

Acústica en salones de clase

Un recurso para crear ambientes de aprendizaje con condiciones de audición deseables

Parte II

Acoustical Society of America

asa@aip.org

RESUMEN

El objetivo de esta publicación es proporcionar un material suplementario para arquitectos, educadores y diseñadores de escuelas para emplearlo en la construcción o renovación de ambientes de aprendizaje. La publicación no pretende reemplazar los servicios de un consultor acústico profesional. Es para emplearse como un auxiliar en la comprensión de los elementos de las condiciones deseables de audición en los salones de clase.

PALABRAS CLAVE

Acústica, salones, aulas.

ABSTRACT

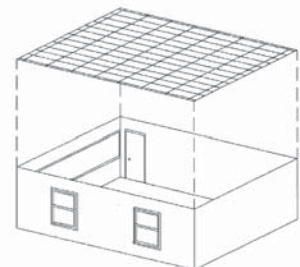
The intent of this publication is to create a supplemental resource for architects, educators, and school planners for use with new construction or renovation of learning environments. The publication is not intended to replace the services of a professional acoustical consultant. It is to be used as an aid in the understanding of the elements of desirable listening conditions in classrooms.

KEYWORDS

Acoustics, classrooms.

NOTAS

- Esta publicación fue preparada por el Comité Técnico de Acústica Arquitectónica de la Sociedad Americana de Acústica (ASA), por Benjamín Seep, Robin Glosemeyer, Emily Hulce, Matt Linn, and Pamela Aytar, quienes durante la preparación de la publicación, eran estudiantes avanzados en el programa de Ingeniería Arquitectónica de la Universidad de Kansas. La supervisión de este proyecto estuvo a cargo de Bob Coffen, FASA, un miembro de la Facultad de Ingeniería Arquitectónica de la Universidad de Kansas.
- La norma ANSI S12.60-2002 "American National Standard: Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools" está disponible gratuitamente en Internet en la dirección: <http://asastore.aip.org>
- La primera parte de este artículo se publicó en Ingenierías Vol. IX, No. 30, de enero-marzo 2006.



Copyright©2000
Acoustical Society of
America.

All right reserved.

Reproducción autorizada
por la ASA.

Traducido por Sergio
Beristáin, Presidente del
Instituto Mexicano de
Acústica.

EJEMPLOS DE SALONES DE CLASES

¿Cómo encajan todas las piezas del rompecabezas? Esta sección presenta ejemplos de salones de clase con buena y mala acústica con el fin de ilustrar cómo se pueden emplear los acabados arquitectónicos para controlar la reverberación y el eco.

Desde el punto de vista acústico, los salones en plan abierto son seguramente los peores. Mientras pueden ser ventajosos para ciertos métodos de enseñanza o interacción estudiantil, tienen serias limitaciones acústicas. Es fácil que los estudiantes se distraigan con las señales acústicas y visuales que provienen de clases adyacentes. Y si los estudiantes con deficiencia auditiva, o con desórdenes relacionados con la falta de atención, tienen dificultades para concentrarse en la voz del maestro en salones con ruido mecánico, considere su situación en un salón donde el ruido de fondo no es aleatorio, sino señal inteligible. Para atacar este problema, muchos salones en plan abierto han sido divididos con particiones parciales, o separaciones ópticas como cortinas. Pero mientras estas barreras ayudan a los estudiantes a concentrarse al eliminar las distracciones visuales, prácticamente no proporcionan reducción de ruido entre los salones (la figura 9 muestra un ejemplo de aulas en plan abierto).



Fig. 9. Salones en plan abierto. Mientras pueden ser ventajosos para ciertos métodos de enseñanza o interacción estudiantil, tienen serias limitaciones acústicas. Aunque las divisiones parciales u operativas eliminan las distracciones visuales, prácticamente no proporcionan reducción de ruido entre los diferentes grupos.

Otro diseño indeseable es el de un salón alto con techo de yeso o tabla-roca rígida, paredes duras y piso duro. En tal salón la reverberación y los ecos tienden a destruir la inteligibilidad del habla, especialmente para niños pequeños. A diferencia del ruido mecánico, la reverberación no puede ser evitada elevando el nivel de voz del maestro. En este caso debe agregarse un tratamiento acústico para incrementar la absorción y reducir los ecos destructivos (ver la figura 10a). Para sugerencias de materiales, vea la sección de tiempo de reverberación en el Apéndice. Para una solución no tradicional, el estudio de un caso se presentará un poco más adelante.

Simplemente agregando un falso plafond absorbente y una alfombra delgada en el piso, usualmente se obtendrá un salón con buena acústica y tiempo de reverberación corto. Esta solución es económica para salones nuevos y puede ser una forma asequible para renovar salones ya existentes. Para salones pequeños o de tamaño moderado, el falso plafond producirá un tiempo de reverberación aceptable, siempre que el plafond empleado tenga un coeficiente de reducción de ruido NRC de 0.75 o mayor. La alfombra agrega un poco de absorción en alta frecuencia, pero su uso fundamental es para reducir el ruido producido por los estudiantes (observe la figura 10b). Desafortunadamente, esta solución no hace nada en contra de los ecos de las paredes. Sin embargo, una distribución cuidadosa de los muebles, como gabinetes y libreros, puede contribuir a reducir grandes superficies planas de muros, y reducir ecos.

El mejor diseño de un salón para clases normales, quitará un poco de absorción del techo para ubicarla en las paredes, dejando la parte central del techo rígida para reflejar la voz del maestro hacia la parte posterior del salón. Este procedimiento que parece complejo, con un techo parcialmente absorbente y reflejante, puede construirse con facilidad mediante un plafond modular, colocando paneles absorbentes acústicos en el perímetro del plafond, y paneles de tabla-roca en la parte central. Para reflejar más sonido hacia la parte posterior, puede modificarse la forma del techo encima del maestro, al frente del salón. Esta superficie reflectora debe construirse de material rígido como triplay o tabla-roca, y puede pintarse de acuerdo al salón. Colocando además material absorbente en las paredes, simultáneamente

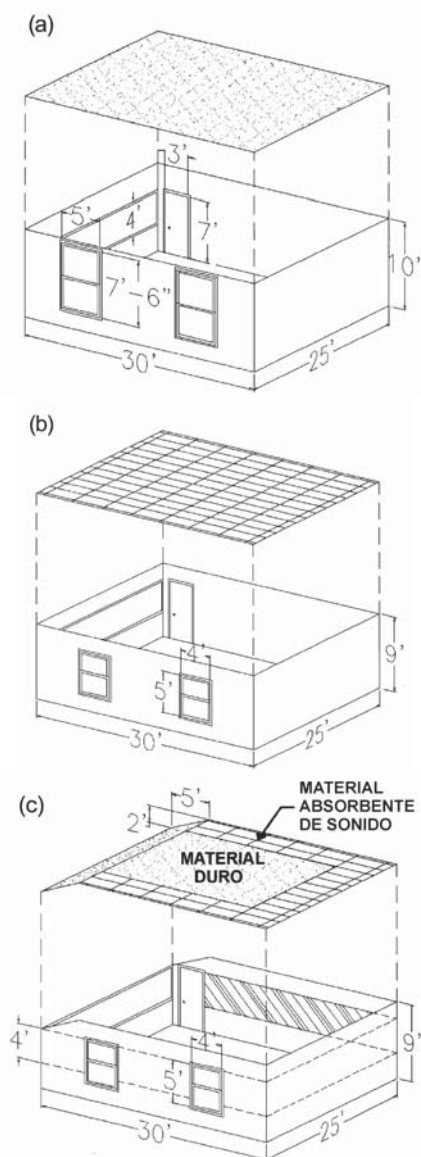


Fig. 10. Croquis de salones de clase. (a) Salón típicamente indeseable sin material absorbente y sin reflexiones características útiles. (b) Salón mejor con un plafond acústico absorbente y una alfombra delgada. (c) Salón deseable con material absorbente de sonido en tres muros, una alfombra delgada, un plafond reflejante inclinado en el frente, y un techo con la parte central reflejante y absorción en la parte perimetral.

se controla el tiempo de reverberación y los ecos. Paneles de fibra de vidrio de 5 cm. de espesor, cubiertos de tela son una buena elección ya que son atractivos, robustos y producen un poco de absorción en bajas frecuencias. Agregue una alfombra delgada al piso y el resultado será un salón

de clases con acústica maravillosa, con tiempo de reverberación corto, sin ecos, distribución apropiada de reflexiones, y bajo ruido del interior, y todo ello logrado con materiales de construcción comunes (ver figura 10c).

ESTUDIO DE UN CASO - SALONES ANTIGUOS

El caso de este estudio es un salón de un viejo edificio universitario, que era sujeto de continuas quejas de los maestros por las pobres características acústicas que incluían altos niveles de ruido y mala inteligibilidad del habla. Aunque éste es un salón universitario, su diseño es típico de muchas escuelas primarias y secundarias antiguas. El salón, mostrado en la figura 11, tiene techo de yeso alto y muchas ventanas altas. El edificio fue construido sin sistema central de aire acondicionado, así que fueron agregados varios sistemas de ventana que eran muy ruidosos. Para elaborar las recomendaciones adecuadas que mejoren las condiciones acústicas del salón, se midió el nivel de ruido establecido por la unidad de aire acondicionado de ventana, además del tiempo de reverberación del cuarto. Era importante mejorar las características acústicas sin afectar la estética de manera adversa.

Debido al techo alto y a la falta de material absorbente en el salón, el tiempo de reverberación resultaba demasiado largo a frecuencias medias, 1.5 seg. Agregarle un plafond acústico suspendido hubiera mejorado el espacio acústica, pero no visualmente. Para evitar interferir con las ventanas altas, el plafond suspendido tendría que inclinarse en los lados, además que un falso plafond nuevo hubiera afectado la arquitectura tradicional del salón. En cambio, se emplearon paneles de 5 cm de fibra de vidrio densa, cubierta de tela de un color que complementó el del salón, suspendidos del techo al mismo nivel que las lámparas colgantes existentes. Esto resultó una solución de apariencia agradable sin el costo de reemplazar las lámparas, lo que hubiera sido necesario con un plafond suspendido. Paneles de fibra de vidrio cubierta de tela también fueron colocados en las paredes entre las ventanas para prevenir la presencia de ecos repetitivos y disminuir aún más el tiempo de reverberación. Después de la modificación, el tiempo de reverberación del salón vacío se redujo a un valor deseable de 0.5 seg. a

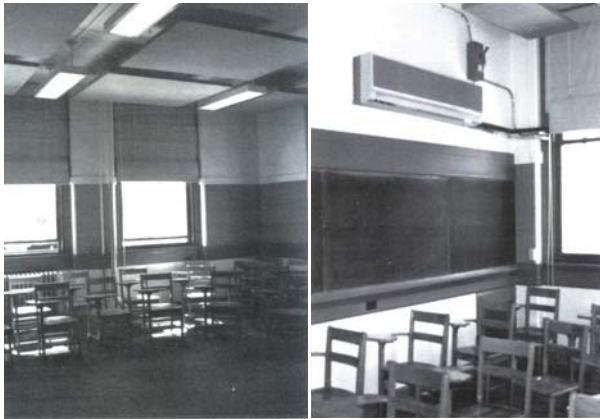


Fig. 11. Mejoras a un salón antiguo. La fotografía (a) muestra el material absorbente de sonido en forma de paneles de fibra de vidrio recubiertos de tela, colgados en el techo, adheridos a las paredes y la alfombra. La fotografía (b) muestra, montada en el muro, la unidad de aire acondicionado de dos velocidades, relativamente ruidosa que sustituyó a los climas de ventana.

frecuencias medias. Soluciones similares pueden aplicarse a muchos salones donde el empleo de falsos plafones no es adecuado.

El aire acondicionado de este salón también se modificó con resultados acústicos mixtos. Los sistemas originales de ventana producían un nivel de ruido inaceptable, evaluado como de NC-57. La escuela decidió reemplazarlos por unidades de pared tipo fan-coil de dos velocidades, y con el compresor ubicado en el exterior. Esto mejoró la ventilación del salón pero no resolvió por completo el problema del ruido. Con el ventilador en la velocidad alta, el ruido en la zona cercana es NC-50, 7 menos que en el caso anterior de NC-57, pero aún inadecuado. En el lado opuesto del salón, el ruido es NC-45. En la baja velocidad el ruido es NC-36 y NC-33. A baja velocidad de operación, el nivel de ruido está cerca del criterio buscado de NC-35 (como se estableció en la parte I de este artículo, en la sección de Ruido de equipo mecánico, publicado en *INGENIERÍAS* Vol. IX, No. 30). Pero a alta velocidad, el ruido es significativamente mayor. Cuando se tengan que emplear unidades fan-coil en el interior de salones, conviene emplear sistemas de varias velocidades capaces de ventilar el cuarto en forma adecuada operando a baja velocidad.

RECOMENDACIONES ACÚSTICAS PARA CUARTOS ESPECIALES

Aunque el objetivo principal de esta publicación es proporcionar recomendaciones para la acústica de salones de clase, esta sección trata los aspectos relacionados con otros cuartos de uso común en escuelas. El material aquí expuesto no es tan amplio como el tratado para los salones de clase, pero mucho del material ya presentado, por la necesidad de eliminar el ruido mecánico y producir una reducción de ruido efectiva, también se aplica a recintos como cafeterías, gimnasios y auditorios.

Esta sección no intenta cubrir la acústica de salones de música, ya que la acústica de estos espacios es especialmente crítica. Los cuartos de propósito especial son complejos y es mejor que sean tratados por un consultor acústico profesional.

El problema más común de cafeterías y gimnasios es el tiempo de reverberación (TR) excesivo, ya que en general tienen un volumen amplio y materiales de superficie rígida en las paredes. En las cafeterías, este TR largo hace que el ruido crezca, haciendo que los estudiantes hablen cada vez más fuerte para escucharse, hasta alcanzar un rumor muy fuerte. En los gimnasios, frecuentemente empleados para eventos de destreza y asambleas, al combinarse una mala acústica con sistemas de sonido mal diseñados, la voz es prácticamente incomprensible y la música es destrozada.

Existen varias opciones para mejorar la absorción sonora en estos espacios amplios. En construcciones nuevas, si el techo se planea construir con paneles expuestos de lámina de metal, considere emplear lámina perforada en la parte baja y fibra de vidrio por arriba para absorber el sonido. Esto reducirá significativamente el tiempo de reverberación sin incrementar notablemente los costos. Otra opción tanto para construcciones nuevas como para renovaciones consiste en colgar paneles o banderines absorbentes del techo. En el mercado existen estos paneles hechos de fibra de vidrio en diferentes grosores cubiertos con plástico delgado o tela. Son fáciles de instalar, están disponibles en múltiples colores y no afectan en forma adversa la apariencia del recinto. Colocar paneles de fibra de vidrio o de madera en las paredes reducirá la reverberación y los ecos repetitivos.

Los gimnasios y cafeterías tienden a ser espacios ruidosos, y este ruido puede molestar salones de clase cercanos. Así que conviene separar estas áreas de los salones, y no colocar salones debajo de gimnasios. Los ruidos de impacto de pelotas de basquetbol y otros semejantes son un problema severo que resulta costoso de resolver en instalaciones nuevas, y es aún más caro en remodelaciones.

Los auditorios escolares se usan para una gran variedad de actividades, incluyendo conferencias, teatro, danza y música. Todas estas actividades requieren de una buena acústica, pero cada una de ellas tiene diferentes requisitos acústicos. Para cumplir las metas de todas estas actividades, la acústica del auditorio deberá ser un compromiso, de tal manera que resulte adecuada para todas ellas, pero buena para ninguna, o contar con una técnica denominada “acústica variable” para adaptar la acústica a cada actividad. La acústica variable involucra el empleo de paneles, cortinas y otros materiales que puedan ser rearrreglados fácilmente para alterar las reflexiones, el tiempo de reverberación y otras propiedades acústicas. Para obtener resultados satisfactorios para estos recintos complejos, es mejor buscar la ayuda de un consultor acústico profesional. Dicho esto, los párrafos siguientes proporcionan algunas recomendaciones de diseño a seguir y errores comunes a evitar.

Combinar el auditorio con la cafetería o con el gimnasio es una idea tentadora para ahorrar espacio y dinero. Por desgracia esto rara vez, si acaso, resulta en un auditorio satisfactorio acústicamente, ya que los recintos tienen requisitos conflictivos. En un auditorio el objetivo es reforzar el sonido producido en un punto, mientras en gimnasios y cafeterías la idea es eliminar el ruido de múltiples fuentes. Este conflicto no puede resolverse adecuadamente, así que estas combinaciones deben evitarse. En un auditorio, la forma del recinto es importante para reflejar el sonido hacia la audiencia. Evite recintos amplios en forma de abanico y con la pared posterior cóncava con su radio centrado en o cerca del centro del escenario. Una pared cóncava posterior enfocará ecos molestos en los ejecutantes en el escenario, y si las paredes laterales están muy abiertas, no proporcionarán reflexiones tempranas útiles hacia la audiencia. Para obtener sonido reflejado hacia la parte posterior, la profundidad de la zona bajo el balcón debe ser

menor que dos veces la distancia de piso a balcón. Un techo horizontal enviará todas las reflexiones a la parte posterior, así que algunas secciones del techo deben inclinarse para difundir las reflexiones a toda la audiencia. Paneles difusores convexos en forma de pirámides o cilindros, o difusores especiales “QRD” contribuyen a uniformizar el sonido en el auditorio y a reducir ecos discretos. Los muros deben cubrirse con cortinas pesadas que se desplacen horizontalmente o se eleven verticalmente para agregar absorción o eliminarla cuando sea necesario.

APÉNDICE

Frecuencia

La frecuencia es un factor importante en la mayoría de las mediciones acústicas. El sonido se produce cuando una fuente vibrante causa pequeñas fluctuaciones en el aire, y la frecuencia es la razón de repetición de estas vibraciones. La frecuencia se mide en Hertz (Hz), donde $1 \text{ Hz} = 1$ ciclo por segundo. Una persona joven con audición normal puede detectar un amplio rango de frecuencias desde unos 20 a 20,000 Hz. Para trabajar con un espectro tan amplio, los acústicos dividen el rango de frecuencias en secciones llamadas bandas de octava. Cada banda de octava se define por su frecuencia central. Las frecuencias centrales de las bandas de octava normalizadas son: 63, 125, 250, 500, 1,000, 2,000, 4,000 y 8,000 Hz. Como puede verse, la relación de frecuencias sucesivas es 2:1 justo como en una octava musical. Esto también se correlaciona con la sensibilidad del oído a la frecuencia, ya que un cambio de frecuencia es distinguido más fácilmente a bajas frecuencias que a altas. Por ejemplo el cambio de 100 a 105 Hz es más notable que el de 8,000 a 8,005 Hz. Las bandas de octava de alta frecuencia contienen un rango de frecuencias más amplio que las bandas de octava de baja frecuencia, pero son percibidas como prácticamente iguales. Para obtener un indicador más detallado del espectro de la potencia sonora, es común que se hagan mediciones en bandas de frecuencia de un tercio de octava. Las frecuencias centrales normalizadas para bandas de tercios de octava son: 50, 63, 80, 100, 125, 160, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1,000, etc. Observe que una banda de octava contiene una banda de tercio de octava centrada a la frecuencia normalizada de la

banda de octava, y una banda de tercio de octava a cada lado.

Decibeles

La medida más común del nivel sonoro es el Nivel de Presión Sonora, o NPS, expresado en decibeles, abreviado dB. Los decibeles no son unidades típicas como los centímetros o los kilogramos ya que no se relacionan linealmente con una cantidad específica. En cambio, los decibeles están basados en la relación logarítmica de la intensidad o potencia sonora a una intensidad o potencia de referencia. La potencia sonora y la intensidad no son fáciles de medir. Sin embargo, la presión sonora es fácil de medir con un medidor de nivel sonoro. La presión sonora también puede expresarse en dB ya que la presión sonora al cuadrado es proporcional a la potencia sonora o intensidad. Se emplean los dB, en lugar de la amplitud real del sonido en unidades de presión, ya que su valor logarítmico representa la forma en que el oído interpreta el sonido y porque los números son más manejables para los cálculos. La mayoría de los sonidos están en el rango de 0 a 140 dB, que son equivalentes a ondas con presiones de 20 a 200,000,000 de micropascales (o sea 2×10^{-10} a 2×10^{-2} atm). Para familiarizarse con niveles de presión sonora (en dB), los NPS aproximados de algunas fuentes sonoras comunes se presentan en la figura 12.

Un medidor de nivel sonoro simple combina los niveles de presión sonora en todo el rango de frecuencias para indicar el NPS total en dB.

Fuente	NPS en dB(A)
Sonido audible más débil	0
Susurro	20
Residencia silenciosa	30
Estéreo suave en residencia	40
Rango de voz	50-70
Cafetería	80
Martillo neumático	90
Ruido fuerte de gente	100
Motocicleta acelerando	100
Concierto de Rock	120
Turbina de avión (a 22.5 mts)	140

Fig. 12. Niveles de Presión Sonora de fuentes sonoras comunes.

Medidores más complejos cuentan con filtros que pueden medir el NPS en cada banda de octava o de tercio de octava separadamente, así que se puede identificar el nivel en cada banda, y por lo tanto el espectro sonoro. Los medidores de nivel sonoro también pueden “ponderar” el nivel de presión sonora, ajustando el nivel a diferentes frecuencias antes de combinar los niveles en un nivel total ponderado. Por ejemplo, la ponderación A, reduce el nivel de los sonidos de baja frecuencia para simular las variaciones de sensibilidad del oído a las diferentes frecuencias. Los valores ponderados con A se denotan como dB(A) para diferenciarlos de los dB sin ponderación. De forma similar, los valores ponderados en C se etiquetan como dB(C). La ponderación C reduce ligeramente el nivel de los sonidos por debajo de 50 Hz y por encima de los 5,000 Hz, pero es casi plana a frecuencias medias, y puede emplearse para obtener un valor aproximado sin ponderación con medidores de sonido que sólo tienen ponderación A y C. Comparando los niveles ponderados en A y en C de la misma fuente de ruido, se tiene una idea de su distribución de frecuencia. Si los dos niveles difieren sólo 1 ó 2 dB, la mayoría del ruido está por encima de los 500 Hz. Si la diferencia es mayor, gran parte del ruido es de baja frecuencia.

Para convertir niveles de presión sonora por bandas de octava, sin ponderación, a niveles ponderados en A o en C, sume o reste las cantidades indicadas en la figura 13 en cada una de las bandas correspondientes.

Frecuencia central de la banda de octava (Hz)	Ponderación A	Ponderación C
31	-40	-2
63	-26	0
125	-16	0
250	-9	0
500	-3	0
1,000	0	0
2,000	+1	0
4,000	+1	0
8,000	-1	-3

Fig. 13. Discriminación de frecuencias en dB para ponderación A y C.

Después, sume los niveles en bandas de octava, (dos a la vez como se explica a continuación), para obtener el valor totaltotal ponderado en A o en C.

Como se mencionó anteriormente en el texto, calcular el NPS de dos fuentes que suenan al mismo tiempo no es tan simple como sumar los valores individuales de ellas en decibeles. Dos personas hablando al mismo tiempo a 70 dB(A) cada una, no son tan sonoros como una turbina de avión a 140 dB(A). Para combinar dos valores en decibeles, deben primero convertirse en presión al cuadrado, sumarse, y de nuevo convertirse a decibeles. La matemática puede aproximarse empleando la figura 14.

Diferencia entre dos valores en decibeles	Cantidad a sumar al valor mayor
0 ó 1	3
2 ó 3	2
4 a 9	1
10 ó más	0

Fig. 14. "Suma" de Decibeles.

Si un sonido es mucho más sonoro que otro, el sonido más fuerte oculta al más débil, y el nivel de decibeles combinado, es justamente el nivel del sonido más fuerte. Si los dos sonidos tienen la misma sonoridad, entonces la combinación es 3 decibeles mayor. Se pueden combinar más de dos fuentes, sólo que deben considerarse dos a la vez. Por ejemplo, en un salón de clases por construir se espera tener 34 dB(A) de ruido del sistema mecánico, una computadora que genera 32 dB(A) y un retroproyector que produce 43 dB(A). ¿Cuál será el nivel de presión sonora total de las tres fuentes de ruido? La diferencia entre los dos primeros valores de decibeles es $34 - 32 = 2$, así que hay que agregar 2 dB al valor mayor, $34 + 2 = 36$ dB(A). Ahora se combina este valor con el del ruido del proyector: $43 - 36 = 7$, así que hay que agregar 1 dB al valor mayor: $43 + 1 = 44$ dB(A) que es el valor total de las tres fuentes. Si el nivel NPS de la voz del maestro es de 55 dB(A), ¿cuál será la relación señal-a-ruido del salón? $55 - 44 = 11$ dB, que es suficiente para una buena inteligibilidad del habla. ¿Qué tanto más fuerte es el nivel de 44 dB(A) que cada una de las fuentes? Debido a la respuesta del oído, sólo se puede distinguir una diferencia de 3 dB. Un incremento de 10 dB, suena aproximadamente el doble de fuerte, y un incremento de 20 dB suena unas cuatro veces más fuerte.

Tiempo de reverberación

Hace unos 100 años, un profesor de física de Harvard llamado Wallace Clement Sabine desarrolló la primera ecuación para determinar el tiempo de reverberación, lo cual se conoce como la ecuación de Sabine y se sigue usando para diseño. El tiempo de reverberación se define como el tiempo necesario para que el sonido decaiga 60 dB de su valor inicial. La sencilla ecuación de Sabine establece que:

$$TR(60) = \frac{0.161V}{(\Sigma S\alpha)}$$

donde:

TR(60) = Tiempo de reverberación (segundos)

V = Volumen del cuarto (m^3)

S = Área de la superficie (m^2)

α = Coeficiente de absorción del material a la frecuencia considerada

Σ Indica que se deben sumar los productos (S)(α) de todas las superficies.

Para emplear esta fórmula se debe conocer el volumen del recinto, el área superficial de cada material y los coeficientes de absorción de esos materiales. Los coeficientes de absorción se miden en laboratorios especializados, y representan la fracción de la energía sonora (no del nivel sonoro en dB), que el material absorbe, como un valor entre 0 y 1. La figura 15 proporciona los coeficientes de absorción de materiales comunes en salones de clase.

El Coeficiente de Reducción de Ruido, NCR, es un sólo número que se emplea frecuentemente y es básicamente el promedio de los coeficientes de absorción a 250, 500, 1,000 y 2,000 Hz. Este simple parametro puede ser útil para comparar la absorción relativa de dos materiales, sin embargo, examinando los coeficientes de absorción en cada banda de octava, se tiene una mejor idea del funcionamiento del material a las diferentes frecuencias.

Es común calcular el tiempo de reverberación con el cuarto vacío. Ya que la gente y su ropa proporcionan absorción adicional, el cuarto vacío es el peor de los casos, pero no del todo irracional, ya que la ocupación en los salones varía. Para un análisis completo, el cálculo debe realizarse en cada banda de octava, ya que el TR puede variar ampliamente a frecuencias diferentes, sin embargo, para una estimación rápida, se puede calcular el TR de un

Coeficiente de Absorción de Sonido (α) por banda de octava						
Materiales	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1K Hz	2K Hz	4K Hz
Páneles plafond de fibra de vidrio	0.70	0.85	0.75	0.85	0.90	0.90
Páneles de fibra de vidrio, 5 cm de espesor	0.30	0.50	0.80	0.90	0.80	0.75
Bloque de concreto, pintado	0.10	0.05	0.06	0.09	0.09	0.08
Muro de tabla-roca	0.25	0.15	0.08	0.06	0.04	0.04
Yeso en muro o techo	0.14	0.10	0.06	0.05	0.04	0.03
Linóleo o piso de loseta plástica	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Alfombra delgada sobre concreto	0.05	0.10	0.25	0.30	0.35	0.40
Puerta de madera	0.15	0.11	0.09	0.07	0.06	0.06
Vidrio	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Placa de yeso	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04

Fig. 15. Coeficientes de absorción típicos para materiales comunes de construcción empleados en instalaciones educativas.

salón a sólo una banda de octava, representativa de las frecuencias de la voz, como 1,000 Hz. Si este TR es aceptable, entonces es muy probable que el TR en el rango de voz también será aceptable.

Para demostrar el uso de la ecuación de Sabine, la figura 16 presenta un ejemplo de cálculo del TR a 500 Hz para el ejemplo del salón con mala acústica de la figura 10a. Trate de calcular el TR a 500 Hz del salón acústicamente satisfactorio de la figura 10b, agregando sólo el plafond absorbente. Observe que el plafond está a una altura menor, así que el volumen y la superficie cambiarán. El TR del salón satisfactorio es de aproximadamente 0.4 seg.

Material	S (m ²)	α (500 Hz)
Linóleo	(7.6)(9.1) = 69.2	0.03
Ventanas	(2)(1.5)(2.3) = 6.9	0.18
Puerta	(0.9)(2.1) = 1.9	0.09
Placa de yeso	(1.2)(7.6) = 9.1	0.01
Enyesado (muros y techo)	69.2 + (3)(33.5) -6.9 - 1.9 - 9.1 = 151.8	0.06
$V = (7.6)(9.1)(3) = 207.6 \text{ m}^3$ $\Sigma S\alpha = (69.2)(0.03) + (6.9)(0.18)$ $+ (1.9)(0.09) + (9.1)(0.01)$ $+ (151.8)(0.06)$ $= 12.64$ $TR(60) = \frac{(0.161)(207.6)}{12.64}$ $TR(60) = 2.64 \text{ seg. a } 500 \text{ Hz.}$		

Fig. 16. Ejemplo de cálculo de TR a 500 Hz.

Inteligibilidad del habla

Existen varios métodos para medir o predecir la inteligibilidad del habla, desde una simple lectura del nivel de sonido en ponderación A, hasta el complejo Índice de Transmisión de Voz (STI). Para salones de clase, la inteligibilidad del habla puede predecirse a partir del tiempo de reverberación y la relación señal-a-ruido. Un salón con TR de 0.5 seg. y +10 dB de S/R, tendrá aproximadamente 90% de inteligibilidad del habla. Si el TR se mantiene en 0.5 seg., pero la S/R se reduce a 0 dB, la inteligibilidad cae aproximadamente al 55%. De forma similar, si la S/R es +10 dB pero el TR se incrementa a 1.5 seg., la inteligibilidad se disminuye a 75%. Y si la S/R baja a 0 dB y el TR es de 1.5 seg. la inteligibilidad disminuye dramáticamente al 30%. Es triste, que esta condición exista aún en la actualidad en algunos salones de clase.

Se pueden efectuar pruebas de inteligibilidad del habla en salones existentes. Tales pruebas pueden efectuarse de diferentes maneras. Típicamente un orador lee sílabas sin sentido, palabras monosilábicas, u oraciones, y la audiencia anota lo que oye, o selecciona en una lista de posibles alternativas. El porcentaje de los elementos de la prueba escuchados correctamente, es una medida de la inteligibilidad del habla. Se han desarrollado pruebas normalizadas que

indican el procedimiento de la prueba, la selección de audiencia, entrenamiento de los oradores y de la audiencia, etc. También se han grabado listas normalizadas de palabras y que pueden reproducirse en lugar de tener un orador leyendo las listas. Esto elimina claves por lectura de labios, variaciones entre oradores diferentes, voces características y niveles de voz. Antes de iniciar la prueba real, la audiencia debe practicar haciendo una prueba en un ambiente tranquilo para familiarizarse con el procedimiento y obtener resultados consistentes. (Las palabras empleadas se seleccionan al azar de listas normalizadas, de tal manera que la audiencia no pueda simplemente memorizar el orden de las palabras).

Para la prueba en el salón, el orador debe leer la lista desde la posición habitual del maestro. Para asegurar resultados conservadores, varias personas deben ubicarse juntas en el área del salón con la relación señal-a-ruido más baja. Esta se encuentra en la mayoría de los casos al fondo del salón, o cerca de la fuente de ruido mecánico más fuerte. Todos los ruidos presentes normalmente durante las clases, como ruido mecánico, ruido exterior o de los pasillos, deben estar presentes para asegurar valores de inteligibilidad del habla representativos.

Los adultos obtienen en promedio 10% mejores resultados que los niños en las pruebas de inteligibilidad del habla. Por ejemplo, en un salón de primer grado en que un grupo de adultos obtuvo el 90%, es probable que los estudiantes sólo alcancen el 80%. Los estudiantes con problemas de audición o aprendizaje, o aquellos para los que el idioma sea su segunda lengua, tendrán resultados aun menores. Si la inteligibilidad del habla es menor al 90%, se deben implementar tratamientos acústicos para reducir el tiempo de reverberación y/o mejorar la relación señal-a-ruido.

Las pruebas de inteligibilidad del habla no son sencillas, por lo que se sugiere asesoría profesional. El audiólogo de la escuela puede ser un gran recurso al respecto.

Determinación del criterio de ruido

El nivel de ruido en un espacio puede describirse en forma efectiva con un sólo valor denominado Criterio de Ruido (NC). El valor NC se determina

midiendo el nivel de presión sonora del ruido en cada banda de octava, marcando estos niveles en una gráfica, y después comparando los resultados con las curvas NC preestablecidas. La curva NC más baja que no se excede con el espectro del ruido graficado es el valor NC del sonido. En la mayoría de las gráficas, se incluyen curvas NC a intervalos de 5 dB para ahorrar espacio, pero el valor NC puede expresarse en cualquier número entero, y no sólo como múltiplos de 5. Para ilustrar esto, se indican los valores NC de una unidad de ventilación de ventana, un fan-coil y el ruido de fondo de el caso previamente estudiado (ver figuras 17 y 18). Se ha proporcionado una gráfica de NC en blanco (ver figura 19).

Frecuencia Central de la Banda de Octava (Hz)	Unidad de ventana	F a n - coil	Ruido de fondo
63	62		51
125	67	46	42
250	63	47	32
500	60	54	24
1,000	25	48	25
2,000	16	41	16
4,000	10	30	10
8,000	6	23	6
NC	23	50	23

Fig. 17. Niveles de Presión Sonora de las fuentes de ruido medidas en el caso estudiado. Ver Fig. 18 para las curvas NC.

Nivel sonoro Vs. distancia

Todo el mundo sabe que el nivel del sonido decrece al aumentar la distancia a partir de la fuente. El decremento del nivel sonoro está indicado por la *ley del cuadrado de la distancia*. O sea, que el decremento de energía sonora es proporcional al cuadrado de la distancia. Por ejemplo, si la distancia de audición de una fuente sonora se incrementa por un factor de 2 (se duplica), la energía sonora directa decrece en un factor de 4 ó 2 al cuadrado (2 veces 2). Esto se traduce en una reducción de 6 dB en el nivel de intensidad sonora del sonido directo cada vez que se duplique la distancia desde la fuente sonora.

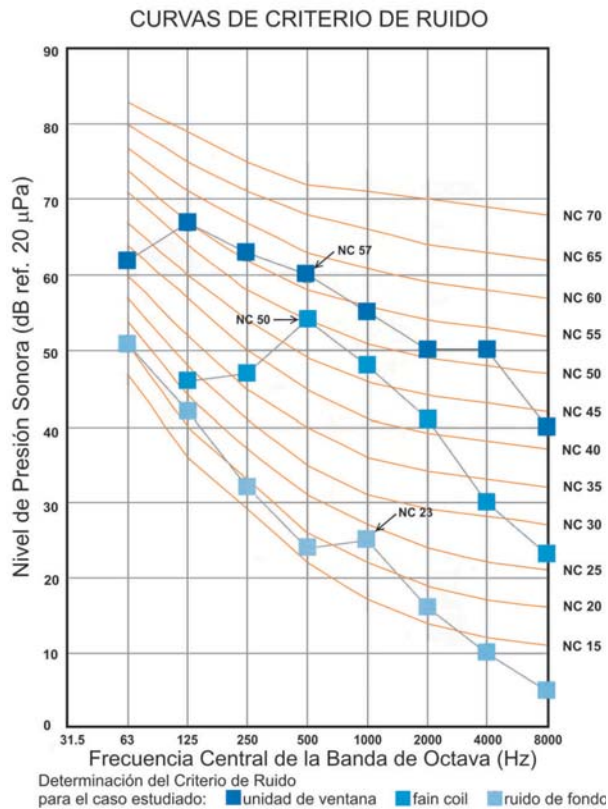


Fig. 18. Curvas de criterios de ruido.

Asúmase que en un salón particular, la diferencia promedio entre el nivel sonoro de la voz del maestro y el nivel del ruido de fondo del salón producido por el sistema de aire acondicionado es de 10 dB en la posición de los estudiantes a 3 m. del maestro. Con estos 10 dB de relación señal-a-ruido, la comprensión de la voz del maestro es probablemente satisfactoria como se discutió en la sección de inteligibilidad del habla. Pero si la distancia a los estudiantes se duplica a 6 m., la relación señal-a-ruido se reducirá a unos 4 dB (asumiendo que el ruido de fondo permanece constante). A la distancia de 9 m. el nivel del sonido directo generado por el maestro se reduce unos 10 dB y la relación señal-a-ruido es 0 dB, con muy poca inteligibilidad. Así que es muy importante mantener el nivel del ruido de fondo en valores aceptables en todo el salón si se desea conservar una relación señal-a-ruido apropiada y con ello una buena inteligibilidad del habla.

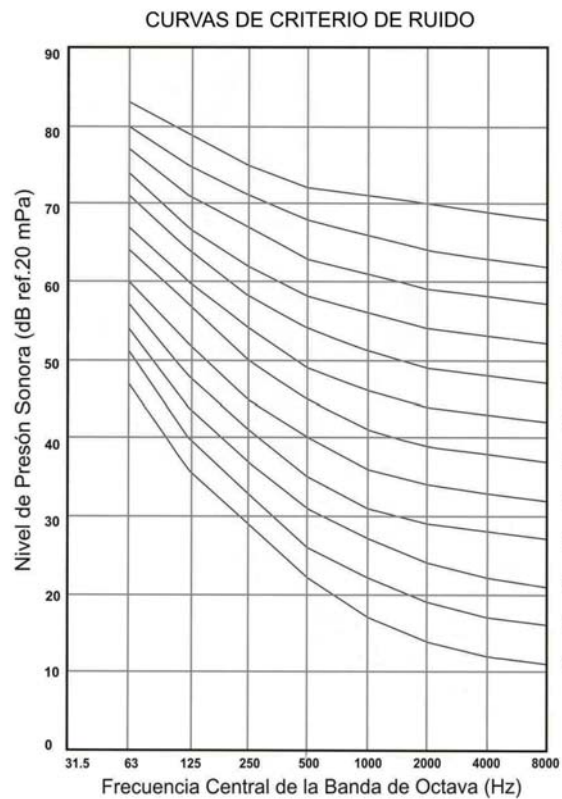


Fig. 19. Curvas de criterios de ruido.

BIBLIOGRAFÍA

La información contenida en esta publicación no intenta reemplazar a un consultor acústico profesional, sino ayudar en la comprensión de los elementos que producirán condiciones deseables de aprendizaje. Para mayor información sobre acústica de recintos y control de ruido pueden consultarse las siguientes publicaciones:

- M. Mehta, J. Johnson and J. Rocafort. Architectural Acoustics, Principles and Design. Prentice Hall, Columbus, Ohio, 1999.
- W. J. Cavanaugh & J. A. Wilkes. Architectural Acoustics, Principles and Practice. John Wiley and Sons, New York, 1999.
- C. M. Salter (Ed.). Acoustics, Architecture, Engineering, the Environment. William Stout Publishers, San Francisco, 1998.

- C. M. Harris. Noise Control in Buildings. Institute of Noise Control Engineering, Poughkeepsie, New York, 1997
- R.E. Apfel. Deaf Architects and Blind Acousticians? A Guide to the Principles of Sound Design. Apple Enterprises Press, New Haven, Connecticut, 1998
- M. D. Egan. Architectural Acoustics. McGraw Hill, New York, 1988
- L. K. Irvine & R.L. Richards. Acoustics and Noise Control Handbook for Architects and Builders. Krieger Publishing Co., Melbourne, Florida, 1998

Para obtener copias de este documento en su versión original en inglés, por favor contacte:
Acoustical Society of America

Suite 1NO1
2 Huntington Quadrangle
Melville, NY 11747

Tel: (516) 576-2360
FAX: (516) 576-2377

Email: asa@aip.org

<http://asa.aip.org>



EL INSTITUTO MEXICANO DE ACÚSTICA
y el CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL, UNIDAD OAXACA
en el marco de la celebración del
70 Aniversario del Instituto Politécnico Nacional
Invitan al



13th CONGRESO INTERNACIONAL MEXICANO DE ACÚSTICA

11 - 13 de Octubre de 2006
OAXACA, OAXACA, MÉXICO

CONFERENCIAS, POSTERS, CURSOS, EXPOSICIÓN

Temáticas: Audio, Acústica Arquitectónica, Música, MIDI, Acústica Física, DSP, Ruido, Vibraciones Mecánicas, Bioacústica, Comunicaciones, Normas, Etc.

INSTITUCIONES PARTICIPANTES: Acoustical Society of America, Asociación Mexicana de Ingenieros y Técnicos en Radiodifusión, Cámara de la Industria de la Construcción, Del. Oaxaca, Cenidet, Centro Nacional de Metrología, Colegio de Ingenieros en Comunicaciones y Electrónica, Instituto Politécnico Nacional, Tecnológico de Veracruz, Universidad Autónoma de Nuevo León, Universidad de Guadalajara, Universidad de Guanajuato, Universidad de las Américas en Puebla, Universidad Latina de América, Universidad Tecnológica Vicente Pérez Rosales.

SEDE: Centro de Convenciones del Hotel Fortín Plaza, en Oaxaca, Oaxaca.

Límite para entrega de trabajos en extenso: 15 de julio de 2006

INFORMACIÓN

Coord. Gral. M.Sc. Sergio Beristain; sberista@hotmail.com
Apartado Postal: 12-1022, Col. Narvarte 03001 México, D. F.
TEL. (52-55) 5682-2830, 5682-5525, FAX (52-55) 5523-4742
OAXACA Coordinador: Ing. Rodolfo Martínez y Cárdenas
rodolfo_mc@yahoo.com TEL. 5729-6000 Ext. 82716