

CONDICIONES ACÚSTICAS EN AULAS DE LA UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

PACS: 43.55.Gx

Benjamín Chisca Tubío, Sergio Feijoo Juarros y José M. Alvarez Rodriguez
Grupo de Procesado de Señal, Departamento de Física Aplicada
Universidad de Santiago de Compostela
Facultad de Física, Campus Universitario Sur
15706 Santiago de Compostela. España
Tel: 981 563 100, ext. 14044
E-mail: fasergio@usc.es

ABSTRACT

Background noise levels and Reverberation Times were measured in 34 unoccupied classrooms. From these measurements, the values corresponding to different degrees of classroom occupancy were estimated, together with Speech Intelligibility. Results show that most unoccupied classrooms do not meet the required criteria, while in occupied classrooms the requirements are met only for medium/high levels of occupancy.

RESUMEN

Con la intención de caracterizar las condiciones acústicas de las aulas de la Universidad de Santiago de Compostela se han medido los valores de tiempo de reverberación y de niveles de ruido de fondo de 34 aulas desocupadas. Luego se han estimado estos mismos parámetros, así como el de la Inteligibilidad del Habla, en función del nivel de ocupación. Comparando estos resultados con los valores recomendados, se ve que las aulas desocupadas no cumplen los mínimos exigidos, mientras que para las aulas ocupadas los niveles de ocupación deben ser medios-altos.

1 - INTRODUCCIÓN

Hoy en día el lugar básico de aprendizaje, tanto a nivel escolar como universitario, es el aula, donde la interacción profesor-alumno es principalmente oral. De ahí que para que se den unas óptimas condiciones docentes y un correcto desarrollo académico del alumno, es necesaria una correcta comprensión del mensaje. Esto es lo que cuantifica la Inteligibilidad del Habla: porcentaje de mensaje hablado correctamente reconocido por el oyente (a partir de ahora nos referiremos a ella por sus sigla en inglés, **SI**: Speech Intelligibility). Existen múltiples formas y criterios para evaluar la SI, la mayoría basados en test de reconocimiento de fonemas, palabras o frases. Estos nos dan un valor de la SI en función del porcentaje de acierto en el reconocimiento del mensaje.

En la SI influyen múltiple factores. Si la analizamos desde el punto de vista de un sistema de comunicaciones, podemos entender la SI como una interacción entre un emisor (profesor) y un receptor (alumno), a través de un canal de comunicación (el aula). Así, tenemos que:

- Emisor: para caracterizarlo se suele dar su Nivel de Voz (en inglés, **SL**: Speech Level) medido en dBA. Este dependerá de características del emisor (sexo, tipo de voz,...), de la emisión (nivel y tiempo de emisión), así como del criterio de medida (distancia y tiempo de medida).
- Transmisión: vendrá determinada por:
 - Las características del aula: volumen, diseño, distribución y tamaño de superficies absorbentes. Todo esto incide directamente en el valor que tomará el Tiempo de Reverberación (**RT**: Reverberation Time). Normalmente se toman como referencia valores de RT para 1 kHz
 - El nivel de ruido que tengamos en el aula (**NL**: Noise Level). Este es la suma del nivel de ruido de fondo con el aula desocupada (**BNL**: Background Noise Level) y el nivel de ruido debido a la actividad de los alumnos (**SAL**: Student Activity Noise Level). Para cuantizarlo se suelen dar medidas de Nivel Sonoro Equivalente realizadas durante un tiempo que depende del tipo de ruido. Sus valores normalmente se dan en dBA.
- Receptor: además de las características fisiológicas y subjetivas del oyente, en la correcta comprensión del mensaje tiene especial importancia la distancia a la fuente, así como la diferencia entre los niveles de señal y de ruido recibidos (**SNL**: Speech-Signal to Noise Level Difference), que normalmente se miden en dBA.

Históricamente, la mayoría de los estudios sobre la SI se centran en la importancia que sobre ella tienen el RT, el NL y el SNL. La tendencia a sido relacionar valores medidos de estos parámetros con resultados de test de SI en las mismas aulas y condiciones. Repitiendo esto para un gran número de aulas y de condiciones, y utilizando luego técnicas de regresión múltiple, se han buscado ecuaciones que relacionen la inteligibilidad, un valor subjetivo, con parámetros acústicos objetivos y, por tanto, fácilmente medibles. Esto ha llevado al desarrollo de modelos de predicción y simulación de condiciones de inteligibilidad en aulas. A partir de ellos se pueden dar valores recomendados de RT, NL y SNL para una óptima SI. Un trabajo especialmente interesante de destacar en este sentido es el de Picard y Bradley [1], los cuales realizaron un compendio de la mayoría de los trabajos relacionados con el tema anteriores al año 2001. En él concluyen que para garantizar una buena inteligibilidad en las aulas sería necesario que el RT no sobrepasase los 0.7 segundos, siendo óptimo un RT de 0.5 segundos. En cuanto al nivel de ruido, este no debería exceder los 35 dBA. Por otra parte, está ampliamente consensuado que un valor mínimo aceptable de SNL sería de 6 dBA, mientras que para valores SNL superiores a 12 o 15 dBA la inteligibilidad no va a aumentar. (Todos estos valores serán los que nosotros utilicemos como referencia a lo largo de este trabajo). Debido a la dificultad de realizar mediciones en aulas ocupadas, se ha tendido a hacer la mayoría de toma de datos en aulas vacías y un número menor de medidas en aulas con un cierto grado de ocupación. A partir de estos resultados se han buscado relaciones entre valores para aulas vacías y para las mismas aulas ocupadas. Esto simplifica la tarea de medida.

El objetivo de este trabajo es hacer una evaluación inicial de las condiciones acústicas de aulas de la Universidad de Santiago de Compostela, y comprobar si se cumplen los valores recomendados. La investigación constó de dos partes:

- Primero se realizaron medidas de RT y BNL en aulas desocupadas.
- Luego hicimos una predicción de los posibles valores de varios parámetros, incluyendo la SI, en función de la ocupación. Su importancia radica en el hecho de que al aumentar la ocupación disminuye el RT, ya que aumenta la superficie absorbente, favoreciendo la SI. Pero por otro lado el aumento de ocupación hace que crezca el ruido debido a la actividad de los alumnos, lo cual perjudica a la SI. Nuestro propósito fue ver si existen valores de ocupación que optimicen la SI.

Un problema con el que nos enfrentamos durante la realización de este trabajo es la falta de homogeneidad de criterios en el campo de la acústica de aulas:

- No existe una única metodología de toma de datos, llegando incluso algunos trabajos a no especificar esta. Hay una gran disparidad en la elección de situación de los equipos de medida, tiempos de medida e incluso de parámetros de medida.
- Existen diferentes tipos de test de SI, no estando clara la relación de estos con los parámetros acústicos, ni la relación entre ellos. Últimamente se tiende a usar como estándar de medida de la SI el índice RASTI. Sin embargo, no es fácil relacionar este con el nivel de ocupación del aula.

- Además, no todas las investigaciones tienen en cuenta la importancia de las condiciones del emisor, la distancia de este al receptor, o la influencia de la ocupación sobre los parámetros relacionados con la SI.

2 - MÉTODO

Atendiendo a un criterio de mayor frecuencia de uso, se seleccionaron 34 aulas de las facultades de Biología, Farmacia, Física y Matemáticas. En general su forma era rectangular, con techo plano, habiendo alguna clase con techo inclinado. Casi todas tenían falso techo, de diferentes materiales, asientos no acolchados, suelo de terrazo, ventanas simples y paredes no tratadas acústicamente. En la tabla I aparece un resumen de sus dimensiones.

	L [m]	W [m]	H [m]	V [m ³]	N máx.
V. med. (sd)	12.1 (±4.2)	8.4 (±1.7)	3.4 (±0.8)	352 (±191)	111 (±57)
Rangos	5.8 - 20.1	6.0 - 11.9	2.5 - 5.1	112 - 241	31 - 241

Tabla I: Valores medios, desviación típica de estos (entre paréntesis) y valor máximo y mínimo para la longitud (L), ancho (W), alto (H), volumen (V) y aforo (N máx.) de las aulas estudiadas

2.1- Medidas directas realizadas en las aulas vacías:

Niveles de Ruido de Fondo (BNL):

- En cada aula se realizaron 3 medidas de Nivel Sonoro Equivalente en Ponderación A de los niveles de ruido de fondo. La duración de cada medida fue de 5 minutos.
- Las mediciones se realizaron con un sonómetro integrador tipo 1 marca Brüel & Kjaer, modelo 2260 Observer, convenientemente calibrado antes y después de cada medida.
- El sonómetro se colocó en el centro de la zona de pupitres, sobre un trípode a una altura de 1.20 metros, que se corresponde con la altura típica del oído de un alumno sentado.
- Durante las mediciones se tomó nota de las incidencias sonoras.
- Si el aula disponía de algún tipo de sistema de proyección o de renovación de aire, una de las medidas se realizó con este o estos aparatos en funcionamiento normal, obteniéndose un valor mínimo y un valor máximo de BNL por aula.

Tiempo de Reverberación (RT):

- En cada aula se realizaron 3 o 4 medidas de Tiempo de Reverberación para 1 kHz.
- Se usó un reproductor de ruido rosa, un amplificador de señal, una fuente omnidireccional dodecahédrica y un sonómetro integrador tipo 1 marca CESVA, modelo SC-30.
- La fuente dodecahédrica se colocó en el centro del aula, a una altura de 1.4 m. El sonómetro se colocó en 3 o 4 posiciones distantes de la fuente por lo menos 1.4 metros y por lo menos 1 m de cualquier superficie.
- Como valor de RT a 1 kHz se tomó el promedio de las medidas.

2.2- Predicción de valores para aulas ocupadas:

A continuación detallamos las ecuaciones y modelos utilizados para predecir la variación de una serie de parámetros con n , la ocupación del aula. Previamente a su utilización comprobamos que el rango de validez de estos modelos coincidiera con nuestras condiciones experimentales:

- Tiempo de Reverberación a 1 kHz, $RT(n)$:

$$RT_{Ocupada}(n) = \frac{0.16 \cdot V}{A_{Vacía} + n \cdot 0.81}, [s] \quad (1)$$

donde V es el volumen útil en m^3 del aula vacía, $A_{vacía}$ la absorción total en m^2 del aula vacía, n el número de alumnos y 0.81 la absorción media a 1 kHz de una persona en m^2 . Esta no es más que una corrección del valor de la ecuación de Sabin para campo difuso para tener en cuenta el efecto de los alumnos. La justificación de su uso radica en que predice razonablemente bien cambios debidos a pequeñas variaciones en la absorción [2].

- Nivel de Ruido, $NL(n)$:

$$NL(BNL, n) = 10 \cdot \log(10^{0.1 \cdot BNL} + 10^{0.1 \cdot SAL(n)}) , \text{ [dBA]} \quad (2)$$

De [3] tenemos que:

$$SAL(n) = 83 + 10 \cdot \log(n) - 34.4 \cdot \log(A_{LLena}) + 0.081 \cdot A_{LLena} , \text{ [dBA]} \quad (3)$$

donde $A_{LLena} = A_{vacía} + (n \text{ máx.}) \cdot 0.81 \text{ [m}^2\text{]}$ es la absorción del aula completamente llena.

- Diferencia Señal Ruido, $SNL(r, BNL, n)$:

$$SNL(r, BNL, n) = SL(r, n) - NL(BNL, n) , \text{ [dBA]} \quad (4)$$

El cálculo de $SL(r, n)$ se basa en un método predictivo empírico [2]. Este utiliza unos parámetros simples para caracterizar el aula. Como valor de referencia del nivel de voz original usa el de un hombre adulto medio, hablando hacia los alumnos con un esfuerzo vocal entre normal y elevado, de pie, quieto, cerca del encerado:

$$SL(r, n) = I_{vacía} + s_{vacía} \cdot \frac{\log(r)}{\log(2)} + 10 \cdot \log\left(\frac{1/(4\pi \cdot r^2) + 1/A_n}{1/(4\pi \cdot r^2) + 1/A_{vacía}}\right) , \text{ [dBA]} \quad (5)$$

$$I_{vacía} = 65.79 - 0.0105 \cdot L \cdot W + 1.5198 \cdot fw - 1.4061 \cdot abs - 4.3186 \cdot ups , \text{ [dBA]} \quad (6)$$

$$s_{vacía} = -1.208 - 0.0877 \cdot L + 1.1401 \cdot bas , \text{ [dBA]} \quad (7)$$

r : distancia, en metros, de la fuente al oyente

L : longitud del aula en metros

W : ancho del aula en metros

fw : distancia del profesor a la pared más cercana en metros

$abs = 1$ si el aula tiene superficies absorbentes, 0 en caso contrario

$ups = 1$ si el aula tiene asientos acolchados, 0 en caso contrario

$bas = 1$ si el aula no tiene ningún material absorbente, 0 si lo tiene

- Inteligibilidad del Habla, $SI(SNL, RT)$ [4]:

$$SI(SNL, RT) = 2.26 \cdot SNL - 0.0888 \cdot SNL^2 - 13 \cdot RT + 95 , \text{ [%]} \quad (8)$$

Esta ecuación se basa en el Fairbanks Rhyme Test como medio de valoración de la inteligibilidad. Para este test, un criterio (el que nosotros usaremos) de valor mínimo que garantice una Inteligibilidad óptima es el de 97 % [5].

Tras usar este modelo nos encontramos con que tiene dos limitaciones algebraicas:

- Alcanza un valor máximo para $SNL=12.725$ dBA. Para valores mayores SI no responde al comportamiento lógico con el SNL . Tomamos este valor máximo de SNL como un valor de saturación: todo valor de SNL mayor de 12.725 dBA lo sustituimos por él.

- Aunque da valores en tanto por cien, a veces llega a superar el 100 %. Este problema ya lo recogía el trabajo original. No le dimos importancia, considerando que la ecuación sólo nos permite hacer una estimación cualitativa de la inteligibilidad del aula.

3 - RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1 mostramos los valores de RT y BNL medidos para cada aula, así como los valores máximos recomendados.

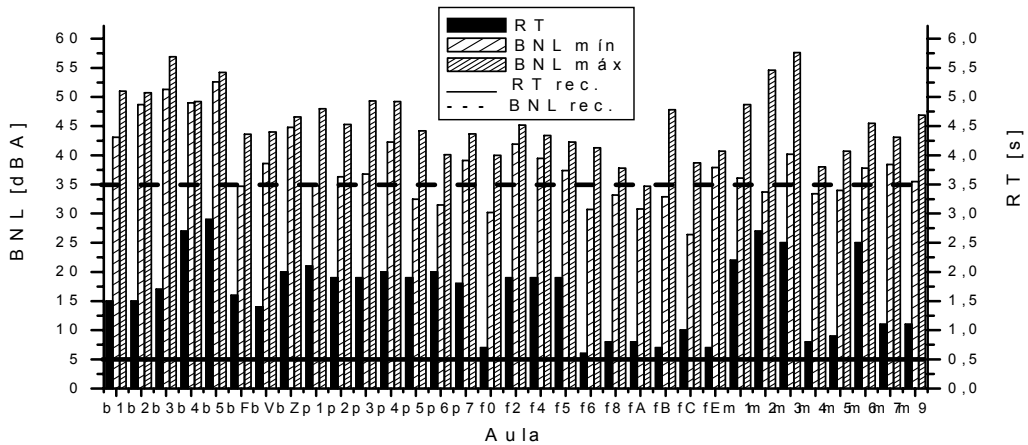


Figura 1: Valores medidos de BNL , máximo y mínimo, y RT para cada aula y valores máximos recomendados (rec.)

Como se puede apreciar, todas las aulas superan el valor de RT máximo. En cuanto al BNL., los valores de BNL máximo superan el valor recomendado, mientras que poco menos de la mitad (15 aulas) cumplen con el valor recomendado cuando tenemos BNL mínimo.

A continuación mostramos las gráficas obtenidas para un aula particular usando los modelos de predicción para aulas ocupadas (fig. 2). El comportamiento fue similar para todas las aulas

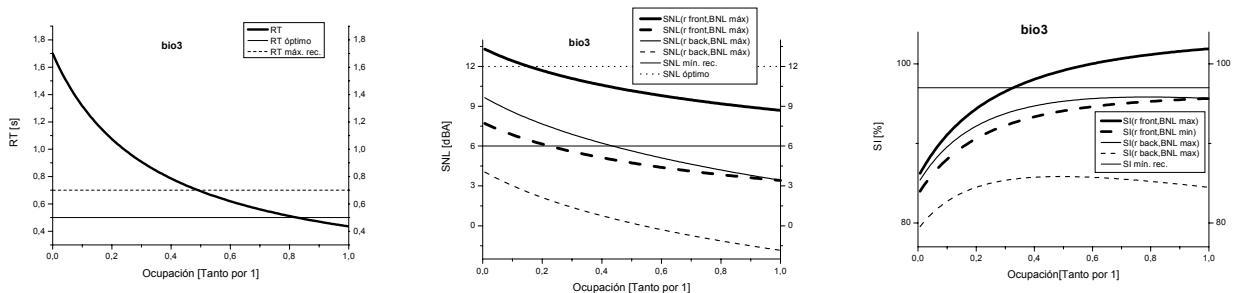


Figura 2: Gráficas de RT, SNL y SI en función del nivel de ocupación, en tantos por uno, de la distancia profesor-alumno y del valor de BNL, junto con los niveles recomendados (rec.), para un aula particular (aula 3 de Biología).

Podemos ver que tanto el RT como el SNL decrecen con la ocupación, mientras que la SI crece con esta. Buscando los puntos de corte con los valores recomendados podemos obtener el rango de ocupación que cumple con el criterio de RT máximo y SNL mínimo, por un lado, y con el criterio de SI mínimo, por otro lado. A continuación, en la tabla II, mostramos los valores medios, así como sus desviaciones típicas (entre paréntesis) de los valores de ocupación mínimos, para RT y SI, y máximos, para SNL, necesarios para cumplir con cada uno de los criterios. Para simplificar, damos un valor promediado sobre los resultados de BNL máx.

y BNL mín., para dos distancias a la fuente: *r front*, mínima distancia y *r back*, mayor distancia alumno-profesor.

	RT < 0.5 [s]	RT < 0.7 [s]	SNL > 6 [dBA]	SNL > 12 [dBA]	SI > 97 [%]
<i>r front</i>	> 0.75 (±0.26)	> 0.44 (±0.28)	< 0.97 (±0.15)	< 0.79 (±0.33)	> 0.30 (±0.27)
<i>r back</i>	> 0.75 (±0.26)	> 0.44 (±0.28)	< 0.79 (±0.33)	< 0.49 (±0.44)	> 0.44 (±0.39)

Tabla II: Resultados promedios y (desviaciones típicas) de los valores de ocupación, en tantos por uno, a partir de los cuales se empieza a cumplir cada uno de los criterios recomendados.

De este cuadro sacamos seis rangos de ocupación recomendados, en función del criterio usado y de la distancia profesor-alumno:

- Según el criterio de RT y SNL óptimos (RT < 0.5 s, SNL > 12 dBA), la ocupación debería estar comprendida en intervalo 0.75-0.79 para *r front*, mientras que para una distancia *r back* no habría un valor de ocupación que cumpliera a la vez con las dos condiciones, (RT < 0.5 → n. ocup. > 0.75, SNL > 12 dBA → n. ocup. < 0.49)
- Según el criterio de RT máximo y SNL mínimo (RT < 0.7 s, SNL > 6 dBA), la ocupación debería estar en 0.44-0.97 para *r front*, y en 0.44-0.79 para *r back*.
- Según el criterio de SI > 97 %, para *r front* deberíamos tener un nivel de ocupación mayor del 0.30, mientras que para *r back* este debería ser mayor del 0.44.

4 - CONCLUSIONES

- Las aulas vacías no cumplen con los valores recomendados de RT y BNL.
- En la predicción para aulas ocupadas:
 - El nivel de ocupación juega un papel fundamental en las magnitudes acústicas y en la inteligibilidad.
 - Tendremos valores aceptables de SI para ocupaciones medias – altas.
 - Los resultados de los criterios de valoración de la Inteligibilidad usados difieren entre sí. El modelo de la SI no recoge la particularidad de la merma de SNL con el aumento de la ocupación para posiciones alejadas del alumno con respecto al profesor.
 - Existe una diferencia apreciable entre los niveles de ocupación que cumplen con los valores recomendados para posiciones cercanas y para posiciones alejadas del profesor.
 - Los resultados obtenidos para SI y SNL serían más desfavorables si hubiéramos usado como referencia el nivel de habla de una mujer, ya que este en promedio es 2.6 dB inferior [6].

REFERENCIAS

- [1] M. Picard, J. S. Bradley, "Revisiting Speech Interference in Classrooms", *Audiology*, 40, 221-244, (2001).
- [2] M. Hodgson, "Empirical Prediction of Speech Levels and Reverberation in Classrooms", *Journal of Building Acoustics*, 8 (1), 1-14, (2001).
- [3] M. Hodgson, R. Rempel y S. Kennedy, "Measurement and Prediction of Typical Speech and Background-Noise Levels in University Classrooms During Lectures", *J. Acoust. Soc. Am.* 105 (1), 226-233, (1999).
- [4] J. S. Bradley, "Speech Intelligibility Studies in Classrooms", *J. Acoust. Soc. Am.* 80 (3), 846-854, (1986).
- [5] S. R. Bistafa y J. S. Bradley, "Reverberation Time and Maximum Background-Noise Level for Classrooms from a Comparative Study of Speech Intelligibility Metrics", *J. Acoust. Soc. Am.* 107 (2), 861-875, (2000).
- [6] M. Hodgson, "Rating, Ranking and Understanding Acoustical Quality in University Classrooms", *J. Acoust. Soc. Am.* 112 (2), 568-575, (2002).