLA-MORALES, Ignasi de. “Arquitectura Líquida”, *DC. Revista crítica arquitectónica*, nº 5-6, 2001.

THÜN, G.et al. “The Agency of Responsive Envelopes: Interaction, Politics and Interconnected Systems”. *International Journal of Architectural Computing (IJAC)*. Publicación especial: Architectural Robotics, nº 3, Vol 10, 2012.

THÜN, G. Et al. “Soundspheres: Resonant Chamber”. *Leonardo Journal of the international Society for the Arts, Sciences and technology*, nº 4, Vol. 45, MIT Press, 2012.

TSCHUMI, B. *The Manhattan transcripts*. Londres: Academy Editions, 1994.

WERNER, Niels Et.al. "Variable low-frequency absorber for multipurpose concert halls", *Forum Acusticum*, nº 616, 2012.

#### **Pies de foto**

[1] Cuadro comparativo de las situaciones de la arquitectura. Fuente: Ignasi De Solà-Morales. "Arquitectura líquida", 2001.

[2] Cuadro comparativo tiempo de reverberación diversas actividades. Fuente: Antoni Carrión, *Diseño Acústico de espacios arquitectónicos*, 1998.

[3] Prototipo Resonant Chamber. Fuente: RVTR – Universidad de Michigan, 2012.

[4] Sistema AQflex Niels Werner. Fuente: Adelman-Larsen, 2016.

[5] "Espace de Projection" IRCAM de Paris. Fuente: Delamary, 2005.

[6] DRM, Metodología de Investigación en Diseño. Fuente: Lucien Blessing, DRM: A Design Research Methodology. Konstruktionstechnik Und Entwicklungsmethodik, 2004.

[7] Exploraciones en papel plegado. Elaboración propia, 2016.

[8] Modelo sistemas polédricos Ron Resch. Elaboración propia, 2016.

[9] Estructura del prototipo escala 1:1. Configuración 1 y 3. Elaboración propia, 2016.

[10] Prototipo escala 1:1. Posibilidades acústicas configuración 1-2-3. Elaboración propia, 2016.

[11] Diagrama despiece constructivo prototipo módulo de 4 poliedros. Elaboración propia, 2016.

[12] Prototipo Acústico Configuración 03. Elaboración propia, 2016.

[13] Medición Acústica Prototipo. Elaboración propia, 2017.

[14] Comparación del tiempo de reverberación obtenido en las 3 configuraciones del prototipo en una sala reverberante. Elaboración propia, 2017.

Situaciones	Condiciones materiales	Categorías
Sólido	Firmeza	Espacio
Viscoso	Ductilidad	Proceso
Líquido	fluidez	Tiempo

[1]

Tipo de sala	Tiempo de reverberación recomendado Trev (seg.)
Estudio de radio	0.2 - 0.4
Sala de clases	0.6 - 0.8
Auditorio - sala de conferencias	0.7 - 1.0
Teatro de ópera	1.2 - 1.5
Sala conciertos música de cámara	1.3 - 1.7
Sala conciertos música sinfónica	1.8 - 2.0

[2]



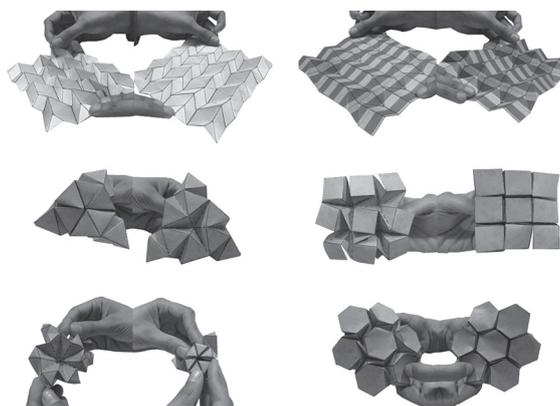
[3]



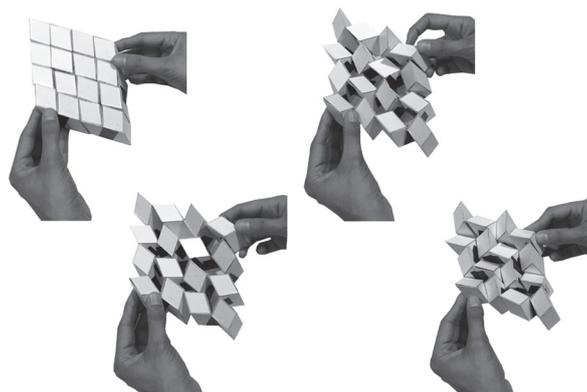
[4]



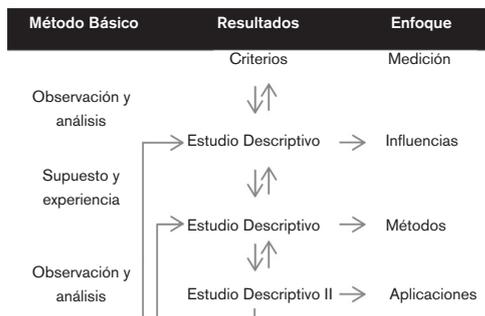
[5]



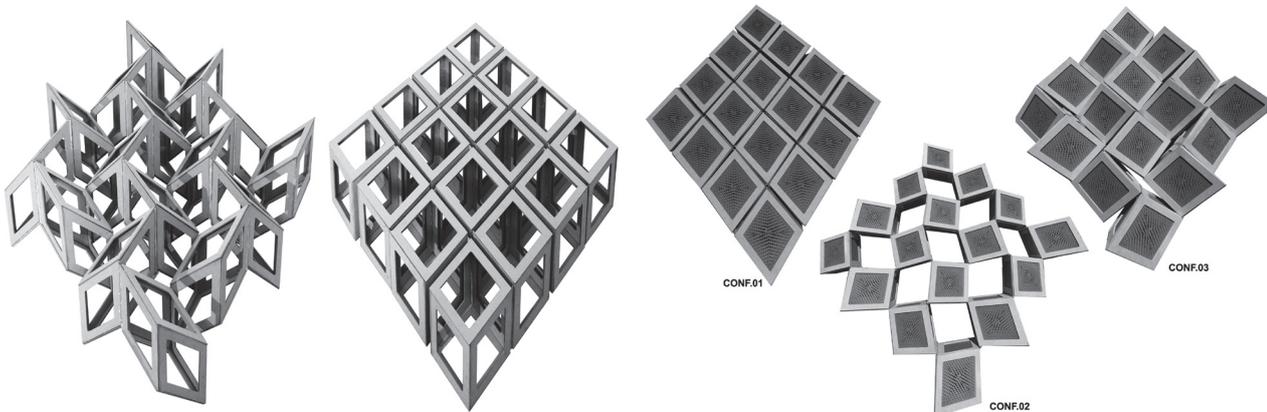
[7]



[8]

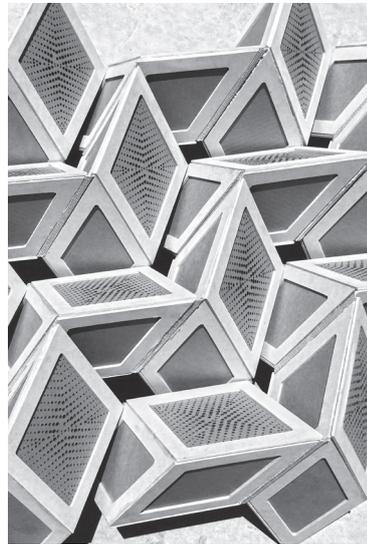
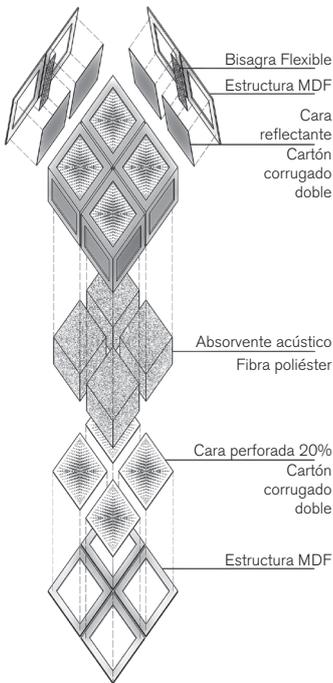


[6]



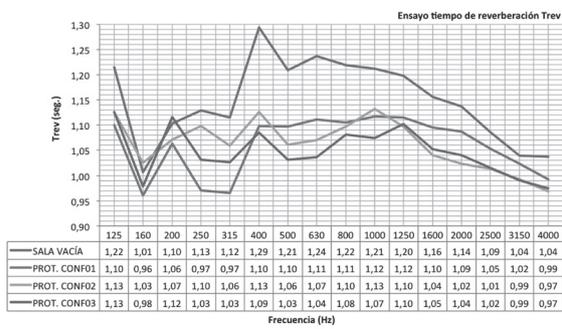
[9]

[10]



[12]

[11]



[14]



[13]