



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

ARQUITECTURA PARA ZONAS DE ALTO NIVEL DE RUIDO URBANO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN ARQUITECTURA

PRESENTA:

Mtro. Antonio Javier Bautista Kuri

TUTOR PRINCIPAL

Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz

Grupo de Acústica Aplicada y Vibraciones

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

Dr. Felipe Orduña Bustamante

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología
Grupo de Acústica Aplicada y Vibraciones

Mtro. Leonardo Zeevaert Alcántara

Posgrado Facultad de Arquitectura

Ciudad Universitaria, Cd.Mx., noviembre 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

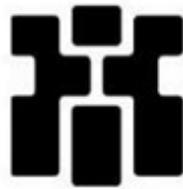


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



INSTITUTO
DE INVESTIGACIONES
HISTÓRICAS

Agradecimientos



Grupo de Acústica y Vibraciones



Se agradece el apoyo de la DGAPA-UNAM al proyecto PAPIIT número IT100723:
“Medición de absorción, aislamiento y difusión acústica de materiales por reflectometría y
transmisión en régimen transitorio”



Comité

Tutor

Dr. SANTIAGO JESÚS PÉREZ RUIZ

Cotutores

Dr. FELIPE ORDUÑA BUSTAMANTE

Mtro. LEONARDO ZEEVAERT ALCANTARA

Sinodales

Dra. JIMENA DE GORTARI LUDLOW

Mtro. ANTONIO PÉREZ LÓPEZ

Dedicatoria

A la UNAM, que es parte de mi

A mi familia y amigos

A mis maestros

Índice

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	i
Agradecimientos.....	iii
Comité.....	iv
Dedicatoria.....	v
Índice.....	vi
La tesis se estructuró de la siguiente forma	ix
Introducción.....	xiii
Planteamiento del problema.....	xvi
1 – Marco teórico	1
1.1 Teoría de la Arquitectura.....	1
1.2 La Acústica y la Arquitectura.....	5
1.3 La Acústica Arquitectónica.....	10
1.4 Objetivo de la Arquitectura	15
1.5 Diseño funcional en la Arquitectura	17
1.6 Objetivo del diseño acústico - arquitectónico	19
1.7 Marcos de referencia.....	20
1.7.1 Marco internacional.....	20
1.7.2 Marco nacional y de la Ciudad de México.....	21
1.7.3 Marco institucional de la UNAM	25
2 - Normas y reglamentos.....	27
2.1 Normas acústicas internacionales que se utilizaron.....	27
2.2 Normas acústicas nacionales	28
3 – El escenario acústico, contaminación y confort acústico	31
3.1 Contaminación acústica	31
3.2 Niveles de presión sonora en las aulas	36
3.3 Niveles de presión sonora (NPS) en viviendas.....	37

3.4	Confort acústico.....	37
4	- Aislamiento sonoro	40
4.1	Aislamiento sonoro	40
4.1.1	Fenómenos acústicos de aislamiento (transmisión).....	42
4.2	La acústica de edificaciones en las aulas, vivienda y su evaluación	44
4.3	Consideraciones para la caracterización del aislamiento acústico	45
4.4	Consideraciones de medición de aislamiento sonoro en laboratorio.....	46
4.4.1	Cámara de transmisión para mediciones de laboratorio	47
4.5	Medición de aislamiento sonoro en campo	48
4.5.1	Procedimientos de medición de aislamiento sonoro en campo (fachada)....	49
5	- Casos de estudio.....	50
5.1	Primer caso de estudio.....	51
5.1.1	Procedimiento de medición	51
5.1.2	Resultados de primer caso de estudio	54
5.2	Segundo caso de estudio	56
5.2.1	Evaluación del muro divisorio entre dos departamentos	57
5.2.2	Evaluación de las fachadas.....	58
5.2.3	Medición de tiempo de reverberación	61
5.2.4	Descripción arquitectónica del departamento estudiado	62
5.2.5	Dimensiones.....	63
5.2.6	Equipo utilizado para el segundo caso.....	64
5.2.7	Resultados del segundo caso	64
5.2.8	Propuesta de mejora de aislamiento sonoro de muro entre dos espacios ...	68
5.2.9	Recomendaciones para el desarrollo de proyectos.....	68
5.2.10	Conclusiones para el primer y segundo caso.....	69
6	-Tercer caso de estudio.....	71

6.1	Desarrollo del tercer caso.....	75
6.1.1	Materiales de construcción.....	75
6.2	Calificadores base de referencia internacional.....	77
6.3	Calificadores adicionales internacionales.....	77
6.4	Procedimiento de medición en las diez aulas del Edificio “B”.....	78
6.4.1	Equipo utilizado.....	78
6.4.2	Obtención de índices de desempeño acústico de propósito general.....	79
6.4.3	Medición de ruido de fondo.....	79
6.4.4	Índices de desempeño acústico.....	79
6.4.5	Medición de aislamiento acústico global de fachada.....	80
6.5	Resultados de las mediciones.....	81
6.5.1	Resumen de datos.....	84
6.5.2	Aula con el aislamiento sonoro de fachada más bajo.....	86
6.6	Discusión de los resultados.....	87
6.6.1	Las aulas del Edificio “B” de acuerdo con las indicaciones de la OMS.....	89
6.7	Propuestas de soluciones.....	90
6.7.1	Solución 1: barrera aislante.....	90
6.7.2	Solución 2: fachada de doble piel.....	94
6.8	Valoración del uso de programas simuladores.....	98
6.9	Conclusiones.....	98
7	– Conclusiones.....	101
	Glosario.....	104
	Créditos de figuras, tablas y diagrama.....	131
	Referencias.....	137
	Anexo A, instalaciones y equipo utilizado.....	143

La tesis se estructuró de la siguiente forma

Estructura – Breve resumen de cómo está compuesta la tesis. **Introducción** – El quinto programa de la Unión Europea reconoce la contaminación acústica como un problema medioambiental, el ruido se percibía como un acompañante socialmente necesario ha pasado a ser molesto. Son innumerables las voces que se alzan denunciando que se vive en ciudades ruidosas. La Arquitectura puede contribuir a reducir la contaminación acústica urbana al interior de las edificaciones, ya sea en nuevos proyectos o en edificios ya construidos. **Planteamiento del problema** – Se denuncia que el ruido urbano es un problema de contaminación ambiental por múltiples razones, también se presenta una perspectiva de la totalidad del trabajo de investigación con detalles, normas, lugares y casos de estudio, así como un planteamiento teórico de la Arquitectura, asumiendo una tendencia estético-funcional. **1. Marco teórico** – Donde se aborda el objetivo de la Arquitectura, y su relación con la acústica, así como factores que intervienen para evaluar el entorno. Marco internacional con datos y cifras que fundamentan la necesidad de atender la acústica de las edificaciones. El marco nacional y de la CdMx, con datos geográficos de población y de denuncias por ruido por alcaldía, con lo que se justifica el estudio sobre la Arquitectura para zonas urbanas. Se aborda también a la Ciudad Universitaria cómo el marco institucional que cobija a la investigación y se hace referencia a su identificación como un espacio urbano al que hay que atender desde la Acústica Arquitectónica. El punto **2. Normas y reglamentos**, menciona cuáles normas internacionales que fueron parámetros para esta investigación. Por ello se les dedica un apartado distinguiendo entre las normas internacionales, nacionales, dos de la Ciudad de México y normas propuestas por la iniciativa privada. En el apartado **3. Escenario acústico, contaminación y confort acústico**, sostiene que, al ser la acústica en edificaciones el tema principal de la investigación resulta importante abordar el confort acústico como un elemento de diseño arquitectónico. Se expone la importancia de atender la presión sonora particularmente en aulas y viviendas dado que, millones de personas conviven durante muchas horas al día en estos recintos. El punto **4. Aislamiento sonoro**,

considera que, al señalar al ruido como uno de los grandes problemas de contaminación urbana, toma relevancia abordar al diseño arquitectónico y los materiales que reducen el ruido en los interiores. Se pone énfasis en la transmisión de sonidos, el diseño y materiales de construcción que evitan la transmisión de sonidos del exterior al interior y cómo se asocia esto con el aislamiento sonoro. En él punto. **5. Casos de estudio**, se presentan dos casos objeto de estudio de esta investigación, el método que se utilizó fue aplicado de manera novedosa, lo que constituye un aporte original. El Primer caso, buscó la caracterización de aislamiento sonoro R de un muro de block, según norma ISO 10140-2 y el índice de reducción sonora de un solo número de acuerdo con la norma ISO 717-1, en cámara de transmisión conformada por cámara emisora - cámara receptora. El segundo caso de estudio, caracterización de aislamiento sonoro según normas ISO 16283-1 y 16283-3 y el índice de reducción sonora de un solo número de acuerdo con la norma ISO 717-1 al mismo tipo de muro, construido como divisorio entre viviendas y en fachadas de un conjunto habitacional, indicando el procedimiento y resultados para obtener la diferencia de nivel estandarizada (aislamiento sonoro) para muro divisorio y el índice de reducción sonora aparente (aislamiento sonoro) para muros de fachada y conclusiones para el primer y segundo caso de estudio. Por su parte, el apartado. **6. Tercer caso**, presenta el estudio realizado a diez aulas del Edificio "B" de la unidad de Posgrado de la UNAM. Para conocer su condición de confort acústico, se utilizaron los dos calificadores más comunes: el tiempo de reverberación y el ruido de fondo. Adicionalmente, se consideraron otros cinco calificadores, en donde se aplicó de manera novedosa el análisis crítico y la manera de entender el problema, lo que constituye un aporte original.

El tiempo de decaimiento temprano; definición 50 milisegundos; índice de transmisión del habla; porcentaje de pérdida de articulación de consonantes y aislamiento de acústico global para muro fachada. Los resultados se presentan en gráficas y tablas donde se contrastaron con el confort acústico en condiciones de escucha natural. Se presenta también un resumen de datos obtenidos y una breve comparativa de su estado actual contra un estado ideal. El estudio de los datos

obtenidos permitió identificar los problemas acústicos de las diez aulas y diseñar, con el apoyo del programa Predictor-LimA, dos soluciones arquitectónicas para reducir el efecto del ruido externo-interno. La propuesta uno fue una barrera aislante en el límite del predio junto a la Av. Insurgentes. La propuesta dos consistió en sugerir una fachada de doble piel o segunda fachada a 2 m de la fachada original. Se resaltan elementos que permiten considerar cuál de las dos opciones es la mejor. Finalmente, en el punto 7. **Conclusiones**, Uno de los puntos que se enfatiza en esta investigación, es que la arquitectura debe tener entre sus objetivos, diseñar espacios confortables que ofrezcan protección contra la contaminación de ruido urbano: consideraciones para futuros trabajos.

Por último, se integran: un Glosario de términos acústicos utilizados en este documento. Los créditos de fotografías, figuras, tablas y diagramas. Las referencias y el anexo A (instalaciones y equipos utilizados).

La citación de referencias de este trabajo se ajusta al estilo de la revista ELSEVIER, **Applied Acoustics**, donde se utilizan números progresivos entre corchetes y en la lista de referencias también se pone el número entre corchetes,

References

“There are no strict requirements on reference formatting at submission. References can be in any style or format as long as the style is consistent. Where applicable, author(s) name(s), journal title/book title, chapter title/article title, year of publication, volume number/book chapter and the article number or pagination must be present. Use of DOI is highly encouraged. The reference style used by the journal will be applied to the accepted article by Elsevier at the proof stage. Note that missing data will be highlighted at proof stage for the author to correct”.

Fuente:

https://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/405890?generatepdf=true. Pág. 10

Se adjunta ejemplo:

Nota en el trabajo:

Numero entre corchetes cuadrados [11]

Nota en referencias:

[11] Van der Geer J, Hanraads JAJ, Lupton RA. The art of writing a scientific article. J Sci Commun 2010.

Introducción

La contaminación acústica o ruido ambiental o ruido urbano, puede ser un riesgo para la salud pública y se encuentra entre las principales molestias ambientales. Desde hace algunas décadas se sabe que tiene impactos negativos en el bienestar humano y es una preocupación creciente entre los gobiernos y el público en general. El silencio se ha convertido en un bien escaso en nuestras vidas. El desarrollo industrial, económico y cultural, la expansión urbana, el aumento del parque vehicular, entre otros, han contribuido a transformar una amplia gama de sonidos. Lo que otrora fue enriquecedor, se ha convertido en contaminación acústica.

“El quinto programa de la Unión Europea reconoce que la contaminación acústica constituye uno de los principales problemas medioambientales en Europa. El ruido se ha convertido en una de las mayores fuentes de malestar de la vida actual” [1].

La investigación del ruido urbano representa un cambio de paradigma en las políticas de control de ruido hacia un enfoque multidisciplinario. Actualmente se involucran no sólo mediciones físicas, sino también la cooperación de las ciencias humanas y sociales para dar cuenta de la diversidad de condiciones entre países y culturas.

“Hoy, se pone mayor énfasis en cómo las personas realmente experimentan los ambientes acústicos; y cómo consideran los sonidos ambientales como un recurso en lugar de un desperdicio”. [2].

El ruido, que se percibía como un acompañante socialmente necesario, ha pasado a ser algo molesto, un factor de contaminación grave. Ante estas circunstancias los gobiernos deben anticiparse a los acontecimientos y prevenir posibles conflictos ambientales.

“Son innumerables las voces que se alzan denunciando que se vive en ciudades muy ruidosas, que el ruido es un factor que distorsiona y desequilibra la vida y que es un inconveniente para avanzar en el progreso” [3].

Lo común es que, en una investigación de confort acústico, quizás se realice algunas pruebas en laboratorio y/o mediciones en campo. Con este trabajo se pretende demostrar el enorme beneficio de realizar pruebas de laboratorio-campo de los mismos elementos, el uso de los calificadores más utilizados y proponer otros más, teniendo como objetivo final el confort acústico de las personas.

La Arquitectura puede contribuir a reducir la contaminación acústica urbana al interior de las edificaciones, ya sea en nuevos proyectos o en edificios ya construidos. Menos ruido significa mayor confort acústico en el interior de los edificios y, por lo tanto, coadyuvar en el logro del bienestar de las personas. No obstante, para conseguir la reducción de ruido y proponer soluciones arquitectónicas, es indispensable conocer el grado de afectación acústica en las edificaciones.

Esta investigación da cuenta de los resultados de varios estudios acústicos originales, detallados y sistematizados que evidencian el problema que se tiene en diversos aspectos del aislamiento acústico de elementos constructivos, este tipo de estudios por sus características de alta especialidad no sea ha realizado en otros trabajos de Acústica Arquitectónica debido a la complejidad del conocimiento de esta especialidad, el costo de los equipos, el conocimiento de manejo de los equipos, el acceso al uso al laboratorio y lugares de prueba en campo, entre otros. Los estudios que se presentan en este trabajo sé realizaron de acuerdo con las normas internacionales ISO y ANSI/ASA vigentes, con equipo especializado y adquirido por el Posgrado de Arquitectura de la UNAM, tanto en laboratorio como en campo, esto hace que los resultados sean confiables y relevantes, teniendo en

cuenta la finalidad del espacio arquitectónico (habitacional, educativo, salud, entre otros). Con base en lo anterior, los casos de estudio son los siguientes:

El primer caso, fue medir el aislamiento R de un muro de block colocado en la Cámara de Transmisión del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM. El muro en laboratorio, no se consideran instalaciones, solamente es con el material de construcción y acabados finales (en caso de llevar), se realizan pruebas controladas, sólo se considera el sonido a través del muro (frontal), no existe ruta de sonido por flanqueo (lateral, piso o techo).

El segundo caso, fue medir el aislamiento sonoro del mismo tipo de muro construido como divisorio y como fachada en un edificio de viviendas. Los resultados de estas dos mediciones difieren entre ellos. El muro en campo, el sonido se llega de todos lados, por flanqueo de muros, techo, piso, a través de ventanas, puertas, altura de arrastres de puertas, orificios de las instalaciones, ruidos exteriores, etc., al no ser condiciones controladas, es difícil conocer el aislamiento acústico de muro en campo.

En el tercer caso, se exponen los datos recabados mediante mediciones realizadas en la Unidad de Posgrado de la UNAM, campus Ciudad Universitaria. El objetivo fue conocer el impacto del ruido producido por el tránsito vehicular al interior de las aulas, proponer soluciones arquitectónicas y acústicas, para revertir el problema de aislamiento sonoro y de inteligibilidad del habla. La metodología utilizada fue de corte exploratoria y experimental. Los datos se levantaron considerando calificadores que se contrastaron con las normas aplicables. Los resultados mostraron el grado de contaminación acústica en los recintos, a partir de los cuales se propusieron soluciones arquitectónicas de acondicionamiento acústico para mejorar el aislamiento sonoro.

Planteamiento del problema

Numerosas investigaciones, anteriores y recientes, han confirmado que el ruido urbano es un importante problema de contaminación ambiental por las siguientes razones:

- Por su efecto nocivo sobre la salud humana, ya que provoca daños auditivos y no auditivos, como estrés.
- Afecta a grandes núcleos de población.
- A pesar de las medidas de mitigación y control implementadas, su crecimiento es constante.
- Su medición y evaluación es compleja y costosa.

Por ello, actualmente, en muchos países, se considera un problema de salud pública. Ante esta situación, la Organización Mundial de la Salud ha desarrollado diversas recomendaciones y sugerencias basadas en investigaciones y análisis de diversos especialistas. Entre las recomendaciones sugeridas se encuentran las siguientes:

- Debemos reconocer que el ruido es un contaminante importante.
- Legislar sobre todos los aspectos que inciden en el problema del ruido.
- Cuantificar la cantidad de población afectada y el costo de atender los daños a la salud causados.
- Planificación del territorio y vías de comunicación.
- Dotar a los edificios (viviendas, escuelas, hospitales, etc.) de una mejor protección contra el ruido (aislamiento acústico).
- Entre otras.

La concentración urbana es una característica que define a las urbes modernas. Esta concentración provoca un incremento en la contaminación en

general. Uno de estos contaminantes es el ruido urbano. Éste se diferencia de otros por las siguientes características:

- Requiere muy poca energía para ser emitido.
- Es complejo de medir y cuantificar.
- Es costosa la instrumentación utilizada.
- Son costosas la implementación de las medidas de mitigación y el acondicionamiento acústico.
- El ruido no se acumula, pero el daño que causa el ruido si es acumulativo.

Estas características hacen que las medidas de su gestión, control y/o mitigación sean complejas de instrumentar. Actualmente, esta complejidad se ha abordado con un enfoque interdisciplinario, donde cada disciplina aporta, métodos, procesos, herramientas y conocimientos propios, pero que, al trabajar en conjunto da lugar a nuevos enfoques, más amplios y profundos. Esto viene ocurriendo con la Arquitectura y la Acústica, frente al problema de ruido urbano.

En nuestro país no es común que los diseños arquitectónicos de los espacios habitables consideren el confort acústico. Por lo tanto, se descuida el tema de la protección contra el ruido urbano. Situación que tiende a acrecentarse y que afecta la salud de grandes sectores de la población mexicana.

Tradicionalmente, el diseño de un lugar con requisitos acústicos surgió en la construcción de salas de conciertos, auditorios, salas de espectáculos y lugares similares. Los conocimientos que surgieron para atender las exigencias de diseño de este tipo de recintos se conjugaron en lo que se conoce como Acústica Arquitectónica. Sin embargo, la pretensión de crear espacios que enfrenten el problema de la contaminación por ruido urbano requiere procedimientos y herramientas que pocas veces se tratan o definitivamente están ausentes en la Acústica Arquitectónica tradicional. Por poner un ejemplo, el problema de disminuir

el molesto ruido que provoca un avión o un camión pesado en el dormitorio de una casa recién se estudia, y no era un tema de gran interés en la Acústica Arquitectónica. Estos problemas han sido resueltos con un variado enfoque experimental, basado en modelos físicos y computacionales, evaluando perceptivamente su desempeño.

Este trabajo abarca desde la valoración acústica en laboratorio de elementos arquitectónicos tradicionales como muros, puertas, ventanas, hasta la verificación de su comportamiento en obra. Esta valoración se realizó de acuerdo con procedimientos internacionales (procedimientos que no tenemos reglamentados o establecidos oficialmente en nuestro país) y utilizando equipo de medición altamente especializado, adquirido por el Posgrado de Arquitectura de la UNAM, proveniente de otros países ya que estos no se fabrican en México. Otro aspecto que se tuvo en cuenta fue el objetivo final del recinto (habitación, oficina, aula, etc.) ya que cada uno de estos espacios requiere de unas condiciones acústicas específicas. También se tuvo como objetivo determinar, desde las herramientas y métodos de la Arquitectura junto con los procedimientos y métodos de la Acústica, la posibilidad de dotar a los edificios de una mejor protección frente al ruido urbano.

Las actividades de investigación realizadas para este trabajo se pueden resumir en tres acciones: En primer lugar, evaluar el aislamiento acústico de un muro construido con un tipo de block multiperforado en condiciones controladas (laboratorio). La evaluación se llevó a cabo en el Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En segundo lugar, evaluación (en campo) de muros de fachada y divisorios entre viviendas, siendo construidos los muros con el mismo material que el muro medido en laboratorio. La evaluación se realizó en un edificio residencial sujeto a ruido vehicular proveniente de una avenida contigua. Ambas valoraciones se realizaron de acuerdo con las recomendaciones de normas internacionales. Estas dos actividades fueron muy importantes porque permitieron contrastar los resultados de la evaluación del aislamiento sonoro medido tanto en

laboratorio como en campo (en obra). Un aporte importante fue demostrar que los valores de aislamiento acústico en campo, al no poder realizarse de manera controlada, son influenciados directamente por elementos arquitectónicos de la construcción (como puertas, ventanas, etc.); además, de otras trayectorias de propagación del ruido, y estos a su vez varían, dependiendo de la ubicación del edificio. Eso hace parecer que el aislamiento acústico del muro en estudio cambia. Anteriormente, como no se hacían estas pruebas de campo-laboratorio se consideraba que podía haber cierta similitud en los resultados.

En tercer lugar, se estudiaron varias aulas del Edificio “B” de la Unidad de Posgrado de la UNAM (UP-UNAM). Este conjunto arquitectónico fue seleccionado porque aquí se forman alumnos de todos los posgrados por lo que es emblemático. Colinda con la Av. Insurgentes Sur, considerada una de las más transitadas de la Ciudad de México (CdMx) y que genera una gran cantidad de ruido debido al intenso tránsito vehicular. La intención de este caso de estudio fue determinar si los criterios de diseño arquitectónico utilizados en la construcción de la Unidad de Posgrado-UNAM (año 2013), fueron rebasados por el crecimiento vehicular como consecuencia de la concentración urbana que padece la CdMx.

El método que se puso en práctica, así como el análisis crítico y la manera de entender el problema fueron novedosos, lo que constituye un aporte original. El enfoque de la investigación fue esencialmente experimental. Debido a la complejidad y amplitud del tema, la fundamentación teórica se basó en modelos físicos y computacionales que se han ido estableciendo en normas internacionales. De hecho, es ampliamente aceptado en la comunidad científica que las normas internacionales son las fuentes de información más actualizada y oportunas que permiten realizar evaluaciones con bajos márgenes de error.

Este trabajo se realizó gracias a la estrecha colaboración del Programa de Maestría y Doctorado de Arquitectura, la Facultad de Arquitectura y el Grupo de

Acústica Aplicada y Vibraciones del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, todas instituciones de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Dado el momento histórico que estamos viviendo donde la economía, la política, la sociedad y la sustentabilidad tienen un rol protagónico, los arquitectos debemos ser muy sensibles a estos cambios, debemos proponer soluciones que estén a favor para que las personas tengan salud auditiva y confort acústico. Para realizar nuestros proyectos e investigaciones debemos considerar tener un enfoque interdisciplinario, multidisciplinario y transdisciplinario; vinculando instituciones ambientales, institutos de investigación e instituciones educativas y, con todo esto, se enriquezca nuestro trabajo, con lo que se podrán abrir nuevas líneas de investigación en La Facultad de Arquitectura de la UNAM, para la licenciatura, maestría, doctorado y posdoctorado.

Los resultados de esta investigación original e innovadora permitieron proponer soluciones desde una perspectiva de la Arquitectura, **asumiendo una tendencia estético-funcional, con dos componentes básicos: Arquitectura y Acústica.**

1 – Marco teórico

1.1 Teoría de la Arquitectura

“Al habitar llegamos, así parece, solamente por medio del construir. Éste, el construir, tiene a aquel, el habitar, como meta”. Estas son palabras, pronunciadas por Martín Heidegger [4].

Son muestra irrefutable de la importancia de la arquitectura como manifestación de la cultura humana. Si entendemos a la cultura como “todo aquello construido por el hombre” y asumimos que el hombre crea y construye para su propio beneficio, entonces la arquitectura no tiene otro más que el noble fin de atender las necesidades del hombre.

“La humanidad transforma su entorno y crea espacios habitables, es decir edifica ciudades donde sus necesidades y aspiraciones se ven reflejadas. El hombre, pieza por pieza eleva sobre su cabeza y pone bajo sus pies, todos aquellos edificios y construcciones que le sirven para, en la lógica de Heidegger, habitar. Las personas no sólo existen. A diferencia de los otros seres vivos con los que comparten el planeta, las personas son. Son existencia, son, parafraseando a Weber”.

“Habitar, siguiendo a Heidegger, significa permanecer, estar, participar, estar en la tierra, pertenecer a ella. Es una experiencia que involucra la historia, la idea de presente, la de futuro, es la condensación del tiempo, Es la manera en que los mortales son en la tierra” [5] . La arquitectura brinda eso: el uso del espacio para imprimir lo que en el pensamiento humano se concibe y tenerlo a buen recaudo.

Animales insertos en tramas de significación que ellos mismos han tejido. Por lo tanto, acercarse a la comprensión de la cultura y a la arquitectura como uno de sus componentes, implica reconocer la subjetividad de la existencia del hombre y

su intrínseca necesidad de asignarle significado a cada una de las cosas que construye y que le rodean.

En las ciudades se vive, pero también se habita. Construir edificios es más que pensar en satisfacer la necesidad básica de protección contra las inclemencias del medio ambiente. La edificación de espacios materializa las ideas, percepciones, creencias, aspiraciones, etc., de un conjunto de personas que comparten un momento histórico determinado. Es la manifestación misma de lo más íntimo y profundo del pensamiento humano, de la construcción de sí sabiendo que coexiste con otros. La arquitectura plasma la existencia, la evolución y la presencia misma de las personas.

En todos los espacios donde moran los sujetos, se pueden encontrar alojamientos que lo protegen de los embates de la naturaleza y con eso ya cumplen una función importante. Tener donde guarecerse de la lluvia o protegerse del sol, la nieve y el viento, resulta algo necesario para la supervivencia humana. Sin embargo, la grandeza del hombre no le permite reducir su ingenio a ese nivel. *“El hombre busca construir su habitar. El habitar es el fin que persigue todo construir”* [5]. Erigir edificios, es la forma en que el ser humano utiliza la arquitectura para habitar y construirse a sí mismo. Al habitar el hombre se construye. Construye su historia, su lugar en el mundo, su identidad, se afirma como el constructor de la vida humana y de la vida de todos sus vecinos vivos o inertes.

El pensamiento hace al mundo, pero no en abstracto, habitar es más que una idea, es la materialización, concreta y tangible del pensamiento humano. La arquitectura brinda a la raza humana la posibilidad de trascender, de mostrarse, es la inteligencia humana materializada en edificios.

Pensar en levantar edificios, viviendas, vías de comunicación, mercados, hospitales, aeropuertos es pensar sobre todo en el desarrollo permanente del ser humano y darle un espacio tangible para su habitar. Cada línea, cada trazo, cada

curva en un edificio es muestra fehaciente de que el hombre existe y piensa, se piensa, construye y se construye. Al construir ciudades, el hombre habita. Es decir, vive y hace patente su presencia en el planeta, habita en un espacio y en ese espacio se manifiesta la esencia misma de su ser humano: su vida y su muerte.

La ciudad como lugar de los hombres.

“El hombre no puede existir fuera de las condiciones naturales por lo que le es necesario transformarlas para establecer sus condiciones materiales de existencia. El hombre social no puede vivir sin aprovechar lo que la naturaleza le brinda, Marx citado por Rosental y Ludin” [6].

Es precisamente en esa transformación que los hombres crean ciudades. La ciudad brinda las condiciones para el habitar humano y atender sus necesidades. La urbe da a los sujetos el espacio para producir, trabajar, crear y perpetuarse. Las ciudades de los hombres los cuidan, los resguardan de los elementos naturales. La edificación de los centros urbanos tiene una razón de ser y es la arquitectura la herramienta utilizada para edificarla.

“Las ciudades abonan a la evolución de la humanidad. El hombre camina derecho, dice Le Corbusier porque sabe a dónde va. La ciudad es donde el hombre encuentra su lugar y lo construye” [7]. “Si la arquitectura logra lugares para vivir no los logrará nunca "sobre el papel". Es mediante la transformación de la materia física que el nuevo lugar emerge. La ciudad es el lugar del hombre y en ella se construye un lugar para cada uno. Es la manifestación plena de la relación entre la sociedad y la naturaleza” [8].

En las ciudades se habita, es el hábitat humano y en su urbanización no sólo la naturaleza se ve afectada, la estructura física de las personas, su cuerpo y su mente se transforman, se adaptan. La arquitectura, al domar a la naturaleza, al meterla en cintura, transforma el cuerpo humano. Diseñar una presa, un aeropuerto,

construir un edificio de viviendas, todo tiene impacto en el ser humano. Al construir edificios altos, el clima, la temperatura, la cantidad de aire que circula o se acumula, cambian. El confort que representa vivir en una ciudad exige procesos adaptativos que modifican la estatura, el color y resistencia de la piel, la forma de los ojos, el pelo. Los hombres se acomodan a las nuevas condiciones producto de su vivir en las ciudades y esa adaptación los transforma emocional, cognitiva y físicamente como una forma de respuesta al entorno.

La Arquitectura se convierte así en ese “entre”, en ese “en medio” de las condiciones naturales y el cuerpo de las personas. Es ese “entre” cultural que une y religa el cuerpo y el entorno para que el hombre pueda saberse ahí. Las edificaciones son el “en medio” que permite hacer de las ciudades el lugar, el lugar de los hombres.

La idea original de evolución humana planteada por Charles Darwin a finales del siglo XIX evidenció el hecho de que el planeta no pertenece a los más fuertes o grandes, es de quienes logran adaptarse. El ingenio e inteligencia humana han sido la pieza clave para que, aun siendo uno de los seres vivos más débiles, la raza humana haya podido adaptarse y evolucionar a lo largo de la historia. La arquitectura urbana ha sido también una de las herramientas más importantes en la adaptación y evolución de las sociedades humanas.

No todo en las ciudades redundan en mejoras para el ser humano. Si bien la tendencia es la búsqueda del desarrollo, el crecimiento poblacional y su concentración en las ciudades -su densidad- resulta en la generación de elementos que afectan negativamente a las personas, contaminan su entorno. Demasiada luz, demasiado calor, demasiado ruido son también características propias de las ciudades y alteran el equilibrio necesario para que el hombre habite. Con frecuencia, eventos inesperados como una pandemia, una plaga o algún otro fenómeno natural, hacen necesario repensar las formas de construcción de los espacios a fin de

favorecer la adaptación de las personas. Por ello, el diseño arquitectónico evoluciona para brindar las mejores condiciones de vida.

1.2 La Acústica y la Arquitectura

La relación entre estas dos disciplinas es muy antigua, examinemos: la palabra raíz, en griego, de Acústica es “Akoustikós” y significa escuchar. Por otro lado, en Física se suele definir la Acústica como: “disciplina que estudia la generación, transmisión y recepción del sonido (ondas sonoras)”, por lo que otra acepción de Acústica es: “Características sonoras de un recinto”, que se emplea cuando se dice: el recinto tiene una buena Acústica. Esta acepción cobra relevancia, en el presente trabajo, cuando examinamos el significado de Arquitectura, que se puede definir como: “Arte y Ciencia de diseñar, proyectar y construir espacios delimitados (recintos) que se utilizan con un objetivo determinado”. De modo que podemos concluir que la Arquitectura y la Acústica se complementan para alcanzar el objetivo de lograr recintos donde al transmitirse el sonido, éste se escuche correctamente. Por supuesto que en esta definición es necesario profundizar en lo que consideramos como sonido y cómo haremos para calificarlo, en una escala física, o en una escala perceptual, cuando ese sonido se propague en un recinto.

Existen muchos tipos de sonido que el ser humano puede percibir, pero en la Acústica Arquitectónica, tradicionalmente se suelen considerar dos: la música y la voz.

“La importancia de diseñar y construir recintos para la música y la voz tiene una larga tradición y ha constituido un gran reto para los arquitectos y constructores. Inicialmente estos espacios arquitectónicos se concebían con criterios místicos, religiosos o mitos como suponer que los recintos debían cumplir los criterios armónicos de la música” [9].

No obstante que el conocimiento de diseñar y construir recintos para la música era muy empírico, algunos auditorios con excelente acústica sobrevivieron

a través de los años. Estos excelentes recintos sirvieron de ejemplo para el diseño de nuevas salas de conciertos. Como no había disponibles explicaciones científicas para dar cuenta de la excelente calidad de sonido de ciertos recintos, los arquitectos trataban de emular el exitoso precedente, seleccionando ciertas características acústicas consideradas como beneficiosas. Es decir, se diseñaba y se construía basándose en la experiencia, y no aplicando un procedimiento científico.

“La Acústica surge como disciplina científica con las aportaciones de Lord Rayleigh” [10]. A finales del siglo XIX (1895), con el trabajo de Wallace C. Sabine, donde mejora las condiciones de escucha de la Fogg Lecture Hall, después de muchas pruebas se dio cuenta de que las condiciones interiores modifican el tiempo de reverberación, finalmente, los usuarios quedaron satisfechos con las adaptaciones que realizó, dando con esto inicio a la Acústica Arquitectónica.

En un trabajo posterior que le fue encargado, los resultados no fueron los que W.C. Sabine esperó, tomándolo como un fracaso, lo que le obligó a retirarse como profesor para el resto de sus días, años después se demostró con la ayuda de nuevas investigaciones realizadas por expertos en la materia, que el Symphony Hall of Boston es una de las mejores salas de concierto del mundo. Con estos trabajos pioneros de W. C. Sabine, se demostró que el diseño arquitectónico de los recintos no es suficiente con el buen gusto del diseñador, además, se debe basar en cálculos científicos demostrables y repetibles, lo cual no basta con la información de las primeras investigaciones. Por lo tanto, debe continuar, proponer, verificar, corregir y seguir investigando, todo en pro de tener un confort acústico para los usuarios. Con esta idea, los investigadores de Acústica Arquitectónica han publicado sus trabajos para su análisis .

La contribución científica de Sabine a la Acústica Arquitectónica se puede resumir en el concepto y ecuación del tiempo de reverberación (TR), que se utiliza y ha dado buenos resultados hasta el día de hoy.

“El concepto de tiempo de reverberación consiste en establecer que las características acústicas del recinto se manifiestan en la cantidad de reflexiones acústicas que existen dentro del recinto provocando un decaimiento de sonido, corto o largo, que se puede predecir mediante la ecuación “(1) [11]:

$$T_R = 0.161 \frac{V}{A} \quad (1)$$

Donde:

V es el volumen del recinto.

A es la absorción sonora del recinto.

T_R es el tiempo que tarda en decaer a una millonésima del sonido una vez que la fuente sonora de excitación se ha apagado.

La importancia de esta fórmula no es sólo su simplicidad, sino también su claro reconocimiento y definición del tiempo de reverberación como objetivo de diseño. Seguramente Sabine consideraba la acústica arquitectónica como de dos dominios. Uno, de pura investigación física de la propagación del sonido y su interacción con el recinto, y el otro, la percepción subjetiva de los efectos musicales y su cuantificación. La fórmula de Sabine se usa para predecir el tiempo de reverberación. Mientras que el tiempo de reverberación se usa como parámetro crítico que influye en la apreciación de la música y aún hoy se investiga su valor óptimo.

La vigencia del tiempo de reverberación como indicador del desempeño acústico de un recinto, perdura aún hoy en día, aunque las investigaciones en el tema han propiciado el surgimiento de nuevos índices de desempeño acústicos fundamentados en un mejor conocimiento de los aspectos tanto perceptuales (Psico acústica) como en los físicos de la propagación del sonido en el interior de los recintos.

Los avances en las investigaciones de la acústica arquitectónica no sólo han permitido diseñar salas de conciertos, auditorios y recintos semejantes, con más certeza y con una mejor predicción de su desempeño, sino que también han permitido el desarrollo de mejores herramientas, tanto teóricas como experimentales para estudiar el comportamiento del sonido en recintos con una finalidad distinta a escuchar música en vivo. Esta línea de investigación se desarrolló a partir de saber que el sentido de la audición humana abarca otras dimensiones distintas a la percepción de la música y la voz cantada. Por poner un ejemplo, el estudio de la audición, junto con la instrumentación acústica, ha permitido, desarrollar un índice acústico, que permite cuantificar la transmisión del habla en un recinto de enseñanza o salón de clase de conferencias, etc., con ayuda de programas computacionales se obtienen esos valores (programa DIRAC entre otros), otro ejemplo:

“Saber que el sistema auditivo permanece activo aun cuando se duerma, ha permitido valorar el daño que puede provocar en nuestra salud exponerse a un sonido constante durante la noche” [12].

Las investigaciones sobre la forma en que se procesa la información auditiva han dejado en claro que el oído no sólo escucha pasivamente los sonidos, sino que ha desarrollado procesos neuronales para poder, por ejemplo, enmascarar ciertos sonidos o reconocer lo que dice una persona cuando otras hablan al mismo tiempo, esto es llamado efecto cocktail (cómo reconocemos lo que dice una persona cuando otras hablan al mismo tiempo). Todos esos conocimientos surgidos en la psicoacústica se han incorporado al cuerpo de conocimiento de la Acústica Arquitectónica, dotándola de técnicas y métodos para poder valorar la acústica de los recintos.

Otro tema de interés que cada vez cobra mayor importancia en la Acústica Arquitectónica es el de diseñar espacios donde se controle la transmisión de ruido. La definición usual de ruido es sonido no deseado. Esta definición, tiene la

implicación de que hay un sujeto que escucha el ruido y emite un juicio, basado en una serie de factores, considerando que lo que escucha no es lo deseado. Este sujeto puede emitir un juicio porque el sonido es demasiado fuerte, es molesto, o tiene una cualidad desagradable. En todos los casos, el sujeto aplica alguna valoración a lo que escucha para caracterizar el sonido como ruido. En algunos otros casos, el nivel del sonido es lo suficientemente alto como para causar daño auditivo, y el sujeto puede aceptar los niveles de ruido, como en una situación industrial, o en realidad puede querer el sonido, como en un concierto ruidoso o en un automóvil con música muy fuerte reproducida por sistema de audio. El concepto de sonido no deseado también implica que hay una persona que quiere que el nivel de sonido se reduzca; por lo tanto, los procedimientos del control del ruido se han desarrollado para satisfacer estas necesidades. En algunos casos, el control del ruido es un asunto administrativo como el establecimiento de horas de funcionamiento para actividades ruidosas al aire libre o gestionar de otro modo las fuentes de ruido para que los niveles sean aceptables. En la mayoría de los casos, sin embargo, se requiere realizar un análisis técnico de la fuente sonora, estudiar la propagación del sonido desde la fuente hasta el receptor, y aplicar una valoración psicoacústica para encontrar una solución de mitigación de ruido. Este proceso suele denominarse ingeniería de control de ruido. Por esta razón algunos autores, han sugerido utilizar el concepto de acústica de edificios en lugar de Acústica Arquitectónica.

En ese sentido, la acústica de edificios es la ciencia del control del ruido en los edificios. Esto incluye la minimización de la transmisión de ruido de un espacio a otro y el control de las características del sonido dentro de los propios espacios.

La acústica de los edificios es una consideración importante en el diseño, operación y construcción de la mayoría de los edificios, y puede tener un impacto significativo en la salud y el bienestar de la comunicación y la productividad. Pueden ser especialmente importantes en espacios como salas de conciertos, estudios de

grabación, salas de conferencias, etc., donde la calidad del sonido y su inteligibilidad son muy importantes.

La acústica de los edificios se encuentra presente en todos los aspectos de la vida moderna. La correcta aplicación de los principios de la Acústica Arquitectónica puede mejorar considerablemente la calidad de vida en el trabajo, en el tiempo libre y en el hogar. Algunos sonidos son deseables y deben mejorarse o enfatizarse (p. ej. la voz de los oradores en una cámara de debate, etc.), otros sonidos son altamente indeseables y deben reducirse o prevenirse (p. ej. , ruido en el taller de una fábrica, ruido de la fiesta de un vecino a primera hora de la noche, etc.). En muchos países se han establecido límites mínimos para los niveles de ruido permitidos en un entorno particular (por ejemplo, en el hogar, en el lugar de trabajo). También se han elaborado reglamentos que definen las propiedades acústicas mínimas aceptables de los elementos de construcción (por ejemplo, paredes, pisos, puertas) y el aislamiento acústico mínimo aceptable que debe existir entre viviendas contiguas. Estos reglamentos son a veces recomendaciones y, a veces, exigibles por ley. Una reflexión cuidadosa sobre las propiedades acústicas de un edificio propuesto en la etapa de diseño, quizás junto con los resultados de las mediciones acústicas en muestras de materiales y modelos a escala, a menudo puede ahorrar mucho tiempo y esfuerzo más adelante. Sin embargo, es frecuente que se deban realizar modificaciones para mejorar las propiedades acústicas del edificio terminado.

Para hacer esto de manera efectiva, por lo general se deben realizar mediciones antes de que se pueda proponer un remedio.

1.3 La Acústica Arquitectónica.

Dentro de la acústica se encuentra la acústica arquitectónica, que estudia la propagación del sonido, el nivel de presión sonora, el aislamiento acústico, absorción del sonido, así como las condiciones para que un espacio brinde confort

acústico a los humanos. Los sonidos son un elemento intrínseco al ser humano. Desde su aparición en la tierra las personas escucharon aquello que les rodeaba. Los sonidos se volvieron compañeros permanentes, brindaron seguridad. La precipitación de la lluvia, un trueno, los trinos y graznidos de las aves, etc., permitieron que los primeros humanos desarrollaran estrategias que utilizaron en su beneficio.

Sin embargo, con el paso del tiempo y la evolución de las actividades humanas, los sonidos se fueron diversificando y acumulando en un mismo espacio y al mismo tiempo. La acumulación de diferentes sonidos llega a incomodar y a alterar el entorno y, por lo tanto, las actividades diarias de las personas. A esos sonidos que son desagradables se les llama “ruido”. El ruido, al ser producto de las actividades de los hombres, también ha sido su compañero permanente. Para estudiar los sonidos, los ruidos y el silencio, se echa mano de la Acústica.

La Acústica es la rama de la física que estudia la generación, propagación y propiedades del sonido. El sonido es una onda mecánica que se propaga a través de la materia, en estado gaseoso, líquido o sólido. Es una sensación en el órgano del oído, producida por el movimiento ondulatorio en un medio elástico, normalmente el aire, esto es debido a rapidísimos cambios de presión generados por el movimiento vibratorio de un cuerpo sonoro conocido como fuente sonora.

La Acústica como disciplina, debe ser entendida como un espacio multidisciplinario donde la física, las ciencias de la ingeniería, la arquitectura y la música, entre otras áreas del conocimiento, disertan y reflexionan alrededor de un mismo objeto de estudio: las múltiples y complejas relaciones que se establecen entre los sonidos, el ruido, el silencio y el entorno físico. Así la Acústica participa en la comprensión y solución de problemas sonoros con el propósito de coadyuvar, de la mano de la arquitectura, en la construcción de espacios urbanos amigables con el ser humano. Por su parte, la arquitectura busca crear espacios sonoros

adecuados a la función de los inmuebles y a esto se le llama “Acústica Arquitectónica”.

No hay duda de que el sonido condiciona el carácter del espacio definiéndolo como el lugar en el que las personas pueden concentrarse, conversar, debatir o hacer conferencias, entre otras.

“Todo planteamiento acústico conlleva una serie de factores que afectan al aislamiento, generación, transmisión, absorción, reflexión, difusión y finalmente, a la escucha del sonido . Para conseguir un adecuado confort acústico en una sala, a la vez que una correcta inteligibilidad de la palabra es preciso que el ruido de fondo existente sea suficientemente bajo, que el nivel de campo reverberante sea igualmente bajo y que no existan ecos ni focalizaciones del sonido” [13].

Actualmente, la Acústica juega un papel importante en el diseño arquitectónico dado que busca dotar a las edificaciones, por un lado, de elementos reductores del ruido y por otro de elementos para mejorar los sonidos. La insonorización de los espacios protege la convivencia humana, cuida de la salud de las personas. Se sabe que el ruido, sobre todo el ruido permanente –como el que se produce en las grandes ciudades- provoca alteraciones psicosomáticas que alteran la vida cotidiana. Mejorar el confort acústico en los espacios urbanos como viviendas y escuelas, favorece una mejor convivencia y productividad.

Hoy en día, el ruido es un elemento contaminante en todas las ciudades del mundo y sus efectos se han dejado sentir. “La OMS, en su primer informe mundial sobre audición, declaró que una de cada cuatro personas presentará problemas auditivos en 2050” [14, 15]. Este dato basta para reconocer la importancia de los estudios acústicos en todos los espacios habitables de las ciudades.

La demanda generalizada para establecer políticas para la regularización del ruido ha llevado a diferentes organizaciones internacionales a establecer niveles

tolerables. Tal es el caso de la publicación en 1999 que hizo la OMS del documento denominado: “*Occupational and Environmental Health Team, donde los autores Berglund, Birgitta, Lindvall, Thomas, Schwela, Dietrich, H.*”, incluyen una tabla de valores guía para el ruido comunitario en ambientes específicos, ver Tabla 1.

Ambiente específico	Efecto(s) crítico(s) sobre la salud	L _{Aeq} [dBA]	Base de tiempo [h]	L _{AFmáx} [dBA]
Exteriores de zona de viviendas	Sería molestia, de día y al atardecer	55	16	-
	Molestia moderada, de día y al atardecer	50	16	-
Interior de vivienda	Inteligibilidad de la palabra y molestia moderada, de día y al atardecer	35	16	-
Interior dormitorios	Perturbación del sueño, de noche	30	8	45
Exterior dormitorios	Perturbación del sueño, ventana abierta (valores exteriores)	45	8	60
Aulas escolares y preescolares, interior	Inteligibilidad de la palabra, perturbación de la extracción de información, y la comunicación de mensajes	35	Durante las clases	-
Dormitorios preescolares, interior	Perturbación del sueño	30	En horas de sueño	45
Patio de recreo escolar, exterior	Molestia (fuentes externas)	55	Durante los juegos	-
Hospital, dormitorios de guardia, interior	Perturbación del sueño, de noche	30	8	40
	Perturbación del sueño, de día y atardecer	30	16	-
Hospitales, habitaciones, interior	Interferencia con el descanso y la recuperación	Lo menor posible		
Áreas industriales, comerciales y de tránsito, interior y exterior	Daño auditivo	70	24	110
Ceremonias, festivales y actos de entretenimiento	Daño auditivo (concurrentes: < 5 veces por año)	100	4	110
Sistemas públicos de refuerzo sonoro, exteriores e interiores	Daño auditivo	85	1	110
Música y otros sonidos a través de auriculares	Daño auditivo (valor de campo libre)	85 ⁽²⁾	1	110
Sonidos impulsivos de juguetes, pirotecnia y armas de fuego	Daño auditivo (adultos)	-	-	140 ⁽¹⁾
	Daño auditivo (niños)	-	-	120 ⁽¹⁾
Exteriores en parques y reservas naturales	Perturbación de la tranquilidad	(3)		

(1) Nivel de pico L_{peak}, no L_{AFmáx}, medido a 100 mm del oído

(2) Utilizando auriculares, valores adaptados a campo libre

(3) Deben preservarse las áreas exteriores existentes, y mantener una baja relación entre ruidos intrusivos y ruido de fondo natural

Tabla 1 - Valores guía para el ruido comunitario en ambientes específicos.

No hay duda alguna de que el sonido define el carácter del espacio. Todo planteamiento acústico conlleva una serie de factores que afectan al aislamiento,

generación, transmisión, absorción, reflexión, difusión y finalmente, a la escucha del sonido.

“La Acústica Arquitectónica inicialmente, estudió la forma en que se propaga, percibe, mide y modela el sonido en recintos de grandes volúmenes, como las salas de concierto, auditorios, etc.” [16].

Una visión que atiende más a las condiciones actuales es considerar que los estudios de Acústica Arquitectónica deben estar presentes en la construcción de todos los espacios.

“Es necesario reconocerla como la ciencia que tiene como finalidad conseguir un buen sonido dentro de un edificio cualquiera. Es la encargada de equilibrar la interacción entre las personas y el sonido, tanto en espacios interiores como en exteriores” [17].

Dada la creciente demanda de atención al ruido, recientemente se ha identificado la necesidad de explorar una línea de investigación denominada **acústica de edificaciones**. Esta nueva ruta tiene su objeto de estudio en recintos con un volumen de hasta 566 m³.

“Es decir, pone atención en las condiciones acústicas de espacios como aulas y salones de clase, viviendas, estudios de grabación, etc.” [18].

Si bien la acústica de edificaciones está asociada con la tradicional **Acústica Arquitectónica**, difiere de ésta en aspectos como:

- a) Su campo modal (modo propio) en lugar de campo difuso.
- b) La necesidad de ampliar la gama de frecuencias de análisis hacia frecuencia por debajo de 100 Hz, que es un campo poco estudiado.
- c) Estudia los espacios con un volumen menor a 25 m³.

Como puede observarse, la Acústica de edificaciones, aun cuando poco explorada, resulta ser el referente ideal para el presente estudio que tuvo como espacios de investigación diez aulas de clase de la Unidad de Posgrado de la UNAM, campus Ciudad Universitaria.

1.4 Objetivo de la Arquitectura

“El objetivo de la Arquitectura es encontrar la mejor manera de distribuir el espacio para que la gente se sienta bien en él” [19]. “La Arquitectura es el arte de diseñar y construir edificios” [20]. “La Arquitectura (del latín architectūra, architectūrae, y este a su vez del griego antiguo ἀρχιτέκτων, architécōn, ‘arquitecto’ o ‘constructor jefe’, compuesto de ἀρχός, archós ‘jefe’, ‘guía’, y τέκτων, téctōn, ‘constructor’). Según el diccionario de la Real Académica Española” [21]. “Arquitectura es el arte y la técnica de proyectar, diseñar y construir modificando el hábitat humano, estudiando la estética, el buen uso y la función de los espacios, ya sean arquitectónicos o urbanos” [22].

“Arquitectura: Es la disciplina que proporciona los conocimientos, habilidades del pensamiento y destrezas psicomotrices para resolver correctamente cualquier problema de diseño arquitectónico” [23].

El diseño arquitectónico debe satisfacer las necesidades de espacios habitables para el ser humano, tanto en lo estético como en lo tecnológico. Entendiendo al diseño como proceso creativo encausado hacia una meta determinada, existen ciertas bases que apoyen su desarrollo y su creatividad. Estas bases no han sido formuladas a modo de reglamento a seguirse al pie de la letra, pues se rigen por la creatividad. La Arquitectura, es cada vez más vista desde perspectivas globales, ecológicas e inclusivas.

En nuestros días, la teoría de la arquitectura comprende todo lo que se muestra en los manuales de los arquitectos: legislación, normas y estándares de

edificios. Se pretende que todo ayude en el trabajo del arquitecto y mejore su producto -la calidad de los edificios-. La intención así es la misma que en la tecnología y la producción en general: las teorías comprobadas ayudan a los diseñadores a hacer su trabajo mejor y más eficientemente lo que, incluso, ayuda a hacer cosas que, en tiempos pasados, se creían imposibles. Como reza un viejo dicho, no hay nada más práctico que una buena teoría.

La teoría de la arquitectura consiste en todo el conocimiento que el arquitecto usa en su trabajo, incluyendo cómo seleccionar el sitio mejor y los materiales de construcción más adecuados. Por otra parte, existen orientaciones sobre cómo diseñar construcciones prácticas, su fácil mantenimiento y sus reparaciones. Podemos descubrir que esto incluye estudiar empíricamente qué material usan los arquitectos en la obra. En este estudio se sostiene que, *“además de las normas y métodos motivados racionalmente, en la obra se involucran aspectos heterogéneos y “acientíficos” como los prejuicios de los clientes, los caprichos de la moda, las decisiones de ahorro de costes por parte de las compañías constructoras y los manejos políticos”* [24].

En esta lógica, el diseño arquitectónico debe considerar el destino final del edificio, su ubicación geográfica y materiales de construcción a utilizar. Todo ello requiere de la comparecencia de propuestas estéticas, de conocimientos como la sustentabilidad, la estructura, los acabados finales, la iluminación, la ventilación, la comunicación, la seguridad y la higiene. Todas estas especialidades se deben incorporar al diseño final tomando en cuenta el entorno social.

Para evitar en lo posible los altos niveles de ruido al interior de los espacios, es necesario implementar acciones que ayuden a amortiguarlo. Para eso se deben hacer estudios específicos y saber en qué condiciones acústicas se encuentran los edificios futuros o ya existentes. Es indispensable, en la proyección de una nueva construcción saber, por ejemplo, la ubicación incluyendo vías de comunicación, fuentes generadoras de ruido (eventual o periódico), por mencionar sólo algunos.

Cuando estos ruidos ocurren, afectan a los usuarios negativamente en los lugares habitacionales, escolares, entre otros, lo que se manifiesta como incomodidad y disgusto lo cual demerita la calidad de vida.

En la actualidad, hay factores ambientales, urbanos, industriales o de comunicación, que no pueden ser evitados. La acción humana es muy amplia, por lo que, una estrategia de atención al ruido debe ser encaminada a proponer formas en las que pueda ser minimizado, ver Diagrama 1.

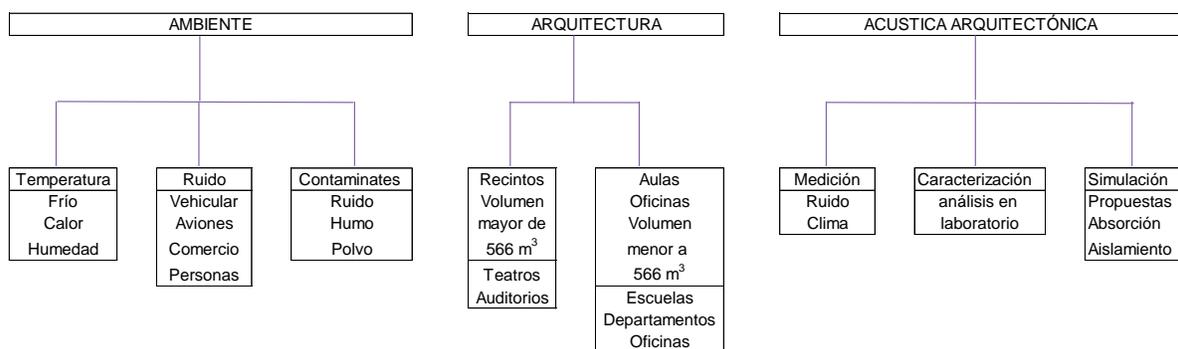


Diagrama 1 - Factores que intervienen para evaluar el entorno, identificar posibles conflictos y generar propuestas de solución.

1.5 Diseño funcional en la Arquitectura

En la Arquitectura existen muchas tendencias de diseño, una de ellas es la Arquitectura funcionalista. Es una corriente arquitectónica que surgió a finales del siglo XIX y principios del XX. Se caracteriza especialmente por la simplificación de las formas lo que implica la eliminación de casi toda ornamentación. Mies Van der Rohe y Le Corbusier son dos de los arquitectos más reconocidos en esta corriente. Sin embargo, la arquitectura funcionalista como tal dio inicio gracias a la perspectiva del arquitecto Louis Sullivan, creador de la frase “la forma sigue a la función”. Una de las críticas que recibe la idea de basar la forma en la función señala que ésta puede ser una estrategia de diseño que omita considerar aspectos estéticos, psicológicos y sociales. La arquitectura no trata sólo sobre funcionalidad, ya que incluso las funciones de un espacio arquitectónico pueden variar según la cultura.

El diseño funcional aplica cuando se requieren realizar actividades específicas en el espacio. Al llevarlas a cabo, se espera que el espacio no ofrezca dificultades, más bien, se busca que las facilite.

“Los diseños funcionalistas se enfocan en eliminar todo aquello que no cumpla una función de uso o estructural. La Arquitectura, al ser también un arte, no necesariamente debe cumplir con otras funciones más allá que la de expresar lo que el arquitecto desea plasmar en su obra” [25].

El enfoque funcionalista, es parte de los enfoques recuperados en la presente investigación pues, al incluir a la Acústica como una de las áreas de conocimiento, se pone énfasis en la búsqueda de que, frente a los problemas acústicos identificados en las edificaciones estudiadas, se proponen soluciones que favorecen y mejoran las condiciones estructurales.

En síntesis, podemos decir que la Arquitectura y la Acústica son un binomio necesario en la construcción de nuevas edificaciones. La información brindada por la Acústica proporciona elementos que permiten decidir la ubicación, los materiales, los acabados y los costos de la obra. No obstante, también es importante reconocer que la tarea arquitectónica involucra los conocimientos aportados por otras áreas del conocimiento como la física, la ingeniería y la sociología, por mencionar sólo algunas. Hoy en día, el trabajo arquitectónico debe ser entendido como un área multidisciplinaria donde el arquitecto se convierte en parte de un equipo con un mismo objetivo: el diseño y construcción de ambientes habitables y amigables con la salud y la vida de las personas.

Con lo hasta aquí expuesto, podemos resumir que en las ciudades los hombres habitan y se construyen en sociedad. Los sonidos propios de los ambientes habitados, a lo largo del tiempo y con el crecimiento de las ciudades, se han convertido en ruido. El ruido es un acompañante permanente del ser humano,

sin embargo, su exposición constante genera alteraciones ambientales que dañan la salud de las personas. La Arquitectura tiene el noble fin de ser el “en medio” entre las condiciones ambientales y las personas. Dada esta responsabilidad, el diseño arquitectónico debe recurrir a disciplinas como la Acústica para diseñar y construir espacios con niveles adecuados de confort acústico. Los estudios desde el punto de vista de la Acústica Arquitectónica, entonces, tienen el objetivo de aportar información que haga de las edificaciones (viviendas, escuelas, hospitales, etc.) y de las ciudades los lugares donde los hombres habiten en las mejores condiciones.

1.6 Objetivo del diseño acústico - arquitectónico

Frente al sostenido aumento en la contaminación acústica de las ciudades, uno de los objetivos del diseño acústico arquitectónico efectivo es proporcionar confort acústico a espacios habitacionales, escolares, etc., con el fin de facilitar la comunicación, el descanso y la inteligibilidad del habla. De acuerdo con el momento histórico y de ubicación, la ciudad completa enfrenta niveles elevados de contaminación acústica. Este hecho requiere que, en los proyectos arquitectónicos, se incorporen estrategias de construcción como multicapas en los muros, ventanas de doble cristal, sellos en puertas y ventanas etc. A la par, es indispensable identificar las fuentes de ruido, así como los canales por los cuales ingresa del exterior al interior. Es decir, se debe saber si el ruido se propaga por vía aérea o estructural.

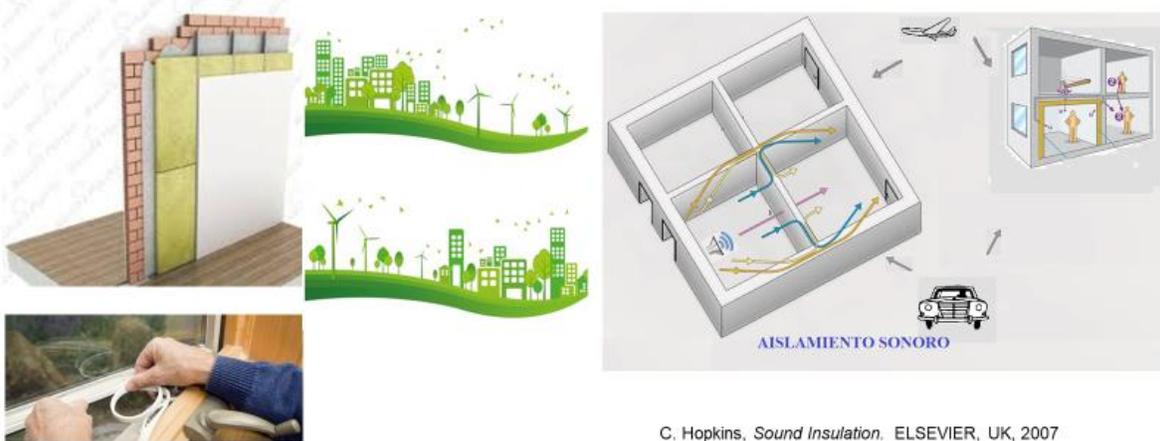
La Figura 1, muestra cuáles son los objetivos de la arquitectura frente al ruido enfatizando su contribución para su control, así como el dotar a las edificaciones, cualquiera que sea su función, de un mejor aislamiento sonoro.



Objetivos de la arquitectura ante el ruido

La Arquitectura contribuye a dar soluciones de control de ruido, tanto en la trayectoria como en la protección del receptor.

Dotar a las edificaciones (viviendas, escuelas, hospitales, etc.) de una mejor protección (aislamiento) contra el ruido



C. Hopkins, *Sound Insulation*. ELSEVIER, UK, 2007

Figura 1 – Aislamiento sonoro en la arquitectura.

1.7 Marcos de referencia

Existen dos marcos de referencia, internacional y nacional.

1.7.1 Marco internacional

La Organización Mundial de la Salud [26], “*identifica a Latinoamérica como la región más contaminada por ruido en el mundo y en la que destacan Buenos Aires y Ciudad de México (CdMx), con los niveles de contaminación acústica más elevados (Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial)*” [27].

La OMS en Europa [28] “*alerta sobre que, por su impacto, la contaminación acústica es “la segunda causa de enfermedad por motivos medioambientales, por detrás de la polución atmosférica, y no sólo es una molestia medioambiental, sino también una amenaza para la salud pública”.*

Datos y cifras

Más de mil millones de personas de entre 12 y 35 años corren el riesgo de perder la audición debido a la exposición prolongada y excesiva a música alta y otros sonidos recreativos. Esto puede tener consecuencias devastadoras para su salud física y mental, educación y perspectivas de empleo.

“En el mundo, 1500 millones de personas viven con algún grado de pérdida de audición, de las cuales unos 430 millones necesitan servicios de rehabilitación” . “La OMS advierte que por el aumento en la generación de ruido urbano una de cada cuatro personas presentará problemas auditivos en 2050 ” [29].

1.7.2 Marco nacional y de la Ciudad de México

México es uno de los pocos países del mundo donde el ruido no es un tema prioritario y existen pocas regulaciones al respecto. La carencia de equipos para estudiar este contaminante, la falta de personal capacitado, así como desconocimiento del área de acústica ambiental, redundan en el incumplimiento de las normas, generando una ciudad ruidosa y desconsiderada con la salud de sus habitantes.

Legislación

- *El Artículo 4° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos [30], establece que:*
 - *“Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El estado garantizará el respeto a este derecho”.*
- *El Artículo 13 de la Constitución Política de la Ciudad de México [31] establece que:*

- *“Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. Las autoridades adoptarán las medidas necesarias, en el ámbito de sus competencias, para la protección del medio ambiente y la preservación y restauración del equilibrio ecológico, con el objetivo de satisfacer las necesidades ambientales para el desarrollo de las generaciones presentes y futuras”.*

La Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales [32] señala que:

- *“La contaminación acústica” es un problema ambiental importante con cada vez mayor presencia en la sociedad moderna. Debido al desarrollo de actividades industriales, comerciales y de servicios se generan fuentes fijas y móviles que producen diferentes tipos de ruido que, de acuerdo con su intensidad, frecuencia y tiempo de exposición, repercuten no sólo en los seres humanos sino en todos los seres vivos que conforman los ecosistemas en los que se encuentra inmersa la población humana”.*
“La exposición constante al ruido produce pérdida de audición, de memoria, de atención y alteraciones en la conducta, además de daño a los ecosistemas”.

Situación sonora de la CdMx

Según especialistas” [33].

- *“En la CdMx, la exposición al ruido es de 85 decibeles durante tiempos prolongados lo que se traduce en daños auditivos para el 75% de la población. El valor del ruido está 20 puntos por encima de los 65 decibeles que la OMS establece como límite en este campo. En las grandes vialidades se registran entre 70 y 85 decibeles durante 350 días del año, por lo que se considera que hay una mala calidad auditiva en la CdMx.*

Uno de los problemas que tiene la CdMx y que evita mejorar la situación sonora, son las pocas leyes, reglamentos, normas o algún tipo de instrumento jurídico que regule la cantidad de contaminación acústica o ruido en los diferentes espacios urbanos, Figura 2.



Figura 2 – La OMS ante el ruido.

Datos por alcaldía CdMx

Según el censo del año 2020, la población en la CdMx es de 9,209,944 habitantes, en una superficie de 1,485 km². En la Tabla 2, se muestran la CdMx por, Alcaldía, población, superficie y densidad de habitantes.

Demarcaciones territoriales de la Ciudad de México					
Alcaldías	Población (2020) ⁷	Superficie (km ²)	Densidad de habitantes (km ²)	Código postal	
Álvaro Obregón	759 137	96.17	7 894	01000 - 01999	
Azcapotzalco	432 205	33.66	12 840	02000 - 02999	
Benito Juárez	434 153	26.63	16 303	03000 - 03999	
Coyoacán	614 447	54.4	11 295	04000 - 04999	
Cuajimalpa de Morelos	217 686	80.95	2 689	05000 - 05999	
Cuauhtémoc	545 884	32.4	16 848	06000 - 06999	
Gustavo A. Madero	1 173 351	94.07	12 473	07000 - 07999	
Iztacalco	404 695	23.3	17 369	08000 - 08999	
Iztapalapa	1 835 486	117	15 687	09000 - 09999	
Magdalena Contreras	247 622	74.58	3 320	10000 - 10999	
Miguel Hidalgo	414 470	46.99	8 820	11000 - 11999	
Milpa Alta	152 685	228.41	668	12000 - 12999	
Tláhuac	392 313	85.34	4 597	13000 - 13999	
Tlalpan	699 928	312	2 243	14000 - 14999	
Venustiano Carranza	443 704	33.4	13 284	15000 - 15999	
Xochimilco	442 178	122	3 624	16000 - 16999	

Tabla 2 - Demarcaciones territoriales y población de la CdMx.

Tipo de denuncias, por año y por alcaldía

Con relación al ruido urbano, las quejas de los vecinos se han dejado oír. En las tablas 3 y 4, se puede observar que, el ruido se encuentra entre los veinte tipos de contaminación de la ciudad de México al mismo tiempo, se nota que la contaminación acústica es un factor de preocupación de los habitantes y se demuestra mediante denuncias a las autoridades correspondientes. Las alcaldías Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo son los espacios urbanos donde mayor número de denuncias se presentan.

Procuraduría Ambiental y Ordenamiento Territorial (PAOT) principales denuncias por año																							
22-feb-22																							
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Totales	
Sin clasificación	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Agua	0	27	22	35	35	38	42	52	73	39	22	32	50	16	28	33	41	33	5	21	0	644	
Aire	4	33	36	60	35	46	33	36	58	134	50	42	40	45	72	54	50	40	0	0	0	868	
Animales	6	8	3	2	5	18	36	48	59	78	118	456	445	643	908	1287	1696	1872	488	5536	642	14354	
Anuncios	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36	3	39	
Arbolado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	86	495	44	625	
Barrancas	1	14	28	23	24	19	12	16	20	19	15	35	21	16	17	16	32	19	0	0	0	353	
Construcción	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	212	1375	119	1707
Contaminación Visual	0	0	3	4	15	0	2	5	3	2	12	13	6	10	1	8	7	12	0	6	0	109	
Emisiones a la atmósfera	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	124	9	141	
Energía Luminica	0	0	2	0	0	1	1	1	0	0	0	2	0	0	0	1	0	4	2	3	1	18	
Gases Olores y Vapores	0	15	25	19	29	30	65	53	64	45	33	50	28	26	27	12	27	29	0	0	0	577	
Residuos	1	24	64	60	64	84	115	156	122	220	268	167	111	61	33	29	28	30	7	33	4	1681	
Ruido	8	167	140	189	240	232	253	330	345	408	480	596	718	863	840	782	954	888	219	1408	139	10199	
Suelo de Conservación	6	20	23	14	34	33	26	36	917	171	34	36	35	31	27	13	21	38	0	0	0	1515	
Uso de Suelo	8	59	133	310	310	381	523	499	565	829	846	1192	1263	1266	1237	1605	1899	1679	101	809	63	15577	
Vibraciones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	8	0	10	
Zonificación	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38	93	4	135	
Áreas Naturales Protegidas	0	0	0	6	2	10	10	3	5	13	9	29	18	14	13	13	53	15	0	0	0	213	
Áreas Verdes	15	90	130	137	278	302	324	290	396	420	454	507	656	461	334	408	382	483	25	92	2	6186	
Áreas de Valor Ambiental	0	0	1	9	8	4	5	3	27	19	16	41	34	14	22	33	46	26	0	0	0	308	
Total	49	457	610	874	1079	1198	1447	1528	2654	2397	2357	3198	3425	3466	3559	4294	5236	5169	1193	10039	1030	55259	

Tabla 3 – Principales denuncias por año.

PAOT Alcaldía con mayor número de denuncias por ruido por año																							
22-feb-22																							
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	s	
Álvaro Obregón	Ruido	0	10	11	23	13	12	18	12	11	16	29	29	37	47	58	32	40	53	8	59	6	524
Azcapotzalco	Ruido	1	12	7	15	13	12	15	14	25	28	27	27	37	40	32	29	42	17	8	49	6	456
Benito Juárez	Ruido	0	27	18	28	26	32	34	56	51	60	60	94	103	148	122	120	152	108	34	201	20	1494
Coyoacán	Ruido	1	20	14	14	15	21	30	43	46	21	32	38	36	64	58	47	63	86	15	115	11	790
Cuajimalpa de Morelos	Ruido	0	2	2	2	1	4	2	0	2	5	7	3	7	8	5	11	12	2	6	1	84	
Cuauhtémoc	Ruido	1	18	21	30	46	58	73	67	83	90	154	152	207	256	216	236	287	276	77	315	43	2706
Gustavo A. Madero	Ruido	0	18	17	19	27	19	23	24	25	21	25	36	35	27	44	37	61	40	15	105	9	627
Iztacalco	Ruido	0	10	10	13	14	10	9	25	6	17	5	16	22	25	31	20	27	25	5	51	9	350
Iztapalapa	Ruido	4	14	11	22	27	17	19	28	32	36	33	48	70	75	78	55	43	60	17	148	11	848
La Magdalena Contreras	Ruido	0	1	1	0	1	0	0	4	1	2	7	5	12	11	8	11	8	9	4	17	1	103
Miguel Hidalgo	Ruido	0	14	8	8	26	10	15	19	21	45	34	67	76	70	92	103	121	105	17	147	7	1005
Milpa Alta	Ruido	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	2	2	1	0	1	0	0	0	4	0	15	
Tláhuac	Ruido	0	5	1	2	4	8	2	12	5	4	6	7	7	4	8	11	10	17	3	36	3	155
Tlalpan	Ruido	0	11	9	6	13	11	4	10	15	35	40	37	28	47	32	34	41	34	12	74	2	495
Venustiano Carranza	Ruido	1	3	6	5	8	8	5	11	12	27	13	23	31	30	32	28	33	29	1	56	5	367
Xochimilco	Ruido	0	2	4	2	6	10	4	3	10	4	7	8	12	11	21	13	15	17	1	25	5	180
Total		0	219	1408	139	1766																	

Tabla 4 – Alcaldía con número de denuncias por ruido por año.

1.7.3 Marco institucional de la UNAM

La UNAM, tiene el título de ser La Universidad de la Nación, ubicada en la posición # 93 de calidad académica a nivel mundial [34], y la 2a de Latinoamérica. Tiene una extensión total de 730 Hectáreas.

La Ciudad Universitaria se localiza al sur de la CdMx. En su inicio el ruido no era molesto porque se ubicó en una zona, en ese entonces, rural. Inicialmente exitoso el diseño arquitectónico de los espacios y edificaciones de la UNAM, apenas se ha modificado en los últimos 70 años. Prácticamente se diseña y construye igual que cuando se creó el campus de CU en el año 1952.

Los diseños más recientes y construcciones de aulas no cumplen con las necesidades funcionales que demandan los cambios que ha sufrido el medio ambiente que rodea al campus. Ha sido intenso el crecimiento de la población que utiliza los espacios la Ciudad Universitaria. Se calcula que, en el ciclo escolar 2023 habrá más de 350,000 estudiantes, profesores y trabajadores. Esta gran cantidad de usuarios requiere de movilidad dentro del campus, lo que ha ocasionado un incremento importante del tránsito vehicular y cambios en la movilidad dentro del campus (transporte público gratuito por medio de autobuses a diésel y gasolina), en consecuencia, una alta generación de ruido.

Para ilustrar las dificultades que surgen al continuar con el diseño arquitectónico original, se presenta un estudio realizado en el complejo arquitectónico de la Unidad de Posgrado de la UNAM, campus Ciudad Universitaria (ver caso tres de este trabajo). El edificio, por su diseño semicircular tiene todo tipo de orientaciones solares, ventilación natural, exposiciones a ruido interno (pasillos, patio central) y ruido externo (vialidades). El complejo arquitectónico fue construido en el año 2013.

2 - Normas y reglamentos

Para atender y controlar las emisiones de ruido, se pueden identificar diversas y variadas iniciativas. Entre ellas se pueden nombrar la elaboración de mapas de ruido, las estaciones de monitoreo permanente y por supuesto, se han diseñado criterios que norman las emisiones de ruido en el espacio urbano. En este apartado se abordan las normas acústicas nacionales e internacionales que existen y que fueron utilizadas como parámetros en los tres casos de estudio que se realizaron.

2.1 Normas acústicas internacionales que se utilizaron

Las normas internacionales que se utilizaron en esta investigación son: la ANSI/ASA (American National Standard Acoustical / Acoustical Society of America) y las normas ISO (International Organization for Standardization):

- *“ANSI/ASA S12.60-2010: American National Standard, Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools - Part 1: Permanent Schools (ANSI/ASA 2010)”* [35]. Esta norma es de los Estados Unidos de América. Su uso fue contemplado dado que establece los parámetros de tiempo de reverberación y ruido de fondo en escuelas de nivel básico. Si bien la investigación se realizó en aulas de educación universitaria, la consulta de estas normas resultó de utilidad para tener un parámetro de referencia.
- *“ISO 717-1:2013. Acoustics —Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation (ISO 717-1 2013)”* [36]. Esta norma es europea, se utiliza para obtener el valor de aislamiento de un sólo número. Dado que proporciona el valor de aislamiento en un espacio, esta norma se usó para identificar los problemas acústicos presentes en las aulas de clase estudiadas.

- “ISO 10140: 2010. Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 2: Measurement of airborne sound insulation (ISO 10140-2 2013)” [37]. Esta norma es europea, mide el aislamiento acústico en laboratorio (pruebas controladas). Usar esta norma fue de gran utilidad pues permitió obtener información del aislamiento acústico en condiciones controladas para, posteriormente, contrastarla con la obtenida en campo, objeto de estudio del caso 1.
- “ISO 16283:2014. Acoustics – Field measurement of sound insulation in building of building elements - Part 1: Airborne sound insulation (ISO 16283-1 2014)” [38]. Esta norma es europea, mide el aislamiento sonoro a elementos de las edificaciones, por ejemplo, muros divisorios entre viviendas. En esta investigación, esta norma brindó los parámetros necesarios para identificar las condiciones acústicas en las viviendas y en sus muros, objeto de estudio del caso 2.
- “ISO 16283:2016. Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 3: Façade sound insulation (ISO 16283-3 2016)” [39]. Esta norma es europea, mide el aislamiento sonoro de la fachada de las edificaciones en campo. El uso de esta norma en la investigación permitió corroborar el supuesto de que las mediciones acústicas en campo y en laboratorio, distan en sus resultados, por ello resultó de una importancia relevante. objeto de estudio del caso 3.

2.2 Normas acústicas nacionales

En México, en el sector acústico-arquitectónico y debido al reciente interés por el tema y la reducida investigación realizada, existen pocas normas que puedan ser consideradas en los diseños arquitectónicos que buscan el confort acústico. Por ello, con frecuencia, se acude a las normas internacionales que, sin embargo, dejan

de lado aspectos culturales que impactan en la generación y control de ruido en las ciudades mexicanas.

A nivel nacional, se han realizado esfuerzos tanto públicos como privados por regular la generación de ruido. No obstante, frente a la ausencia de políticas públicas claras, su uso es escaso pues se les considera poco claras y confusas. En seguida se enlistan las normas nacionales existentes sobre el tema.

- NOM-081-ECOL-1994, revisión del 23 de abril 2003 [40] .
- NORMA Oficial Mexicana NOM-011-STPS-2001 [41].
- Ley Ambiental del Distrito Federal, 13 enero del 2000 [42].
- Norma Ambiental para el Distrito Federal, NADF-005-AMBT-2013 [43].
- Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED) [44].
- Recomendaciones Leed, 25 julio 2019 [45].

Para efectos de esta investigación se consultaron las recomendaciones acústicas para el sector educacional que se encuentran en *“las normas del Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa Vol. 3, Tomo IV-acustica, aun cuando éstas norman los ambientes acústicos en la educación básica”*.

Normas y reglamento de la CdMx

En la Ciudad de México, en los años recientes, se observa un mayor interés por los temas de Acústica Urbana y Acústica Arquitectónica. Como resultado, algunos criterios de construcción incorporan el tema acústico y se incluyen en el reglamento de construcción de la CdMx. Son un reglamento y normas para desarrollar proyectos y ejecución de obras de todo tipo y cuya aplicación resulta difícil debido a la falta de precisión en sus planteamientos. Por ello, cuando el problema acústico no está contemplado en los alcances de las normas nacionales, se recurre a las normas internacionales.

Son básicamente 2 documentos orientadores publicados en la Ciudad de México:

- Reglamento de Construcción para la CdMx, 15 de diciembre del 2017 [46].
- Normas Técnicas Complementarias (NTC), 8 de febrero del 2011 [47].

Por la naturaleza misma del presente estudio, el reglamento y las normas nacionales, se tuvieron como referentes.

Normas acústicas propuestas por empresas

Debido a las pocas normas nacionales existentes en los campos de interés para la arquitectura (construcción, fabricación de elementos de cerramiento, oficinas, educación, salud, etc.), muchas empresas han hecho esfuerzos por generar Normas Mexicanas (NMX) recomendaciones que no son obligatorias, estas en ocasiones tienen costo, algunas empresas que han tenido iniciativas al respecto son:

- Cuprum S.A. de C.V.
- Consorcio industrial Valsa S.A. de C.V.
- Alupanel servicios Arquitectónicos S.A. de C.V.
- Saint Gobain Glass México.
- Vitro vidrio y cristal S.A. de C.V.
- Dorma México S de R.L. de C.V.

3 – El escenario acústico, contaminación y confort acústico

3.1 Contaminación acústica

El crecimiento de la población mundial ha provocado un incremento en la demanda de espacios arquitectónicos de todo tipo, que requieren diseños y soluciones especiales de construcción altamente complejas. En principio, es difícil atender la necesidad de confort acústico por la cantidad de requisitos que debe cubrir un diseño arquitectónico, pues es necesario tomar en cuenta aspectos como: la inversión económica, el costo energético, tanto en su construcción como para su funcionamiento, o sea, la sustentabilidad (ubicación, orientación, ventilación, calefacción, iluminación) y aunque en algunos casos se ha reducido la emisión de ruido de vehículos de transporte público y privado, en algunos casos, éstos han aumentado en cantidad.

Las edificaciones expuestas a la contaminación acústica o ruido no pueden implementar efectivamente su función. En espacios dedicados a la enseñanza, la presencia de altos niveles de ruido enmascara el mensaje sonoro emitido por el profesor y esto hace que se pierda la comprensión del mensaje oral (inteligibilidad). Al mismo tiempo, se ve comprometida la ventilación natural a través de ventanas, dada la necesidad de mantenerlas cerradas a fin de mitigar el ruido externo. Una solución para hacer frente a esta situación es construir envolventes que puedan ofrecer un aislamiento acústico eficiente. Con ello, al mismo tiempo, se facilita la ventilación natural.

“No menos importante es dotar a las construcciones de las condiciones materiales que provean bienestar y comodidad. Es decir, los diseños arquitectónicos requieren incluir elementos básicos de acústica con el fin de garantizar confort acústico” [48].

Este último concepto, a menudo señalado como “confort”, requiere una mejor y más cuidadosa explicación. Se dice que el ser humano debe ser indiferente frente al ambiente, para poder concentrarse en lo que tienen que hacer (descansar, aprender, crear). De tal modo, vivir en un ambiente confortable, significa eliminar cualquier sensación desagradable que le impida concentrarse.

Según la OMS, *“las personas expuestas al ruido sufren daños auditivos y no auditivos en su salud cuando éste alcanza niveles por arriba de los 65 decibeles. El grado varía gradualmente según la intensidad del sonido y el tiempo de exposición”* [49].

Se puede decir que una meta en las grandes ciudades es construir espacios donde el silencio permita el desarrollo de la vida cotidiana. No obstante, las condiciones actuales han redundado en el crecimiento de ciudades ruidosas donde la salud de sus habitantes se ve vulnerada.

El aumento de la población y la industria, el creciente hacinamiento, la fuerte exposición a contaminantes como el ruido de vehículos, gases tóxicos, radiación, etc., forma parte de nuestro hábitat. En este contexto, la Arquitectura con sus diseños, materiales y mobiliario debe procurar el confort acústico, ver Figura 3.

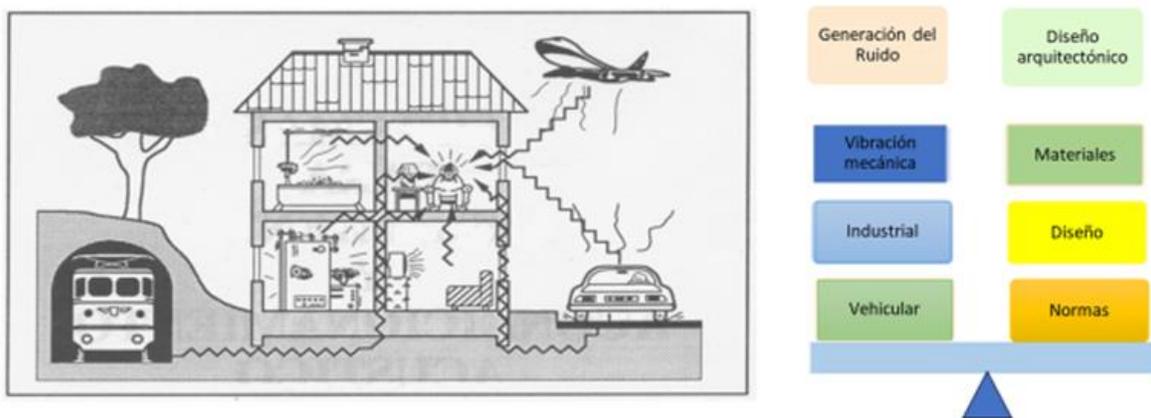


Figura 3 - Vías de acceso del Ruido VS Arquitectura.

“Revitalizados por la acumulación de pruebas científicas de los efectos nocivos de la contaminación acústica, varios países, sobre todo de la Comunidad Europea y Estados Unidos de América, han instituido como un objetivo reducir sustancialmente los niveles de ruido al cual se ven expuestas las personas. Esto ha dado lugar a iniciativas importantes que buscan un enfoque común para prevenir o reducir los efectos nocivos del ruido ambiental. Entre las acciones más importantes se encuentra la elaboración de mapas estratégicos de ruido. Esto, para coadyuvar en la creación de zonas tranquilas y mejorar los ambientes laborales, educativos y habitacionales” [50].

Por esta razón el confort acústico se centra en lograr un aislamiento sonoro adecuado dejando en segundo término el acondicionamiento interior. Los criterios de desempeño acústico se relacionan principalmente con el nivel de presión sonora y tiempo de exposición, ya que los daños en la salud se manifiestan de diversas maneras de acuerdo con el tiempo de exposición.

“Es decir, en términos generales, se trata de lograr bajos niveles de presión sonora en el interior; aun cuando en el exterior se registren niveles de presión sonora altos” [51]. La exposición al ruido genera efectos negativos, ver Figura 4.



Figura 4 - Efectos por exposición al ruido.

El tránsito vehicular como la principal fuente de ruido

El ruido en los espacios urbanos y suburbanos es un factor contaminante constante. Actualmente es reconocido como un grave inconveniente a la salud humana. Se sabe que afecta a las personas en lo fisiológico, psicológico, económico y social.

*“Estudios realizados en diferentes países han demostrado que el **80% de la contaminación acústica es causada por el tránsito vehicular en las ciudades**, ver Figura 5 y 6. Esto tiende a aumentar debido a la distribución poco funcional del territorio, Adicionalmente, el desarrollo urbano disperso ha llevado a la creación de una extensa red de calles por las que circulan de forma constante e ininterrumpida diferentes medios de transporte” [52].*

Aun cuando se reconocen las diferentes formas de transmisión del ruido (que es el inverso del aislamiento sonoro), para efectos de este trabajo se consideró el ruido transmitido únicamente de forma aérea y no por flanqueo (ruido a través de elementos sólidos).

El tránsito vehicular como la principal fuente de ruido medioambiental en la Ciudad de México.

“En México, para el año 2020, a nivel nacional, se tenían registrados y en circulación 50,347,569 vehículos de motor a combustión interna” [53].

Un año después (2021), sólo en la CdMx, se tenían registrados y en circulación 6,149,969 de vehículos automotores.

Vehículos automotores y fuentes de ruido de diversos tipos, ver Figuras 5 y 6, son las principales causas de la contaminación acústica.



Fuentes de ruido

El ruido de vehículos (autos, camiones, autobuses). Es el principal componente del Ruido Urbano, es decir es la principal fuente de contaminación por ruido en los espacios urbanos. Además, es difícil de controlar y es la de mayor impacto, por la gran cantidad de población que afecta



"Community Noise". WHO 1995 Miedema, H.M.E. and H. Vos. "Exposure-response relationships for transportation noise," J. Acoust. Soc. Am., 104(6), 3432-3445, 1998

Figura 5 – Fuentes de ruido.



Autos, la principal fuente de ruido

Pese a que la industria automotriz gasta en investigación y desarrollo, millones en fabricar mejores vehículos (incluyendo vehículos menos ruidosos). El ruido generado por vehículos seguirá creciendo porque la tendencia es que circulen más.

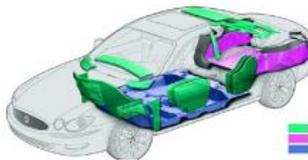
Esto significa que el control de ruido en la fuente no puede, por sí sólo, contrarrestar su influencia en la contaminación por ruido



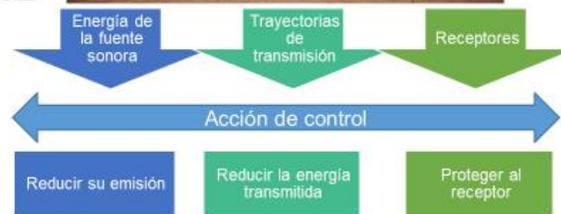
REQUISITOS PARA AUTOS SILENCIOSOS



• Espuma interior
• Reduce 9 dB



■ Cojinetes de absorción sonora
■ Ajuste acústico de caja de
■ Alfombra absorbente



H. V. Fuchs, Applied Acoustics: Concepts, Absorbers, and Silencers for Acoustical Comfort and Noise Control, Springer-Verlag Berlin 2013

Figura 6 – Automóviles principal fuente de ruido.

En el presente trabajo, sus alcances se centran en el ruido vehicular en tres zonas diferentes de la CdMx. La Figura 7, muestra ejemplos del tipo de ruido considerado en el presente trabajo.

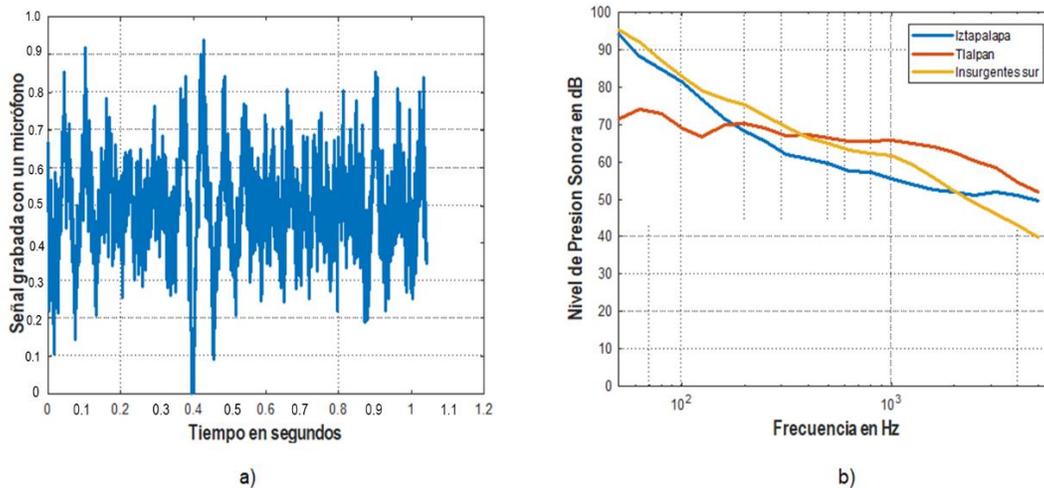


Figura 7 - Ejemplos de ruido urbano considerados en el presente trabajo; a) Señal de tiempo de ruido de la Av. Insurgentes; b) Espectros de ruido urbano medido a 2 metros de las fachadas de edificaciones ubicadas en 3 sitios diferentes, en nivel de presión sonora sin ponderación.

3.2 Niveles de presión sonora en las aulas

El nivel de presión sonora (NPS), es la expresión logarítmica que se utiliza para medir la cantidad de sonido emitida por una fuente sonora, éste se puede filtrar dependiendo de su aplicación por medio de filtros de ponderación (A, B, C o Z sin filtro) y sus unidades de medida son los decibeles [dB], referidos a 20 μ Pa.

“La vecindad de las escuelas con fuentes de ruido afecta diversos procesos cognitivos. Se ha demostrado que ruidos de más de 40 dBA dificultan las actividades de raciocinio matemático. A los 50 dBA disminuye la eficiencia laboral, a 55 dBA se entorpece la memoria, a partir de los 60 dBA se dificulta captar información auditiva, a los 64 dBA se provoca lentitud en el aprendizaje y a los 70 dBA aparecen problemas de comprensión lectora” [54].

Pedro Matamala, jefe del servicio de otorrinolaringología, junto con ingenieros de la Universidad de Santiago, en Chile, *“realizaron una investigación en nueve colegios de la ciudad de Santiago. Los resultados mostraron que los niveles de ruido en el interior de las aulas superaban los 50 dB, llegando a alcanzar 60 dBA*

en algunas ocasiones. Debido a esto, dicen los investigadores, el 40 % de los estudiantes encontraban dificultades para comprender el mensaje del profesor. Según el estudio, el 50% de las escuelas de la zona alcanzaban niveles de ruido de 70 dBA de media frente a los 35 dBA máximos al interior de las aulas, frente al nivel máximo de 55 dBA al exterior durante el día y 45 dBA por la noche que recomienda OMS” [55].

3.3 Niveles de presión sonora (NPS) en viviendas

En las grandes ciudades, las viviendas, así como centros de trabajo y otros edificios son ubicados, por cuestiones prácticas, cerca de las vías de transporte. Este hecho hace que el ruido ambiental o ruido de fondo sea elevado y afecte el ambiente al interior de los recintos.

En términos generales, se espera que las viviendas brinden seguridad y confort para que las personas puedan descansar y restablecerse de sus actividades cotidianas. Por ello, un nivel de presión sonora (NPS) de ruido de fondo superior a 55 dBA, puede provocar estrés y otras alteraciones. Cuando se duerme y descansa el NPS debe estar por debajo de 35 dBA. En la realidad son niveles que resultan difíciles de lograr, ya que en una ciudad como la CdMx, se requieren servicios y productos que se distribuyen durante la noche, generando ruido permanentemente.

3.4 Confort acústico

*“El Instituto de seguridad y salud laboral “define al confort acústico como **el nivel sonoro que no molesta, que no perturba y que no causa daño directo a la salud.** El hecho de que se tenga confort acústico significa que el campo sonoro existente no genera ninguna molestia significativa a las personas o espectadores presentes en el recinto considerado. Contar con confort acústico también es indicativo de que el grado de inteligibilidad será alto. La obtención de una correcta*

inteligibilidad de la palabra es imprescindible en todos aquellos recintos donde la comprensión del mensaje oral es de capital importancia” [56].

El confort acústico debe ser parte del objetivo del diseño arquitectónico y no sólo en los espacios donde se espera que el confort acústico sea estrictamente necesario, como son teatros, salas de concierto, etc. En México, es poco usual que el diseño arquitectónico de espacios escolares, habitacionales, etc., incorpore elementos que satisfagan las necesidades de confort acústico. Por ejemplo: tiempo de reverberación, índice de transmisión del habla, entre otros, son aspectos que, frecuentemente, no son considerados parte de la funcionalidad acústica, por lo que el confort acústico es inexistente o muy pobre. Hoy en día es necesario proponer modificaciones que corrijan la funcionalidad acústica de este tipo de recintos, dada su importante función social. Entonces, al hablar de confort acústico, es necesario poner sobre la mesa la exigencia de lograr un ambiente funcional y saludable que ofrezca protección contra los efectos negativos del crecimiento urbano y su consecuente aumento de ruido.

Otro aspecto fundamental poco atendido es si los recintos ofrecen el suficiente aislamiento sonoro como para proteger su interior contra el ruido exterior y poder alcanzar el confort acústico. Esta particularidad es importante por el aumento en los niveles de ruido exterior, proveniente, sobre todo, del aumento del flujo vehicular, que es la mayor fuente de contaminación acústica o ruido ambiental en las ciudades.

Para mejorar el confort acústico el diseño arquitectónico pretende dos cosas:

- a) Controlar el campo sonoro generado en el exterior para que interfiera mínimamente con el campo sonoro interior (aislamiento sonoro).

- b) Controlar el campo sonoro en el interior del recinto (controlando el exceso de reflexiones del sonido, reverberación, mediante absorción acústica) para

obtener valores que calificarán de manera positiva su desempeño. Estos valores se definen de acuerdo con el tipo de recinto del que se trate.

Espacios existentes con contaminación por ruido

Los recintos existentes, son los que presentan mayor contaminación por ruido. Para poder tratarlos se deben hacer valoraciones de sus condiciones acústicas y, con los datos obtenidos, proponer soluciones que se evalúan de dos maneras:

- A. Por medios subjetivos o psicoacústicos. Se obtienen mediante el análisis de la respuesta perceptual de sujetos expuestos a señales de estímulo controlados, que se reproducen dentro del recinto a evaluar.

- B. Por medios objetivos. Se utilizan mediciones físicas a través de equipos, como tiempo de reverberación, inteligibilidad del habla, claridad, etc., a través de equipos, como sonómetro y sus programas, fuente omnidireccional, amplificador, micrófonos y programas de cómputo como el Dirac. Con el uso de este tipo de equipo y programas se calculan los diferentes parámetros físicos, que describen al sonido propagándose en el recinto.

Esta doble evaluación permite valorar el recinto para obtener información técnica y establecer criterios de diseño arquitectónico para el uso específico al que está destinado. Los parámetros físicos medibles se establecen para que tengan una alta correlación con la impresión subjetiva de los oyentes. Para tener una mejor valoración del desempeño de elementos aislantes, se realizan pruebas y estudios, así como mediciones en campo que, posteriormente son estudiados por personal especializado en laboratorios especiales, como el Grupo de Acústica Aplicada y Vibraciones del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM.

4 - Aislamiento sonoro

4.1 Aislamiento sonoro

El aislamiento sonoro, comúnmente llamado aislamiento acústico, se refiere a la protección contra la transmisión de sonidos del exterior al interior de un recinto o de un recinto a otro (transmisión del ruido a través de elementos rígidos, paredes) proporcionada por el diseño y los materiales usados en la construcción. Se trata de reducir el ruido aéreo. Para conseguir niveles de ruido aceptables en el interior de un recinto a aislar: a) se busca reducir la energía en el medio de propagación del sonido que proviene del exterior o de otro recinto y/o, b) atenuar la energía del sonido en el interior del recinto a aislar. En el caso a) se habla de aislamiento sonoro o acústico y en el caso b) de absorción acústica.

Para aislar las edificaciones se usan combinaciones de materiales absorbentes y materiales masivos y rígidos. Al incidir la onda acústica sobre un material de construcción, una parte de la energía se refleja, otra se absorbe, y otra se transmite al otro lado como puede observarse en la Figura 9. El aislamiento que ofrece el material usado en la construcción o fabricación de los muros (paredes, piso y techo) de un recinto es la diferencia entre la energía incidente y la energía transmitida, esta última es la suma de la energía reflejada y la energía absorbida por los muros del recinto expuestos al sonido. Los materiales pueden actuar de dos maneras ante la incidencia de un sonido: lo absorben y/o lo reflejan. Hay que puntualizar que todos los materiales actúan más o menos de las dos maneras, pero hay que diferenciar ambos fenómenos.

Los materiales que aíslan (reducen) el sonido, son materiales de obra masivos y rígidos que dificultan el paso del sonido en función de su espesor y su masa (densidad). De los materiales que pueden proporcionar un mayor aislamiento acústico, y uno de los más usados por los arquitectos, es el "concreto". Otros también de uso frecuente son los muros masivos de piedra o tabique, ventanas de doble lámina de vidrio, etc. La reducción de ruido se logra en cierta gama de

frecuencias de los sonidos. Cada material o conjunto de materiales forman una unidad de obra, y esa unidad tiene una frecuencia propia por lo que los sonidos que contienen esa frecuencia la hacen "entrar en resonancia". Un buen ejemplo es el caso de los materiales pesados que transmiten, con cierta facilidad, los sonidos de frecuencias bajas (tonos bajos o graves).

Los materiales absorbentes acústicos son aquellos cuya consistencia es elástica. Ejemplos de éstos son la espuma de poliuretano, la lana mineral y la fibra de vidrio. Su característica principal es que son porosos y en cierta forma aislantes térmicos. En este caso absorben el sonido en casi cualquier gama de frecuencias, pues su elasticidad no tiene frecuencia de resonancia, aunque su efectividad de absorción depende de su espesor, densidad y forma, y no de su masa; además de su colocación y distribución en el recinto.

“Las soluciones de aislamiento acústico se diseñan teniendo en consideración los factores masivos, multicapa y de disipación, entre otras” [57].

- *“Factor masivo. El aislamiento acústico se consigue principalmente por la masa de los elementos constructivos: a mayor masa, mayor resistencia opone al choque de la onda sonora y mayor es la atenuación. Por esta razón, no conviene hablar de aislantes acústicos específicos, puesto que son los materiales normales y no como ocurre con el aislamiento térmico”.*
- *“Factor multicapa. Cuando se trata de elementos constructivos constituidos por varias capas, una disposición adecuada de ellas puede mejorar el aislamiento acústico hasta niveles superiores a los que la suma del aislamiento individual de cada a capa, pudiera alcanzar. Cada elemento o capa tiene una frecuencia de resonancia que depende del material que lo compone y de su espesor. Si el sonido (o ruido) que llega al elemento tiene esa frecuencia producirá la resonancia y al vibrar el elemento, producirá sonido que se sumará al transmitido. Por ello, si se disponen dos capas del mismo material y distinto espesor, y que por lo tanto tendrán distinta*

frecuencia de resonancia, la frecuencia que deje pasar en exceso la primera capa, será absorbida por la segunda”.

- *“Factor de disipación. También mejora el aislamiento si se dispone entre las dos capas un material absorbente. Este tipo de materiales suelen ser de poca densidad entre 30 - 70 kg/m³, y con gran cantidad de poros. Se utilizan porque también suelen ser buenos aislantes térmicos. Así, un material absorbente colocado en el espacio cerrado entre dos tabiques paralelos mejora el aislamiento que ofrecerían dichos tabiques por sí solos. Un buen ejemplo de material absorbente es la lana de roca (o mineral), actualmente el más utilizado en este tipo de construcciones”.*

“La reflexión del sonido puede atenuarse también colocando una capa de material absorbente en los paramentos de los elementos constructivos, aunque estas técnicas pertenecen más propiamente al ámbito de la absorción acústica”.

4.1.1 Fenómenos acústicos de aislamiento (transmisión)

- **Transmisión del ruido de impacto.** Es el ruido que se genera cuando un medio físico vibra como consecuencia de las ondas producidas por el impacto de algún material contra otro.
- **Transmisión del ruido aéreo.** Es el proceso de propagación de ondas sonoras o ruido desde un espacio a otro a través del aire.
- **La reflexión.** Es cuando una onda sonora rebota sobre una superficie, produciendo un aumento en la amplitud del sonido debido a la sumatoria de los rebotes de la onda en varias superficies (paredes, techos y pisos) ver, Figuras 8 y 9.

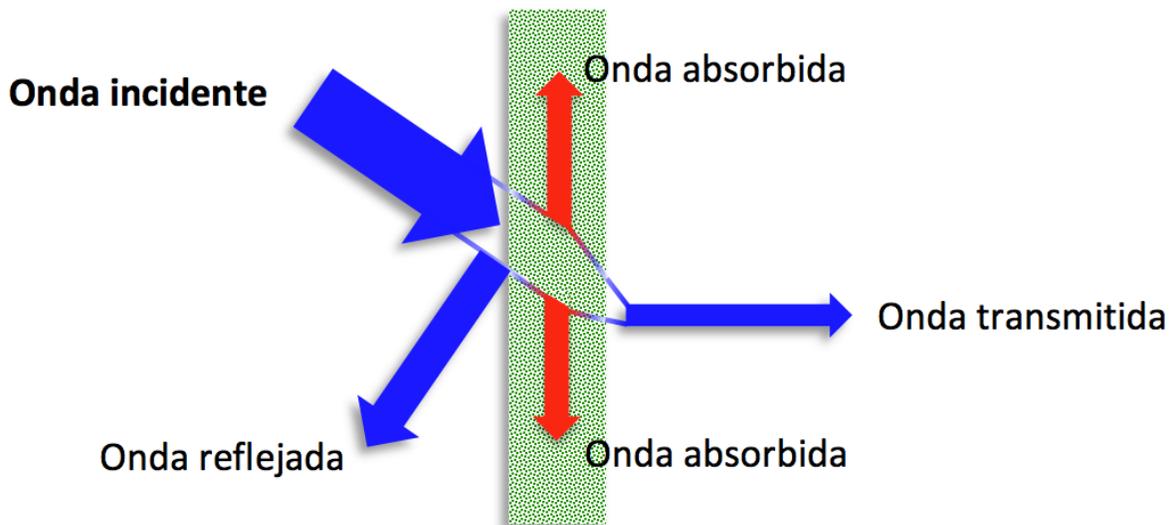


Figura 8 - Esquema de aislamiento sonoro vía aérea, donde se observa el fenómeno de reflexión y transmisión del sonido en un objeto sólido.

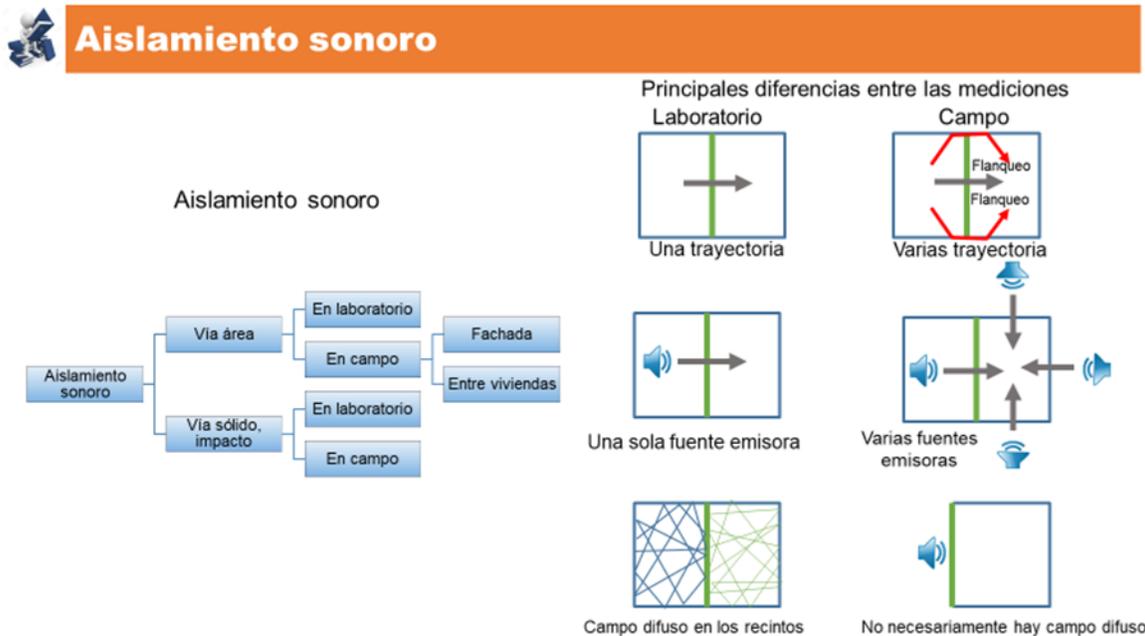


Figura 9 – Aislamiento sonoro en campo y en laboratorio.

El aislamiento sonoro, se ocupa de adecuar materiales aislantes en lugares estratégicos entre la fuente y el receptor para evitar que se introduzca el ruido del exterior proveniente de todo tipo de fuentes. Las mediciones acústicas en edificios

son muy importantes a la hora de diseñar el inmueble, seleccionar los materiales constructivos, mobiliario y equipo para evaluar medidas de control del ruido en entornos edificados. Para lograr dichas valoraciones se realizan estudios o mediciones del ruido interior y del ruido exterior, calificando los parámetros de acuerdo con el tipo de recinto, con estos datos se realizan diversos análisis para conocer los niveles de aislamiento sonoro, así como el confort acústico, Figura 10.

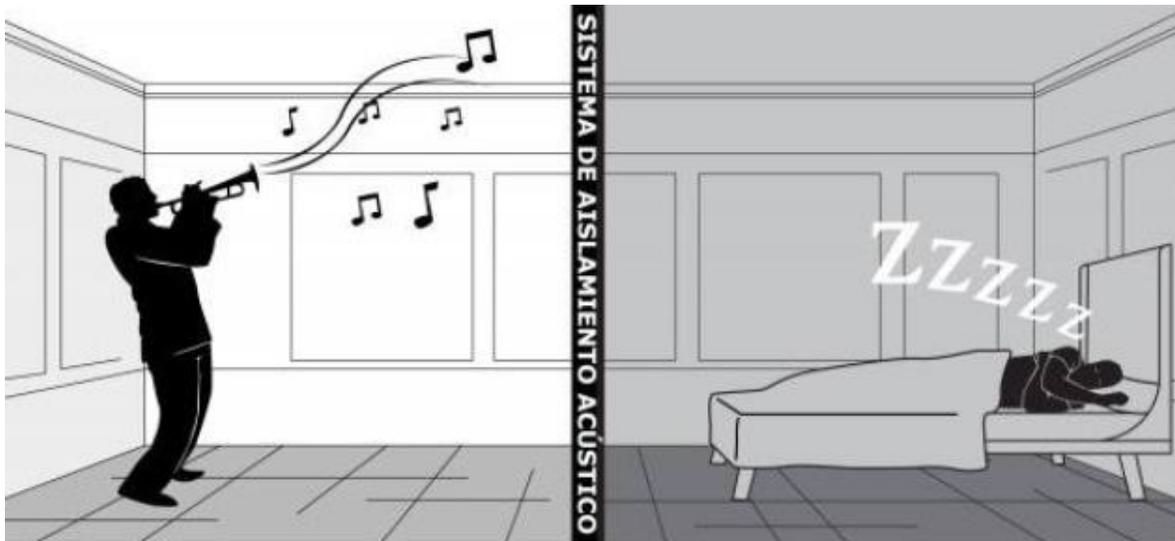


Figura 10 - Aislamiento sonoro y evaluación subjetiva de confort acústico.

4.2 La acústica de edificaciones en las aulas, vivienda y su evaluación

En los recintos educativos (aulas, salas de conferencias, laboratorios, etc.), el objetivo principal es mejorar la comunicación oral en un ambiente donde se privilegie la correcta comunicación, la concentración y la atención. Este objetivo, denominado en forma global como confort acústico (aislamiento sonoro – absorción sonora), se justifica plenamente si se toma en cuenta que, en estos recintos, es donde se lleva a cabo la delicada tarea de impartir el conocimiento. Los recintos educativos deben diseñarse para que el conocimiento comunicado por vía oral no sufra distorsiones, enmascaramientos o distractores que dificulten su comprensión. A la par, se procura porque el orador no tenga que realizar un esfuerzo vocal excesivo.

4.3 Consideraciones para la caracterización del aislamiento acústico

Los procedimientos para caracterizar el aislamiento acústico de elementos y espacios se basan en la medición de los niveles de presión sonora (NPS) y de aislamiento sonoro en laboratorio y en campo. Esta información se complementa con la obtención de datos provenientes de los calificadores de confort acústico. El levantamiento de esta información es complejo pues requiere personal capacitado en el uso de equipo y en la interpretación de los valores que se van registrando; además, se debe realizar una importante inversión económica y se requiere de mucha experiencia en las mediciones de campo y laboratorio, ver Figura 11.

Los requisitos indispensables para caracterizar el aislamiento acústico de un recinto son:

- Personal capacitado y con experiencia.
- Laboratorio, que tenga infraestructura especializada para el estudio e investigación en Acústica.

El Laboratorio de Acústica y Vibraciones (LAV) del ICAT-UNAM tiene instalaciones especiales para realizar labores de investigación y de asesoría como son las Cámaras Acústicas: Reverberante, de Transmisión y Anecoica.

- Equipo y accesorios para las mediciones de laboratorio y de campo como son: sonómetros (clase 0), calibradores, fuentes sonoras omnidireccionales, sistemas giratorios de micrófonos, medidores ambientales, procedimientos de medición estandarizados (normas), cables de conexión especiales, conectores, computadoras, programas de cómputo específicos, etc.

El Posgrado de Arquitectura de la UNAM, tienen a su disposición un sonómetro clase 0, marca Brüel & Kjær (B&K), tipo 2270 para mediciones de laboratorio y

de campo, para el manejo y procesamiento de la información obtenida de las mediciones realizadas con este sonómetro, la marca B&K pone a disposición del usuario el programa de cómputo BZ-7224 al BZ-7230.

También, es importante mencionar que para las mediciones que se realizan en laboratorio, es necesario contar con medidores ambientales para el monitoreo de los parámetros de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica, ya que la variación de éstos afecta la velocidad de propagación del sonido.



Figura 11 – Equipos que se utilizan en mediciones de acústica en laboratorio y en campo.

4.4 Consideraciones de medición de aislamiento sonoro en laboratorio

Esta medición tiene como objetivo conocer el nivel de aislamiento acústico R . Para la evaluación de elementos constructivos utilizados en la Arquitectura, se utiliza la Cámara de Transmisión, el equipo y los procedimientos descritos en las normas ISO 10140-2, ISO 717-1, ver Figura 12.

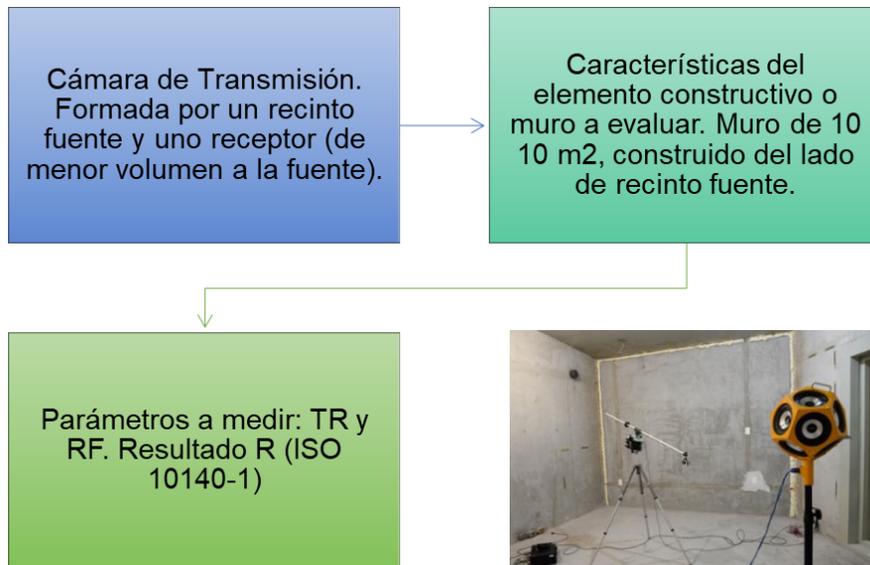


figura 12 – Consideraciones para medir el Tiempo de Reverberación (TR), Ruido de Fondo (RF), para calcular el aislamiento sonoro (R) en Cámara de Transmisión del elemento constructivo o muro a evaluar.

4.4.1 Cámara de transmisión para mediciones de laboratorio

Las mediciones se caracterizan por realizarse en condiciones controladas, lo que requiere de un recinto especializado denominado Cámara de Transmisión. Esta cámara está compuesta de dos recintos adyacentes: Uno conocido como recinto fuente y un segundo recinto señalado como receptor que tiene menor volumen al recinto fuente. El elemento constructivo o muro para evaluar deberá tener una superficie de 10 m² (de acuerdo con la norma (ISO 10140-1), se coloca entre ambos recintos, a manera de pared divisoria y del lado del recinto fuente. Las principales exigencias de la Cámara de Transmisión son: a) Lograr que la transmisión sonora se realice únicamente a través del muro, es decir, sin fugas por flanqueo (laterales); b) En la medición sólo se toma en cuenta el sonido generado en el recinto fuente, evitando al máximo las interferencias de cualquier otra fuente sonora adicional; c) En ambos recintos el campo sonoro presente en su interior debe ser difuso. En la Figura 13 se muestra un esquema del arreglo experimental utilizado en esta investigación.

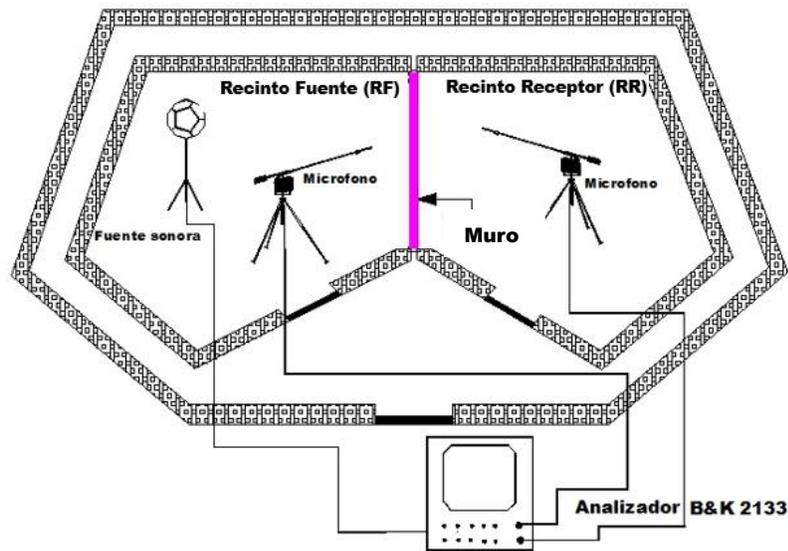


Figura 13 - Arreglo de medición utilizado en la Cámara de Transmisión.

4.5 Medición de aislamiento sonoro en campo

Las mediciones de aislamiento en campo se realizan en espacios cerrados como edificios y puede ser para muros divisorios (paredes), losas de entrepiso o fachadas. Es importante mencionar que el sonido y las vibraciones se propagan no sólo de forma aérea, sino también de manera estructural; es decir, a través de paredes, piso y techo. A esta propagación se le llama transmisión por flaqueo. Esta forma de trasmisión del ruido no se abordará en este trabajo.

La Figura 14, da cuenta de los requerimientos necesarios para la medición de aislamiento sonoro en campo, de acuerdo con el protocolo.

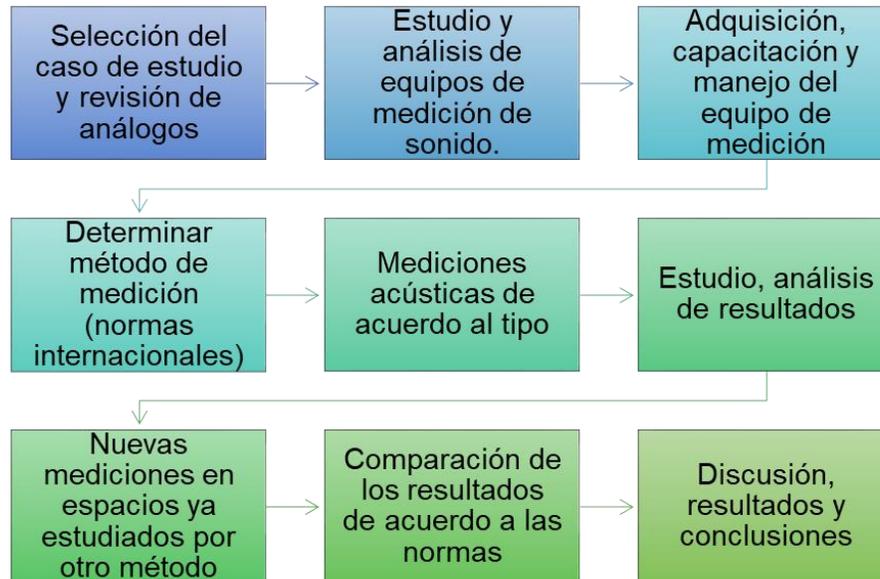


Figura 14 – Proceso de análisis de ruido en elementos constructivos.

4.5.1 Procedimientos de medición de aislamiento sonoro en campo (fachada)

La determinación del aislamiento sonoro en campo es similar al realizado en laboratorio. Se obtiene la diferencia del nivel de presión sonora (NPS), medida en ambos lados del muro de forma espacial y simultánea. En el caso de una fachada las diferencias en el proceso de medición radican en que el micrófono, al exterior, tiene que estar a dos metros de distancia de la fachada a estudiar. El ruido que proviene del exterior debe ser el que se transmite únicamente por la fachada de forma aérea (no por flanqueo). Otras mediciones que se deben realizar son las del Tiempo de Reverberación (ésta en por lo menos tres posiciones diferentes) y Ruido de Fondo. Los niveles aceptados de diferencia entre dentro y fuera del espacio donde está el muro a caracterizar de acuerdo con las normas ISO 16283-3 y la ISO 717-1 es de cuando menos 10 dB por debajo del emisor, en este caso el ruido provocado por los vehículos.

5 - Casos de estudio

A continuación, se muestran tres casos de estudio. Para los casos primero y segundo, el método practicado se aplicó de manera novedosa, lo que constituye un aporte original, que consistía en realizar pruebas en laboratorio-campo con el mismo elemento constructivo.

Primer caso, se eligió porque, en el momento de la elaboración de este trabajo, en el Laboratorio de Acústica y Vibraciones (LAV) se estaban realizando pruebas de aislamiento acústico a un muro construido con un tipo block con alvéolos.

En el segundo caso, el mismo tipo de block, se colocó como muro divisorio y fachada para un edificio de viviendas.

Es decir, se podía estudiar el desempeño del aislamiento acústico en condiciones controladas y no controladas. Los resultados finales fueron muy contundentes, ya que difieren los obtenidos en campo de los de laboratorio, esto es una gran aportación a la Acústica Arquitectónica.

En el tercer caso se abordó con un análisis crítico y de forma original y única; el método, la discusión y la manera de entender los problemas, como hasta ahora nunca se había llevado a cabo. La búsqueda de publicaciones relacionadas con este tema de estudio arrojó, que no hay precedentes.

Para este tercer caso de estudio, se eligieron diez aulas del edificio “B” de la Unidad de Posgrado de la UNAM (construido en 2013 y ubicado en CU junto a la Av. Insurgentes Sur), por su fácil acceso y cercanía al LAV, además se sabía que en este edificio el ruido exterior, generado por el intenso tránsito vehicular proveniente de Av. Insurgentes, molestaba a estudiantes y profesores cuando

impartían clases, por lo que el estudio se centró en medir el aislamiento acústico de la fachada, así como calificadores de confort acústico.

Las propuestas y resultados obtenidos de este caso de estudio se comparten en este trabajo para su análisis con los especialistas en Acústica Arquitectónica, así como para diseñadores y de esta manera se avanza en el conocimiento de aspectos de la Arquitectura y se abren líneas de especialización.

5.1 Primer caso de estudio

Se midió el aislamiento sonoro en la Cámara de Transmisión del LAV, de un muro con una superficie de 10 m² de frente construido con block multiperforado BH8122040, de la marca Bloquera. En esta medición la transmisión del ruido ocurrió a través del muro y no por flanqueo. Se cuidó que no hubiera ningún tipo de fisura en el cuerpo del muro ni en su perímetro.

5.1.1 Procedimiento de medición

El procedimiento de medición se realizó de acuerdo con la norma ISO 10140-2:2010, en el rango de frecuencias de 100 a 5,000 Hz. En la Figura 15, se muestra una parte del arreglo experimental utilizado.

La norma establece como procedimiento de medición, determinar la potencia sonora incidente y la potencia sonora transmitida, las potencias se estiman mediante el promedio espacial de la presión sonora; a esta cantidad hay que restar la potencia absorbente del recinto receptor. Este procedimiento se resume en la siguiente ecuación:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) \quad (1)$$

Donde:

R Aislamiento sonoro o índice de reducción sonora

- L_1 Es el nivel de presión sonora (NPS) promedio en el recinto fuente.
- L_2 Es el nivel de presión sonora (NPS) promedio en el recinto receptor.
- S Es el área del espécimen de prueba (en este caso el muro) en m^2 .
- A Es el área de absorción acústica equivalente en el recinto receptor, en m^2 .

En general, se define el valor promedio como:

$$L = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right] \quad (2)$$

Donde:

- L Nivel de Presión Sonora (NPS) promedio de energía en una habitación, se expresa en decibeles (dB).
- n Número de valores a promediar.

Para determinar A se utiliza la ecuación de Sabine, por lo que la ecuación (1) se modifica a:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log(Tr) + 10 \log_{10} \left(\frac{S}{0.163V} \right) \quad (3)$$

Donde:

- T_r Tiempo de reverberación del receptor.
- V Volumen del receptor.

Block BH8122040
 Medidas: 12x20x40
 Perforado 19 orificios
 Precocido
 Rayado exterior





Figura 15 – Dimensiones del block y su imagen, muro sin aplanado del lado del receptor y con aplanado del lado del emisor.

Después de colocar la muestra a medir y antes de realizar mediciones de nivel de presión sonora, se deben caracterizar ambos recintos (fuente y receptor) con el objetivo de que los tiempos de reverberación cumplan con los establecidos en la norma:

$$1 \leq T_R \leq 2 \left(\frac{V}{50} \right)^{2/3} \quad (4)$$

Donde:

V es el volumen del recinto que se quiere evaluar,

TR es su tiempo de reverberación

De tal manera se tiene:

Para el recinto receptor $V = 68.3 \text{ m}^3 \Rightarrow 1 \leq TR \leq 2.46 \text{ (s)}$.

Para el recinto fuente $V = 77.6 \text{ m}^3 \Rightarrow 1 \leq TR \leq 2.68 \text{ (s)}$.

Para lograr estos tiempos de reverberación, fue necesario acondicionar ambos recintos, introduciendo cierta cantidad de absorción. Este acondicionamiento se hizo a prueba y error, midiendo cada vez el tiempo de reverberación. Este ajuste se hizo en los recintos, equipo utilizado en la medición se enlista en la Tabla 5.

Equipo	Marca	Modelo	No. Serie
Analizador	Bruel & Kjaer	2133	18553601
Micrófono incidencia aleatoria (CF)	Bruel & Kjaer	4943	4749906

b

Micrófono incidencia aleatoria (CR)	Bruel & Kjaer	4943	1440624
Boom giratorio (CR)	Bruel & Kjaer	3923	2705111
Boom giratorio (CF)	Bruel & Kjaer	3923	1015239
Calibrador	Bruel & Kjaer	4230	1207137
Termo higrómetro	White Box	CT485-R5	-----
Computadora Laptop	Hewlett-Packard	-----	-----
Fuente Omnidireccional	Bruel & Kjaer	4292-L	42009

Tabla 5 - Equipo utilizado para el primer caso.

5.1.2 Resultados de primer caso de estudio

La medición del índice de reducción sonora R (también conocido como aislamiento sonoro), se realizó 2 veces para verificar las condiciones de repetitividad del método de medición empleado. El resultado del aislamiento sonoro del muro levantado con el block BH8122040, se muestra en la gráfica de la Figura 16.

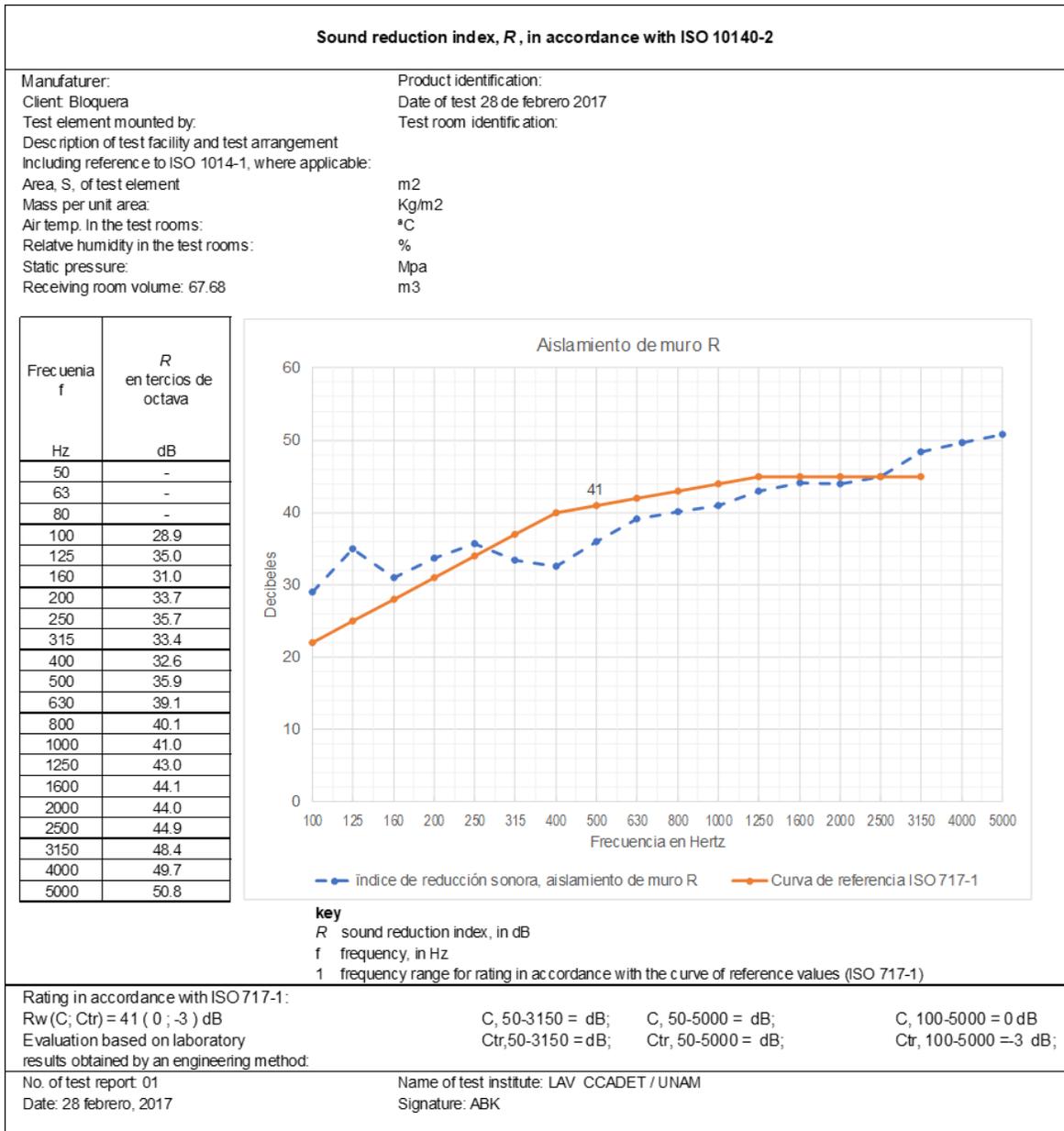


Figura 16 – Índice de reducción sonora R de muro con block BH8122040, de acuerdo con ISO 717-1, 10140-2

Se puede observar cuál es el desempeño del block de aislamiento por frecuencias, así como el valor de aislamiento de un sólo número: 41 dB con ponderación A.

5.2 Segundo caso de estudio

El estudio se realizó en el conjunto habitacional “Quiero Casa”, ubicado en la Calzada Ermita Iztapalapa, cerca de la estación del metro Cerro de la Estrella, de la línea 8 del tren Metropolitano, Ciudad de México, ver Figura 17. Consistió en la medición de aislamiento de muro en campo, en vivienda multifamiliar, construida con el mismo block multiperforado BH8122040 que tiene un aislamiento acústico en laboratorio $R = 41$ dB con ponderación A. Pero en campo, su desempeño aparenta ser diferente. El block se colocó como muro en todos los lugares que requerían muro divisor, por ejemplo, entre viviendas, fachadas, etc.

Para medir el aislamiento de un muro en campo se utilizaron las normas ISO16283, partes 1, 2 y 3. La parte 2, versa sobre aislamiento sonoro vía sólido o impacto (el sonido se propaga estructuralmente por sólidos; es decir, paredes piso y techo); las partes 1, y 3, son sobre diferencia de nivel estandarizada y aislamiento sonoro, ambos por vía área, que es el sonido que se propaga por el aire. La parte 1, especifica las condiciones para obtener la diferencia de nivel estandarizada (D_{nT}) de un muro que divide dos espacios. La parte 3, especifica las condiciones para medir la diferencia de nivel estandarizada de Fachada ($D_{tr,2m}$). Esta norma se utiliza en campo, para evaluar globalmente el desempeño acústico de elementos divisorios como muros o fachadas, tomando en cuenta todas las aportaciones sonoras que suceden al mismo tiempo por flanqueo y ranuras, en el rango de frecuencias de 100 a 5,000 Hz, debido a esto, es el método que se utiliza con mayor frecuencia; el resultado que proporciona se correlaciona con la apreciación subjetiva de los ocupantes de la edificación. Los resultados obtenidos sugieren que el aislamiento sonoro de un muro en laboratorio puede diferir con los resultados de la diferencia de nivel estandarizada en campo, lo que conlleva a que no se puede realizar un comparativo entre ambos; pese a todo, ambos tipos de medición son indispensables.



Figura 17 - Ubicación donde se realizaron las mediciones en campo.

5.2.1 Evaluación del muro divisorio entre dos departamentos

En este caso se midió la diferencia de nivel estandarizada (D_{nT}). Para llevar a cabo esta medición se requirió establecer, uno de los departamentos, como recinto fuente y el departamento contiguo, con un volumen mayor o igual al del recinto fuente, como recinto receptor. Ambos recintos separados por el muro a estudiar. En el cuarto emisor se colocó una fuente omnidireccional a 1.5 m de altura en dos posiciones diferentes, generando ruido blanco; además se colocó un micrófono a 1.5 m de altura, tanto en el recinto fuente como en el receptor, para medir de manera simultánea en 10 posiciones diferentes, además se mantuvieron puertas y ventanas cerradas, ver Figura 18.

Para calcular la Diferencia de nivel estandarizada (D_{nT}), se siguieron las recomendaciones de la ISO 16283-1: 2014, sección 3.14, que especifica:

$$D_{nT} = (L_1 - L_2) + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (5)$$

Donde:

- L_1 Es el promedio espacial energético del NPS en el recinto fuente, cuando su volumen es mayor o igual a 25 m³.

- L_2 Es el promedio espacial energético del NPS en el recinto receptor, cuando su volumen es mayor o igual a 25 m^3 .
- T Es el tiempo de reverberación en el recinto receptor.
- T_0 Es el tiempo de reverberación de referencia, $T_0=0.5 \text{ seg.}$

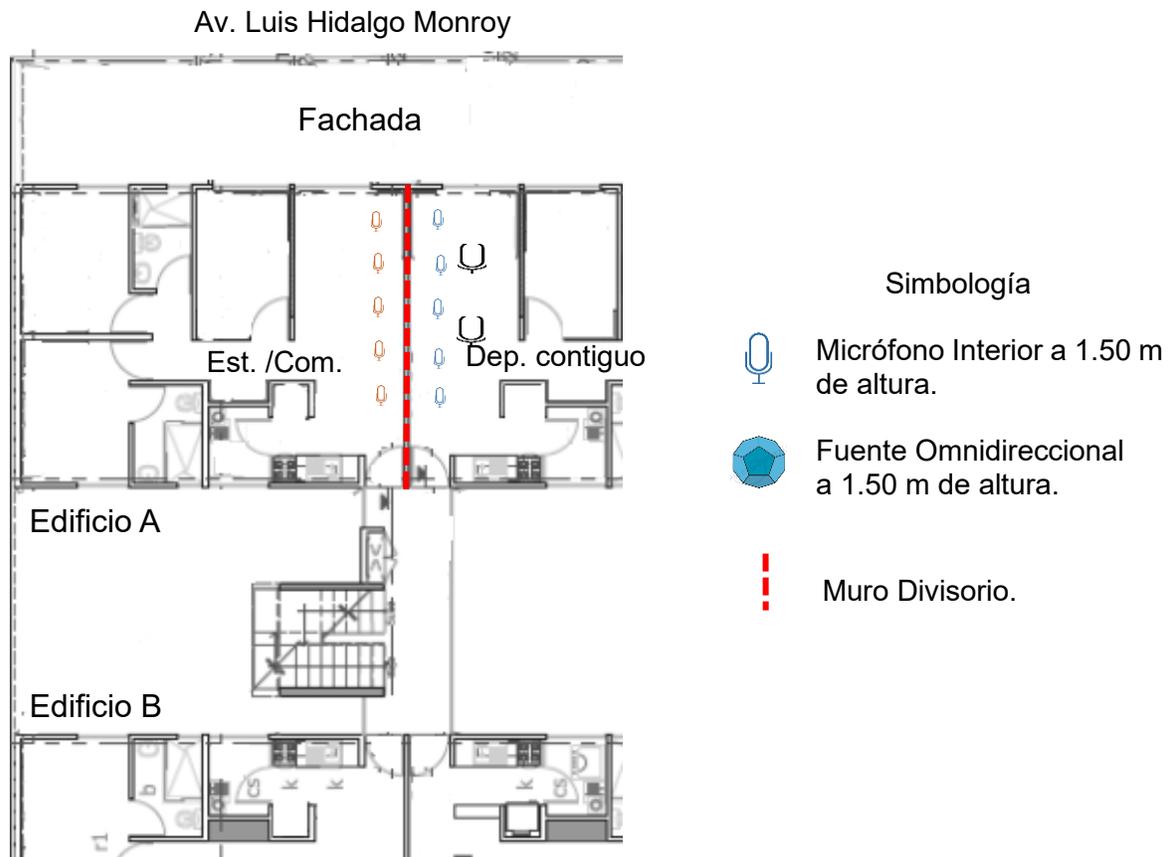


Figura 18 - Ubicación de micrófonos y fuente omnidireccional, medición diferencia de nivel estandarizada (D_{Nt}).

5.2.2 Evaluación de las fachadas

La evaluación del muro puesto como divisor y fachada en viviendas se realizó por el método de diferencia de nivel estandarizada ($D_{tr, 2m, nT}$), este tipo de medición se ajusta a la norma ISO 16283-3, tiene como objetivo estimar la diferencia de nivel estandarizada ($D_{tr, 2m, nT}$), del sonido exterior – interior, en condiciones reales utilizando el ruido de tránsito vehicular como señal de prueba. Debido a que, en este

caso, la señal de prueba es una fuente de sonido muy variable, fue necesario medir, simultáneamente, los NPS en el exterior y en el interior. Además, se cuidó que existiera una diferencia entre los NPS exterior – interior, de al menos 10 dB. La medición del ruido exterior se realizó con un micrófono colocado en una pértiga, a 2 metros frente a la fachada, esto se realizó desde el cuarto contiguo, de esta forma se pudo mantener cerrado (puertas y ventanas) el recinto a estudiar. En su interior se colocó un micrófono en 5 lugares diferentes a 1.5 m de altura y se midió durante 3 minutos, en cada lugar, el NPS equivalente L_{Aeq} con ponderación A, ver Figuras 19, 20 y 21.

Considerando lo anterior se tiene que:

$$D_{tr,2m,nT} = (L_{1,2m} - L_2) + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (6)$$

$L_{1,2m}$ NPS promedio temporal exterior, en una posición de 2 m frente a la fachada.

L_2 NPS promedio, espacial y temporal. El promedio espacial se toma sobre la zona central del recinto, donde la radiación del campo cercano de las fronteras del recinto tiene poca influencia.

tr Indica que se utiliza el ruido de tránsito vehicular como señal de prueba.

T Es el tiempo de reverberación en el recinto receptor.

T_0 Es el tiempo de reverberación de referencia, $T_0=0.5$ seg.

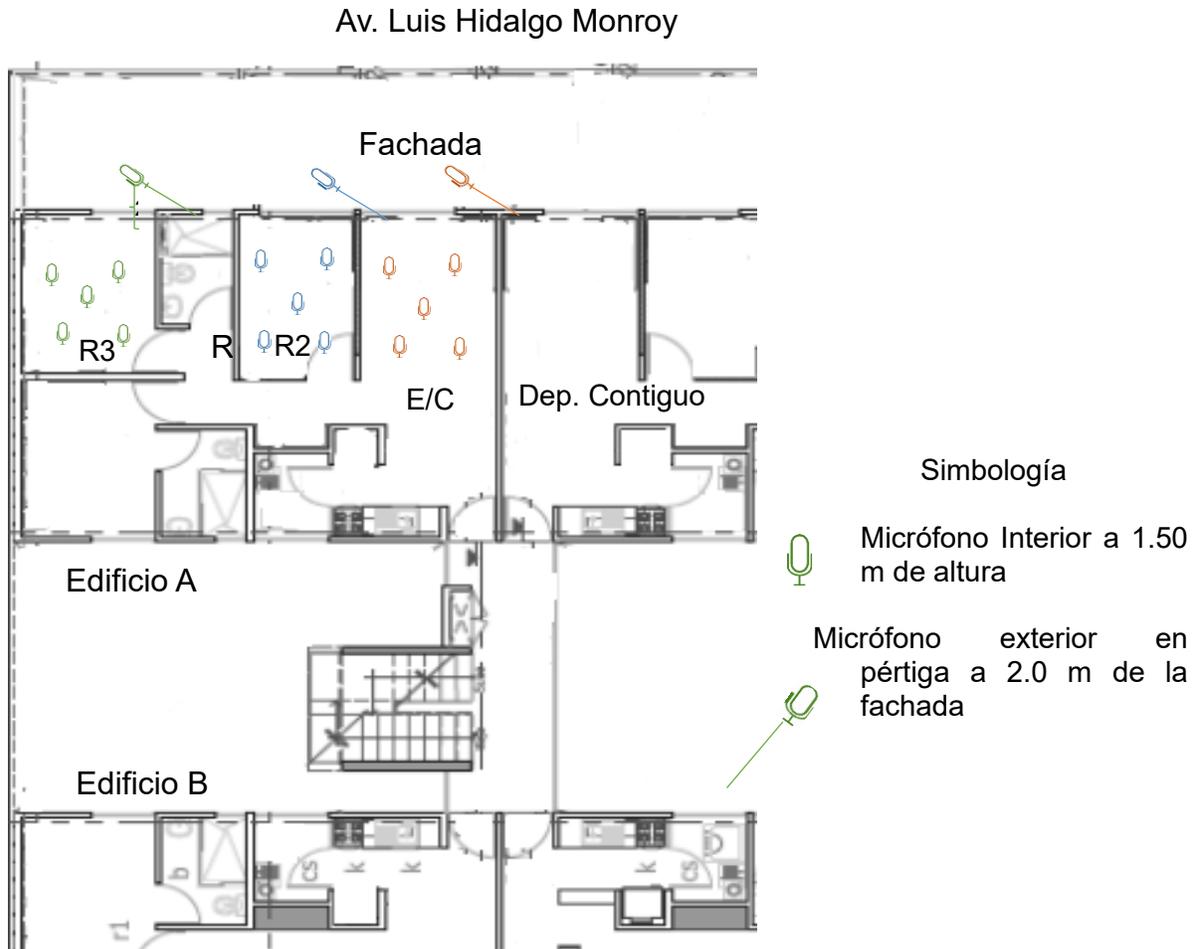


Figura 19 - Ubicación de micrófonos exterior-interior, medición del NPS simultáneamente.



Figura 20 - Posición de micrófonos para la medición de la diferencia de nivel estandarizada ($D_{tr,2m,nT}$), de la fachada.

5.2.3 Medición de tiempo de reverberación

Para obtener la diferencia de nivel estandarizada del muro divisorio (D_{nT}), así como para la fachada $D_{tr,2m,nT}$, se midió el tiempo de reverberación, para estimar la energía absorbida en el interior del recinto receptor. De acuerdo con las expresiones 1 y 2; estos se midieron con puertas y ventanas cerradas y, como señal de prueba, se generó un barrido exponencial en frecuencia que se reprodujo por medio de una fuente omnidireccional, colocada a 1.5 m de altura. Para la obtención de datos, se colocó un micrófono a 1.5 m en diferentes lugares del recinto receptor, ver Figuras 21 y 22. La información que se obtuvo se procesó con el programa Dirac 6.0.

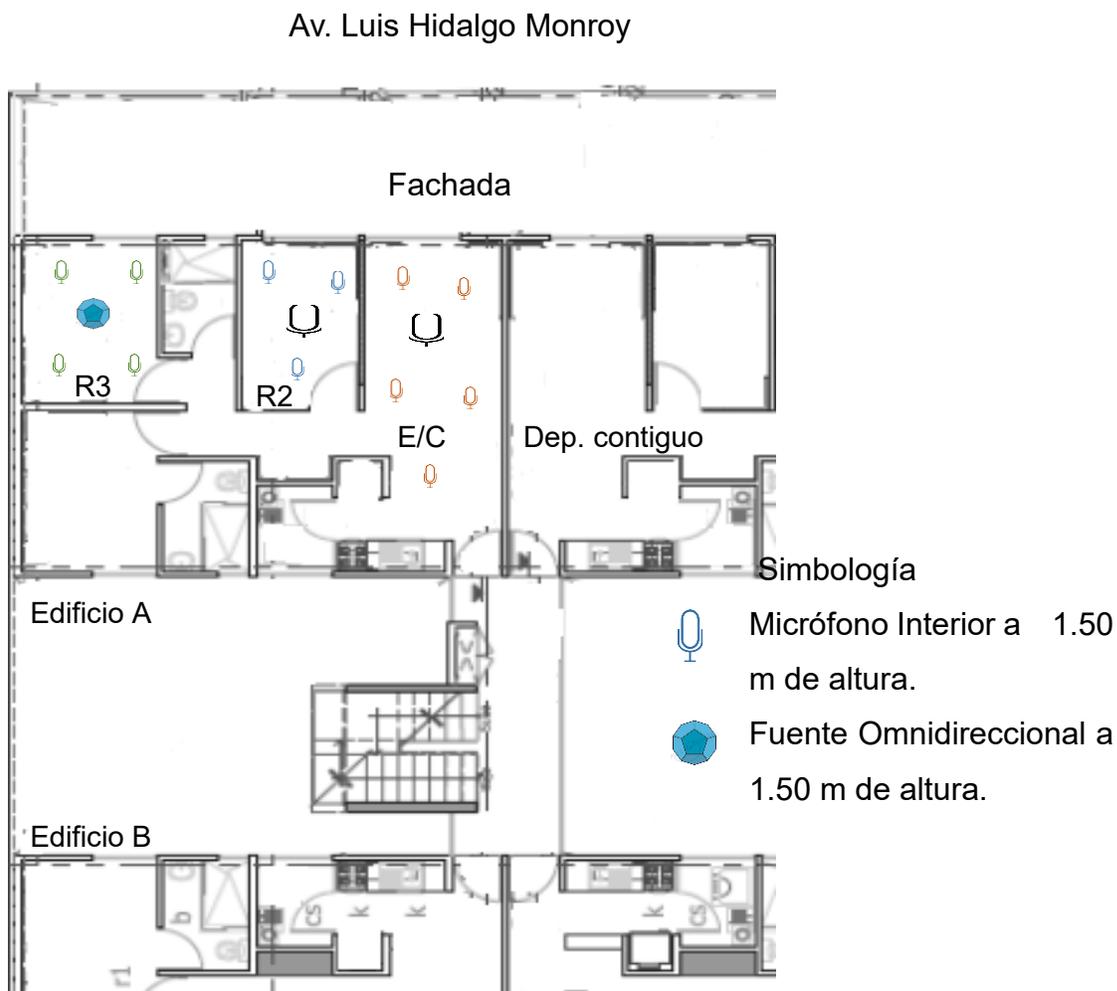


Figura 21 - Medición de tiempo de reverberación en las Recamaras 3, 2 y en la Estancia / Comedor.



Figura 22 - Posición de la fuente omnidireccional y de los micrófonos; a) En la Recamara 2; y b) Estancia-Comedor, fachadas orientadas hacia la calle Luís Monroy.

5.2.4 Descripción arquitectónica del departamento estudiado

El departamento estudiado puede ser caracterizado de la siguiente manera:

- Estructura de concreto, entresijos de vigueta y bovedilla con plafón de yeso; piso de losetas de barro.
- Muros de fachada (Figura 22), construido parcialmente con block multiperforado tipo BH8122040, acabado interior con aplanado de yeso y pintura vinílica al exterior. Las ventanas ocupan un área muy grande de este muro, están fabricadas de aluminio tipo perfil ligero, con cristal de 3 mm, con una o dos secciones corredizas para ventilación.
- Muros divisorios: construidos con block multiperforado BH8122040, con aplanado de yeso en ambas caras.

- Puertas de las recamaras y de acceso: son tipo ligero fabricadas de aglomerados de madera, no sellan al piso, Figura 23.



Figura 23 - Puerta de acceso al departamento.

5.2.5 Dimensiones

En la Tabla 6, se muestran las dimensiones de los recintos estudiados, las Recamaras 1 y 2, así como la Estancia / Comedor; sus diseños son representativos de este tipo de conjunto habitacional.

Aula	Volumen m ³	Área Fachada m ²	Área de muro m ²	Altura en metros
Rec. 2	20.42	5.88		2.3
Rec. 3	16.8	4.97		2.3
Est./Com.	35.93	5.86		2.3
Muro divisorio			15.48	2.3

Tabla 6 - Dimensiones de los espacios.

5.2.6 Equipo utilizado para el segundo caso.

En la tabla 7 se muestra el equipo utilizado para las mediciones del tiempo de reverberación.

Equipo	Marca	Modelo	No. Serie
Analizador	Bruel & Kjaer	2270	3007502
Micrófono campo libre	Bruel & Kjaer	4189	587
Micrófono campo libre	Bruel & Kjaer	4189	588
Calibrador	Bruel & Kjaer	4230	1207137
Fuente omnidireccional	Bruel & Kjaer	4292-L	42009
Amplificador	Bruel & Kjaer	2734	-----
Computadora Laptop	Hewllet-Packard	-----	-----

Tabla 7 – Equipo utilizado para el segundo caso.

5.2.7 Resultados del segundo caso

La Figura 24, muestra los resultados de la medición de aislamiento sonoro para muros fachadas $D_{tr,2m,nT}$ y muro divisorio D_{nT} , en el intervalo de frecuencias de 100 a 5,000 Hz, en bandas de tercios de octava.

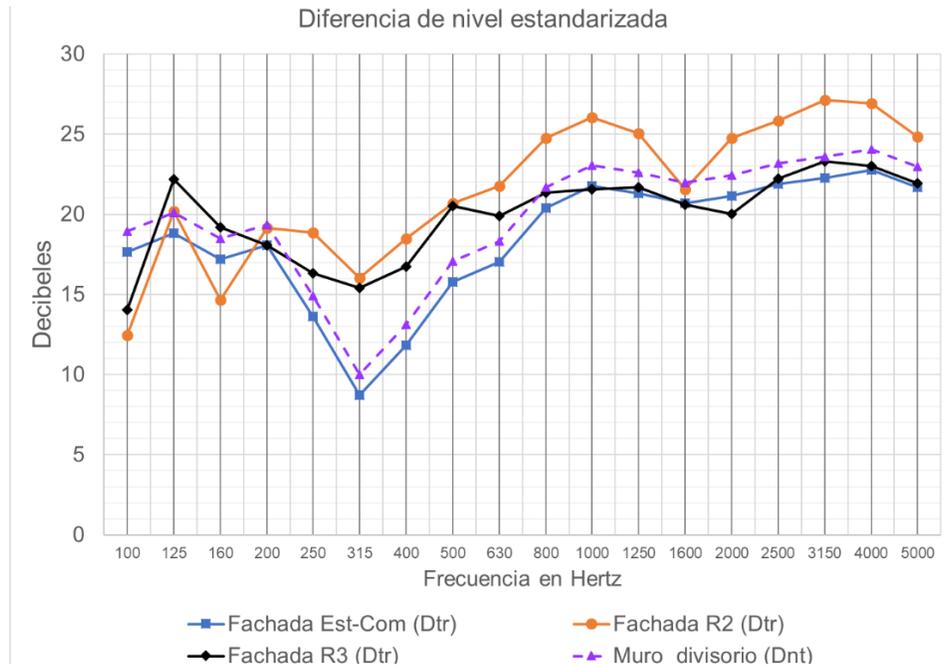


Figura 24 - Resultado de las mediciones el Aislamiento Sonoro en bandas de frecuencia de tercios de octava.

Para el cálculo del índice de un sólo número, se siguieron las recomendaciones y el espectro de frecuencias de referencia de la norma ISO 717-1:2013. En las gráficas de las Figuras 25 a 28, se muestran las curvas y el valor de este índice. Y en la tabla 8 el resumen de aislamientos y valores C y C_{tr} solicitados por la norma ISO 717-1.

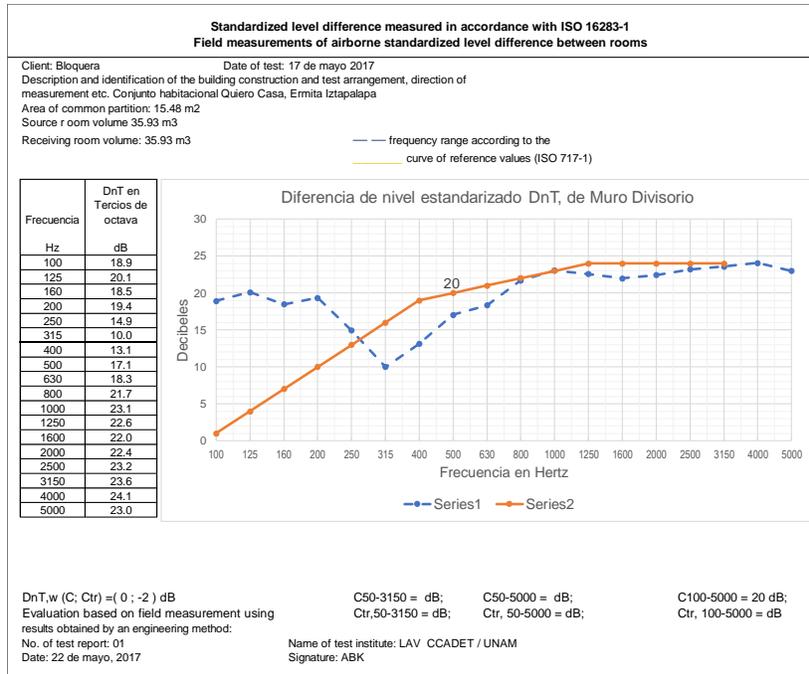


Figura 25 - Valor de un sólo número muro entre viviendas.

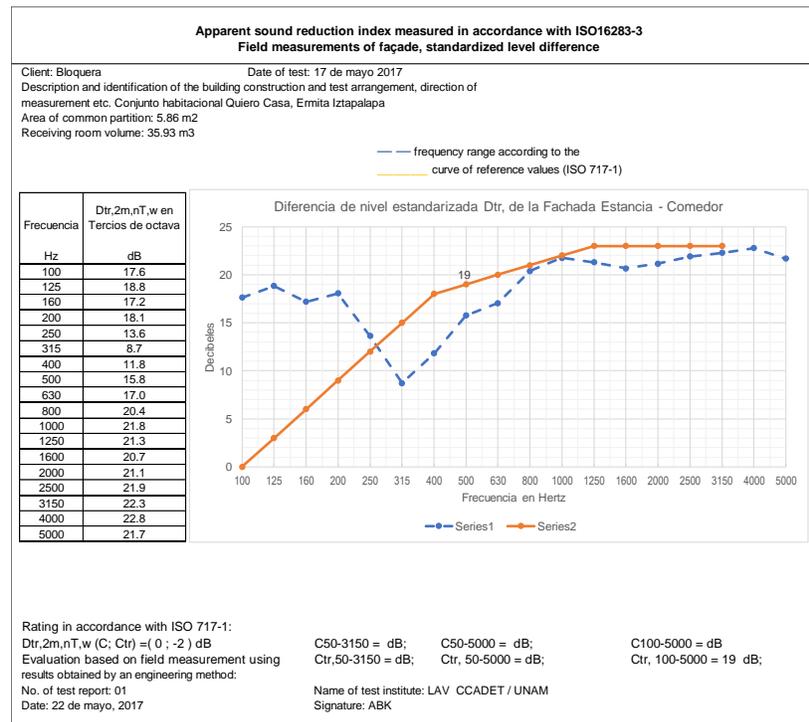


Figura 26 - Valor de un sólo número fachada estancia-comedor.

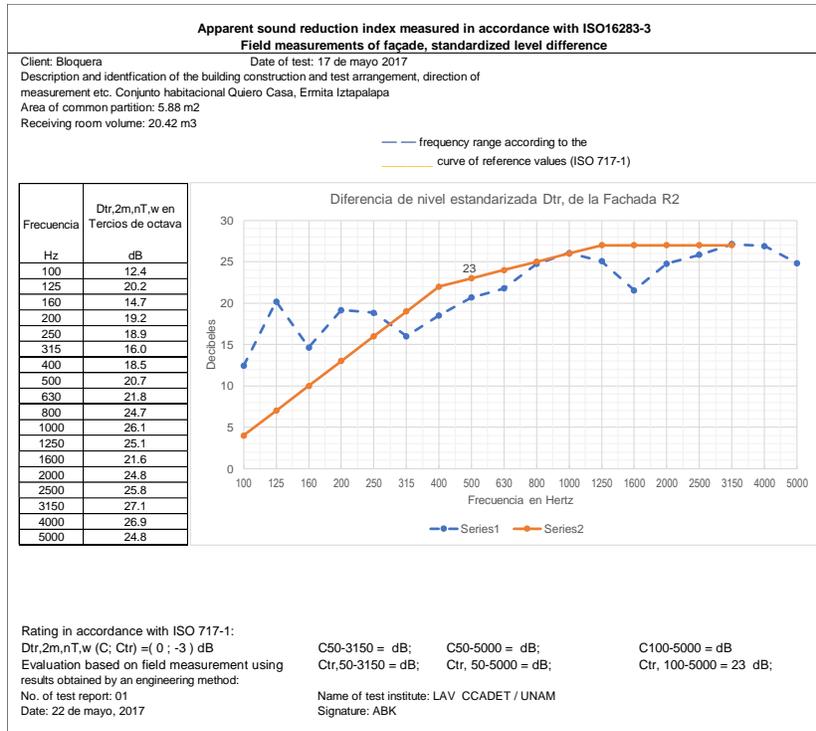


Figura 27 - Valor de un sólo número muro de la fachada recamara 2.

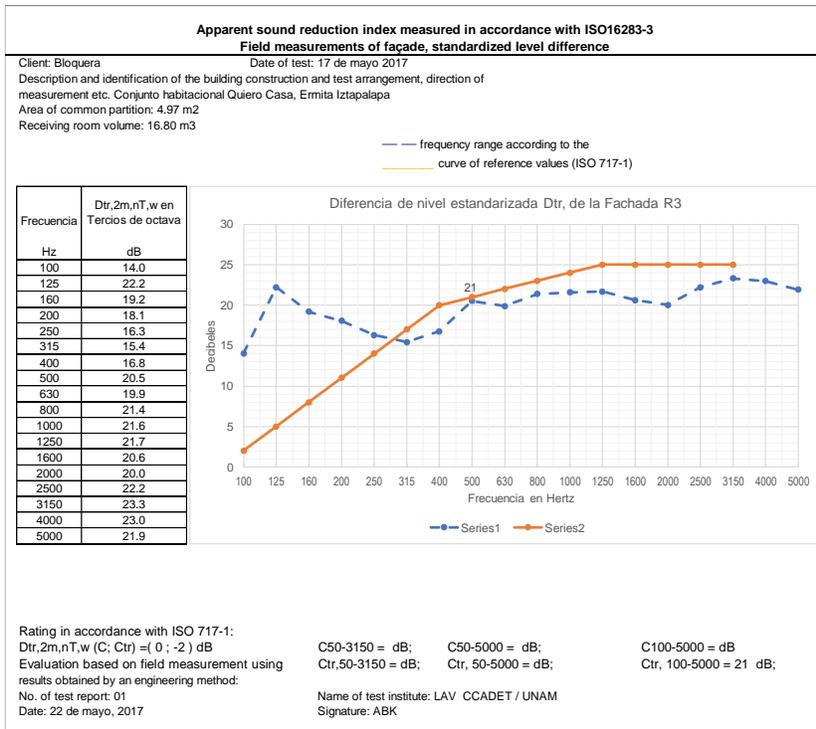


Figura 28 - Valor de un sólo número de la fachada recamara 3.

Tabla 8 - Resumen de aislamientos y valores C y C_{tr} solicitados por la norma ISO 717-1, Tabla 8.

Espacio	$D_{tr,2m,nT,w}$	D_{nT}	C	C_{tr}
Rec. 2	23		0	-3
Rec. 3	21		0	-2
Est.- Com.	19		0	-2
Muro Div.		20	0	-2

- $D_{tr,2m,nT,w}$: Diferencia de nivel estandarizada en fachadas.
- D_{nT} : Diferencia de nivel estandarizado para muro divisorio.
- C: Término de adaptación del espectro, para actividades de vivienda.
- C_{tr} : Término de adaptación del espectro, para fachadas expuestas a tránsito vehicular.

Tabla 8 - Resumen D_{tr} , D_{nT} y en del espectro de 100 – 5,000 Hz.

5.2.8 Propuesta de mejora de aislamiento sonoro de muro entre dos espacios

Con el objetivo de tener experiencia y generar un catálogo según el desempeño aislante acústico del tipo de muros con o sin instalaciones, es recomendable realizar prueba(s) en laboratorio a muro(s) tipo de la obra. Se hacen usando un prototipo que incluya las instalaciones finales. Posteriormente se deben realizar pruebas en campo del aislamiento acústico en los muros colocados y terminados. Esta información será de utilidad para los especialistas e investigadores acústicos, diseñadores de arquitectura y constructores para proponer diseños arquitectónicos con adecuaciones acústicas amables con los usuarios.

5.2.9 Recomendaciones para el desarrollo de proyectos

En la realización de diseños arquitectónicos que involucren la acústica como un elemento de valor agregado, es recomendable que, en la etapa conceptual (inicial) se sepa con claridad aspectos como los siguientes:

- Uso final del inmueble.
- Ubicación del predio.
- Se debe tener un objetivo de confort acústico.

- Conocer con qué recursos humanos se cuenta.
- Conocer el presupuesto a invertir.
- Calendario de ejecución de obra.
- Concepto – estilo arquitectónico.
- Tipo de obra (particular-pública).

5.2.10 Conclusiones para el primer y segundo caso

El block multiperforado BH8122040, se utilizó para construir los muros de fachadas y el muro divisorio en un conjunto habitacional, cuyas mediciones se consignan en este documento. Llama la atención que el muro proporciona un aislamiento menor de 19 – 21 dB con ponderación A (aparenta el 50% de condiciones dadas en el laboratorio de 41 decibeles con ponderación A). Si bien es difícil predecir el aislamiento sonoro alcanzado en la obra construida en relación con el valor medido en laboratorio, la disminución evidenciada por los datos puede explicarse tomando en consideración lo siguiente: La baja calidad de materiales de construcción y de la puerta de acceso al departamento, así como el usado en las ventanas que permiten el ingreso del ruido exterior al interior.

En el muro divisorio entre espacios, que se encuentra en la estancia/comedor, el valor de aislamiento sonoro también es bajo principalmente porque la puerta de acceso al departamento es de tipo ligera (no madera), con un arrastre libre de 2.5 cm. Además, en la valoración de este muro divisorio influye el ruido exterior, ya que el muro de fachada no da aislamiento suficiente por las razones expuestas en el párrafo anterior.

Lo anterior explica por qué los valores de aislamiento sonoro aparentan que son bajos, en comparación de los obtenidos en el laboratorio. Los resultados de las pruebas de aislamiento acústico a los muros realizadas en laboratorio y en campo muestran que son diferentes. En publicaciones especializadas no se encontró

precedente, medir en laboratorio y en campo el mismo tipo de muro, esto no se había hecho antes, por lo que es un aporte original.

6 -Tercer caso de estudio

En este caso de estudio consistió en realizar las siguientes actividades: encuestas y mediciones de ruido, tiempo de reverberación, tiempo de decaimiento temprano, claridad 50, ruido de fondo, inteligibilidad, porcentaje de pérdida de articulación de consonantes, aislamiento de ruido, en diez aulas del Edificio "B" de la Unidad de Posgrado de la UNAM, debido a que sus fachadas se ubican a una distancia de, aproximadamente, 50 m de la Av. Insurgentes Sur, ver Figuras 29, 30 y 31. Debido a esta situación, la intensidad del ruido que se tiene en el interior de las aulas y que, principalmente, proviene del tránsito vehicular alteran el ambiente acústico, ya que interfieren con la comunicación; es decir, con la inteligibilidad del habla.

Este estudio se realiza porque se tiene conocimiento que, se han presentado reiteradas quejas por parte de los usuarios, debido a que dicho ruido impide el desarrollo natural de las actividades académicas y administrativas que las personas desarrollan en el edificio, principalmente, las clases.

En la Figura 29, se muestra la Unidad de Posgrado de la UNAM y su colindancia con Av. Insurgentes Sur; la ubicación del Edificio "B" en la Unidad de Posgrado, la ubicación de las aulas bajo estudio en el Edificio "B" y un detalle de la localización de los puntos de medición en una de las aulas. En esta última, se puede apreciar la colocación de la fuente sonora y de los micrófonos en el interior del aula y en su fachada.

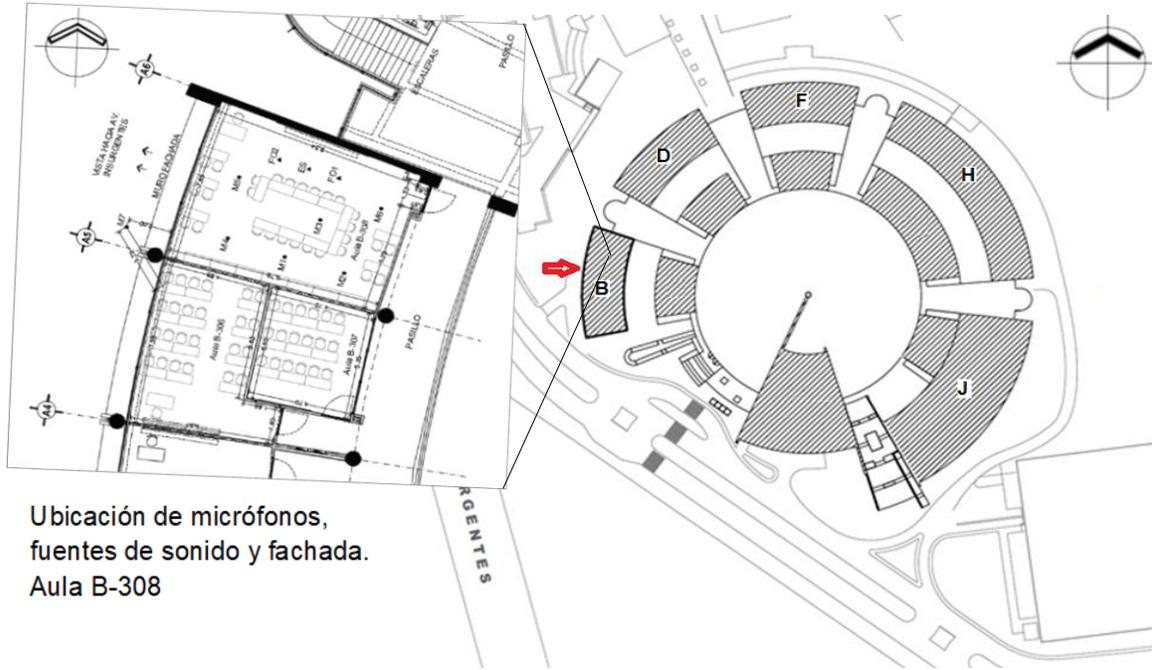


Figura 29 - Ubicación del Edificio “B” en la Unidad de Posgrado de la UNAM, detalle de la colocación de la fuente sonora y los micrófonos en el aula B- 308 y su colindancia con Av. Insurgentes Sur

En la Figura 30, se muestran las aulas ubicadas en el 2° y 3er piso del edificio “B”, donde se realizaron las mediciones y sus dimensiones.

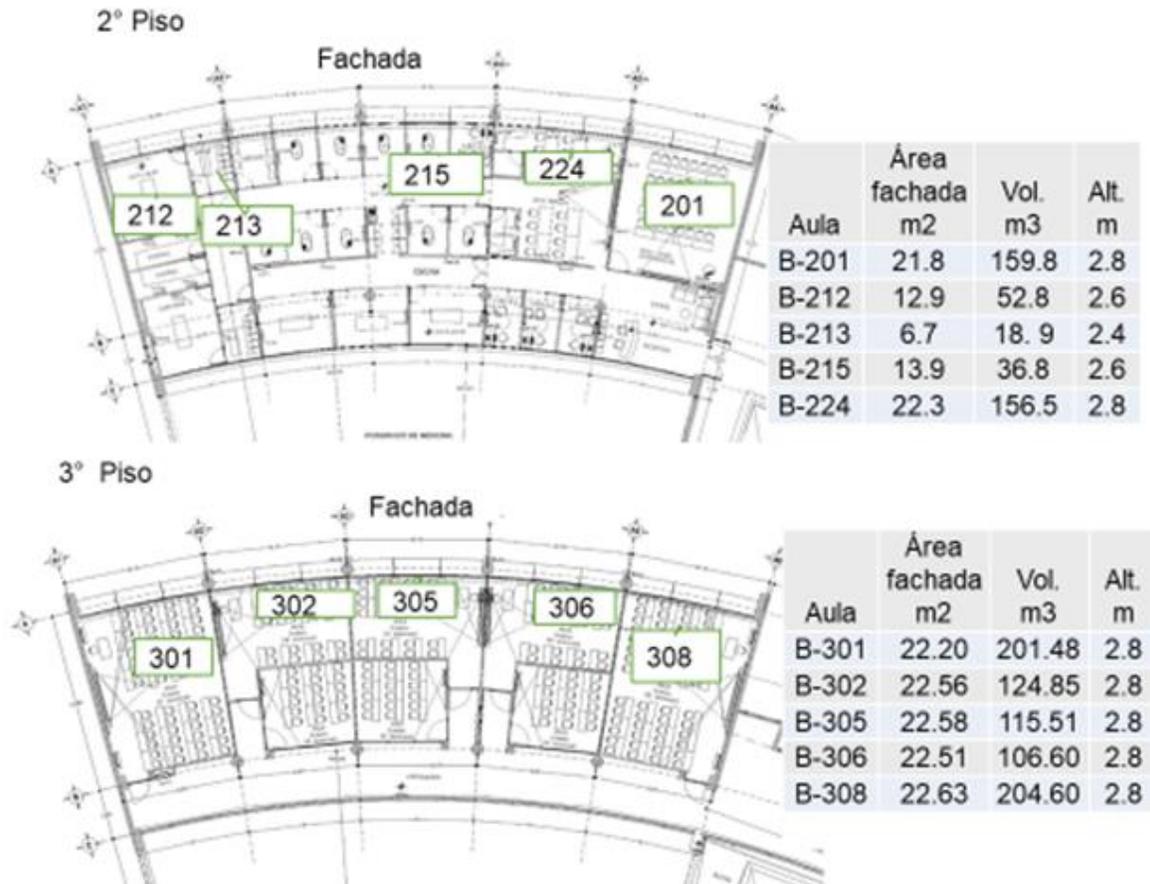


Figura 30 - Aulas donde se realizaron las mediciones, ubicadas en del 2° y 3er nivel piso del edificio “B” y sus dimensiones.

En la Figura 31, se muestra la ubicación del edificio “B” y la distancia aproximada a la que está de la Av. Insurgentes Sur, la ubicación de los puntos de medición de ruido en el exterior del edificio y de las aulas, y los niveles de presión sonora (NPS) equivalentes ponderados A (LAeq) obtenidos durante 15 minutos de medición en cada punto.

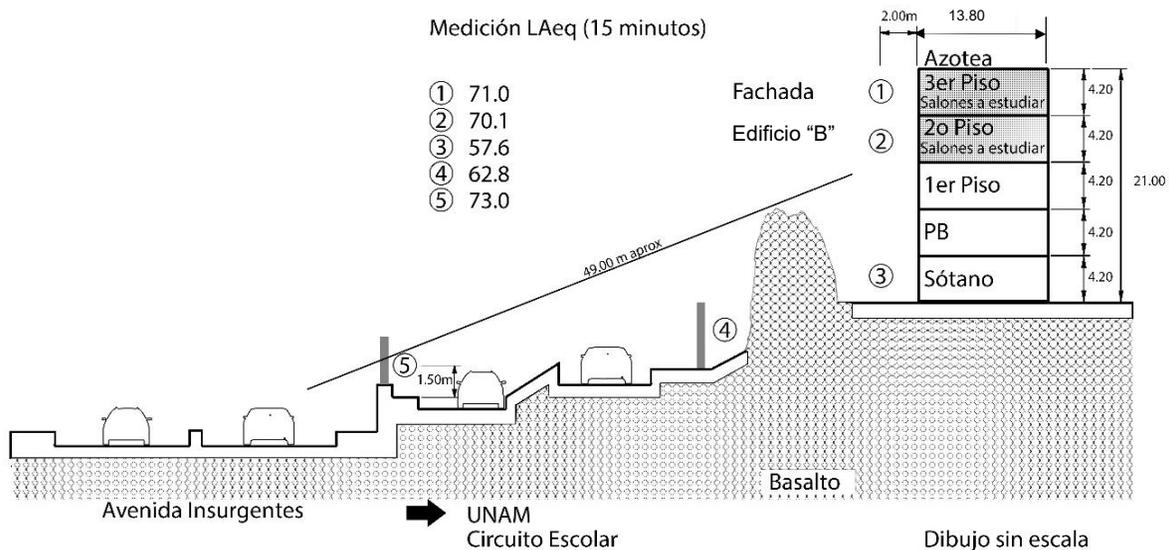


Figura 31 - Vista lateral del Edificio "B" y vías de tránsito vehicular, puntos de medición de ruido exterior al edificio y distancia aproximada entre el edificio y la Av. Insurgentes Sur.

En un primer momento, se realizó una encuesta a profesores y alumnos respecto a la percepción de ruido en las aulas, principalmente, por el ruido generado por el tránsito vehicular en la Av. Insurgentes Sur. El punto focal fue que las aulas son recintos donde se debe lograr una excelente transmisión oral; es decir, inteligibilidad.

Esa encuesta arrojó los siguientes resultados "el 48.4% de los alumnos manifiestan que el ruido ambiental dentro de este conjunto arquitectónico es un inconveniente; el 59.3% opina que el ruido de tránsito vehicular afecta principalmente las actividades académicas que se llevan a cabo dentro del aula; el 64.8% de los encuestados considera que el Edificio "B", es el que tiene más contaminación acústica de todos; el 42.2% declara que el ruido generado por el tránsito vehicular molesta a los usuarios; por último el 56.1% refiere que la principal fuente de ruido es la proveniente de la Av. Insurgentes Sur". [58]

Con base en estos resultados se diseñó una investigación que contempla una estrategia de medición de sonido, esta estrategia se centró en conocer los niveles de ruido al interior de las aulas con la finalidad de proponer soluciones arquitectónicas para mejorar el confort acústico de las aulas del Edificio “B”.

6.1 Desarrollo del tercer caso

La estrategia de medición de sonido se aplicó en las aulas del 2° y 3er piso del Edificio “B” de la Unidad de Posgrado, por ser las más expuestas al ruido de los vehículos que transitan por la Av. Insurgentes Sur y haber personas realizando actividad académica. La Planta Sótano, Planta Baja y Primer Piso no se utilizan.

Las mediciones se realizaron durante los días y horas de mayor tránsito vehicular. Las aulas fueron elegidas de tal forma que representaran los cuatro tipos de salones que existen en el conjunto, ver Tabla 9. Su capacidad es de 10 a 40 alumnos, cuya edad oscila entre 25 y 45 años, según datos del departamento de servicios escolares.

6.1.1 Materiales de construcción

Los materiales que se utilizaron para la construcción de este edificio “B” de aulas son comunes en toda la UNAM, tanto por su durabilidad, bajo mantenimiento y sin aire acondicionado.

- Estructura de concreto, piso de losetas de barro.
- Fachada Muro Oeste, hacia la avenida Insurgentes: prefabricado de concreto como acabado final, muro de block de cemento arena con alveolos, aplanados al interior a base de mezcla y pintura, ventanas con marco de aluminio con un cristal para paso de iluminación natural, ventilación natural con ventanas tipo corredizas sin sello.
- Plafón falso de Tablaroca liso.

- Muros divisorios de Tablaroca, con acabado de pasta texturizada con pintura vinílica acrílica.
- Muro Este, de cancelería de aluminio, ventanas fijas y corredizas, sin sello, puerta de acceso de chapa metálica, sin sello, con núcleo de poliestireno con un cristal fijo de 50 x 50cm.
- En general, las aulas cuentan con mobiliario prefabricado: mesas metálicas con cubierta plástica para dos personas, sillas individuales de plástico, proyector, pantalla blanca para proyección, pizarrón blanco, en algunos son pizarrón de tiza.
- Las aulas no tienen sistema de ventilación electromecánica, la ventilación es natural, ocurre al abrir puerta y ventanas.

Existen varios tipos de aula que, de acuerdo con su tamaño, se han clasificado de la siguiente manera: 1) Cubículo ~19 m³; 2) Aula chica ~53 m³; 3) Aula mediana ~107 m³; 4) Aula grande ~205 m³, ver Tabla 9.

Aula	Volumen m ³	Área fachada m ²	Altura m
B-201	159.81	21.82	2.79
B-212	52.84	12.87	2.61
B-213	18.89	6.71	2.41
B-215	36.82	13.91	2.63
B-224	156.50	22.32	2.80
B-301	201.48	22.20	2.80
B-302	124.85	22.56	2.81
B-305	115.51	22.28	2.81
B-306	106.60	22.51	2.81
B-308	204.60	22.63	2.81

Tabla 9 - Dimensiones de las aulas del Edificio "B".

En la investigación se utilizaron diversos calificadores que se abordan a continuación.

6.2 Calificadores base de referencia internacional

La literatura especializada, da cuenta de investigaciones que miden fundamentalmente el tiempo de reverberación y el nivel de ruido de fondo para referirse al confort acústico. En contraste, los valores utilizados en este trabajo incluyen, además los establecidos por la norma ANSI, ver Tabla 10.

ANSI / ASA. 12.60-2010/Part1 (USA)	Ruido de fondo dB(A)	Tiempo de reverberación máximo en segundos, frecuencias 500, 1,000 2,000 Hz
Espacio central de aprendizaje con volumen cerrado $\leq 283 \text{ m}^3$	35	0.6

Tabla 10 - Valores de referencia internacionales.

6.3 Calificadores adicionales internacionales

El tema del confort acústico en las aulas de escuelas primarias, secundarias, de nivel universitario y viviendas, se ha investigado extensamente, existen numerosas publicaciones consignadas en la literatura especializada.

“Inicialmente, los parámetros que determinaron los calificadores del confort acústico para las aulas fueron el tiempo de reverberación y ruido de fondo” [59], [60].

Es decir, los mismos calificadores que se utilizan en otros recintos como salas de concierto o auditorios. En este estudio, se utilizaron 5 calificadores más con el fin de contar con información más amplia para la toma de decisiones. Estos calificadores se enlisan a continuación y se detallan en el glosario de términos.

- Tiempo de decaimiento temprano.
- Definición 50 milisegundos.
- Índice de transmisión del habla.

- Porcentaje de pérdida de articulación de consonantes.
- Aislamiento acústico global de muro fachada.

6.4 Procedimiento de medición en las diez aulas del Edificio “B”

Se midió en las diez aulas el NPS en las bandas de octavas de 125; 250; 500; 1,000; 2,000 y 4,000 Hz, en dos condiciones: a) Puertas y ventanas abiertas; y b) Puertas y ventanas cerradas, para estudiar el posible conflicto al interior de las aulas entre utilizar la ventilación natural (puertas y ventanas abiertas) o disminuir el nivel de ruido de tránsito vehicular (puertas y ventanas cerradas).

6.4.1 Equipo utilizado

Equipo	Marca	Modelo	No. Serie
Analizador	Bruel & Kjaer	2270	3007502
Micrófono campo libre	Bruel & Kjaer	4189	587
Micrófono campo libre	Bruel & Kjaer	4189	588
Calibrador	Bruel & Kjaer	4230	1207137
Medidor de clima	Kestrel	4500	703401
Amplificador	Bruel & Kjaer	2734	-----
Fuente Omnidireccional	Bruel & Kjaer	4292-L	42009
Echo Speech	Bruel & Kjaer	4720	-----
Pértiga	RØDE	-----	-----
Programa	Predictor-LimA	V 12	
Programa	Dirac	V 6.0	-----
Programa	BZ-7228	-----	-----
Laptop	Hewlett-Packard	-----	-----

Tabla 11 – Equipo utilizado

6.4.2 Obtención de índices de desempeño acústico de propósito general

Los índices que se utilizaron fueron: tiempo de reverberación, tiempo de decaimiento temprano y definición 50 milisegundos. Éstos se midieron por el método de respuesta al impulso, empleando señales sinusoidales con barrido de frecuencia exponencial, utilizando una fuente omnidireccional que se colocó en dos puntos diferentes a 1.5 metros de altura y un micrófono a 1.5 m de altura en diez posiciones puntos diferentes. Los datos se procesaron con el programa DIRAC.

6.4.3 Medición de ruido de fondo

Para determinar el nivel de ruido de fondo se midió, en el centro de cada aula durante 15 minutos el NPS con lo que se obtuvo el LA_{eq} . En un primer momento se midió teniendo las puertas y ventanas cerradas, para disminuir la influencia del ruido de tránsito vehicular. Con esta medición se pudo determinar que existen al menos diez dB de diferencia entre el ruido de fondo (puertas y ventanas cerradas) y el ruido de tránsito vehicular (puertas y ventanas abiertas), por lo que no fue necesario corregir por efecto de ruido de fondo en la medición de aislamiento sonoro. Posteriormente se midió simultáneamente el NPS exterior – interior de las aulas, con las ventanas abiertas.

6.4.4 Índices de desempeño acústico

Los índices que califican la inteligibilidad del habla que se utilizaron en esta investigación fueron: índice de transmisión del habla y pérdida de articulación de consonantes. Las mediciones se obtuvieron mediante la respuesta al impulso utilizando señales de secuencias de longitud máxima, que simula voz femenina y masculina mediante un patrón de directividad de la boca humana. Se utilizó el altavoz tipo Echo Speech que se colocó a 1.50 m de altura, de donde se ubicaba el profesor. El levantamiento de datos se realizó por medio de un micrófono, colocado

en varios puntos, de 3 a 5, de acuerdo con el tamaño del espacio a 1.20 m de altura, Las mediciones fueron realizadas en las aulas con muebles y sin personas, con puerta y ventanas abiertas y, posteriormente, con puerta y ventanas cerradas. La información obtenida se procesó usando el programa DIRAC.

6..4.5 Medición de aislamiento acústico global de fachada

Para obtener este valor existen varios procedimientos. El que mejor aplicó para estudiar la fachada del Edificio “B”, fue el de medición de aislamiento acústico global de fachada en campo aplicando la norma ISO 16283-3. Se utilizó como señal de excitación el mismo ruido de tránsito vehicular generado en la Av. Insurgentes Sur, de esta forma se determinó la diferencia de nivel estandarizada ($D_{tr,2m,nT,w}$). Se midió simultáneamente durante 3 minutos el NPS en el interior y exterior del aula, colocando un micrófono a 2m de la fachada por medio de una pértiga, sostenida desde el aula contigua, porque las aulas se encuentran en el 2° y 3er piso, ver Figura 32 y el otro micrófono, se colocó al interior de las aulas en 5 puntos diferentes a una altura de 1.50 m. De esta forma se obtuvo un promedio temporal. Esta medida proporcionó el mejor estimado del aislamiento acústico global de la fachada incluyendo todos los elementos de ésta (muros, ventanas, ventilas, etc.). Con la curva en función de la frecuencia de 500 Hz, se determinó el índice de clasificación, de una sola cifra, incluyendo los valores de adaptación espectral C y C_{tr} .



Figura 32 - Posición del micrófono para medir el NPS del ruido de tránsito vehicular por fuera del aula a 2 m frente a la fachada.

6.5 Resultados de las mediciones

Los calificadores se midieron en condiciones de escucha natural, aulas existentes, acabados finales y con ruidos ambientales reales (vehículos de todo tipo).

La Figura 33, muestra los valores del tiempo de reverberación, medidos en las diez aulas del Edificio “B”.

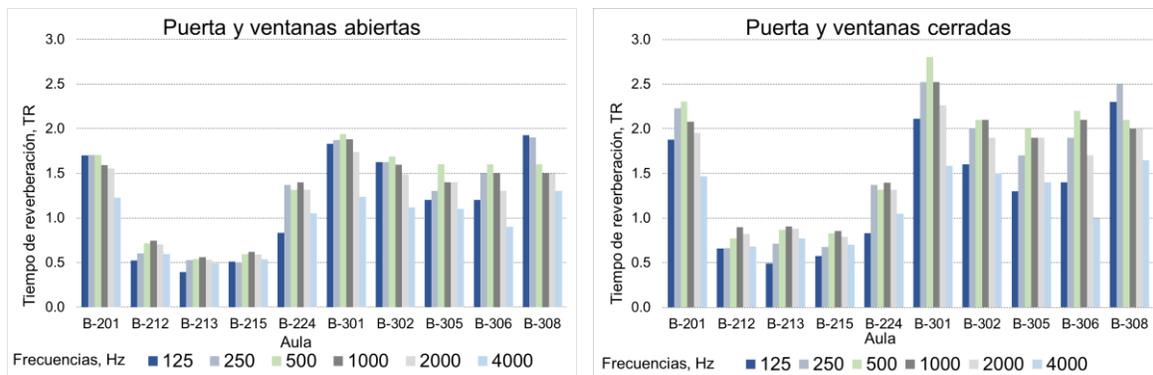


Figura 33 – Tiempo de reverberación de las aulas.

Las Figuras 34 y 35, muestran los valores del tiempo de decaimiento temprano y definición 50 milisegundos.

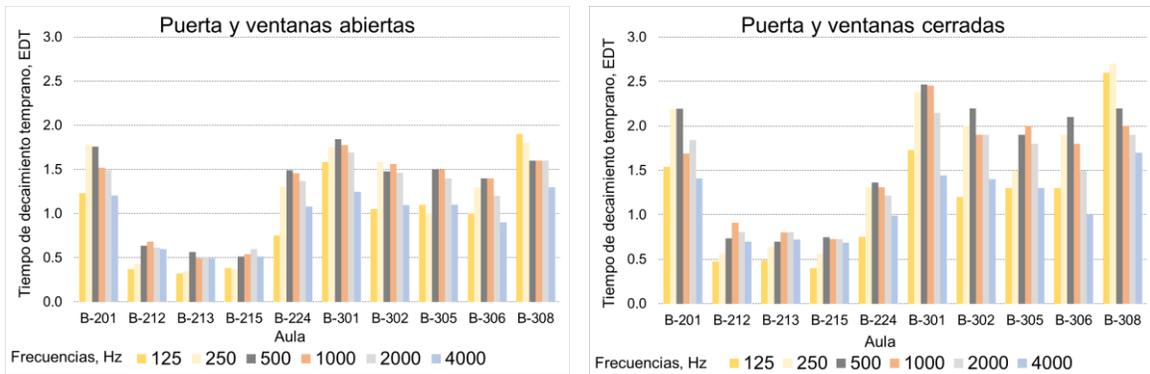


Figura 34 – Tiempo de decaimiento temprano de las aulas.

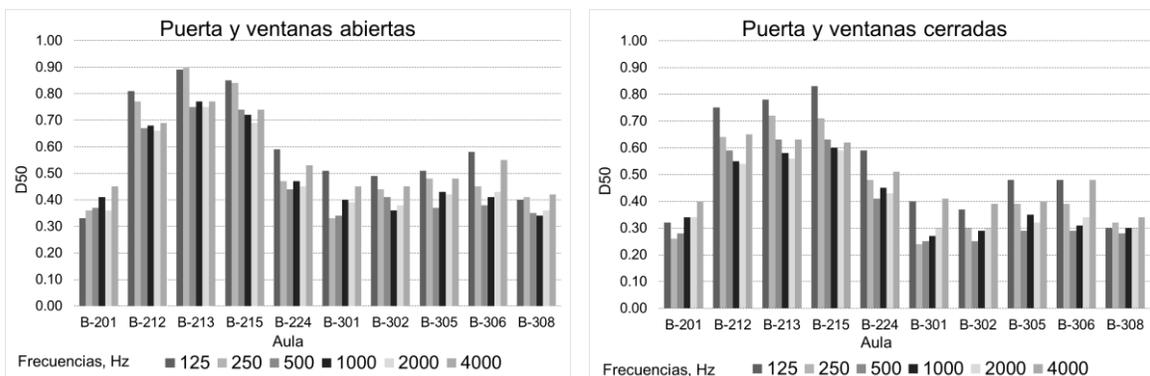


Figura 35 – Definición 50 milisegundos de las aulas.

Las Figuras 36 y 37 muestran los valores de Índice de transmisión del habla y pérdida de compresión de consonantes con dos espectros.

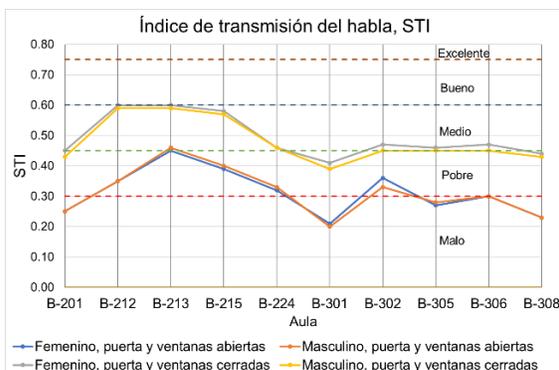


Figura 36 – Valores de índice de transmisión del habla de las aulas.

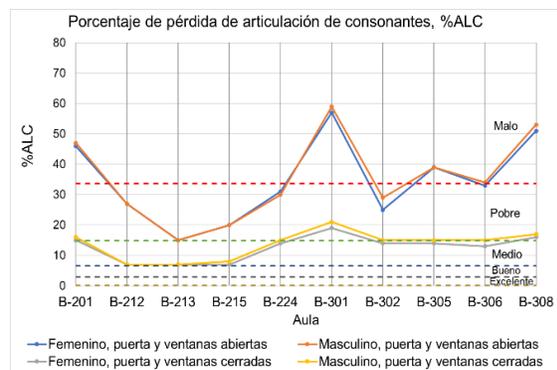


Figura 37 – Valores de pérdida de articulación de consonantes de las aulas.

Los valores LA_{eq} medidos en las diez aulas: al exterior a 2 m de la fachada, al interior con puerta y ventanas abiertas, al interior con puerta y ventanas cerradas y el ruido de fondo recomendado por la norma ANSI/ASA, se muestran en la Figura 38.

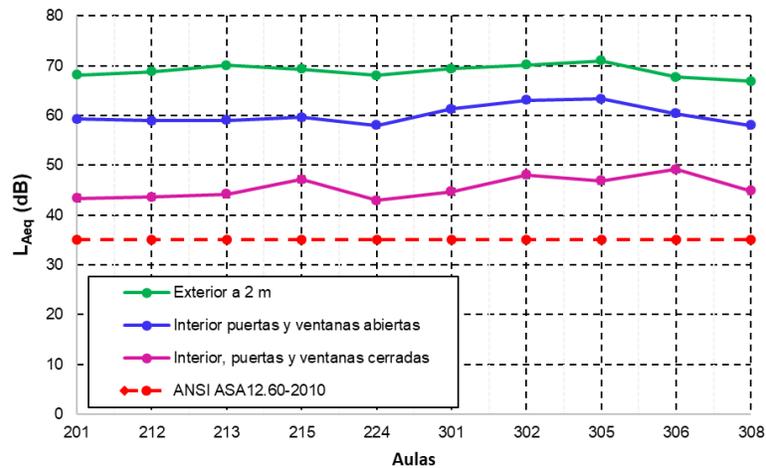


Figura 38 – Gráficas de la medición del LA_{eq} en fachada, en el interior de las aulas con puerta y ventanas abiertas, y con puerta y ventanas cerradas. Se incluye la gráfica recomendada por la norma ANSI/ASA.

La Tabla 12, muestra la diferencia de nivel estandarizada ($D_{tr,2m,nT,w}$) de la fachada que separa y aísla al Edificio “B” del ruido de tránsito vehicular que proviene de la Av. Insurgentes Sur.

Aula	$D_{tr,2m,nT,w}$	C	C_{tr}
B-201	32	31	29
B-212	28	28	25
B-213	27	27	25
B-215	24	24	21
B-224	24	23	23
B-301	32	32	30
B-302	23	23	22
B-305	29	28	26
B-306	30	29	29
B-308	31	30	29

Tabla 12 - Diferencia de nivel estandarizada ($D_{tr,2m,nT,w}$) y sus valores de adaptación espectral C y C_{tr} .

Ejemplo de valor de aislamiento acústico global de fachada del salón B-306, obtenido con el programa BZ-7228 instalado en el sonómetro tipo 2270 ambos de la marca Brüel & Kjær, ver Figura 39.

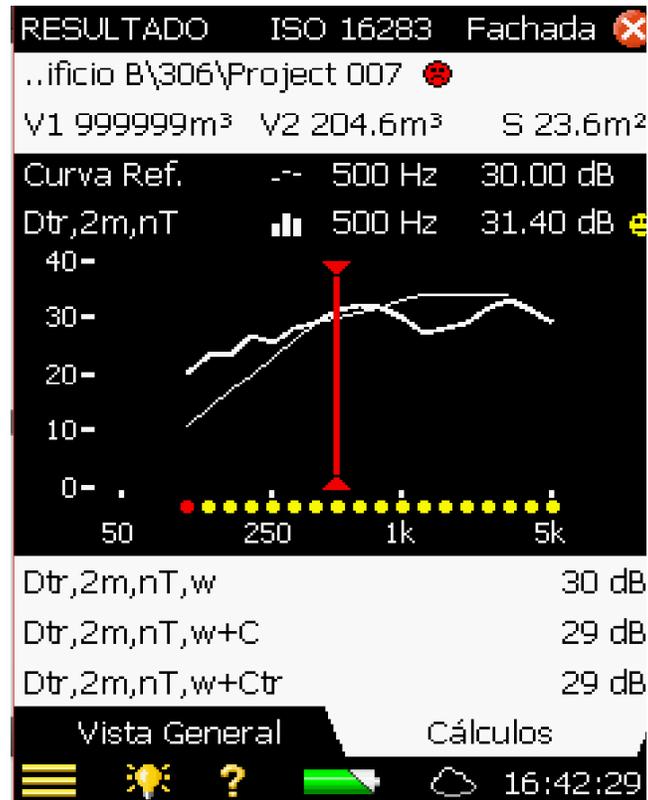


Figura 39 - Medición de aislamiento de fachada aula B-306.

6.5.1 Resumen de datos

Las Tablas 13 y 14 concentran los resultados de las mediciones realizadas en las diez aulas. Se contrastan los valores de los calificadores medidos en campo y los establecidos por la norma ANSI/ ASA. Al mismo tiempo, presenta el estado actual de confort acústico y los valores de referencia ideales.

Puerta y ventanas abiertas				
Calificador	Promedio medido en campo	Norma ANSI/ASA S12.60-2010/Part 1	Estatus	Ideal
Tiempo de reverberación	1.27	0.6	Excede	≤ 0.6
Tiempo de decaimiento temprano	1.23		Excede	≤ 0.6
Definición 50 milisegundos	0.52		Medio	0.86 - 1.0
Índice de transmisión del habla en hombre	0.31		Pobre	0.75 - 1.0
Índice de transmisión del habla en mujer	0.31		Pobre	0.75 - 1.0
Porcentaje de pérdida de articulación de consonantes en hombre	35.3		Excede	0.76 - 2.93
Porcentaje de pérdida de articulación de consonantes en mujer	34.4		Excede	0.76 - 2.93
Ruido de fondo	60	35 dB con ponderación A	Excede	≤ 35
Diferencia de nivel estandarizada ($D_{2m,nT,w}$)	28		Pobre	53

Tabla 13 – Resumen de datos por calificador, con puerta y ventanas abiertas.

Puerta y ventanas cerradas				
Calificador	Promedio medido en campo	Norma ANSI/ASA S12.60-2010/Part 1	Estatus	Ideal
Tiempo de reverberación	1.67	0.6	Excede	≤ 0.6
Tiempo de decaimiento temprano	1.58		Excede	≤ 0.6
Definición 50 milisegundos	0.44		Medio	0.86 - 1.0
Índice de transmisión del habla en hombre	0.48		Pobre	0.75 - 1.0
Índice de transmisión del habla en mujer	0.50		Pobre	0.75 - 1.0
Porcentaje de pérdida de articulación de consonantes en hombre	13.5		Excede	0.76 - 2.93
Porcentaje de pérdida de articulación de consonantes en mujer	12.5		Excede	0.76 - 2.93
Ruido de fondo	46	35 dB con ponderación A	Excede	≤ 35
Diferencia de nivel estandarizada ($D_{2m,nT,w}$)	28		Pobre	39

Tabla 14 – Resumen de datos por calificador, con puerta y ventanas cerradas.

6.5.2 Aula con el aislamiento sonoro de fachada más bajo

Una de las aulas más afectadas por el ruido es la B-305. En la Tabla 15, se resalta en negritas las bandas de frecuencias donde es mayor el nivel de ruido, lo que permite saber cuáles son las aulas que requieren mayor atención. En esta Tabla se muestra el LA_{eq} de ruido exterior con micrófono a 2 m de la fachada; el LA_{eq} al interior con puerta y ventanas abiertas y finalmente el LA_{eq} al interior con puerta y ventanas cerradas, que es el ruido de fondo.

Frecuencia	LA _{eq}	LA _{eq}	LA _{eq}		Frecuencia	LA _{eq}	LA _{eq}	LA _{eq}
Hz	Exterior	Interior	Ruido de fondo		Hz	Exterior	Interior	Ruido de fondo
12.5	-1.0	-6.0	-10.2		630	60.2	52.7	35.1
16	7.3	0.3	-7.6		800	62.1	55.4	36.5
20	13.1	3.2	-4.5		1,000	64.0	56.2	38.0
25	20.0	10.0	4.8		1,250	63.4	56.3	37.7
1.5	24.4	16.5	7.9		1,600	59.7	53.5	34.5
40	28.3	19.4	12.7		2,000	55.8	48.8	32.2
50	33.5	26.4	19.3		2,500	53.0	45.1	28.2
63	40.2	36.0	24.9		3,150	50.1	41.2	22.0
80	43.5	39.6	30.2		4,000	46.6	38.1	16.6
100	46.0	37.9	25.0		5,000	42.9	33.5	12.9
125	46.8	37.7	28.1		6,300	38.1	28.9	10.6
160	56.4	45.3	32.0		8,000	33.2	23.8	7.1
200	56.8	47.5	36.7		10,000	26.6	21.4	4.9
250	57.1	47.2	35.6		12,500	16.7	17.6	2.8
315	57.0	47.1	35.2		16,000	7.6	18.6	0.1
400	58.9	48.4	35.6		20,000	-0.6	14.4	-1.3
500	59.0	50.7	36.4		A	71.0	63.3	46.9

Tabla 15 - LA_{eq} en bandas de tercios de octava de frecuencias donde se resaltan, en negritas, los LA_{eq} más altos medidos en el aula B-305 al exterior a 2 m; al interior con puerta y ventanas abiertas y con puerta y ventanas cerradas, ruido de fondo.

6.6 Discusión de los resultados

Con base en los datos obtenidos incorporando los calificadores propuestos, sabemos que:

- El confort acústico en las aulas del Edificio “B” está afectado, lo que altera la inteligibilidad del habla e interfiere en todas las actividades que se realizan diariamente. El ruido de fondo actualmente es de 46 dB con ponderación A (dBA) con puerta y ventanas cerradas, y 60 dBA con puerta y ventanas abiertas, y no debería ser mayor a 35 dBA.

- Que su índice aparente de transmisión sonora; es decir, la diferencia de nivel estandarizada ($D_{tr,2m,nT,w}$) de la fachada del edificio “B” es bajo, esto quiere decir que el aislamiento acústico global es pobre.).
- Los tiempos de reverberación, son excesivos, estos no deberían ser mayores a 0.6 segundos, en promedio actualmente son de 1.27-1.67 segundos, esto posiblemente se debe a los materiales de acabado final en las paredes y por el mobiliario utilizado.
- Los tiempos de decaimiento temprano son entre 1.23 - 1.58, y no coinciden con los tiempos de reverberación, excediendo lo establecido en la norma *“De haber una difusión del sonido en el recinto producida por una geometría regular del mismo y por una distribución homogénea y uniforme de los materiales utilizados como revestimientos, el valor de tiempo de decaimiento temprano coincidiría con el de tiempo de reverberación”* [61].
- El calificador definición 50 milisegundos es de 0.44 – 0.52 segundos y debería ser de 0.86 - 1.0 lo que indica que la permanencia de las palabras es muy corta, por lo que su estatus es medio.
- El Índice de transmisión del habla es de 0.31 – 0.50 y debería posicionarse entre 0.75 y 1.0, por lo que se estatus es pobre, es decir, que hace poco inteligible la comprensión del habla.
- La Pérdida de articulación de consonantes es de 12.5 – 35.3, este debería estar entre 0.76 - 2.93, actualmente se ubica en niveles de regular y pobre, generando que se pierdan la comprensión de las consonantes, lo que provoca que no se entiendan los mensajes orales.
- El valor de aislamiento acústico global de fachada es la diferencia de nivel estandarizada ($D_{2m,nT,w}$), o índice aparente de reducción sonora. El LA_{eq} promedio

al interior con puertas y ventanas abiertas fue de 60 dBA y con puertas y ventanas cerradas de 46 dBA. Por lo que, el $D_{2m,nT,w}$ promedio de las 10 aulas fue de 28 dBA. Aunque el $D_{2m,nT,w}$ promedio de la fachada de 7 aulas fue de 26 dBA, debido a que su único soporte rígido es en las losas de entrepiso, y el que proporcionan las fachadas de las aulas B-201, B-301 y B-308 es de 32 dBA, que se soportan de igual forma de las losas de entrepiso, además se soportan de los muros de concreto.

El uso de 7 calificadores aportó información puntual respecto a la afectación acústica en las aulas y donde se ubica. Los datos obtenidos pueden ser considerados para diseños arquitectónicos que consideren al confort acústico como un elemento importante para el desarrollo de la vida académica de Ciudad Universitaria.

6.6.1 Las aulas del Edificio “B” de acuerdo con las indicaciones de la OMS

De acuerdo con la OMS (ver Tabla 16), las aulas del edificio “B” con puertas y ventanas abiertas al tener un LA_{eq} promedio de 60 dBA, se colocan muy cerca de la casilla de “comunicación verbal extremadamente difícil” y con puertas y ventanas cerradas al tener un LA_{eq} de 46 dBA, se coloca por encima de la casilla de “dificultad con la comunicación verbal”.

LA_{eq} promedio máximo permitido en dBA	Efectos negativos
30	Dificultad en conciliar el sueño, pérdida de calidad de sueño
40	Dificultad con la comunicación verbal
45	Probable interrupción del sueño
50	Malestar diurno moderado
55	Malestar diurno fuerte
65	Comunicación verbal extremadamente difícil
75	Perdida de oído a largo plazo
110 - 140	Perdida de oído a corto plazo

Tabla 16 - Valores críticos de ruido ambiental según la OMS.

6.7 Propuestas de soluciones

Una vez obtenidos los resultados de las mediciones en campo de las aulas, identificando y estudiando la situación acústica que actualmente tiene y con el objetivo de que se llegue a cumplir su función de transmisión oral con confort acústico, se diseñaron dos soluciones arquitectónicas, para reducir el efecto de ruido externo-interno. Una consiste en la colocación de una barrera aislante y la otra en construir una fachada de doble piel, en ambas se determinó no alterar la fachada original.

Esta acción tuvo un triple objetivo:

- 1) Valorar la eficiencia de cada una de las propuestas.
- 2) Obtener datos que permitan evaluar las propuestas de manera prospectiva.
- 3) Saber cuál de las dos opciones es la más adecuada.

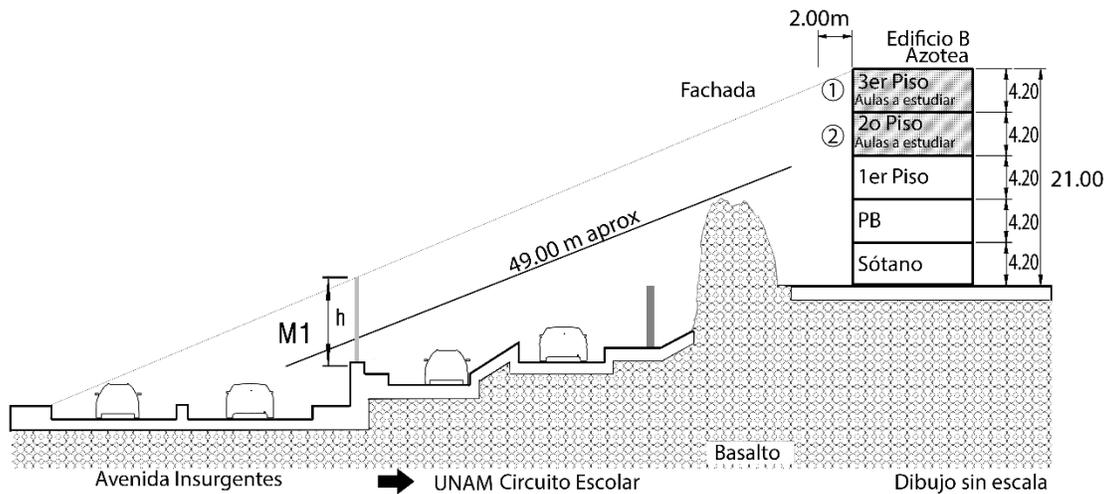
Para decidir cuál de las dos soluciones es mejor, se utilizó el programa (software) Predictor-LimA, al que se alimentan las condiciones topológicas del terreno en el que se ubica la edificación y se puede simular el ruido generado por el tránsito vehicular de la Av. Insurgentes Sur.

En ambas simulaciones se midió el nivel equivalente (LA_{eq}) durante una hora en cada punto.

6.7.1 Solución 1: barrera aislante

En esta simulación se colocaron 92 micrófonos con un metro cuadrado de separación entre ellos, a 2m de la fachada, y en el 2° y 3er piso de la edificación, y, colocar una barrera aislante (M1) construida con lámina de policarbonato de 12 mm de espesor montada en una estructura metálica a, aproximadamente, 49 m de la edificación, en la colindancia de Ciudad Universitaria y Av. Insurgentes Sur. Se

propusieron dos alturas de la barrera; una de $h = 11\text{ m}$ y otra de $h = 15\text{ m}$, ver figura 40.



M1: Muro pantalla con estructura metálica con una lámina de policarbonato de 12mm de espesor

Figura 40 - Aislamiento sonoro utilizando una barrera aislante.

6.7.1.1 Ventajas de colocar una barrera aislante

- Se reduciría el ruido en el interior de las aulas, sin modificar su ventilación.
- Se incrementa en cierta medida la seguridad del lugar.
- La fachada original no se afecta.
- Agregaría un valor estético al exterior, ya que la barrera aislante puede diseñarse con diferentes materiales, pintarse, estamparse, etc.

6.7.1.2 Desventajas de la barrera aislante

- Su costo es relativamente alto, aunque depende del tipo de material utilizado para su construcción, robustez, altura y longitud.
- En este caso, tiene un bajo aislamiento acústico, debido a la diferencia de nivel topográfico del lugar; es decir, el receptor del ruido (Edificio "B") está arriba de la fuente de ruido (tránsito vehicular), lo que facilita que la trayectoria de arribo del ruido de la fuente al receptor sea más directa y, en

consecuencia, hace más difícil que el aislamiento que pueda proporcionar la barrera sea eficiente.

- Limita parcial o totalmente la visibilidad al exterior de la colindancia.

“La literatura especializada recomienda que la fachada esté a una distancia horizontal mínima de 61 m de la barrera aislante, cuando no exista otro tipo de barrera” [62].

En este caso la distancia desde la barrera aislante a la fachada es de aproximadamente 49 m.

Otros condicionantes que influyen en la decisión de optar por esta solución son:

- En México, los arquitectos tienen poca experiencia en el diseño, construcción y los aspectos estéticos, paisajísticos, sociales, de seguridad y mantenimiento de barreras acústicas aislantes.

6.7.1.3 Resultados de la simulación utilizando barrera aislante

En las simulaciones se utilizaron los valores de aislamiento sonoro ($D_{tr,2m,nT,w}$) de la Tabla 12.

Para conocer los valores del LA_{eq} al interior de las aulas en el 2° y 3er piso del edificio “B” sin barrera aislante, con barrera aislante con las dos alturas y ruido de fondo al interior con puerta y ventanas abiertas los resultados se muestran en la Tabla 17.

Piso del Edificio "B"	L _{Aeq} , sin barrera aislante, medido a 2 m de la fachada [dBA]	Datos simulados		L _{Aeq} con barrera aislante de 11m, medido dentro del aula, [dBA]	L _{Aeq} con barrera aislante de 15 m, medido dentro del aula, [dBA]
		L _{Aeq} con barrera aislante de 11 m, medido a 2 m de la fachada [dBA]	L _{Aeq} con barrera aislante de 15 m, medido a 2 m de la fachada [dBA]		
2°	68	64	63	55	54
3°	69	67	64	58	55

Tabla 17 – Resultados de la simulación de aislamiento utilizando barreras acústicas aislantes y considerando puerta y ventanas abiertas de las aulas, los datos dentro de las aulas no son simulados.

6.7.1.4 Con puertas y ventanas cerradas

Los valores del L_{Aeq} al interior de las aulas en el 2° y 3er piso del Edificio "B", sin barrera aislante, con barrera aislante con las dos alturas y ruido de fondo al interior, con puerta y ventanas cerradas, se muestran en la Tabla 18.

Piso del Edificio "B"	L _{Aeq} sin barrera aislante, medido a 2 m de la fachada [dBA]	Datos simulados		L _{Aeq} , con barrera aislante de 11 m, medido dentro del aula [dBA]	L _{Aeq} , con barrera aislante de 15 m, medido dentro del aula [dBA]
		L _{Aeq} con barrera aislante 11 m, medido a 2 m de la fachada [dBA]	L _{Aeq} con barrera aislante 15 m, medido a 2 m de la fachada [dBA]		
2°	68	64	63	41	40
3°	69	67	64	44	41

Tabla 18 – Resultados de la simulación de aislamiento utilizando barreras acústicas aislantes y considerando puerta y ventanas cerradas de las aulas, los datos dentro de las aulas no son simulados.

6.7.2 Solución 2: fachada de doble piel

Una segunda solución fue la de colocar una fachada de doble piel o segunda fachada, ver Figura 41. Se propuso construirla a 2.0 m, frente de la fachada original del Edificio "B", que está orientada hacia Av. Insurgentes Sur.

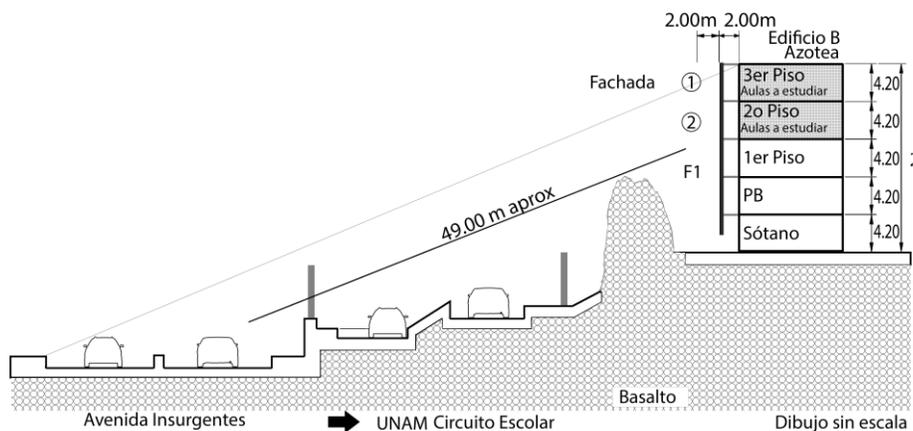


Figura 41 – Colocación de fachada de doble piel en el edificio "B".

Se propuso que la fachada de doble piel en su parte inferior, laterales y superior estuviera abierta. En la parte inferior alcanzaría dos metros por encima del nivel del piso terminado, en los lados alcanzaría el límite del Edificio “B”, la parte superior se colocaría en dos posiciones (alturas). La primera a un metro por encima de la altura del Edificio “B” y la segunda a un metro por debajo de la altura del Edificio “B”.

6.7.2.1 Ventajas de colocar una fachada de doble piel

- *“Funcionaría como un sistema de reducción de ruido”* [63].
- Permite que la ventilación pasiva continúe en las aulas.
- Su construcción agregaría valor estético al paisaje urbano, ya que se puede diseñar con diferentes tipos de materiales, pintarse, estamparse, etc.
- La fachada original no se ve afectada.

6.7.2.2 Desventajas de colocar una fachada de doble piel

- Limita parcialmente la vista a la Av. Insurgentes Sur.
- La inversión inicial es relativamente alta.
- Ocultaría parcialmente la fachada original.

6.7.2.3 Resultados de la simulación utilizando fachada de doble piel

En las simulaciones se utilizaron los valores de aislamiento sonoro ($D_{tr,2m,nT,w}$) de la Tabla 12.

Los resultados de las mediciones del LA_{eq} al interior de las aulas en el 2° y 3er piso el Edificio “B”, con fachada original, con fachada de doble piel en dos alturas, ruido de fondo al interior y con puertas y ventanas abiertas, se muestran en la Tabla 19.

Edificio "B" piso y altura de la fachada de doble piel	LA _{eq} medido a 2 m de la fachada original [dBA]	Datos simulados entre la fachada original y la fachada de doble piel			LA _{eq} medido en el interior de aulas en la orilla de la fachada de doble piel [dBA]	LA _{eq} medido en el interior de aulas entre la orilla y el centro fachada de doble piel [dBA]	LA _{eq} medido en el interior de aulas al centro de la fachada de doble piel [dBA]
		LA _{eq} medido en la orilla de la fachada de doble piel [dBA]	LA _{eq} medido entre el centro y la orilla de la fachada de doble piel [dBA]	LA _{eq} medido en el centro de la fachada de doble piel [dBA]			
2° piso fachada de doble piel a 1.0 m por encima del Edificio "B"	68	56	52	50	47	43	41
3° piso fachada de doble piel a 1.0 m por encima del Edificio "B"	69	56	54	53	47	45	44
2° piso fachada de doble piel a 1.0 m por debajo de la altura del Edificio "B"	68	56	53	51	47	44	42
3° piso fachada de doble piel a 1.0 m por debajo de la altura del Edificio "B"	69	58	56	54	49	47	45

Tabla 19 – Resultados de la simulación de aislamiento utilizando fachada de doble piel y considerando puerta y ventanas abiertas de las aulas, los datos dentro de las aulas no son simulados.

6.7.2.4 Con puertas y ventanas cerradas

Los resultados de las mediciones del LA_{eq} al interior de las aulas en el 2° y 3^{er} piso el Edificio “B”, con fachada original, con fachada de doble piel en dos alturas, ruido de fondo al interior y con puertas y ventanas cerradas, se muestran en la Tabla 20.

Edificio “B” piso y altura de la fachada de doble piel	LA _{eq} medido a 2 m de la fachada original [dBA]	Datos simulados entre la fachada original y la fachada de doble piel			LA _{eq} medido en el interior de aulas en la orilla de la fachada de doble piel [dBA]	LA _{eq} medido en el interior de aulas entre la orilla y el centro fachada de doble piel [dBA]	LA _{eq} medido en el interior de aulas al centro de la fachada de doble piel [dBA]
		LA _{eq} medido en la orilla de la fachada de doble piel [dBA]	LA _{eq} entre el centro y la orilla de la fachad a de doble piel [dBA]	LA _{eq} medido en el centro de la fachada de doble piel [dBA]			
2° piso fachada de doble piel a 1.0 m por encima del Edificio “B”	68	56	52	50	33	29	27
3° piso fachada de doble piel a 1.0 m por encima del Edificio “B”	69	56	54	53	33	31	30
2° piso fachada de doble piel a 1.0 m por debajo de la altura del Edificio “B”	68	56	53	51	33	30	28
3° piso fachada de doble piel a 1.0 m por debajo de la altura del Edificio “B”	69	58	56	54	35	33	31

Tabla 20 – Resultados de la simulación de aislamiento utilizando fachada de doble piel y considerando puerta y ventanas cerradas de las aulas, los resultados dentro del aula no son simulados.

6.8 Valoración del uso de programas simuladores

Aplicando la estrategia de medición en campo se registraron LA_{eq} cada una de las diez aulas en fachada y su interior. Los datos medidos se compararon con los simulados calculados con el programa Predictor-LimA en las mismas condiciones de medición. La diferencia de LA_{eq} entre los valores medidos y simulados fue de ± 1 a 2 dB, por lo que los valores simulados se consideran aceptables. Podemos suponer que los resultados de las 2 soluciones son factibles en caso de que se lleguen a construir.

6.9 Conclusiones

Los datos presentados en este caso de estudio sugieren que el confort acústico en las diez aulas se encuentra entre malo y medio. Esta información permite inferir que, en dichos recintos se afectan, principalmente, los procesos de enseñanza-aprendizaje, por la interferencia del ruido exterior en la inteligibilidad del habla y se podría afectar, eventualmente, la salud de los usuarios.

Las barreras acústicamente aislantes, son comúnmente utilizadas en Europa y en el Oriente (Corea, Japón, entre otros), y se fabrican a base de láminas de policarbonato soportadas en una estructura de acero, con una altura de 9 a 15 metros aproximadamente y de largo sin límite.

En este caso de estudio, después de realizar los cálculos con ayuda del programa especializado Predictor-LimA, se pudo observar que con una barrera de 15 m de altura se obtiene una disminución del LA_{eq} , en fachada, de 5 dBA como máximo.

Con la barrera el ruido se reduce, pero, no es suficiente. Con barrera el ruido de fondo promedio en las aulas es de entre 54 – 58 dBA, con puerta y ventanas abiertas y de 41 – 44 dBA con puerta y ventanas cerradas, por lo que se mantiene por encima de lo recomendado por la norma ANSI / ASA y lo que establece la OMS, ver Tabla 16, como “Comunicación verbal extremadamente difícil” y “Dificultad con la comunicación verbal”, respectivamente.

La fachada de doble piel, es decir, segunda fachada, en los trabajos publicados sólo se refieren a que sería conveniente utilizarlos como elemento aislante sonoro, sin dar ningún valor de aislamiento acústico. En este estudio se calculó el aislamiento acústico de una fachada de doble piel, y es el primer documento que ofrece información relativa al aislamiento sonoro producido por dobles fachadas. La doble fachada consiste en una estructura metálica donde se colocan láminas de policarbonato, y con ésta se cubre frontalmente toda la fachada del edificio. El aislamiento acústico que se obtuvo al interior de las aulas fue de 35 dBA como máximo, por lo que ésta sería la mejor solución.

Los datos obtenidos en la simulación para la fachada de doble piel indican que el ruido de fondo promedio en las aulas es de 41-49 dBA con puerta y ventanas abierta, por lo bajo esta condición, no cumple con lo recomendado por la norma ANSI / ASA, de 27 a 35 dBA, para la OMS el promedio máximo permitido es de 40 dBA (dificultad con la comunicación verbal); no obstante con puerta y ventana cerradas si se cumple con lo establecido en la norma ANSI / ASA y según la OMS el confort acústico será de mejor calidad.

- Este estudio destaca la necesidad de incorporar el confort acústico como uno de los indicadores del diseño arquitectónico.
- Con solo los calificadores tradicionales no se tiene una situación actual completa, los calificadores propuestos deben ser utilizados adicionalmente, para tener una mejor caracterización del recinto y obtener nuevos conocimientos.

- El análisis crítico y la manera de entender los problemas arquitectónicos y acústicos que se aplicaron en este caso de estudio, fueron una manera novedosa de abordar las condiciones en las que se encuentra recintos como las aulas en cuestión, lo que constituye un aporte.
- La discusión de estos temas no se ha llevado a cabo, en ningún foro.
- Resalta la importancia de difundir el conocimiento, en favor del confort acústico de los usuarios de este tipo de recintos.

7 – Conclusiones

El objetivo de la arquitectura es encontrar la mejor manera de distribuir el espacio para que las personas se sientan bien en él. Uno de los puntos que se enfatiza en esta investigación, es que la arquitectura debe tener entre sus objetivos, diseñar espacios confortables que ofrezcan protección contra la contaminación por ruido urbano. La Acústica Arquitectónica nos ayuda a comprender los requerimientos necesarios para poder llegar a un confort acústico. Para ello se requiere la realización de amplios estudios sobre materiales que ofrezcan suficiente aislamiento sonoro, diseñar instalaciones silenciosas, emplear métodos de valoración perceptual y otras estrategias. El reto consiste en diseñar y construir espacios que permitan a sus habitantes alcanzar niveles aceptables de salud; donde salud significa no sólo ausencia de enfermedades, sino un estado completo de bienestar físico, mental y social.

Para entender un poco más todo lo relacionado al confort acústico, se realizaron pruebas de aislamiento acústico en laboratorio y campo. Además, se realizaron mediciones de confort acústico en campo, al evaluar el Edificio “B” de la Unidad de Posgrado de la UNAM, donde se encontró que el diseño arquitectónico utilizado en su construcción no parece haber contemplado el problema de ruido y su efecto en los usuarios. Por lo tanto, los salones de clase de esta edificación no brindan las condiciones apropiadas para cumplir con el objetivo de estos recintos, que es facilitar la comunicación oral entre profesores y alumnos necesaria para la adecuada transmisión del conocimiento. En esta investigación queda evidenciado que con el uso de programas especializados como Predictor-LimA, se pueden proponer soluciones a problemas de ruido urbano, como el que presenta el edificio “B” de la Unidad de Posgrado de la UNAM.

El presente trabajo de tesis muestra que la tarea de diseñar y construir espacios que brinden protección contra la contaminación acústica es un problema complejo. En la UNAM existen las condiciones, instalaciones, equipo, experiencia e

información para desarrollar una estrategia de investigación que permita enfrentar el problema de forma adecuada y pertinente; por lo que se recomienda una agenda de trabajo coordinada e integrada por diversas dependencias universitarias.

Los resultados de los tres casos estudiados muestran que la función acústica de todo espacio construido es factible de ser evaluada mediante índices o indicadores acústicos específicos. Por esta razón, el desarrollo de nuevos y la aplicación de otros índices de desempeño acústico es un tema de investigación vigente. Además, me permitió entender las por las que las pruebas de aislamiento acústico a elementos de construcción en condiciones controladas difieren con los resultados de las pruebas de aislamiento acústico obtenidos en campo, por lo que es recomendable realizar pruebas comparativas para identificar claramente las causas de esas diferencias.

Consideraciones y recomendaciones para trabajos futuros: debemos saber qué tipo de edificio se va a construir y su uso final, la ubicación del predio donde se va a construir de acuerdo a la zona urbana, distancia del edificio a la(s) posibles fuente(s) de ruido, a qué tipo estará expuesto el edificio, con qué materiales se va a construir, qué normas acústicas nacionales e internacionales se deben aplicar, que el equipo acústico con que contamos esté certificado y correctamente calibrado, qué asesores en Acústica Arquitectónica nos apoya y cuál es el confort acústico que se debe tener como parte de los objetivos de la obra.

Este trabajo, es el resultado de una investigación cuya finalidad busca resaltar la capacidad de investigación para abordar problemas como los casos de estudio expuestos, un planteamiento teórico y metodológico nunca trabajado, así como ofrecer una aportación original y sustantiva al acervo de conocimientos relativos a la Arquitectura y a la Acústica Arquitectónica. En el ámbito de la academia y de la investigación, poder colaborar en proyectos de estudio, de laboratorio y en campo, a nivel nacional e internacional, profundizar en el análisis de normas, para ofrecer propuestas que las mejoren.

En la realización de este trabajo de tesis, participaron: el Posgrado de Arquitectura de la UNAM, el Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM, por lo que se tiene la oportunidad de oportunidad para generar investigaciones en las que pueden participar especialistas de varias disciplinas del conocimiento humano, con el fin de generar nuevas líneas de investigación, que ayuden a un bien común.

Glosario

Acústica

La Acústica es la rama de la física que estudia el sonido. Aunque la teoría fundamental de la Acústica trata de las vibraciones y de la propagación de las ondas, podemos considerar el tema como una ciencia multidisciplinaria.

Disponible en: https://www.arauacustica.com/files/noticias/pdf_esp_126.pdf

Acústica arquitectónica

Dentro de la Acústica se encuentra la Acústica Arquitectónica, que estudia la propagación del sonido, el nivel de presión sonora, el aislamiento acústico, la absorción del sonido, así como las condiciones para que una sala brinde confort acústico a los humanos.

Fuente: Definición propuesta por el autor ABK.

Aislamiento sonoro o acústico

Página 40

Aislamiento acústico global de fachada

Método preferido para estimar el global aislamiento acústico de una fachada expuesta a la carretera el tránsito vehicular como fuente de sonido.

Fuente: ISO 16283-3: 2016-02-01, pág. 2

Es el Aislamiento sonoro global aéreo de una fachada. Se obtiene calculando la diferencia de nivel estandarizada, para la fachada expuesta a ruido de vehículos ($D_{tr,2m,nT,w}$), en dBA.

Amplitud

En Acústica la amplitud es la cantidad de presión sonora que ejerce la vibración en el medio elástico (aire). Al mismo tiempo, la amplitud determina la cantidad de energía (potencia acústica) que contiene una señal sonora.

Disponible en: https://www.arauacustica.com/files/noticias/pdf_esp_126.pdf

Barrido exponencial e-sweep

Los estímulos de barrido son más resistentes frente a variaciones de tiempo y no linealidades. El e-sweep tiene la ventaja adicional de que las distorsiones causadas por estos efectos pueden separarse fácilmente de la respuesta de impulso propiamente dicha. El lin-sweep tiene un espectro blanco, mientras que el e-sweep tiene un espectro rosa. Cuando se utilizan estímulos de barrido de más de 20 s, el programa DIRAC ya no reproduce una secuencia inicial para construir el campo de sonido.

Fuente: Programa Dirac v6.0

Confort Acústico

El confort acústico es el nivel de ruido que se encuentra por debajo de los niveles legales que potencialmente causan daños a la salud, y que además ha de ser aceptado como confortable por los usuarios. Es el nivel sonoro que no molesta, que no perturba y que no causa daño directo a la salud.

Instituto de Seguridad Laboral. Gobierno de Chile.

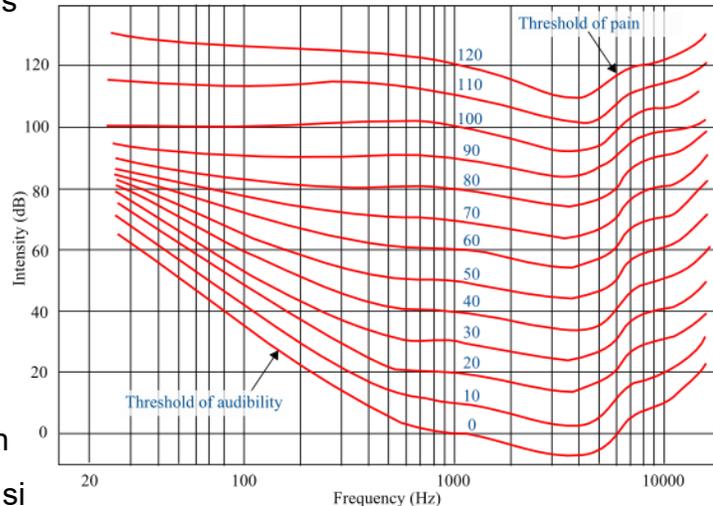
Disponible en: https://ergoedia.isl.gob.cl/app_ergo/Factores_Ambientales_Ruido.pdf

Curvas Isofónicas o de igual sonoridad de Fletcher-Munson

Estas curvas calculan la relación existente entre la frecuencia y la intensidad en decibeles, de dos sonidos para que éstos sean percibidos como de igual de intensos por el oído, con lo que todos los puntos sobre una misma curva isofónica tienen la misma intensidad. Así, si 0 Fon corresponde a una sonoridad de con una

intensidad de 0 dB con una frecuencia de 1000 Hz, también una sonoridad de 0 Fon podría corresponder a una sonoridad con una intensidad de 40 dB con una frecuencia de 90 Hertz.

En estas curvas isofónicas se observa cómo, a medida que aumenta la intensidad sonora, las curvas se hacen cada vez más planas. Esto se traduce en que la dependencia de la frecuencia es menor a medida que aumenta el nivel de presión sonora, lo que significa, que si disminuye la intensidad sonora los últimos sonidos perceptibles



Curvas de igual sonoridad de Fletcher – Munson.

en desaparecer serían los agudos. Las curvas de Fletcher - Munson fueron recalculadas, más tarde, por Robinson - Dadson.

Las curvas Fletcher - Munson y las curvas de Robinson - Dadson sólo son válidas para un campo sonoro directo, dado que no tienen en cuenta que no percibimos por igual los sonidos si provienen de diferentes direcciones (campo sonoro difuso). Las curvas isofónicas también son curvas que relaciona como escucha el oído lo bien y lo mal en función de la presión y de la frecuencia.

- la curva de Ponderación A, corresponde a la curva de nivel de sonoridad de 40 fon, medidas en decibeles A – dB_A .
- La curva de Ponderación B, curva de nivel de sonoridad de 70 fon, medidas en decibeles B – dB_B .
- La curva de Ponderación C, curva de nivel de sonoridad de 100 fon, medidas en decibeles C - dB_C .

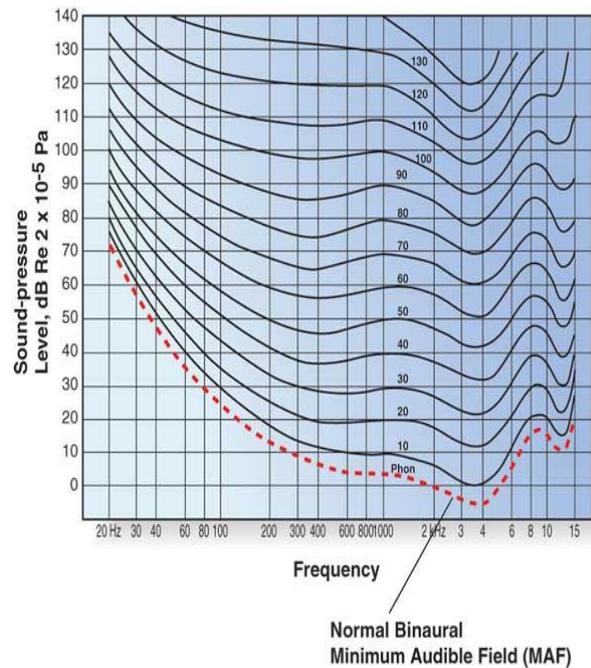
Disponible en: <https://studylib.es/doc/6634859/redes-de-ponderaci%C3%B3n-ac%C3%A1stica>

Curvas Isofónicas o de igual sonoridad Robinson-Dadson

En 1956, D.W. Robinson y R.S. Dadson redefinieron este trabajo. Los contornos de intensidad sonora son los más utilizados hoy en día, pero a menudo se refieren como las curvas de Fletcher-Munson. Eventualmente, la Organización de Normalización Internacional adoptó las curvas de Robinson-Dadson como base para los "Curvas de igual sonoridad", ISO 226: 2003, que ahora es el estándar actual. Dado que estas curvas describen la percepción de sólo tonos puros en un campo libre, no necesariamente se aplican al análisis de bandas de ruido o al ruido aleatorio difundido.

Si invertimos cualquiera de estas curvas de contorno en un nivel de intensidad particular, ahora tenemos el diagrama de respuesta en frecuencia relativa del oído humano para todos los tonos a través de la gama de frecuencias en ese contorno en particular. La inversión de las curvas inferiores ilustra las deficiencias de la respuesta de frecuencia del oído humano a intensidades sonoras bajas. Por el contrario, invierta cualquiera de las curvas superiores, de mayor intensidad para realizar una respuesta de frecuencia más aplanada. Fletcher-Munson

encontraron que la respuesta auditiva humana era consistentemente deficiente a intensidades sonoras bajas, tanto para las frecuencias bajas como para las frecuencias más altas en comparación con el punto de referencia de 1 000 Hertz utilizado para establecer estas curvas. Sin embargo, el oído es particularmente sensible en el rango de aproximadamente 300 a 6 000 Hz. Esto pasa a ser el rango de frecuencia que incluye el sonido de la mayoría de los patrones de habla humana y, curiosamente, el tono de un bebé llorando. Para los niveles medios de presión de



Contornos de igual sonoridad imagen de Robinson-Dadson.

sonido de fondo, la respuesta de rolado a presiones de sonido más bajas nos permite escuchar y entender más fácilmente el habla humana en presencia de ruido de baja o alta frecuencia.

Disponible en: http://www.extron.com/company/article.aspx?id=loudnesscontrol_ts&version=print

Decibel

El decibel es una unidad que se utiliza para medir la intensidad del sonido y otras magnitudes físicas. Un decibel es la décima parte de un Bell (B), unidad que recibe su nombre por Graham Bell, el inventor del teléfono.

$$W_{dB} = 10\log_{10}(W/W_{ref})$$

Disponible en: https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/es/perdida-audicion-reproductores-musica-mp3/glosario/def/decibelio.htm

Definición 50 (D50)

Es la relación de energía del sonido directo y reflejado en los primeros 50 milisegundos y la energía del sonido total.

ISO 3382-1:2009

La razón que define a la definición 50 es:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

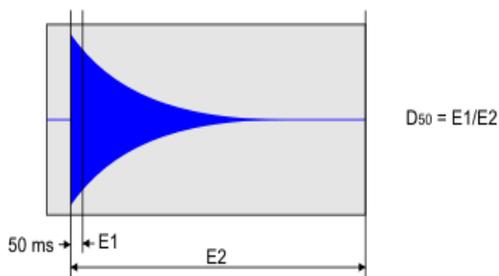


Figura del programa DIRAC v6.0

	D50 %
Excelente	0.86 a 1.0
Bien	0.67 a 0.86
Medio	0.39 a 0.67
Pobre	0.17 a 0.39
Malo	0.06 a 0.17

Definición D50, sus valores¹

¹ Fuente: Samuel Ansay and Paulo Henrique Trombetta Zannin "Using the Parameters of Definition, D% =, and Reverberation Time, RT, to Investigate the Acoustic Quality of Classrooms. Laboratory of Environmental and Industrial Acoustics and Acoustic Comfort, Federal University of Paraná-UFPR, Brazil, 6-Vol.44 No.4 (2016), Canadian Acoustics.

Detector de pico (peak)

Este tipo de parámetro sigue la señal mucho más rápido que las anteriores ponderaciones exponenciales, incluso que el impulsivo. Se aplica sobre los valores instantáneos de la señal, no RMS (root mean square), valor pico, valor pico-pico, y permite evaluar riesgos de daño en el oído humano ante un impulso de muy corto tiempo, pero muy intenso, $50 \mu\text{s}$. Estas medidas se suelen acompañar de la ponderación frecuencial C, decibeles con ponderación C para evaluar niveles de presión sonora dañinos en el puesto de trabajo.

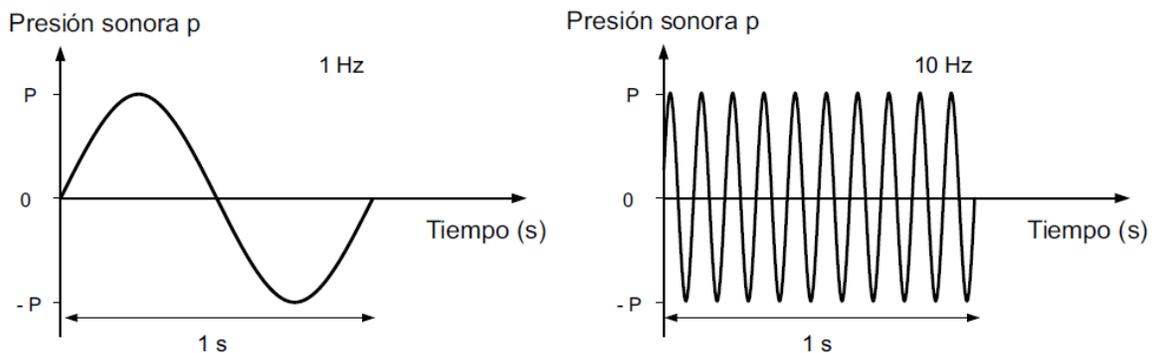
Fuente: Santiago. J. Pérez Ruíz. Comunicación personal, (2019)

Frecuencia del sonido (f)

El número de oscilaciones por segundo de la presión sonora (p) se denomina frecuencia (f) del sonido y se mide en hertz (Hz) o ciclos por segundo (c/s).

Lógicamente, la frecuencia del sonido coincide con la frecuencia de la vibración mecánica que lo ha generado (en el ejemplo anterior, la frecuencia de oscilación de la membrana del tambor).

En la figura 1.3 se observan dos ejemplos de presión sonora “ p ” asociada a oscilaciones de diferente frecuencia.



Ejemplos de oscilaciones de frecuencias 1 y 10 Hz.

Fuente: Antoni Carrión Isbert, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, pág. 28 (1998)

Hertz

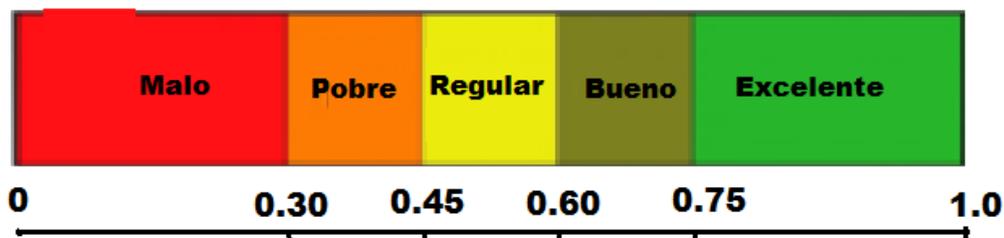
El Hertz (Hz) es la unidad que expresa la cantidad de vibraciones que emite una fuente sonora por unidad de tiempo (frecuencia). El oído humano puede percibir ondas sonoras de frecuencias entre los 16 y los 20.000 Hz. Las ondas que poseen una frecuencia inferior a los 16 Hz se denominan infrasónicas y las superiores a 20.000 Hz, ultrasónicas.

Disponible en: https://www.arauacustica.com/files/noticias/pdf_esp_126.pdf

Índice de transmisión del habla

Se considerado como el índice de referencia, que permite calificar el grado de inteligibilidad de la palabra, el cual se basa en el tiempo de reverberación y ruido de fondo.

Fuente: H. J. M. Steeneken, T. Houtgast, "A physical method for measuring speech- transmission quality"; Journal of the Acoustical Society of America, 67, 318–326, 1980.



Valores de índice de transmisión del habla y su correlación con la percepción de la transmisión del habla

Figura: obtenida del Programa DIRAC v6.0

Logaritmo

Es igual a una unidad de resumen o compresión.

Longitud de onda

Longitud de onda, unos de las primeras fuentes de sonido musicales fueron hechas usando cuerdas estiradas. Cuando la cuerda es jalada vibra hacia adelante y atrás, el desplazamiento inicial viaja a lo largo de la cuerda a una velocidad dada. El tiempo requerido para el desplazamiento por los dos viajes de la longitud de la cuerda es:

$$T = \frac{2L}{c}$$

Donde:

T = Periodo tiempo (s)

L = Longitud de la cuerda (m)

C = Velocidad de la onda (m/s)

Como el desplazamiento de la cuerda refleja desde la terminación, se repite el movimiento cada dos longitudes. La distancia sobre la cual se repite el movimiento es la *longitud de onda*, y está dada en el símbolo griego lamda, λ , para la frecuencia fundamental en una cuerda es $2 L$. Esto nos lleva a la relación general entre la longitud de onda y la frecuencia.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Donde:

λ = longitud de onda (m)

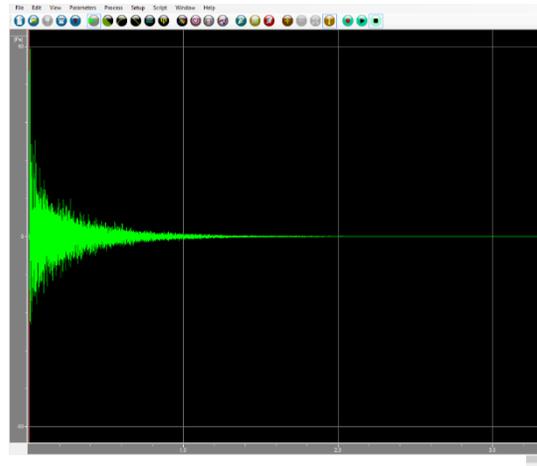
c = velocidad de propagación de la onda

f = frecuencia (Hz)

Fuente: Marshal Long, Architectural acoustics, pág.38

Método integrado de respuesta al impulso

Teóricamente, la respuesta de impulso integrada corresponde al promedio de un número infinito de excitaciones de ruido interrumpidas. Para la evaluación práctica de la incertidumbre de medición utilizando el método de respuesta de impulso integrado, se puede considerar que es del mismo orden de magnitud que utilizando un promedio de $n = 10$ mediciones en cada posición con el método de ruido interrumpido. No es necesario un promedio adicional para aumentar la precisión de la medición estadística para cada posición



Respuesta impulsiva típica de un barrido exponencial, (Figura: obtenida del programa DIRAC v6.0)

Fuente: ISO 3382-1:2009 Acoustics — Measurement of room Acoustic parameters — 7.2 Integrated impulse response method.

Nivel de intensidad sonora

Se denomina intensidad sonora (I) a la cantidad de energía por unidad de tiempo (potencia) acústica transferida por una onda sonora por unidad de área (A) perpendicular a la dirección de propagación. Es el flujo de energía a través de una unidad de superficie, se mide en Watts por metro cuadrado

L_I , se define análogamente como:

$$L_I = 10 \log \left(\frac{\bar{I}}{\bar{I}_0} \right) dB \quad w/m^2$$

Donde I es la intensidad sonora que se mide e \bar{I}_0 es la intensidad acústica de referencia $\bar{I}_0 = 10^{-12} w/m^2$. L_I se mide en decibeles y su valor coincide, por aplicación de la media temporal de la intensidad acústica \bar{I} :

$$\bar{I} = \frac{p^2}{\rho c}$$

El valor de la intensidad acústica umbral de referencia \bar{I}_0 , se calcula a partir de la expresión sonora de referencia \bar{p}_0 por aplicación de la expresión anterior,

sabiendo que la impedancia característica del aire ρc es igual aproximadamente a 410 Rayls. Así:

$$\bar{I}_0 = \frac{\bar{p}_0^2}{\rho c} = \frac{(20 \times 10^{-6})^2}{410} = 10^{-12} \text{ vatios/m}^2$$

Relaciones entre L_w y L_p en su dependencia con el área de transmisión o de radiación

a) Campo sonoro radiado por una superficie.

La energía emitida por una fuente sonora, con una potencia W , que atraviesa una superficie de área S , que tiene un coeficiente de transmisión sonora τ , que vale 1, lo que implica que la superficie S no ofrece ningún impedimento al paso del sonido, y que cuando $W_T = \tau W$. Esto significa que la superficie divisora, observada desde su exterior, ejerce o no un impedimento al paso del sonido que equivale a suponer que la potencia emitida por la fuente sonora se ha reducido mediante una fracción τ .

Por lo tanto, el nivel de potencia sonora transmitido o radiado será:

$$L_W = 10 \log \frac{\tau W}{W_0} = 10 \log \frac{\tau S}{W_0} = 10 \log \frac{\bar{I}}{\bar{I}_0} \frac{\bar{I}_0}{W_0} \tau S;$$

Como $\bar{I}_0 = W_0 = 10^{-12}$ y por aplicación de la expresión de nivel de presión sonora o L_p ; sabiendo que $L_I = L_P$, se deduce:

$$L_W = L_P + 10 \log S + 10 \log \tau$$

o bien:

$$L_W = L_P + 10 \log S - R$$

Donde $R = 10 \log 1/\tau$ que denomina el aislamiento acústico de la superficie S .

A partir de la expresión anterior se observa fácilmente que el nivel de presión sonora depende del nivel de potencia sonora de la fuente, del área de transmisión,

por donde atraviesa la energía sonora y de la resistencia que produce el paso del sonido, debido a la capacidad de aislamiento de dicha superficie.

Fuente: Arau, Higini. ABC DE LA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA, ediciones CEAC (1999, P.51).

Niveles de ponderación

Son escalas para estudio del sonido que se han establecido para diferentes aplicaciones, es importante señalar que el NPS para la frecuencia de 1,000 Hz queda inalterado en las escalas A, B, C y D, por lo tanto, se puede considerar de referencia.

Disponible en: <https://medidordedecibelios.com/ponderaciones-de-frecuencia/>

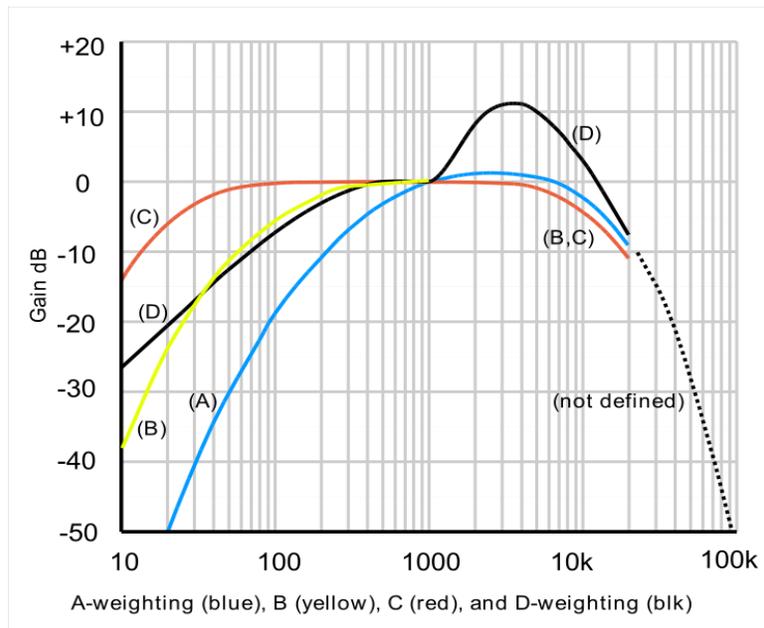


Gráfico de ponderaciones A, B, C y D

Nivel de potencia sonora

El nivel de potencia sonora que emite una fuente determina, “cuanto sonido produce”, para una condición de funcionamiento de un emisor. Se designa con L_w , unidad decibel (dB). Donde W es la potencia acústica de la fuente sonora y W_0 corresponde a una potencia acústica de referencia, que vale a $W_0=10^{-12}$ watts.

Fuente: Arau, Higini. ABC DE LA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA, ediciones CEAC (1999, p.64).

Nivel de presión sonora equivalente L_{eq}

Este índice expresa la media de la energía sonora percibida por un individuo en un intervalo de tiempo, es decir, representa el nivel de presión que habría sido producido por una combinación de eventos de ruido. La suma de la energía total durante un periodo de tiempo da como resultado un nivel equivalente a la energía promedio en ese periodo llamado "nivel sonoro equivalente – $L_{eq, T}$ ". Cuando un ruido es fluctuante, o varía con el tiempo de forma indeterminada, aparece como una medición de interés primordial, el nivel de presión sonora equivalente L_{eq} , se define como el nivel de presión sonora promedio de los niveles determinados durante un lapso de medición, equivalente a calcular un nivel producido durante el tiempo de medición y que se calcula mediante la siguiente fórmula.

Fuente: Arau, Higini. ABC DE LA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA, ediciones CEAC (1999, p.65).

$$L_{eq} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^N (f_i)(10^{L_i/10}) \right], (dB)$$

Donde:

N = es el número de intervalos

f_i = la fracción de tiempo transcurrido en el intervalo i .

L_i = el nivel de presión sonora del intervalo i .

De forma general si el nivel de presión sonora L_i es una función continua al respecto al tiempo t , entonces la ecuación se convierte:

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{t} \int_0^t 10^{L_i/10} dt \right], (dB)$$

Nivel de presión sonora equivalente LA_{eq}

Sí durante la medición se toman los valores del nivel de presión sonora corregidos en curva de ponderación, entonces los resultados determinados por las fórmulas anteriores se expresarán en dB(A), lo que equivale a escribir la siguiente expresión:

Fuente: Arau, Higini. ABC DE LA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA, ediciones CEAC (1999, pág. 51).

$$L_{Aeq} = 10 \log \left[\frac{1}{t} \int_0^t \left(\frac{\overline{P_A}(t)}{\overline{p_o}} \right) dt \right], \quad dB(A)$$

Donde:

T= el tiempo de medición

$\overline{P_A}(t)$ = la presión acústica ponderada A.

$\overline{p_o}$ = presión de referencia 20×10^{-6} Pa

Nivel de Presión Sonora

Nivel de Presión Sonora o L_p está medida en decibeles (dB), modifica las medidas de la presión sonora trasladándola a una escala más manejable, así tenemos que 70 decibeles, que corresponden aproximadamente al nivel de presión sonora de la voz del hombre en una conversación normal, equivalen a una presión sonora eficaz de 0.06325 N/m^2 .

$$\text{Presión Acústica} \quad P = \frac{\text{fuerza}}{\text{Superficie}} = \frac{\text{Newton}}{\text{m}^2} = \text{Pascal}$$

$$P_{\text{Umbral}} = 20 \times 10^{-6} \text{ Pascal}$$

$$P_{\text{Límite}} = 200 \text{ Pascal}$$

Nivel de presión sonora constituye la manera más habitual de expresar la magnitud de un campo sonoro. La unidad de medida es el Newton/ metro² (N/m^2) o Pascal (Pa). En principio el valor a considerar es la diferencia entre el valor fluctuante de la presión sonora total P_T y su valor en equilibrio P_0 . Debido a la variación de dicha magnitud con el tiempo, se utiliza como valor representativo su promedio temporal, que recibe el nombre de valor eficaz o r.m.s. (“root-mean-square”).

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int p(t)^2 dt}$$

Ahora bien, la utilización de dicho valor eficaz da lugar a una serie de problemas cuyo origen se halla en el comportamiento del oído humano y que a continuación se exponen:

- La gama de presiones a las que responde el oído, desde el valor de umbral de audición hasta el que causa dolor, es muy amplio, por lo que el Nivel de Presión Sonora, más débil que puede ser detectada por una persona a la frecuencia de 1 000 Hertz (1kHz) es de 20×10^{-6} Pa, mientras que el umbral del dolor tiene lugar para una presión eficaz del orden de 100 Pa (milésima parte de la presión atmosférica estática $P_0 \approx 10^5$ Pa, equivalente a 1 atmósfera).

$$L_p = 10 \log \left(\frac{\bar{p}}{\bar{p}_0} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{\bar{p}}{\bar{p}_0} \right)$$

En donde: \bar{p} es la relación logarítmica de la presión sonora eficaz, \bar{p}_0 es la presión acústica es el valor umbral mínimo detectable auditivamente por un auditor adulto. Este valor se ha deducido por medio de estadísticas con pruebas sobre una muestra de población suficientemente grande.

- Nuestro sistema auditivo no responde linealmente a los estímulos que recibe, sino que más bien lo hace de forma logarítmica. Por ejemplo, si el nivel de presión que se escucha es producido por un emisor y corresponde a un valor en dB, ahora colocamos un segundo emisor, la energía será el doble, pero el nivel de presión tendrá un incremento de tan solo 3.16 decibeles, los oyentes sentirán un aumento en el nivel. Si colocamos 10 emisores, la energía será de 10 veces más, pero el aumento de nivel de presión será de 10 decibeles, y los escuchas sentirán que el emisor aumento al doble el nivel de presión sonora.

La utilización del umbral de audición como referencia tiene como objetivo que todos los sonidos audibles sean representados por valores niveles de presión sonora. El uso de decibeles reduce la dinámica de presiones sonoras a niveles de presión sonora de 0 a 140 decibeles, donde 0 decibeles representa una presión igual al umbral de audición (no significa, la ausencia del sonido), y 140 decibeles el umbral aproximado del dolor, de esta manera, las cifras manejadas son mucho más simples. Se dan las siguientes relaciones entre cambios de nivel de presión sonora y su efecto subjetivo:

- 1 decibel: mínimo cambio de nivel sonoro poco perceptible.
- 5 decibeles: cambio de nivel claramente percibido
- 10 decibeles: incremento asociado a una doble sonoridad.

Fuente: Antoni Carrión Isbert, libro Diseño acústico de espacios arquitectónicos, (2001, pág. 34).

Ponderación A

Es un método para ajustar las mediciones de tal manera que coincidan con el umbral de sensibilidad del oído humano, en sus diferentes frecuencias. Se emplea para medir relaciones señal – ruido en curvas de medición de aislamiento acústico. Una medida ponderada A representa él como oíría el oído humano. Sí se utiliza un filtro de ponderación A, este valor se expresa como L_A y se define como “*la medición del nivel sonoro continuo equivalente mediante la red de filtrado de la ponderación A*”.

La ponderación A corresponde con el inverso de la curva isofónica de 40 fonos. Se utiliza para determinar el grado de molestia subjetiva que produce un ruido. La siguiente tabla muestra los valores que hay que añadirle a una medida realizada en dB, para obtener el correspondiente valor en decibeles con ponderación A. Se aproxima a la curva de audición de baja sensibilidad. Esta ponderación penaliza mucho las frecuencias bajas y en menor medida las frecuencias altas.

El valor de ponderación “A” en decibeles como función de la frecuencia, es decir, lo que se tiene que restar o sumar a los dB Nivel de presión sonora en cada frecuencia, viene determinado por:

Fuente: Casado, M. (s/f) Redes de ponderación acústica.

Disponible en: https://www.academia.edu/34849204/Redes_de_Ponderaci%C3%B3n_Ac%C3%BAstica

$$W_A = 10 \log \left[\frac{1.562339f^4}{(f^2 + 107.65265^2)(f^2 + 737.86223^2)} \right] + 10 \log \left[\frac{2.242881 \times 10^{16} f^4}{(f^2 + 20.598997^2)^2 (f^2 + 12194.22^2)^2} \right]$$

Donde f es la frecuencia central en Hertz y W_A es la ponderación para aplicar en esa frecuencia.

Filtrado en tercios de octava de la ponderación A									
Frecuencia en Hertz (F HZ)	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63
Pond. A	-70.4	-63.6	-56.4	-50.4	-44.8	-39.5	-34.5	-30.3	-26.2
F en Hertz	80	100	125	160	200	250	315	400	500
Pond. A	-22.4	-19.1	-16.2	-13.2	-10.8	-8.7	-6.6	-4.8	-3.2
F en Hertz	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
Pond. A	-1.9	-0.8	0.0	0.6	1.0	1.2	1.3	1.2	1.0
F en Hertz	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000		
Pond. A	0.6	-0.1	-1.1	-2.5	-4.3	-6.7	-9.3		

Ponderación B

- *Ponderación B*: Sigue aproximadamente el inverso de la curva de 70 fonos, se aproxima a la curva de audición de media sensibilidad. Esto es debido a que el oído humano es bastante sordo para frecuencias bajas y necesita un nivel de presión sonora mayor en comparación con las frecuencias altas. Se está dejando en desuso por la generalización de uso de la ponderación A.

$$W_B = 10 \log \left[\frac{1.025119 * f^2}{(f^2 + 158.48932^2)} \right] + 10 \log \left[\frac{2.242881x10^{16} * f^4}{(f^2 + 20.598997^2)^2(f^2 + 12194.22^2)^2} \right]$$

Donde f es la frecuencia central en Hertz y W_B es la ponderación para aplicar en esa frecuencia.

Fuente: Casado, M. (s/f) Redes de ponderación acústica.

Disponible en: https://www.academia.edu/34849204/Redes_de_Ponderaci%C3%B3n_Ac%C3%BAstica

Ponderación C

Un método de ajustar las mediciones para que coincidan con el límite de sensibilidad del oído humano, en sus diferentes frecuencias. Se ajusta al inverso de

la curva de 100 fonos. Utilizada en la ponderación de niveles de pico. Se aproxima a la curva de audición de alta sensibilidad. El valor de ponderación “C” en decibeles como función de la frecuencia, es decir, lo que se tiene que restar o sumar a los decibeles e en cada frecuencia, viene determinado por:

$$W_c = 10 \log \left[\frac{2.242881 \times 10^{16} * f^4}{(f^2 + 20.5989972)^2 (f^2 + 12194.222)^2} \right]$$

Donde f es la frecuencia central en Hz y W_c es la ponderación para aplicar en esa frecuencia.

Fuente: Casado, M. (s/f) Redes de ponderación acústica.

Disponible en: https://www.academia.edu/34849204/Redes_de_Ponderaci%C3%B3n_Ac%C3%BAstica

Filtrado en tercios de octava de la ponderación C							
Frecuencia en Hertz (F HZ)	10	12.5	16	20	25	31.5	40
Pond. C	-14.3	-11,3	-8.4	-6.2	-4.4	-3.0	-2.0
F(Hz)	80	100	125	160	200	250	315
Pond. C	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.0	0.0
F(Hz)	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
Pond. C	0.0	0.0	0.0	0.0	-0,1	-0.2	-0.3
F(Hz)	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000
Pond. C	-1.3	-2.0	-3.0	-4.4	-6.2	-8.6	-11.3

Ponderación D

Es la curva de ponderación utilizada para determinar el impacto del ruido para niveles muy altos (aviones, en el rango frecuencial de 1 a 10,250 Hz. En baja frecuencia guarda cierta similitud a la curva ponderación B.

Fuente: Casado, M. (s/f) Redes de ponderación acústica.

Disponible en: https://www.academia.edu/34849204/Redes_de_Ponderaci%C3%B3n_Ac%C3%BAstica

Ponderación Z o lineal o sin ponderar

La ponderación Z surgió para normalizar la ponderación lineal o plana de los sonómetros, ya que cada fabricante ponía sus propios cortes de nivel en altas y

bajas frecuencias. Se introdujo en la norma estándar internacional IEC 61672:2003. Los equipos de medición de sonido suelen incluir una red de respuesta lineal – plana -opción lineal o Z - que permite la posibilidad de dejar pasar la señal sin modificación o sea sin filtro.

Fuente: Casado, M. (s/f) Redes de ponderación acústica.

Disponible en: https://www.academia.edu/34849204/Redes_de_Ponderaci%C3%B3n_Ac%C3%BAstica

Sí un nivel de presión sonora de 100 decibeles (Z), en bandas de octava, para convertirlo a ponderación A o C se deberá tomar en cuenta el valor de ponderación “A” y valor de ponderación “C”.

ESPECTROS	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	Global
Espectro sin ponderar o Z	100	100	100	100	100	100	100	100	100	109.5
Espectro ponderado A	73.8	80.9	91.3	96.8	100	101.2	101.0	98.9	93.3	107.2
Espectro ponderado C	99.2	99.8	100	100	100	99.8	99.2	97.0	91.4	108.6

Porcentaje de pérdida de articulación de consonantes

Índica el porcentaje de consonantes que se pierden al escuchar, sus valores van de 0% (excelente) a 100% (malo), entre menos consonantes se pierdan mejor será la inteligibilidad, debido a que las consonantes son las que proveen la comprensión del mensaje oral. Hasta hace poco la evaluación del porcentaje de pérdida de articulación de consonantes únicamente era posible mediante un procedimiento psicoacústico; pero se ha encontrado una ecuación empírica relacionado con el índice de transmisión del habla, esta ecuación se denomina de “Farell Becker” Fuente: Application Note, Measuring Speech Intelligibility Using DIRAC 7841. Bruel & Kjaer, 2015.

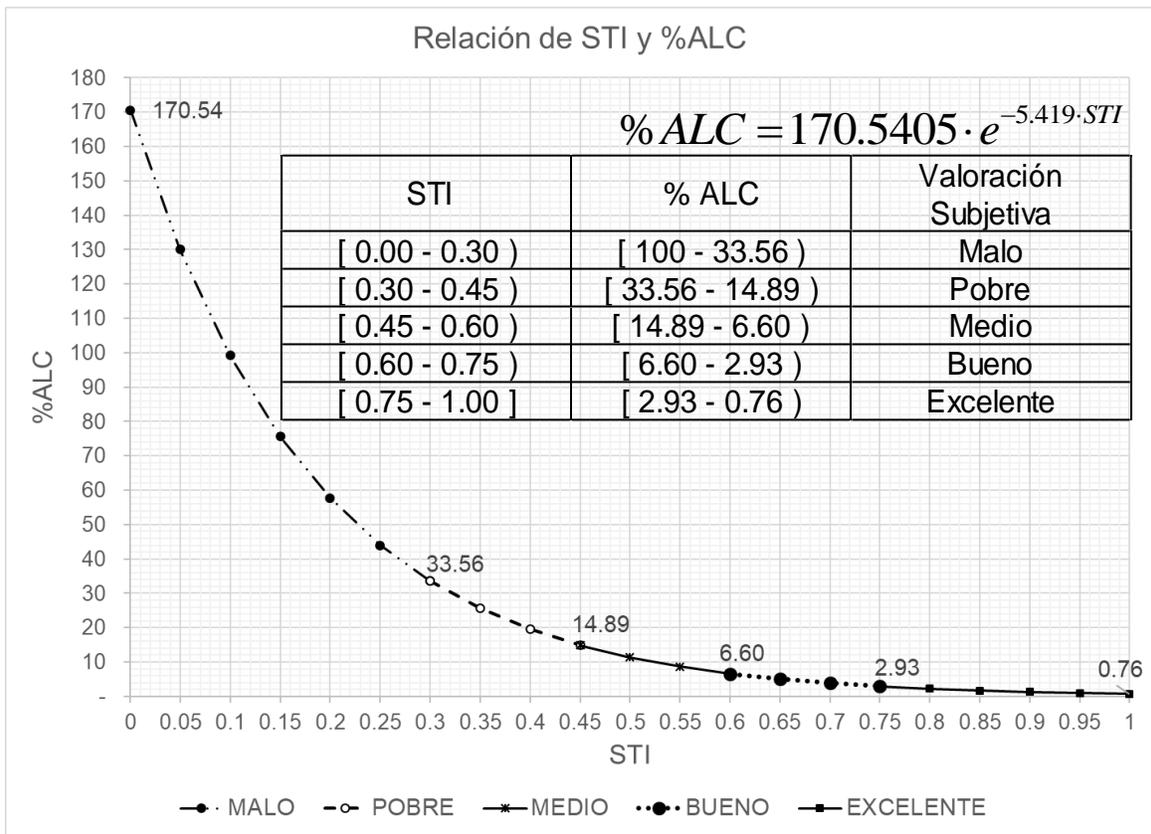


Figura 35 - Relación gráfica entre índice de transmisión del habla y porcentaje de pérdida de articulación de consonantes, percepción en la transmisión del habla

Figura del autor ABK.

Rango Audible

Niveles Sonoros y Respuesta Humana		
Sonidos característicos	Nivel de presión sonora [decibeles]	Efecto
Zona de lanzamiento de cohetes (sin protección auditiva)	180	Pérdida auditiva irreversible
Operación en pista de jets Sirena antiaérea	140	Dolorosamente fuerte
Trueno	130	
Despegue de jets (60 m) Bocina de auto (1 m)	120	Máximo esfuerzo vocal
Martillo neumático Concierto de Rock	110	Extremadamente fuerte
Camión recolector Petardos	100	Muy fuerte
Camión pesado (15 m) Tránsito urbano	90	Muy molesto Daño auditivo (8 Hrs)

Reloj despertador (0,5 m) Secador de cabello	80	Molesto
Restaurante ruidoso Tránsito por autopista Oficina de negocios	70	Difícil uso del teléfono
Aire acondicionado Conversación normal	60	Intrusivo
Tránsito de vehículos livianos (30 m)	50	Silencioso
Living Dormitorio Oficina tranquila	40	
Biblioteca Susurro a 5 m	30	Muy silencioso
Estudio de radiodifusión	20	
	10	Apenas audible
	0	Umbral auditivo

Niveles de presión sonora correspondientes a sonidos y ruidos típicos y valoración subjetiva asociada.

Fuente: Centro de información sobre contaminación por ruido

Disponible en: <https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/soundlev.htm>

Rango dinámico

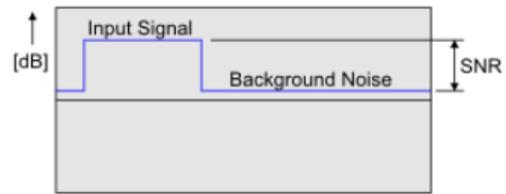
Se llama así a la diferencia en dB entre el sonido más débil y el más fuerte. Por Ej. Los sonidos más débiles en una orquesta, un pianísimo (ppp) es de aproximadamente 30 dB de nivel de presión sonora y los sonidos más fuertes, fortísimo (fff) de unos 110 decibeles de nivel de presión sonora, por lo que el rango dinámico será de 80 decibeles de presión sonora, es la diferencia entre ellos.

Fuente: Santiago Jesús Pérez Ruíz. Comunicación personal. Fecha (2018).

Relación señal / ruido

La relación señal / ruido se define como la relación logarítmica del nivel de señal y el nivel de ruido. La relación señal / ruido es un parámetro de calidad de medición general, relacionado con la señal de entrada en lugar de las respuestas de impulso.

Fuente: Programa Dirac v6.0



Relación señal-ruido, (Figura del programa DIRAC).

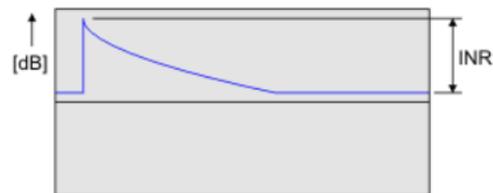
Para obtener la relación señal / ruido correcto a partir de una respuesta de impulso, el ruido debido al sistema de medición y debido a cambios acústicos del sistema bajo prueba debe ser mucho menor que el ruido de fondo, y el valor prepromedio debe ser 1. Ejemplos de acústica, los cambios son personas caminando y movimientos de aire.

Respuesta al Impulso

También conocido como relación de ruido de impulso se define como la relación logarítmica del nivel máximo de respuesta al impulso y el nivel de ruido, y refleja el rango de decaimiento. Sirve

como un parámetro de calidad de medición general, relacionado con medición del sistema en lugar de la medición de la señal, y se calcula con cualquier tipo de receptor. De acuerdo con la ISO 3382, la relación de ruido de impulso deberá ser al menos 35 o 45 decibeles para la determinación precisa de T_{20} o T_{30} respectivamente. Con buenas mediciones, los valores de la relación de ruido de impulso más prácticos varían de 35 a 60 decibeles.

[Fuente: Programa Dirac v6.0](#)



Respuesta impulsiva. (Figura del programa Dirac v6.0)

Ruido

4.26 Ruido Todo sonido indeseable que moleste o perjudique a las personas.

4.11 Nivel de ruido Es el nivel sonoro causado por el ruido emitido por una fuente fija en su entorno.

[Fuente : NOM-081-SEMARNAT-1994](#)

Definido como un fenómeno físico, consiste en variaciones de la presión atmosférica que se transmiten con una determinada frecuencia y amplitud a través de un medio, en nuestro caso el aire, y que resultan perceptibles por el órgano auditivo. En términos prácticos el ruido es cuando un sonido es desagradable o molesto.

Fuente: Instituto nacional de seguridad y salud en el trabajo. Ministerio de trabajo y economía social. Gobierno de España.

Disponible en:

<https://www.insst.es/resultados-busqueda-textual?q=ruido#gsc.tab=0&gsc.q=ruido&gsc.page=1>

Ruido blanco

Tiene un espectro constante en toda la banda de frecuencias audible, y no es necesario que sea al azar o dependiente del tiempo. La amplitud de un ruido al azar es, como función del tiempo, una curva de distribución gaussiana. Un ruido al azar no tiene un espectro de frecuencia uniforme.

[Fuente: William W. Seto, Acústica. Achaum, Mcgraw-hill, pág.142 \(1970\).](#)

Ruido rosa

Contiene frecuencias audibles de entre 20 y 20, 000 Hz, es decir, se encuentra dentro de todo el campo audible del ser humano. Su densidad espectral decae tres decibeles por octava, también conforme aumenta la frecuencia.

<https://35mm.es/ruido-rosa/#caracteristicas-del-ruido-rosa>

Ruido de fondo

Se define como todo aquel ruido que se percibe en una sala cuando en la misma no se realiza ninguna actividad.

Es el ruido existente en el cuarto a estudiar, que no proviene de la fuente de estudio, este ruido puede provenir del exterior, por ejemplo, el tránsito vehicular, pasillos, aulas o habitaciones contiguas o del interior como el uso de ventiladores, aire acondicionado.

Fuente: I. A. Carrión, Diseño Acústico de espacios arquitectónicos, Barcelona: Universidad politécnica de Cataluña, 1998.

Disponible en:

<https://arqlemus.files.wordpress.com/2014/04/disec3b1o-acc3bastico-de-espacios-arquitectc3b3nicos.pdf>

Secuencias de longitud máxima

Secuencias de longitud máxima es una señal de ruido pseudoaleatorio con un espectro de magnitud perfectamente blanco. Es bastante sensible a las no linealidades y las variaciones de tiempo, pero por lo demás proporciona muy buena reproducibilidad. Duplicar la duración de la medición de secuencias de longitud máxima a menudo da como resultado el aumento máximo teórico del INR de 3 dB. Una ventaja de las secuencias de longitud máximas sobre e-sweep es que suena menos intrusivo o irritante.

[Fuente: Programa DIRAC, v6.0](#)

Selección de la respuesta temporal

La respuesta temporal se relaciona con la posibilidad de detectar eventos de corta duración y es la recomendable para ruido de tránsito vehicular.

- La repuesta “Lenta” (Slow) está indicada para ruidos que tengan una duración de más de 1 segundo.
- La respuesta “Rápida” “Fast” detecta ruidos que tengan una duración de 125 Ms.
- La respuesta “Impulso” “Peak” detecta ruidos que tengan una duración de 36 Ms.

La respuesta Impulse constante de tiempo muy pequeña; se emplea para estudiar la influencia de intensidades de corta duración sobre el oído humano.

Fuente: Santiago Jesús Pérez Ruiz. Comunicación personal, (2018).

Silencio

Desde las disciplinas de base tecno-acústica, en ningún momento se discute o se niega la pertinencia del concepto de silencio. Lo que la formalización Psicoacústica demuestra es que no existen situaciones de ausencia sonora total y que siempre es posible encontrar y medir algún sonido. No obstante, el silencio es perceptible, se escucha y se siente. Esta paradoja nos devuelve al problema de la definición de silencio, señalándonos lo inadecuado de describirlo solamente como “ausencia de sonido”; e indica, también, la pertinencia de la perspectiva filosófica que entiende el silencio como *la experiencia interna que experimentamos al percibir la ausencia de algo que esperábamos presente*.

De hecho, definir el silencio como resultado de percibir una clase de formas sonoras es el corolario de asumir la paradoja de que el silencio existe y, a la vez, que la ausencia sonora total no es posible.

Se puede afirmar que en estudio del silencio se aprecian dos dimensiones esenciales: a) La sensación de un cambio físico relevante en la estructura acústica; b) La percepción de ausencia asociada a este cambio.

Fuente: Rodríguez, A. (2021). ¿El silencio es un sonido?: Diez principios para una teoría expresiva del silencio. Journal of Sound, Silence, Image and Technology number 4. pp.8-25.

Disponible en: https://ddd.uab.cat/pub/artpub/2021/252027/jousousil_2021n4p8.pdf

Sonido

Es todo lo que oímos, es una onda mecánica que se propaga a través de la materia, en estado gaseoso, líquido o sólido. Es debido a cambios rápidos de presión generados por el movimiento vibratorio de un cuerpo sonoro. El sonido en

el aire se debe a fluctuaciones de la presión del aire con respecto a la presión atmosférica media, por lo tanto, en el vacío no se propaga el sonido. Fuente: Arau, H. (2015). La arquitectura del sonido y la envolvente de los espacios.

Disponible en: https://www.arauacustica.com/files/publicaciones/pdf_esp_59.pdf

El sonido es una sensación, en el órgano del oído, producida por el movimiento ondulatorio en un medio elástico, normalmente el aire. Es debido a rapidísimos cambios de presión, generados por el movimiento vibratorio de un cuerpo sonoro, que le llamaremos fuente sonora.

Una onda de sonido es una longitudinal. A medida que la energía del movimiento ondulatorio se propaga alejándose del centro de la perturbación, las moléculas de aire individuales que transmiten el sonido se mueven hacia adelante y hacia atrás, de forma paralela a la dirección del movimiento ondulatorio. Por tanto, una onda de sonido es una serie de compresiones y enrarecimientos sucesivos del aire. Cada molécula individual transmite la energía a las moléculas vecinas, pero una vez que pasa la onda de sonido, las moléculas permanecen más o menos en la misma posición. Prácticamente el sonido es todo lo que se percibe a través del oído.

Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/3274752/>

Tiempo de decaimiento temprano

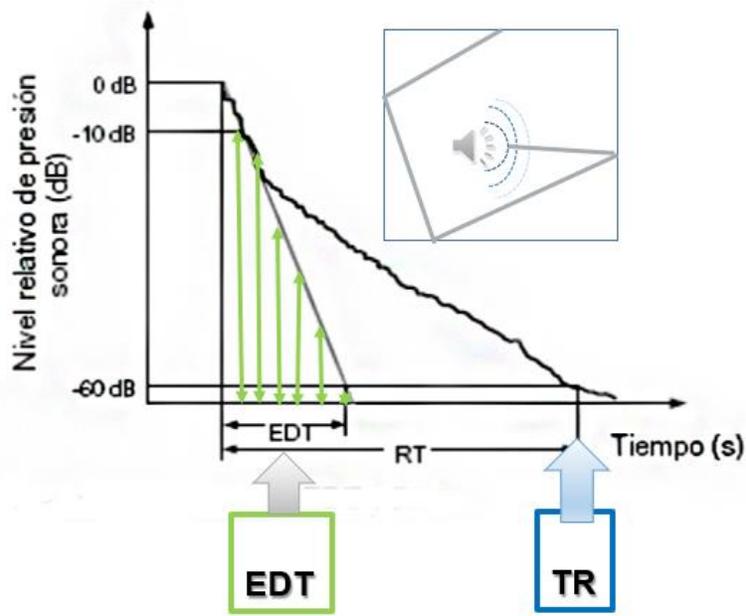
Se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de radiar hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB. Mide la reverberación percibida de manera subjetiva, determina el grado de “viveza” de un recinto.

Fuente: Libro de Antoni Carrión Isbert. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions UPC, Alfaomega. (2001, pág. 226).

Tiempo de reverberación

Es el tiempo en segundos que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta el momento en que el nivel de presión sonora cae 60 decibeles con respecto a su valor inicial.

Fuente: Libro de Antoni Carrión Isbert. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions UPC, Alfaomega. (2001, pág. 63)



Tiempo de reverberación y tiempo de decaimiento temprano (Figura del autor ABK).

Velocidad de propagación del sonido

Es la propagación de las ondas sonoras a través de un medio dado. La velocidad del sonido en el aire es de:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} \text{ m/seg}$$

Donde:

- c es la velocidad del sonido en el aire, en m/ seg.
 - γ es la razón entre el calor específico del aire a presión constante y correspondiente a un volumen contante=1.4014
 - p es la presión en newton/ m² =101 325 N/m²
 - ρ es la densidad del aire a 0°C a nivel del mar 1.293 Kg/m³.
- Para conocer cuál es la velocidad del sonido a nivel del mar y a 0°C:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} m/seg \Rightarrow c = \sqrt{\frac{1.4014 + 101325}{1.293}} m/seg \Rightarrow c = 331.33 m/seg$$

sí ρ es la densidad del aire a 20°C al nivel del mar 1.205 Kg/m³.

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} m/seg \Rightarrow c = \sqrt{\frac{1.4014 + 101325}{1.205}} m/seg \Rightarrow c = 343.33 m/seg$$

Si asumimos que el aire es un gas ideal, entonces la velocidad del sonido depende solamente de la temperatura absoluta del aire.

$$c = 331.4 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} m/seg$$

Si se tiene una temperatura promedio de 20°C, entonces:

$$c = 331.4 \sqrt{1 + \frac{20}{273.15}} m/seg = 343.32 m/seg$$

Fuente: Acustica William W. Seto, McGraw-hill. Serie Schaum (1973)

Créditos de figuras, tablas y diagrama

Figuras

Figura 1 - Aislamiento sonoro en la arquitectura.

Fuente: C. Hopkins, *Sound insulation*, ELSEVIER, UK, 2007.

Figura 2 - La OMS ante el ruido.

Fuente: *Community Noise*, Organización Mundial de la Salud (OMS) 1995.

Figura 3 - Vías de acceso del Ruido VS Arquitectura.

Fuente: *Trasmisión del sonido a través de estructuras*. Se puede consultar en: <https://es.scribd.com/doc/309902165/Transmision-Del-Sonido-a-Traves-de-Estructuras> con información del Autor, Antonio Bautista Kuri (ABK).

Figura 4 – Efectos por la exposición al ruido.

Fuente: “Auditory and non-auditory effects of noise on health”. *THE LANCET*, Vo. 383,2014.

Figura 5 – Fuentes de ruido.

Fuente: *Community Noise*”. WHO 1995 Miedema, H.M.E. and H. Vos. “Exposure-response relationships for transportation noise,” *J. Acoust Sc. A.*, 104(6), 3432-3445, 1998.

Figura 6 – Vehículos principal fuente de ruido.

Fuente: H.V. Fuchs, *Applied Acoustics: Concepts, Absorbers, and Silencers for Acoustical Comfort and Noise Control*, Springer-Verlag Berlin 2013.

Figura 7 – Ejemplos de ruido urbano considerados.

Fuente: Figuras proporcionadas por el Dr. Santiago J. Pérez R., del Laboratorio de Acústica y Vibraciones, del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM (LAV-ICAT-UNAM).

Figura 8 - Esquema de aislamiento sonoro vía aérea.

Fuente: Dibujo obtenido de <https://ecoacustika.com/son-los-materiales-absorbentes-buenos-para-insonorizar/>

Figura 9 - Aislamiento en campo y laboratorio.

Fuente: Tesis de Moreno Ibarra “Estudio psicoacústico y estadístico de la audición en la profesión del DJ. Gabriel (2011).
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/14234/memoria.pdf?sequence=1>

Figura 10 - Aislamiento sonoro y evaluación subjetiva confort acústico.

Fuente: <https://pt.2021discountshop.ru/content?c=venta%20de%20aislante%20acustico&id=40>

Figura 11 – Equipos que se utilizan en mediciones de acústica en laboratorio y en campo.

Fuente: *Fotografías y datos del autor ABK.*

Figura 12 - Consideraciones para medir el aislamiento R para un muro de block en el Laboratorio de Acústica.

Fuente: *Fotografías y datos del autor ABK.*

Figura 13 - Arreglo de medición utilizado en la cámara de transmisión.

Fuente: *Cortesía del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (LAV-ICAT-UNAM).*

Figura 14 – Proceso de análisis de ruido en elementos constructivos.

Fuente: *Datos del autor ABK.*

Figura 15 – Dimensiones del block y su imagen, muro sin aplanado del lado del receptor y con aplanado del lado del receptor, y datos del fabricante Bloquera S.A. de C.V.

Fuente: *Fotografías del autor ABK.*

Figura 16 - Índice de reducción sonora R de muro con block BH8122040 de la empresa Bloquera, de acuerdo con ISO 717-1.

Fuente: *Formato de la norma ISO 717-1 con datos del autor ABK.*

Figura 17 - Ubicación donde se realizaron las mediciones en campo.

Fuente: *Imagen obtenida del programa Google Maps.*

Figura 18 - Ubicación de micrófonos y fuente omnidireccional, medición diferencia de nivel estandarizada (DnT).

Fuente: *Formato de planos de obra con datos del autor ABK.*

Figura 19 - Ubicación de micrófonos exterior–interior, medición de nivel de presión sonora simultáneamente.

Fuente: *Formato de planos de obra con datos del autor ABK.*

Figura 20- Posición de micrófonos para la medición de la diferencia de nivel estandarizada (Dtr,2m,nT), de la fachada.

Fuente: *Fotografía del autor ABK.*

Figura 21 - Medición de tiempo de reverberación en Recamara 3, Recamara 2 y Estancia / Comedor.

Fuente: *Formato de planos de obra con datos del autor ABK.*

Figura 22 - Posición de la fuente omnidireccional y de los micrófonos, a) En la recámara 2; y b) Estancia-comedor, fachadas orientadas hacia la calle Luís Monroy.

Fuente: Fotografías del autor ABK.

Figura 23 - Puerta de acceso al departamento.

Fuente: Fotografías del autor ABK.

Figura 24 - Resultado de las mediciones el Aislamiento Sonoro.

Fuente: Datos del autor ABK.

Figura 25 - Valor de un sólo número muro entre viviendas.

Fuente: Formato de la norma ISO 717-1 y datos del autor ABK.

Figura 26- Valor de un sólo número fachada estancia-comedor.

Fuente: Formato de la norma ISO 717-1 y datos del autor ABK.

Figura 27 - Valor de un sólo número muro de la fachada recámara 2.

Fuente: Formato de la norma ISO 717-1 y datos del autor ABK.

Figura 28 - Valor de un sólo número muro de la fachada recámara 3.

Fuente: Formato de la norma ISO 717-1 y datos del autor ABK.

Figura 29 - Ubicación del Edificio “B” en la Unidad de Posgrado de la UNAM.

Fuente: Formato de planos de obra de la Dirección General de Obras y Conservación de la UNAM-Unidad de Posgrado (DGOyC-UP-UNAM), con datos del autor ABK.

Figura 30 - Características arquitectónicas de las aulas del 2° y 3° nivel.

Fuente: Formato de planos de obra (DGOyC-UP-UNAM), con datos del autor ABK.

Figura 31 - Vista lateral de la ubicación del Edificio “B”, puntos de medición del ruido exterior y distancia a la Av. Insurgentes.

Fuente: Dibujo del autor ABK.

Figura 32 - Posición del micrófono para medir el nivel de presión sonora del ruido vehicular por fuera del aula a 2 m frente a la fachada.

Fuente: Fotografía del autor ABK.

Figura 33 – Medición de tiempo de reverberación de las aulas.

Fuente: Datos del autor ABK.

Figura 34 – Mediciones de tiempo de decaimiento temprano de las aulas.

Fuente: Datos del autor ABK.

Figura 35 – Mediciones de definición 50 en las aulas.

Fuente: Datos del autor ABK.

Figura 36 – Valores de índice de transmisión del habla.

Fuente: Datos del autor ABK.

Figura 37 – Valores de pérdida de articulación de consonantes.

Fuente: Datos del autor ABK.

Figura 38 - Medición de nivel de presión sonora a 2 m de la fachada.

Fuente: Datos del autor ABK.

Figura 39 - Medición de aislamiento de fachada aula B-306.

Fuente: Formato de gráficas de programa BZ- 7228, marca Bruel & Kjaer con datos del autor ABK.

Figura 40 – Aislamiento sonoro con barrera aislante.

Fuente: Dibujo del autor ABK y de la norma ANSI ASA 12.60-2010.

Figura 41 – Vista lateral de la fachada de doble piel en el edificio “B”.

Fuente: Dibujo del autor ABK.

Tablas

Tabla 1 - Berglund, Birgitta, Lindvall, Thomas, Schwela, Dietrich H & World Health Organization. Occupational and Environmental Health Team. (1999).

Guidelines for community noise. World Health Organization.

<https://apps.who.int/iris/handle/10665/66217>

Tabla 2 - Demarcaciones territoriales y población de la CdMx.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020).

https://es.wikipedia.org/wiki/Demarcaciones_territoriales_de_la_Ciudad_de_M%C3%A9xico

Tabla 3 – Principales denuncias por año.

Fuente: https://paot.org.mx/contenidos_gaficas/delegaciones/reporte_completo.php

Tabla 4 – Alcaldía con número de denuncias por ruido por año.

Fuente: https://paot.org.mx/contenidos_gaficas/delegaciones/reporte_completo.php

Tabla 5 - Equipo utilizado para el primer caso.

Fuente: Datos de equipos utilizados, proporcionados por el Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM.

Tabla 6 - Dimensiones de los espacios.

Fuente: Datos del autor ABK.

Tabla 7 – Equipo utilizado para el segundo caso.

Fuente: Datos del autor ABK.

Tabla 8 - Resumen Dtr, DnT y en del espectro de 100 - 5 000 Hertz.

Fuente: Datos del autor ABK, equipo de mediciones acústicas pertenecientes a la UNAM Facultad de Arquitectura.

Tabla 9 - Dimensiones de las aulas del Edificio B.

Fuente: Datos del autor ABK.

Tabla 10 - Valores de referencia internacionales.

Fuente: Norma ANSI / ASA12.60-2010/ PART1 (USA)

Tabla 11 – Equipo utilizado para el tercer caso.

Fuente: Datos del autor ABK.

Tabla 12 - Diferencia de nivel estandarizada (aislamiento acústico global de fachada).

Fuente: Datos del autor ABK.

Tabla 13 - Resumen de datos por calificador, con puerta y ventanas abiertas.

Fuente: Datos del autor ABK.

Tabla 14 – Resumen de datos por calificador, con puerta y ventanas cerradas.

Fuente: Datos del autor ABK.

Tabla 15 - Frecuencias con el nivel de presión sonora más alto en el aula B-305 al exterior a 2 m.

Fuente: Datos del autor ABK.

Tabla 16 - Valores críticos de ruido ambiental según la la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Fuente: Datos de la OMS.

Tabla 17 – Efectos del aislamiento por la barrera aislante con puerta y ventanas abiertas.

Fuente: Datos del autor ABK.

Tabla 18 – Efectos del aislamiento por la barrera aislante con puerta y ventanas abiertas.

Fuente: Datos del autor ABK.

Tabla 19 – Nivel de presión sonora entre las dos fachadas y niveles de presión sonora dentro de las aulas, con puerta y ventanas abiertas.

Fuente: Datos del autor ABK.

Tabla 20 – Nivel de presión sonora entre las dos fachadas y niveles de presión sonora dentro de las aulas, con puerta y ventanas cerradas.

Fuente: Datos del autor ABK.

Diagrama

Diagrama 1 - Factores que interviene para evaluar el entorno.

Fuente: Datos del Dr. Santiago J. Pérez R., LAV-ICAT-UNAM, 2019.

Referencias

-
- [1] Susy 2015. "Conceptos de ruido". https://issuu.com/susy276/docs/conceptos_ruido. (Consultado 18 de septiembre de 2020).
- [2] Jian Kang, Francesco Aletta, et al. 2016. Diez preguntas sobre los paisajes sonoros del medio ambiente edificado. Building and Environment vol. 108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.011>
- [3] Garrido y Garrido, García Sanz, B, Garrido Francisco J. 2003. La contaminación acústica en nuestras ciudades. Barcelona: Fundación "la Caixa". <https://www.camarazaragoza.com/medioambiente/docs/publicaciones/publicacion56.pdf>.
- [4] Heidegger, M. (1951) Construir, habitar, pensar. Disponible en: <https://www.fadu.edu.uy/estetica-diseno-ii/files/2013/05/Heidegger-Construir-Habitar-Pensar1.pdf>
- [5] Weber, M. (1997). Economía y sociedad. México: Fondo de cultura económica. Segunda reimpresión (2002) disponible en: <https://zoonpolitikonmx.files.wordpress.com/2014/08/max-weber-economia-y-sociedad.pdf>
- [6] Rosental, M & Ludin, P. (1946) Diccionario Filosófico Marxista. Disponible en: <https://www.marxists.org/espanol/rosental/1946-diccionario-filosofico-marxista.pdf>
- [7] Le Corbusier. (1985) La Ciudad de Futuro. Tercera Edición del Castellano (1985). Disponible en: <https://urbanitasite.files.wordpress.com/2020/01/le-corbusier-la-ciudad-del-futuro.pdf>
- [8] Muntañola, J. (1995) La arquitectura como lugar. Segunda Edición. | Disponible en: <http://www.elmayorportaldegerencia.com/Libros/Construccion/%5BPD%5D%20Libros%20-%20La%20arquitectura%20como%20lugar.pdf>
- [9] Beranek L. (2004). "Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics and Architecture", Ed. Springer-Verlag.

-
- [10] Rayleigh, J.W. S. The Theory of Sound. Cambridge University Press; Online publication date: October 2011; Print publication year: 2011; First published in: 1877; Online ISBN: 9781139058087.
- [11] Sabine W. C. Collected Papers on Acoustics. Harvard University Press, 1922.
- [12] Zachary A. et al. 2018. "A review of the environmental parameters necessary for an optimal sleep environment". Building and Environment vol. 132, p.p. 11–20.
- [13] Bella Castrillo, Carmen. 2015. Capítulo II. Acústica Arquitectónica. Estudio de la calidad del aula 008, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla. Pag. 28
<https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/41294/TFM%20Bella%20Castrillo,%20Carmen.pdf?sequence=1>
- [14] OMS. Carga de morbilidad por ruido ambiental: cuantificación de los años de vida saludable perdidos en Europa. 2011.
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/326424>
- [15] Informe mundial sobre la audición. Washington, D.C.: Organización Panamericana de la Salud; 2021. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
<https://doi.org/10.37774/9789275324677>. Disponible en <https://iris.paho.org/handle/10665.2/55067>
- [16] Arau, Higini. 1999. ABC DE LA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA. Ediciones CEAC, pág.65.
- [17] Spigt, Jasper. (2020). Que es la Acústica Arquitectónica. Acústica arquitectónica: revista-edificios que son tan bonitos como silenciosos.
<https://www.rockfon.es/acerca-de-nosotros/noticias/2020/acustica-arquitectonica/>.
- [18] Trombetta Zannin, Paulo. Zanardo Zwirtes, Daniele. Marco Passero, Carolina. 2012. *Noise control*, reduction and cancellation solutions in engineering. Federal university of Parana, Brazil, pág.201-232l.
- [19] Pawson, John. 2 noviembre 2004. El objetivo de la arquitectura es hallar la mejor manera de repartir el espacio. El país. Barcelona.
https://elpais.com/diario/2004/11/02/cultura/1099350003_850215.html#:~:text=que%20quiere%20obtener.%22El%20objetivo%20de%20la%20arquitectura%20es%20hallar%20la%20mejor%20manera,con%20el%20bienestar%20del%20individuo.
- [20] Metaportal, Metaportal de Arquitectura, Ingeniería y Construcción. 2022. Arquitectura. *Construmática*. <https://www.construmatica.com/s/arquitectura>.

-
- [21] RAE. 2018. *Arquitectura. Real Academia Española*. <https://dle.rae.es/arquitectura>
- [22] Clive, Dennis. 2010. Gran enciclopedia del saber. National Geographic Society edición. Santiago de Chile: Editorial Amereida S.A. pag. 6. [ISBN 978-956-8631-19-2](https://biblioadida.cloudbiteca.com/pmb/opac_css/index.php?lvl=author_see&id=26410).
https://biblioadida.cloudbiteca.com/pmb/opac_css/index.php?lvl=author_see&id=26410
- [23] Barrios, Dulce María. 2010. Apuntes de clase “Teoría del Diseño”. Revista Legado de Arquitectura y Diseño, num. 14, julio-diciembre 2013, pag. 77-91
<https://www.redalyc.org/pdf/4779/477947373007.pdf>
- [24] Pentti, Routio. 2007. Teorías arquitectónicas
<http://www2.uiah.fi/projects/metodi/>
- [25] México Design. 2015 Que es un diseño funcional en Arquitectura. Grupo México Design. Edición 55.
<https://mexicodesign.com/que-es-un-diseno-funcional-en-arquitectura/>.
- [26] OMS 2021. La OMS advierte que, según las previsiones, una de cada cuatro personas presentará problemas auditivos en 2050. 2 de marzo de 2021.
<https://www.who.int/es/news/item/02-03-2021-who-1-in-4-people-projected-to-have-hearing-problems-by-2050>.
- [27] Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial. Subprocuraduría de Protección Ambiental. 2017. Medición de ruido en el primer cuadro del Centro Histórico (2007-2010).
<http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/EsPA-07-2011.pdf>
- [28] OMS 2018. Environmental noise guidelines. for the European region.
<https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>
- [29] OMS. Publica un nuevo estándar para hacer frente a la creciente amenaza de pérdida de audición. 2022. <https://www.who.int/news/item/02-03-2022-who-releases-new-standard-to-tackle-rising-threat-of-hearing-loss>.
- [30] Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Última reforma DOF 28-mayo-2021. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf>

-
- [42] Ley Ambiental del Distrito Federal, 13 enero del 2000, https://paot.org.mx/centro/leyes/df/pdf/LEYES_AMBIENTALES_DF_PDF/LEY_AMBIENTAL_13_01_2000.pdf .
- [43] Norma Ambiental para el Distrito Federal, NADF-005-AMBT-2013, <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/proyectos-normas/NADF-005-AMBT-2013.pdf> .
- [44] Infraestructura educativa. Secretaría de educación pública 2014 <https://www.gob.mx/inifed/documentos/tomo-iv-acustica>
- [45] Recomendaciones Leed, 25 julio 2019, pag.112: https://www.usgbc.org/sites/default/files/LEED%20v4%20BDC_07.25.19_current.pdf.
- [46] Reglamento de Construcción para la CdMx, 15 de diciembre del 2017, https://paot.org.mx/centro/reglamentos/df/pdf/2018/RGTO_CONS_15_12_2017.pdf
- [47] Normas Técnicas Complementarias (NTC), 8 de febrero del 2011, capítulo 4.7, <http://cgsservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/r406001.pdf>
- [48] García, Armando. 2001. *Environmental urban noise*. edit. A. García, WITpress. Advances in Ecological sciences.
- [49] OMS 2020. Conjunto de herramienta para dispositivos y sistema de escucha segura, 2020. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/331001/9789240001640-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [50] European commission. Relating to the Assessment and Management of Environmental Noise. Evaluation of Directive 2002/49/EC. file:///C:/Users/Acustica/Desktop/Downloads/study_evaluation_directive_environmental_noise.pdf.
- [51] Babisch, W. El concepto de ruido/estrés, evaluación de riesgos y necesidades de investigación. *Ruido Salud* 2002; 4:1-11. <https://www.noiseandhealth.org/text.asp?2002/4/16/1/31833>
- [52] B. Zamorano, González. Estudios demográficos y urbanos. versión On-line ISSN 2448-6515 versión impresa ISSN 0186-7210. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-72102019000300601

-
- [53] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Parque vehicular, total de vehículos. 2020: <https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/>
- [54] NADF-005-AMBT-2013. Norma Ambiental para el Distrito Federal, <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/proyectos-normas/NADF-005-AMBT-2013.pdf>
- [55] OMS and Hear-it. Clases demasiado ruidosas. <https://www.hear-it.org/es/clases-demasiado-ruidosas>, 2017.
- [56] Instituto de seguridad y salud laboral. Región de Murcia. Ficha divulgativa FD-49 2010. Confort acústico. <file:///C:/Users/Profesor/Downloads/58914-FD49%20ruido.pdf>
- [57] Mc Mullan, Randall. 1991. Noise control in buildings. Editions Oxford.
- [58] Calixto, López, Diana. 2018. Ruido Ambiental en la Arquitectura, caso de estudio: Unidad de Posgrado de la UNAM. México: Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura-UNAM. A publicarse.
- [59] W. Mikulski W. J. Radosz. 2011. Acoustics of Classrooms in Primary Schools – Results of the Reverberation Time and the Speech Transmission Index Assessments in Selected Building. Central Institute for Labour Protection National Research Institute. <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/120018/edition/104442/content/archives-of-acoustics-acoustics-of-classrooms-in-primary-schools-results-of-the-reverberation-time-and-the-speech-transmission-index-assessments-in-selected-buildings-mikulski-witold-radosz-jan-2011-vol-36-no-4?language=en>.
- [60] Shield B, Dockrell JE. (2004). External and internal noise surveys of London primary schools. Journal Acoustical Society of America 2004; 115(2):730–8.
- [61] Carrión Isbert, Antoni. 2001. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Edicions UPC, Alfaomega.
- [62] Osama A.B. Hassan, 2018, *Building Acoustics and Vibration*. World scientific.
- [63] Urbán, D. a,* , N.B. Roozen b, P. Zařko a, M. Rychtáriková c,d, P. Tomařovič c, C. Glorieux. 2016. Assessment of sound insulation of naturally ventilated double skin façades. Building and Environment, Volume 110, Pages 148-160.

Anexo A

Instalaciones y parte del equipo son del Laboratorio de Acústica y Vibraciones (LAV) del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT). Equipo y programas para mediciones acústicas son de la Facultad de Arquitectura (FA), estos se utilizaron para mediciones en laboratorio y campo.



Cámara de Trasmisión (cámara emisora - cámara receptora), ubicada en el Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM. Aquí se mide el aislamiento de muros, puertas, ventanas, etc., utilizando la norma ISO-10140-2, instalaciones del LAV-ICAT.



Sonómetro modelo 2270, marca Bruel & Kjaer, se utiliza en campo y laboratorio, su función es medir el nivel de presión sonora en decibeles, aislamiento en muros en campo y laboratorio, tiempo de reverberación, con programas (plantillas) propios.



Fuente Omnidireccional modelo 4292-L, marca Bruel & Kjaer. Se utiliza en conjunto con el amplificador modelo 2734, para generar ruido blanco o rosa, que

son los sonidos para realizar pruebas de aislamiento sonoro según las normas ISO-10140-2 y la norma ISO-16283-3.



Amplificador de sonido modelo 2734, marca Brüel & Kjær. Se utiliza en conjunto con la fuente omnidireccional modelo 4292-L, para generar ruido blanco o rosa.



Fuente Echo Speech modelo 4720, marca Brüel & Kjær. Para emular vocalizaciones de mujer – hombre, con sonidos de secuencias de longitud máxima, para obtener información del índice de transmisión del habla, porcentaje de pérdida de articulación de consonantes.



Medidor de clima modelo 4500, marca Kestrel, se utiliza para medir parámetros de clima, temperatura, presión atmosférica, entre otras.



080190/1

Interfaz de audio digital para pruebas modelo con cable ZE-0948, marca Briel & Kjaer, es el transductor con la computadora.



Analizador de frecuencias en tiempo real de doble canal, modelo 2133, marca Brüel & Kjær, se utiliza para medir el aislamiento sonoro de un muro en laboratorio, según norma 10140-2, equipo del LAV-ICAT.



Soporte de brazo giratorio para micrófono modelo 3923, marca Brüel & Kjær, donde se coloca un micrófono que gira, se utiliza para medir el aislamiento de un muro en laboratorio de acuerdo con las normas ISO-10140-2, equipo del LAV-ICAT.



Micrófono modelo 4189 de campo libre con preamplificador, de alta precisión y sensibilidad, prepolarizado, marca Brüel & Kjær, aparato para transformar las ondas sonoras en energía eléctrica.



Calibrador acústico de precisión para micrófonos clase 1, modelo 4231 marca Brüel & Kjær.



Programa DIRAC, V 6.0, marca Bruel Kjaer, se utiliza para medir tiempo de reverberación, tiempo de decaimiento temprano, índice de transmisión del habla, pérdida de articulación de consonantes en hombres y mujeres, definición en 50 milisegundos.



Programa Predictor-LimA, se utiliza para simular ruido al exterior en: zona urbana, simulación de barreras aíslan.