

Evaluación de ventanas acústicas con ventilación

Evaluation of acoustic windows with ventilation

Avaliação de janelas acústicas com ventilação

Aarón Manuel Salas Cortés¹

¹ Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco CDMX, México. <https://orcid.org/0009-0002-2427-720X>

Correo electrónico: amsc-77@hotmail.com

Resumen

La contaminación acústica en las ciudades se ha intensificado debido al ruido provocado por el tráfico o la construcción, afectando directamente a las edificaciones y a la calidad de vida. La envolvente arquitectónica cumple un papel esencial como barrera frente al ruido; sin embargo, la incorporación de vanos que son ocupados por ventanas para poder proporcionar ventilación natural e iluminación compromete su capacidad de aislamiento sonoro. Incluso cerradas, las ventanas no alcanzan los niveles de atenuación de un muro sólido, y al abrirse, la transmisión de ruido se incrementa de manera significativa. Ante esta problemática, se han desarrollado distintas soluciones de ventanas acústicas con ventilación, cuyo objetivo es equilibrar el confort acústico y proporcionar ventilación. Estas propuestas incluyen enfoques diversos en cuanto a materiales, sistemas de apertura e integración de resonadores, estos diseños buscan atenuación acústica sin sacrificar la ventilación. El presente artículo aporta una descripción de soluciones disponibles actualmente, destacando los aspectos más relevantes de cada una en relación con su diseño, principio de funcionamiento y desempeño acústico. Finalmente, se presenta una comparación entre aquellas de las ventanas acústicas ventiladas, con el fin de identificar sus principales diferencias y niveles de desempeño. Este análisis permite reconocer los avances en la materia y señalar las oportunidades de investigación y mejora en el desarrollo de ventanas acústicas con ventilación aplicables al contexto urbano.

Palabras clave: Acústica, ventilación, Ventana, Aislamiento, Confort.

Abstract

Noise pollution in cities has intensified due to traffic, construction, directly affecting buildings and the quality of life of their occupants. The building envelope plays an essential role as a barrier against external noise; however, the inclusion of openings, generally occupied by windows to allow natural ventilation, daylight, and visual connection with the surroundings, compromises its sound insulation capacity. Even when closed, windows do not achieve the same attenuation levels as solid walls, and when opened, sound transmission increases significantly. In response to this issue, various solutions for acoustic windows with ventilation have been developed, aiming to balance acoustic comfort with the need for air exchange. These designs employ different approaches in terms of materials, opening systems, and the integration of resonators, seeking to maximize noise attenuation without sacrificing ventilation. This article presents a description of the different solutions currently available on the market, highlighting the most relevant aspects of each in relation to their design, operating principles, and acoustic performance. Finally, a comparison is made between the documented cases to identify their main differences and performance levels. This analysis helps to recognize advances in the field and point out opportunities for research and improvement in the development of ventilated acoustic windows applicable to urban contexts.

Keywords: Acoustics, Ventilation, Window, Sound Reduction Index, Comfort.

Resumo

A poluição sonora nas cidades tem se intensificado devido ao ruído gerado pelo tráfego, pela construção e pela atividade social, afetando diretamente as edificações e a qualidade de vida de seus ocupantes. A envoltória arquitetônica desempenha um papel essencial como barreira em relação ao meio externo; no entanto, a incorporação de vãos, geralmente ocupados por janelas para permitir ventilação natural, iluminação e conexão visual com o entorno, compromete sua capacidade de isolamento acústico. Mesmo quando fechadas, as janelas não atingem os níveis de atenuação de uma parede sólida e, quando abertas, a transmissão de ruído aumenta significativamente. Diante dessa problemática, diversas soluções de janelas acústicas com ventilação têm sido desenvolvidas, com o objetivo de equilibrar o conforto acústico e a necessidade de troca de ar. Essas propostas incluem diferentes abordagens quanto aos materiais, sistemas de abertura e integração de ressonadores, buscando maximizar a atenuação sem comprometer a ventilação. O presente artigo apresenta uma descrição das diferentes soluções atualmente disponíveis no mercado, destacando os aspectos mais relevantes de cada uma em relação ao seu projeto, princípio de funcionamento e desempenho acústico. Por fim, é realizada uma comparação entre aquelas para as quais há registro, com o objetivo de identificar suas principais diferenças e níveis de desempenho. Essa análise permite reconhecer os avanços na área e apontar oportunidades de pesquisa e melhoria no desenvolvimento de janelas acústicas com ventilação aplicáveis ao contexto urbano.

Palavras-chave: Acústica, ventilação, janela, isolamento, conforto

1 INTRODUCCIÓN

La contaminación acústica es una preocupación creciente en las áreas urbanas y suburbanas. La exposición continua a niveles elevados de ruido puede tener efectos negativos en la salud física y mental, como estrés, alteraciones del sueño y dificultades para concentrarse. Además, se ha relacionado con problemas cardiovasculares y trastornos psicológicos (Salud, 2019).

El ruido no solo afecta a la salud individual, sino que también incide en la productividad laboral y el rendimiento académico. Diversos estudios han demostrado que los niveles elevados de ruido en ambientes de trabajo y escolares disminuyen la capacidad de concentración y aumentan el riesgo de errores y fatiga (Stansfeld, 2005).

En las ciudades contemporáneas, las edificaciones que se ubican en zonas con altos niveles de contaminación auditiva son más susceptibles a ver comprometido el confort de sus ocupantes. La envolvente arquitectónica, que en esencia tiene la función de proteger al usuario frente a estas condiciones, se ve comprometida por la necesidad de abrir vanos destinados a la colocación de ventanas. Estos elementos cumplen un papel fundamental, pues además de permitir la ventilación natural y el aprovechamiento de la luz solar, para tener una apropiada iluminación y no depender de iluminación artificial, al igual establecen un vínculo directo entre el interior y el exterior, favoreciendo la interacción del usuario con su entorno. Sin embargo, esta condición plantea un reto: cómo lograr que las ventanas conserven sus funciones esenciales sin sacrificar el aislamiento acústico. Ante esta problemática surge la necesidad de investigar soluciones innovadoras enfocadas en el diseño de ventanas que garanticen tanto la ventilación natural como la atenuación del ruido exterior. En los últimos años, tanto en México como en otros países, se han desarrollado diferentes prototipos con este propósito, cada uno con un enfoque particular en su diseño y funcionamiento. Estas propuestas, al ser evaluadas y medidas, han mostrado desempeños diversos, lo que refleja la importancia de seguir explorando alternativas que integren de manera equilibrada el confort acústico y la ventilación en las edificaciones.

2 VENTANAS

“Una ventana, es un elemento constructivo que sirve, de una forma funcional y estética, para cerrar el hueco de una fachada. Es la parte transparente de una fachada que permite la relación interior/exterior, así como la entrada de aire, iluminación natural, radiación solar y la visión en ambos sentidos” (Sanchidrián, 2016).

Una ventana está conformada principalmente por un marco, que puede fabricarse en materiales como aluminio, madera, acero o PVC. En su interior incorpora un material translúcido, generalmente vidrio, disponible en diferentes calibres según las necesidades: 4 mm, 6 mm, 9 mm, 12 mm, entre otros. Además, cuenta con sellos de hermeticidad, los cuales protegen frente a factores externos, y un sistema de herrajes, que incluye bisagras, cerraduras, manillas, pasadores o distintos mecanismos de apertura y cierre.

En cuanto a su diseño, existen diversos modelos según el tipo de apertura, entre los más comunes se encuentran: corrediza, abatible, oscilobatiente, proyectante, fija, de guillotina, entre otros (ver Figura 1).

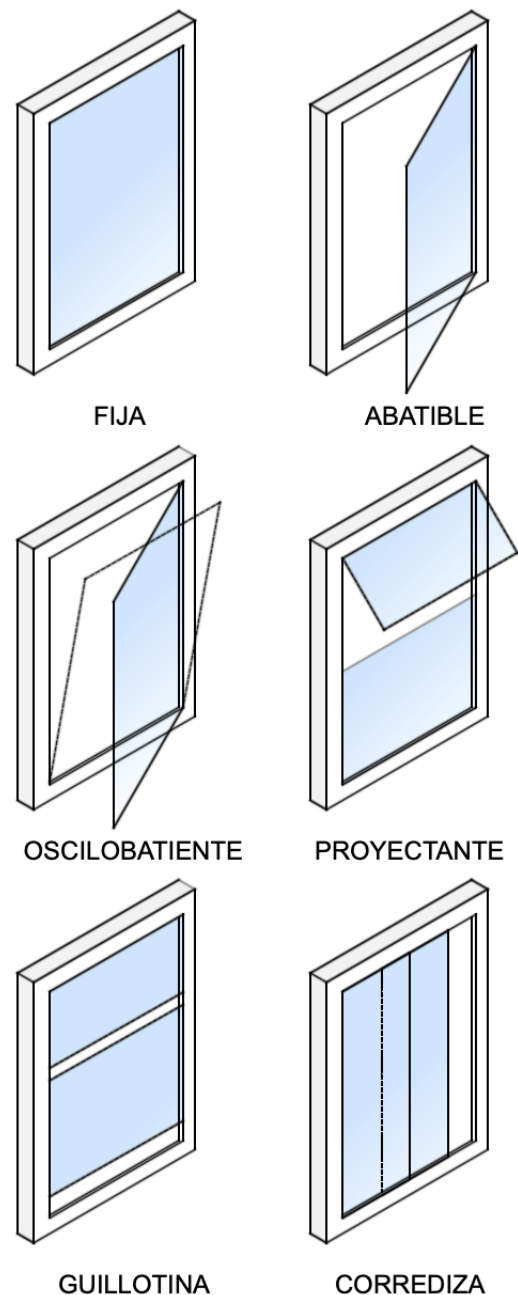


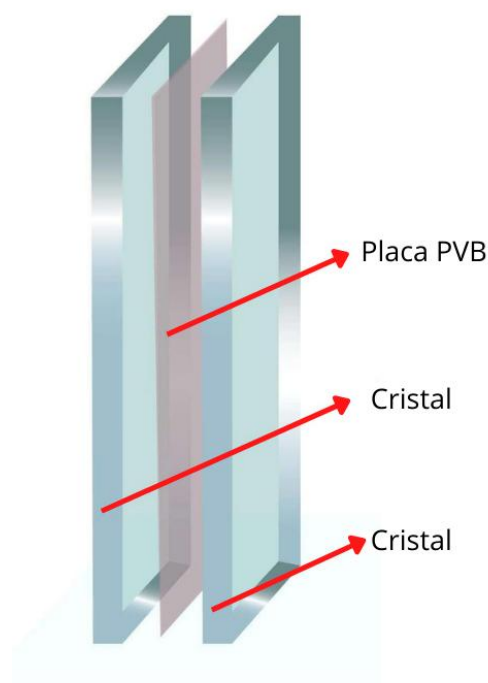
Figura 1. Tipos de Ventanas. Elaboración propia

2.1 Ventanas Acústicas

Actualmente existen ventanas con propiedades acústicas, diseñadas específicamente para mejorar el aislamiento al ruido. Estas ventanas deben sus prestaciones principalmente al tipo de vidrio empleado, a la calidad de los sellos de hermeticidad y a la correcta instalación del sistema, factores que en conjunto determinan su nivel de eficiencia. En el mercado es posible encontrar diferentes configuraciones y soluciones que responden a distintos niveles de exigencia acústica y condiciones de uso, tales como:

2.1.1 Ventanas con Vidrio Laminado

El vidrio laminado este compuesto por dos o más vidrios homogéneos unidos por material plástico, el más utilizado en la edificación y en las fachadas es el de polivinilo butiral (PVB). Es un material plástico con excelentes propiedades de adherencia, transparencia y tenacidad, por lo que da lugar a vidrios que responden a las exigencias de vidrios laminados de seguridad, sobresale su resistencia a la penetración



Vidrio laminado

Figura 2. Ventana con vidrio laminar Tomado de Calor o frío, Elige la ventana adecuada, por Cristel, 28 de febrero de 2025, Cristel.

La nomenclatura en los vidrios laminados es: xx,y a, donde x indica el espesor de cada vidrio componente del laminar en mm; e indica el número de capas de

butiral de 0.38 mm de espesor; a indica que el butiral es de tipo acústico.

El índice de reducción acústica de un vidrio laminar es varios dB superior al del vidrio monolítico del mismo espesor, sin embargo, hay que tener en cuenta que en un vidrio laminar tradicional el índice de reducción acústica está muy afectado por la temperatura superficial, disminuyendo su aislamiento acústico al disminuir la temperatura. Los vidrios laminares acústicos tienen mayor índice de reducción acústica que los vidrios laminares tradicionales de la misma composición. El vidrio laminar PVB(A), prácticamente elimina el efecto de coincidencia (Sanchidrián, 2016).

2.1.2 Ventanas de Vidrio Aislante (UVA)

Pueden ser vidrio monolíticos o laminados, separados por una cámara de aire o gas que puede ser argón o criptón, sellada herméticamente, la cámara suele contener aire seco. La hermeticidad del sellado y la existencia de desecante evitan la producción de condensaciones en la cámara. El índice de reducción acústica de los vidrios laminados varía con la temperatura de los vidrios por ello cuando en una unidad de vidrio aislante hay un vidrio laminado, este se debe colocar por el lado caliente, generalmente dentro el interior del recinto. La utilización de vidrios de color o vidrios de control solar no tiene influencia del aislamiento acústico del vidrio (Sanchidrián, 2016) (ver Figura 3).

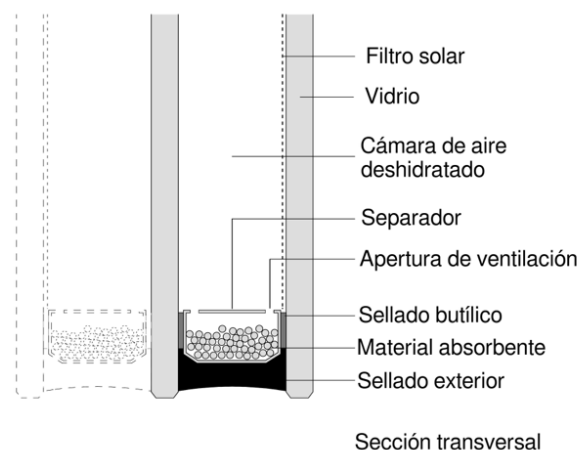


Figura 3. Ventanas de vidrio aislante. Tomado de Vidrio aislante (Isolierglas.svg) (15 de enero de 2008), por petur p, en Wikimedia Commons (licencia CC BY-SA 3.0). <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Isolierglas.svg>

En la Tabla 1 se presenta la reducción acústica en bandas de octava y el índice de reducción acústica R_w para diferentes espesores de vidrio y las configuraciones antes explicadas, adaptada a cada tipo de vidrio comercial disponible en México. Estos datos se han obtenido considerando distintos espesores de vidrio y su rendimiento en la reducción del ruido en cada banda de frecuencia.

Tabla 1. Reducción acústica según el tipo de vidrio. Adaptado de La envolvente acústica de los edificios, por C. Díaz Sanchidrián. © 2016 por el autor.

Tipo de Vidrio	Índice de reducción acústica, R, dB						
	124 Hz	250 Hz	500 Hz	1 Khz	2 KHz	4 Khz	Rw (C, Ctr), dB
Vidrio sencillo mm							
3	14	19	25	29	33	25	28(-1;-4)
6	18	23	30	35	27	32	31(-2;-3)
10	23	26	32	31	32	39	33(-2;-3)
Vidrio laminado + lámina plástica PVB (0,5 -1) mm							
6 +	20	23	29	34	32	38	32(-1;-3)
10 +	24	26	33	33	35	44	34(-1;-3)
Ventana de vidrio aislante (vidrio doble con vidrio sencillo (mm), cavidad llena de aire e = (6-16) mm							
6-(6-16)-4	21	20	26	38	37	39	32(-2;-4)
6-(6-16)-6	20	18	28	38	34	38	31(-1;-4)
10-(6-16)-4	24	21	32	37	42	43	35(-2;-5)
10-(6-16)-6	24	24	32	37	37	44	35(-1;-3)

Como se observa en la Tabla 1, en los vidrios sencillos, el desempeño acústico aumenta conforme se incrementa el grosor en milímetros. Este mismo comportamiento se presenta en los vidrios laminados con implementación de PVB, ya que su índice de reducción sonora mejora al aumentar el espesor del vidrio.

En las unidades de vidrio aislante se presentan cuatro combinaciones. La primera consiste en un vidrio de 6 mm, una cámara de aire entre 6 y 16 mm, y un segundo vidrio de 4 mm. La segunda combinación está formada por dos vidrios de 6 mm, en la cual se aprecia que, al utilizar espesores diferentes, se obtiene un mayor índice de reducción sonora. Finalmente, las últimas dos combinaciones utilizan vidrios de 10 mm en conjunto con espesores de 4 y 6 mm, donde no se observa una diferencia significativa en el aislamiento acústico, salvo en la corrección de los índices C y Ctr, donde sí se aprecia una reducción notable.

Con este análisis de las ventanas acústicas disponibles en el mercado actual, se puede concluir cómo se desempeñan los distintos tipos de ventanas según su acristalamiento y configuración, en función de sus características constructivas. Por ejemplo, una ventana de vidrio aislante presenta un mayor índice de reducción sonora que una ventana sencilla de vidrio de 3 mm.

Sin embargo, surge un problema importante: ¿qué sucede cuando se abre la ventana? La ventilación dentro de un espacio es esencial, ya sea por confort térmico o por motivos de higiene y salud, al permitir la renovación del aire. El problema radica en esta

situación puntual, las ventanas al estar herméticamente cerradas para maximizar su desempeño acústico no pueden abrirse, lo que impide el paso de aire al interior del recinto donde se encuentran instaladas.

Esta problemática ha sido abordada en el estudio “medición de aislamiento acústico en condiciones comparables de laboratorio de ventanas de diseño tradicional y ventanas de estructura metamaterial”, (Ponce, 2023), en el cual se analiza una ventana con configuraciones variables de apertura. Se compara el índice de reducción acústica de una ventana completamente cerrada frente a distintas configuraciones de apertura, lo cual permite evaluar el impacto acústico de cada una de ellas, en la Figura 4 muestra las diferentes configuraciones de apertura en las que se midió para posteriormente poder entender la Figura 5 que grafica el comportamiento de cada una.

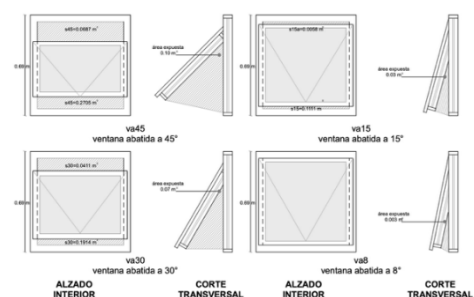


Figura 1. Área de ventilación, ventana. Adaptado de “Medición de aislamiento acústico en condiciones comparables de laboratorio de ventanas de diseño tradicional y ventanas de estructura metamaterial” (p.5), por Ponce, en Tecniacústica, 2023.

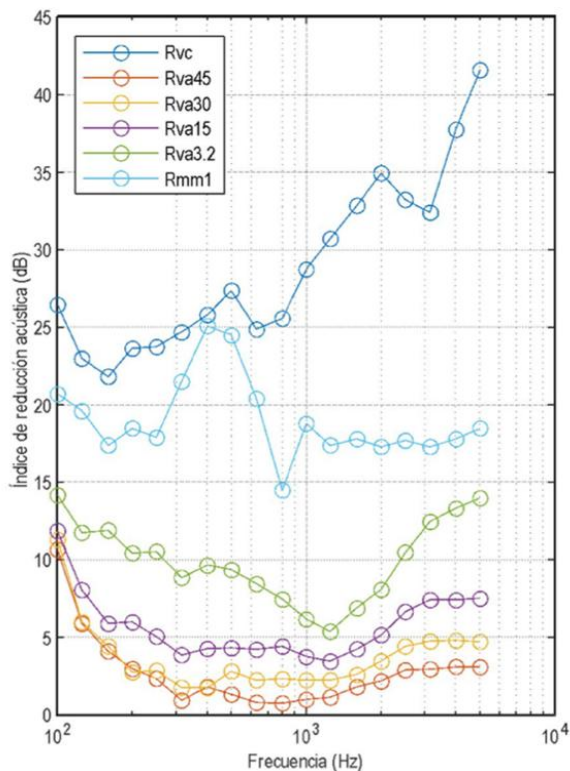


Figura 2. Índice de reducción acústica en ventana. Tomado de “Medición de aislamiento acústico en condiciones comparables de laboratorio de ventanas de diseño tradicional y ventanas de estructura metamaterial” (p.5), por Ponce, en *Tecniacústica*, 2023.

Como se muestra en la Figura 5, el Rvc corresponde a la ventana cerrada, mientras que el Rva15 corresponde a la ventana abierta a 15°, y así sucesivamente hasta Rva45, correspondiente a la ventana abierta en 45°. En concordancia con el problema general de este artículo, a medida que la ventana presenta una mayor abertura, el sonido exterior se transmite con mayor facilidad. Esto se traduce en una disminución progresiva del índice de reducción sonora, evidenciando que, a mayor apertura, menor es el índice de reducción sonora.

En conclusión, la abertura generada por el vano y el tipo de apertura de la ventana representa un punto vulnerable en la envolvente del edificio frente al ruido. No obstante, su implementación es necesaria para permitir la ventilación e iluminación natural. El problema general identificado en esta investigación radica precisamente en esa dualidad: la necesidad funcional de una abertura que permita la ventilación, pero que al mismo tiempo impida el paso del sonido exterior, evitando así comprometer el aislamiento acústico.

3 VENTILACIÓN

La importancia de una adecuada ventilación dentro espacios es indispensable ya que viento facilita la entrada de aire al interior del edificio a través de

aberturas diseñadas específicamente para este propósito.

Esto se centraliza en la salud de las personas dentro las edificaciones y la necesidad de tener aire puro y limpio. Ya que, debido al aislamiento, en un espacio cerrado, la calidad del aire se podría llegar a empeorar debido a la carga vírica que genera la persona aislada (Abouleish, 2021). Es por ello por lo que mejorar la calidad del aire implica un mejor bienestar para los seres humanos (Liu, 2021). Por el contrario, un ambiente sin ventilar genera una situación desagradable y perjudicial para la salud, ya que se aumenta el contagio de enfermedades aéreas (Wargocki, 2002). El confort térmico es influyente en el aspecto de la salud ya que se divide en dos grupos; humedad relativa y temperatura ambiente, el estudio “Computational characterization of the behavior of a saliva droplet in a social environment” (Ugarte Anero, 2022), muestra un proyecto sobre la dinámica que tiene una gota de saliva, indica que tanto la temperatura ambiente como la humedad relativa son parámetros que afectan directamente al tiempo de evaporación de las gotas de un estornudo humano.

Otro aspecto relevante abordado en este estudio es el confort térmico. Aunque inicialmente fue tratado desde la perspectiva de la salud, se toma en cuenta su relación con el confort de las personas que habitan los espacios. En este sentido, la ventilación juega un papel fundamental, ya que permite alcanzar un equilibrio térmico entre el interior y el exterior de los edificios. Esto favorece una sensación de confort sin que el usuario experimente excesivo calor, y reduce la necesidad de recurrir al uso de sistemas de aire acondicionado. Minimizar el uso de estos sistemas no solo implica un menor consumo energético, sino también una reducción en los costos económicos. El ahorro de energía es de suma importancia en la actualidad, favorece la preservación de los recursos energéticos naturales y del medio ambiente.

4 VENTANAS ACÚSTICAS CON VENTILACIÓN

A nivel global, se han desarrollado diversos prototipos de ventanas con el objetivo de reducir el ruido del exterior hacia el interior de las edificaciones y que permitan ventilación. Estos avances buscan mitigar el impacto del ruido urbano. A lo largo de los años, se han llevado a cabo investigaciones y experimentos para crear ventanas acústicas que no solo mejoren el aislamiento sonoro, sino que también permitan un adecuado cambio de aire, garantizando así la ventilación natural dentro de los espacios cerrados.

Algunos estudios e innovaciones tecnológicas han sido publicados en diferentes partes del mundo, destacando el uso de materiales y diseños que optimizan la atenuación del ruido sin comprometer la circulación de aire. Se han explorado distintos enfoques, como el uso

de ventanas de doble acristalamiento, materiales absorbentes de sonido y sistemas de perfiles acústicos avanzados, los cuales se han probado en entornos urbanos y en laboratorios.

En México, también ha habido un interés creciente en este tipo de ventanas. Estos esfuerzos locales contribuyen al desarrollo de soluciones que no solo abordan la contaminación acústica, sino que también favorecen el confort térmico y la ventilación en las edificaciones.

En la investigación sobre el índice de reducción sonora (R_i) en ventanas y su integración con sistemas de ventilación, existen ciertos estudios que se destacan por su influencia y contribuciones al campo a nivel mundial. Estas investigaciones, que se presentan en este artículo, se centran en seis trabajos distintos, cada uno con cualidades propias en cuanto a materiales, métodos de construcción, forma de evaluación y diseño; sin embargo, todos comparten un mismo propósito: comprender y mejorar el desempeño acústico de las ventanas en relación con la ventilación. Las investigaciones son las siguientes:

- 1. Investigation of sound insulation for a Supply Air Window – field measurements and occupant response. Autor: Lars Sommer SØNDERGAARD. Ciudad, País: Australia, (SØNDERGAARD, 2014).
- 2. Design and in-situ measurement of the acoustic performance of a metasurface ventilation window. Autor: Xiang Yu. Ciudad, País: Singapore (Yu, 2019)

- 3. Acoustically Treated Dual Vented Window System. Autor: Field, Chris. Ciudad, País: Australia, (Field, 2019).
- 4. Experimental study on noise reduction and ventilation performances of sound-proofed ventilation window. Autor: Liangfen Du. Ciudad, País: Singapore, (Du, 2020).
- 5. Simplified vented acoustic window with broadband sound transmission los. Autor: Felipe Orduña Bustamante. Ciudad, País: México, (Orduña, 2024).
- 6. Diseño y evaluación de ventana acústica para optimizar el índice de reducción sonora. Autor: Aarón Manuel Salas Cortés. Ciudad, País: México, (Salas, 2026).

Para ejemplificar y hacer más comprensible esta investigación, a continuación, se presentan de forma resumida, mediante la Figura 6 y las Tablas 2 y 3, el diseño y la evaluación de las ventanas.

Con el objetivo de facilitar una mejor comprensión y análisis comparativo entre las metodologías empleadas en los distintos casos de estudio, se elaboraron dos tablas comparativas que sintetiza los aspectos más relevantes de los estudios analizados.

La Tabla 2 presenta las principales similitudes y diferencias en cuanto a los enfoques conceptuales, materiales empleados y configuraciones de ventana consideradas por cada autor.

La Tabla 3 resume las técnicas de medición y el tipo de prueba acústica utilizadas en cada investigación, lo cual permite identificar los criterios experimentales que han guiado el desarrollo de soluciones acústicas con ventilación

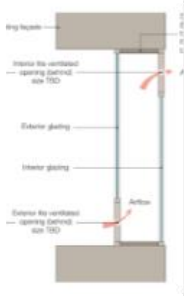
VENTANAS ACÚSTICAS CON VENTILACIÓN					
VENTANA 1	VENTANA 2	VENTANA 3	VENTANA 4	VENTANA 5	VENTANA 6
					
Nombre: Investigation of sound insulation for a Supply Air Window Autor: Søndergaard Ciudad, País: Australia	Nombre: Metasurface ventilation window Autor: Xiang Yu Ciudad, País: Singapore.	Nombre: Acoustically Treated Dual Vented Window System Autor: Chris Field Ciudad, País: Australia	Nombre: Noise reduction and ventilation performances ventilation window. Autor: Du Liangfen Ciudad, País: Australia	Nombre: Simplified vented acoustic window Autor: Felipe Orduña Ciudad, País: México	Nombre: Diseño y evaluación de ventana acústica para optimizar el índice de reducción sonora Autor: Aarón Salas Ciudad, País: México
VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	VP6

Figura 3. Ventanas acústicas con ventilación. Elaboración propia

Tabla 2. Metodología diseño ventanas. Elaboración propia

METODOLOGÍA DISEÑO EN VENTANAS						
METODOLOGÍA		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5
MATERIALES	Marco:	Aluminio	Herrería	Madera	Aluminio	MDF
	Elemento cierre:	Vidrio	Acrílico	Vidrio de 6.38 mm	Vidrio 6 mm	Acrílico
DIMENSIONES	Alto (mm):	2200	760	1200	1650	690
	Ancho (mm):	550	550	679	750	690
	Profundo (mm):	320	100	100	85	162
DISEÑO CONSTRUCTIVO		Dos ventanas, una detrás de la otra. La ventana proyectante abertura 45°	Nueve módulos, en una estructura. Cada módulo cuenta con una abertura al centro	Dos ventanas proyectadas, una detrás de la otra. Ventana doble, fija ambas	Dos ventanas proyectadas, una detrás de la otra. Ventana doble, abatible	Cuatro paneles similares. Cada panel presenta una abertura en la parte inferior izquierda
DISEÑO ACÚSTICO		Canal vertical entre hojas Material absorbente en la cavidad	Cada celda es una cámara resonante, que permite flujo de aire mediante atenua desajuste de impedancia	Doble ventana y tamaño de abertura	NO MENCIONA	Resonador de Helmholtz
TIPO DE ABERTURA		Proyectante	No se manipula	Fija con configuraciones	Proyectante	No se manipula
INSTALACIÓN		Fijas a muro con tornillos. La parte fija es abatible para su limpieza.	Fija a la boquilla.	Tiras de aluminio y madera aseguran el cristal en el hueco, se fijan mediante tuercas.	Las ventanas son desmontables	Fija, con taquetes y sellador en las juntas
SELLO		Una cinta de PVA de espuma de 5 mm	NO MENCIONA	NO MENCIONA	NO MENCIONA	Sellador de juntas marca Sika®
MATERIAL ABSORBENTE		NO ESPECIFICA	NO ESPECIFICA	Tontine Acoustisorb 3 de 50 mm de grosor	Fibra de vidrio con un grosor de 25 mm, cubierto con tela acústica	NO ESPECIFICA

Tabla 3. Metodología medición ventanas. Elaboración propia

METODOLOGÍA MEDICIÓN EN VENTANAS					
METODOLOGÍA	VP1	VP2	VP3	VP4	VP5
Simulación	NO MENCIONA	Mediante simulaciones FE	NO MENCIONA	NO MENCIONA	Simulaciones por computadora con el método de matriz de elementos finitos
Medición índice de reducción sonora (Laboratorio) o (En sitio)	Departamentos en la zona norte de Copenhague Se midió en dos habitaciones. Para cada habitación se realizaron tres mediciones, variando el grado de abertura	Se sitúa entre dos habitaciones Se sitúa en dos habitaciones (fuente y la receptora). Se midió TL con un altavoz omnidireccional colocado en sala fuente con ruido blanco.	Laboratorio Acústico de la Universidad de Sídney Se sitúa en dos habitaciones la habitación fuente y la receptora. Se midió TL con un altavoz omnidireccional colocado en sala fuente con ruido rosa.	Casa inteligente Universidad Nacional de Singapur (NUS) Se generó ruido con 2 altavoces en el exterior y se colocaron 3 micrófonos en la habitación interior.	Camara transmisión ICAT UNAM Se sitúa en dos habitaciones (fuente y la receptora). Se midió TL con un altavoz omnidireccional colocado en sala fuente con ruido rosa.
Normatividad	NO MENCIONA	ISO 16283-1	ISO - 10140 - 2	NO MENCIONA	ISO - 10140 - 2 y - 4
Resultados	Abierta: Rw = 28 dB Semi Abierta: Rw = 31 dB Cerrada: Rw = 43 dB	Rw = 22 dB	200 mm Rw = 25 dB. 100 mm Rw = 28 dB. Cerrada Rw = 36 dB	Abierta 45° Rw = 29. Abierta 90° Rw = 20 dB Cerrada Rw = 35 dB	Rw = 30 dB
Evaluación de ventilación	En su estudio se aplicaron cuestionarios a los usuarios para conocer la eficiencia de la ventilación	NO MENCIONA	Se presentan resultados del flujo de aire (en L/s) en función del grado de apertura	Se midió la tasa de renovación de aire (ACH) en dos dormitorios para evaluar la eficiencia de ventilación.	NO MENCIONA

Las Tablas 2 y 3 muestran cómo, a pesar de abordar el mismo problema general la necesidad de ventilación sin comprometer el aislamiento acústico, cada estudio aplica enfoques particulares. Las diferencias se reflejan en la selección de materiales, las dimensiones empleadas y, sobre todo, en el tipo de abertura planteada en el diseño.

Una constante en la mayoría de los casos es la concepción de la ventana como un resonador, así como el uso de configuraciones de doble ventana que

permiten un recorrido controlado del aire. Sin embargo, existen excepciones, como en los trabajos de Yu Xiang y Felipe Orduña, donde el diseño se asemeja más a una celosía, ya que su modo de operación no permite un cierre manipulable.

Asimismo, los métodos de evaluación empleados varían entre investigaciones, aunque se observa un elemento común: la referencia a la norma ISO 10140, que establece los parámetros de medición y análisis de resultados en estudios de aislamiento acústico.

El desempeño de cada ventana varía según su grado de apertura, su tamaño y, por supuesto, su diseño. Cada una presenta características distintas en cuanto a la manera en que puede integrarse en la envolvente arquitectónica, en su forma de operación y en las condiciones específicas para las que fue concebida. Estos factores influyen directamente en el resultado del índice de reducción sonora y, en consecuencia, en el nivel de aislamiento que cada ventana puede ofrecer.

5 MÉTODOS DE ANÁLISIS

Para calcular el índice de reducción sonora es común emplear cuatro normas, dependiendo de si las pruebas se realizan en laboratorio o en sitio. La selección de la norma depende directamente del contexto de evaluación del desempeño acústico de la ventana:

ISO 10140-2: Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 2: Measurement of airborne sound insulation. Establece el método para medir en laboratorio el aislamiento a ruido aéreo de elementos constructivos, como ventanas, muros o puertas, en condiciones controladas.

ISO 10140-4: Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 4: Measurement procedures and requirements. Define los procedimientos y requisitos que deben cumplirse durante las mediciones en laboratorio, con el fin de garantizar resultados confiables y repetibles.

ISO 16283-1: Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation. Describe el método para realizar mediciones in situ del aislamiento a ruido aéreo en edificios y elementos constructivos, cuando no es posible evaluar en condiciones de laboratorio.

ISO 717-1: Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation. Especifica los procedimientos para la evaluación y clasificación del aislamiento acústico a ruido aéreo, tanto en edificios como en elementos constructivos, a partir de resultados obtenidos en laboratorio o en sitio.

Estas normas son de suma importancia ya que dicen como hacer las mediciones, esto se refiere a las posiciones que deben tener los elementos con lo que realizaras cada medición por lo regular es necesario una fuente sonora, micrófonos, un termohigrómetro y resonadores dependiendo el caso. La posición de la fuente sonora en la cámara emisora, cumple con los lineamientos normativos.

- a) La fuente sonora debe estar ubicada a no menos de 50 cm de los límites del recinto.
- b) Debe mantenerse una distancia mínima de 1 metro respecto al elemento separador (en este caso, el muro con ventana).
- c) Deben tener tres posiciones de fuente por medición
- d) Las posiciones del altavoz no deben estar alineadas paralelamente.
- e) Cada posición del altavoz debe separarse al menos 70 cm entre sí.
- f) La base de montaje del altavoz no debe ubicarse a menos de 1 metro del piso

Para los micrófonos utilizados en las mediciones existen tres tipos principales: fijos, de movimiento continuo mecanizado y de movimiento barrido manual. Cada uno cuenta con criterios específicos para su aplicación:

- Micrófonos fijos: se recomienda disponer de varios micrófonos en diferentes posiciones para obtener un promedio representativo.
- Micrófonos de movimiento continuo mecanizado: suelen girar sobre su propio eje con un radio de 360°, completando la rotación en un tiempo determinado.
- Micrófonos de barrido manual: el usuario realiza el movimiento de barrido, que puede ser de tipo circular, helicoidal, cilíndrico o en tres semicírculos.

Las distancias mínimas recomendadas para la colocación de los micrófonos son las siguientes:

- Entre micrófonos fijos: al menos 0.70 m.
- Entre cada micrófono y los límites del recinto: al menos 0.50 m.
- Entre cada micrófono y cualquier altavoz: al menos 1.00 m.

Si las pruebas se realizan en laboratorio, es necesario ajustar el tiempo de reverberación (TR) tanto de la cámara emisora como de la receptora. Para ello se emplean resonadores o materiales absorbentes. La ISO 10140 establece los siguientes parámetros para cada cámara:

- Cámara emisora: $1 \text{ s} < TR < 2.68 \text{ s}$
- Cámara receptora: $1 \text{ s} < TR < 2.46 \text{ s}$

Otro parámetro que la norma menciona es la medición de la temperatura y humedad del recinto ya que si durante una sesión se presenta una variación superior a $\pm 3^\circ\text{C}$ en temperatura o $\pm 3\%$ en humedad relativa, los resultados de esa medición deben ser descartados y el procedimiento repetido en condiciones estables, ya que estos factores alteran la velocidad del sonido, para esto se ocupa el termohigrómetro.

Para las mediciones, la norma establece que la fuente sonora debe colocarse en al menos dos posiciones con el fin de obtener un promedio energético representativo.

A continuación, se describe de manera general el proceso de medición en laboratorio:

Instalación del modelo de prueba: puede tratarse de una puerta, ventana, muro, material u otro elemento. Este se coloca entre la cámara emisora y la cámara receptora.

- Posicionamiento de micrófonos y fuente sonora: la colocación se realiza conforme a lo estipulado en la norma correspondiente.
- Medición del tiempo de reverberación (TR): se determina en ambas cámaras, emisora y receptora, para verificar que se cumplan los valores normativos.
- Medición de parámetros ambientales: incluye la temperatura, la humedad relativa y la presión atmosférica, ya que pueden influir en los resultados acústicos.

Otro factor importante que considerar es que cada medición debe realizarse en al menos dos días distintos. Esto permite reducir la influencia de errores externos a los habituales, como ruidos de impacto o transmisión sonora proveniente del exterior de la cámara. Además, realizar las pruebas en diferentes jornadas proporciona un conjunto de datos más amplio, lo que facilita la comparación y aumenta la confiabilidad de los resultados.

La Figura 7 muestra un ejemplo del posicionamiento de la fuente sonora y los micrófonos durante una medición en laboratorio. En este ejemplo, se realizan un total de seis posiciones de la fuente sonora.

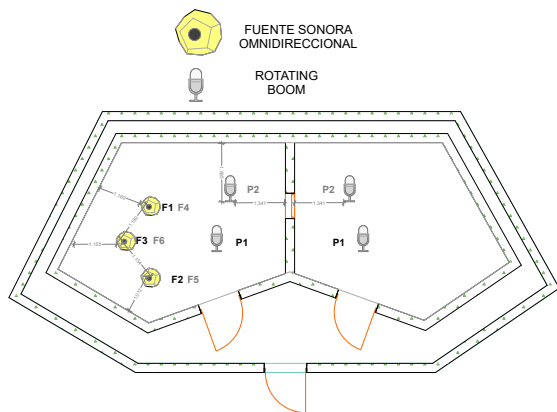


Figura 4. Posicionamiento de micrófonos y fuente omnidireccional

Cuando los micrófonos están sincronizados en la posición P1, tanto los de la cámara emisora como los de la receptora registran las posiciones F1, F2 y F3 de la fuente sonora. De manera similar, cuando los micrófonos se sincronizan en la posición P2, registran las posiciones F4, F5 y F6.

Este procedimiento permite obtener un mayor número de datos, asegurando un campo acústico más representativo dentro de las cámaras y aumentando la precisión del promedio energético de la medición.

Con todos los parámetros y condiciones previamente establecidos, se pueden realizar las mediciones y comenzar a obtener los datos correspondientes al índice de reducción sonora del elemento ensayado.

El siguiente paso consiste en procesar los datos obtenidos durante las mediciones. Cada norma establece su propio método de interpretación, pero, en general, las ecuaciones empleadas consideran los mismos parámetros fundamentales.

Durante este procedimiento, la fuente sonora suele generar ruido rosa, ya que este tipo de señal permite distribuir la energía de manera uniforme en cada banda de tercios de octava. Esto posibilita obtener resultados precisos en el rango de 100 Hz a 5000 Hz, lo que a su vez permite evaluar de manera detallada, por frecuencia, el sonido que se está emitiendo en la cámara emisora y el que se está recibiendo en la cámara receptora.

A continuación, se presenta un procedimiento metodológico para la obtención de los resultados:

5.1 Cálculo de los niveles de presión acústica promediados energéticamente.

Este cálculo se emplea para obtener el promedio energético de las mediciones en dos espacios con una única fuente emisora. El objetivo es promediar energéticamente el nivel de presión acústica en la cámara emisora y la cámara receptora, Ec (1).

$$L = 10 \log_{10} \left(\frac{10^{L1/10} + 10^{L2/10} + 10^{L3/10}}{n} \right) \quad (1)$$

Donde:

n: número de promedios

5.2 Diferencia de niveles

Para obtener la diferencia de niveles de presión acústica promediados energéticamente entre el recinto emisor y el recinto receptor, Ec. (2).

$$D = L1 - L2 \quad (2)$$

Donde:

L1 nivel de presión acústica promediado energéticamente en el recinto emisor

L2 nivel de presión acústica promediado energéticamente en el recinto receptor

5.3 Diferencia de niveles estandarizada

Este cálculo final se utiliza teniendo como variante el tiempo de reverberación, Ec. (3).

$$DnT = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{S}{A} \quad (3)$$

Donde:

S: Superficie de muestra de ensayo en m²

A: Área equivalente de absorción sonora en cámara receptora en m².

Mediante este procedimiento metodológico es posible obtener el índice de reducción sonora por banda de tercios de octava para cada frecuencia medida.

El siguiente paso consiste en aplicar estos resultados según la ISO 717-1, cuyo objetivo es calcular el índice de aislamiento acústico ponderado *Rw* (*Weighted Sound Reduction Index*). Este índice cuantifica la capacidad de un elemento constructivo, como una ventana, un muro o una puerta, para atenuar el sonido aéreo. El valor de *Rw* se expresa en decibelios (dB) y permite comparar de manera objetiva el desempeño acústico de distintos elementos.

La norma establece parámetros y reglas para calcular el valor de *Rw*. Para ello, se debe desplazar una curva de referencia sobre los resultados medidos en bandas de tercios de octava hasta lograr la mejor coincidencia con el sistema medido; en ese punto se determina el valor de *Rw* del elemento constructivo.

Además, la norma define un procedimiento para calcular los índices **C** y **Ctr_tr**, que representan correcciones en función del espectro del ruido incidente:

C (correction index): se utiliza para evaluar la eficacia del aislamiento acústico frente a ruido rosa o ruido de banda ancha, típico en entornos interiores.

Ctr_tr (traffic spectrum correction index): se aplica cuando el ruido incidente corresponde a tráfico urbano, considerando que las frecuencias bajas predominan en este tipo de ruido, afectando la percepción del aislamiento acústico.

Estos índices permiten ajustar el valor de *Rw* según el tipo de ruido al que estará expuesto el elemento constructivo, proporcionando una medición más representativa y aplicable a la realidad.

Por lo general, este procedimiento se utiliza para interpretar los resultados de las mediciones con el fin de evaluar el comportamiento acústico del elemento que se está analizando, ya sea una ventana, un muro, una puerta u otro componente constructivo.

Para el análisis de ventilación no existe una norma que regule este procedimiento, a diferencia del aspecto acústico, que sí está regido por normas que establecen un procedimiento metodológico específico.

Por consiguiente, cada investigación aborda el tema de ventilación según las posibilidades del estudio, el equipo disponible y el conocimiento del investigador.

No obstante, existen herramientas, software y métodos matemáticos que permiten analizar el comportamiento de una ventana o abertura, entre los cuales se encuentran:

La simulación computacional permite modelar y predecir el flujo de aire y la distribución de velocidades dentro de un espacio, proporcionando resultados detallados sin necesidad de realizar pruebas físicas.

- Flow Design®: software de simulación de flujo de aire en tiempo real, utilizado para visualizar patrones de ventilación y movimiento de aire alrededor de estructuras y elementos arquitectónicos de manera rápida y sencilla.
- CFD Autodesk®: herramienta de dinámica de fluidos computacional que permite simular con precisión el comportamiento del aire dentro y alrededor de espacios cerrados, evaluando velocidad, presión y distribución de contaminantes o calor.
- SimScale®: plataforma de simulación en la nube que permite realizar análisis de flujo de aire y ventilación mediante modelos CFD, facilitando la colaboración y el acceso remoto a los resultados.
- Foam®: conjunto de herramientas de código abierto para simulación CFD que permite modelar flujos complejos y realizar análisis detallados de ventilación y comportamiento de fluidos.

Herramientas físicas utilizadas en estudios experimentales se incluyen:

Túnel de viento: permite reproducir condiciones de viento controladas para analizar la interacción del flujo de aire con ventanas, fachadas y aberturas.

Anemómetros: instrumentos que miden la velocidad y dirección del flujo de aire, esenciales para validar resultados de simulación o realizar mediciones in situ.

5.4 Métodos Matemáticos

Existen ecuaciones para predecir el comportamiento de una abertura ante el flujo de viento y observar el intercambio de aire que se producirá en un espacio en específico. Tales como:

Flujo volumétrico

El flujo volumétrico de aire (*Q*) es fundamental en dinámica de fluidos y ventilación, y se define como el volumen de aire que pasa a través de una sección transversal por unidad de tiempo (Awbi, 2003). Se expresa generalmente con la Ec. (4)

$$Q = A * V \quad (4)$$

Donde:

Q: es el flujo volumétrico (m³/s)

A: es el área de la abertura (m²)

V : es la velocidad del aire a través de dicha área (m/s)

Ventilación natural inducida por presión se expresa con la Ec. (5).

$$Q = C_d * A * \sqrt{\frac{2 * \Delta P}{\rho}} \quad (5)$$

Donde:

C_d es el coeficiente de descarga (adimensional)
 ΔP es la diferencia de presión (Pa)
 ρ es la densidad del aire (kg/m³)
 A es el área de la abertura (m²)

El flujo volumétrico de aire representa la cantidad de volumen de aire que atraviesa una abertura de acuerdo con su área.

Cambios de Aire por Hora

La ecuación del ACH (de aire por hora) indica cuántas veces se renueva el aire de un espacio en una hora, Ec. (6).

$$ACH = \frac{Q(t)}{V_R} \quad (6)$$

$Q(t)$: caudal de aire suministrado (m³/s)
 V_R : volumen del espacio (m³/)

A partir de esta metodología es posible calcular o predecir el comportamiento de una abertura o ventana según su diseño, forma y dimensiones, obteniendo así una estimación de su funcionamiento. Sin embargo, es

importante considerar que todas estas simulaciones se realizan en entornos controlados y, en la mayoría de los casos, asumen la incidencia constante del viento sobre el elemento.

Este factor debe tomarse en cuenta como una fuente de error, ya que al instalar la ventana dentro de una envolvente arquitectónica real, las condiciones de viento no siempre serán las ideales. El viento es impredecible y no puede direccionarse únicamente hacia una dirección. Por ello, para un uso correcto, es necesario realizar un análisis del viento local, identificando las direcciones dominantes y predominantes en la zona.

No obstante, incluso con estos datos, no se garantiza que la ventana reciba viento incidente directo durante todo el tiempo de uso, por lo que los cálculos y simulaciones deben interpretarse como más que como resultados absolutos.

6 CONCLUSIONES

En el aspecto acústico, el desempeño de las ventanas se evalúa mediante el índice de aislamiento acústico ponderado R_w , que cuantifica la capacidad de un elemento constructivo para atenuar el sonido aéreo. La Tabla 4 presenta los valores obtenidos para cada ventana evaluada, lo que permite realizar una comparación y observar el desempeño relativo de cada una frente al ruido exterior, y así observar dependiendo su diseño, tamaño y los materiales de construcción cual tiene de mayor a menor rendimiento acústico dependiendo su ventilación.

Tabla 4. Comparación R_w ventanas acústicas

Comparación R_w Ventanas Acústicas				
Ventana	R_w (dB) Cerrada	R_w Apertura media (dB)	R_w Apertura completa (dB)	Cita
VP1 (Supply Air)	43 (-2;-7)	31 (-1;-5)	28 (-2;-4)	(Søndergaard, 2014)
VP2 (metasurface ventilation window)			22 (-2;-3)	(Xiang, 2019)
VP3 (Ventana de Doble Ventilación)	36	28	25	(Field, 2019)
VP4 (Ventana de Ventilación)	35 (-1;-2)	29 (0;-2)	28 (0;-2)	(Liangfen, 2020)
VP5 (metaventana)			18 (0;0)	(Orduña, 2024)
VP6 Ventana prototipo 3	37 (-1;-4)	34 (-1;-3)	11 (-1;-1)	(Salas, 2026)

Como se observa, cada ventana presenta un índice de reducción sonora distinto, lo cual depende en gran medida de su diseño, forma de operación y dimensiones. No todas las ventanas cuentan con los valores de C y C_{tr} , pero en aquellas que sí se registraron, se puede evaluar su desempeño frente a diferentes espectros de ruido. La ventana que muestra el mejor desempeño es la VP1, correspondiente a la Supply Air, seguida por la VP6, que es una ventana ventilada. Por otro lado, la VP2 presenta el menor desempeño, lo cual se explica porque carece de un mecanismo efectivo de operación que permita un aislamiento acústico adecuado.

En cuanto a la ventilación, cada una de las ventanas evaluadas se analizó mediante métodos distintos, por lo que no es posible establecer una comparación directa entre ellas. No obstante, se observa que la ventilación es un factor relevante y que cada estudio la abordó de manera funcional según el diseño específico de la ventana. En general, se demuestra que estas ventanas permiten un flujo de aire adecuado dentro del recinto, cumpliendo con su propósito de ventilación sin comprometer completamente el aislamiento acústico.

En conclusión, el campo de las ventanas acústicas con ventilación es relativamente nuevo y aún ofrece un amplio margen de investigación. Las ventanas presentadas en este estudio muestran una mejora significativa en el aislamiento acústico, a pesar de permitir la entrada de aire al interior de la edificación, lo que evidencia que es posible combinar ventilación y control del ruido de manera efectiva. Estas investigaciones sientan las bases para futuros desarrollos que optimicen ambos aspectos, ajustando diseño, dimensiones y mecanismos de operación para lograr un desempeño más eficiente.

REFERENCIAS

- Abouleish, M. Z. (2020). Indoor air quality and COVID-19. *Public Health*, 191, 1.
- Awbi, H. B. (1998). —ventilation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2(1-2), 157-188.
- BNT162b2-elicited neutralization of B. 1.617 and other SARS-CoV-2 variants. *Nature*, 596(7871), 273-275.
- Field, C., & Cuthbert, G. (2019, September). Acoustically treated dual vented window system. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 259, No. 9, pp. 581-590). Institute of Noise Control Engineering.
- Du, L., Lau, S. K., Lee, S. E., & Danzer, M. K. (2020). Experimental study on noise reduction and ventilation performances of sound-proofed ventilation window. *Building and Environment*, 181, 107105.
- Liu, J., Liu, Y., Xia, H., Zou, J., Weaver, S. C., Swanson, K. A., ... & Shi, P. Y. (2021).
- Orduña-Bustamante, F., Velasco-Segura, R., Quintero, G., Pérez-Ruiz, S. J., Pérez-López, A., Dorantes-Escamilla, R., & Ponce-Patrón, D. R. (2024). Simplified vented acoustic window with broadband sound transmission loss, *Applied Acoustics*, 217, 109865.
- Organización Mundial de la Salud. (2019). *Investigaciones epidemiológicas*. Oficina Regional para Europa de la OMS.
- Ponce Patrón, D. R., Orduña Bustamante, F., Quintero Pérez, G., Pérez Ruiz, S. J., Dorantes Escamilla, R., Bautista Kuri, A., & Pérez López, A. (2023). Medición de aislamiento acústico en condiciones comparables de laboratorio de ventanas de diseño tradicional y ventanas de estructura metamaterial. En *Tecniacústica 2023*.
- Salas Cortés, A. M. (2026). Diseño, fabricación y evaluación de una ventana con resonador de Helmholtz: Desempeño acústico y de ventilación (Tesis de maestría). Universidad Autónoma Metropolitana.
- Sanchidrián, C. D. (2016). *La Envolvente Acústica de los Edificios*. Madrid: Munilla-Lería.
- SøNDERGAARD, L. S. (2024). Sound insulation of partially open windows-alternative laboratory measurement methods. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*.
- Stansfeld, S. A. (2005). Noise and health: a review of the evidence. *International Journal of Environmental Health Research*.
- Ugarte-Anero, A., Fernandez-Gamiz, U., Portal-Porras, K., Zulueta, E., & Urbina-García, O. (2022).
- Wargocki, P. S. (2002). Ventilation and health in non industrial indoor environments. *European multidisciplinary scientific consensus meeting*, 113–128.
- Yu, X. (2019). Design and in-situ measurement of the acoustic performance of a metasurface ventilation window. *Applied Acoustics*, 152, 127-132.