

DETERMINACIÓN DEL *JUST NOTICEABLE DIFFERENCE (JND)* DE PARÁMETROS ACÚSTICOS MEDIANTE CAMPOS SONOROS REALES

PACS: 43.55.Hy

San Martín, R; Lopetegui, K; Arana, M.
Laboratorio de Acústica, Departamento de Física
Universidad Pública de Navarra
Campus de Arrosadía, 31006, Pamplona
Tel: 948 168 541
Fax: 948 169 565
E-mail: ricardo.sanmartin@unavarra.es

ABSTRACT

In the field of Architectural Acoustics, *just notice difference (jnd)* is considered to the minimal variation in the value of an acoustic parameter detectable by the listener. Despite the apparent approval by the scientific community of the *jnd* results, the difficulty to determine them should not be underestimated. This paper proposes the use of real sound fields and auralizations-based psychoacoustic test for determining the *jnd* of three of the most important parameters: Early Decay Time (EDT), Clarity (C_{80}) and Loudness (G).

RESUMEN

En el campo de la Acústica Arquitectónica, se considera *just noticeable difference (jnd)* a la mínima variación en el valor de un parámetro acústico perceptible por el oyente. A pesar de la aparente aprobación por parte de la comunidad científica de los resultados obtenidos para los *jnd*, no se debería subestimar la dificultad a la hora de determinarlos. En este trabajo se propone el uso de campos sonoros reales y test sicoacústicos basados en auralizaciones para la determinación del *jnd* de tres de los parámetros más importantes: *Early Decay Time* (EDT), *Clarity* (C_{80}) y *Loudness* (G).

INTRODUCCIÓN

El *jnd*¹ de un parámetro acústico es actualmente aceptado por la comunidad científica como el mejor indicador de cara a conocer la percepción subjetiva provocada por una variación en dicho parámetro. Puede usarse en muchas áreas: ofrece una orientación sobre la precisión con la que deberían medirse los parámetros acústicos objetivos; establece la precisión con que los modelos computacionales deberían ser capaces de simular un recinto; y es una herramienta

¹ También puede encontrarse en la literatura como ‘difference limen’ o ‘differential threshold’.

fundamental para los acústicos para conocer si una alteración en el diseño de una sala será realmente apreciada por la audiencia.

Existen en la bibliografía diversos estudios relativos a la sensibilidad del oyente a cambios en el campo sonoro en recintos. Los más antiguos entre los comúnmente citados fueron realizados por W. Reichardt y W. Schmidt [1] en la década de los 60. Establecían valores para los entonces denominados '*difference limens*' para el nivel y retardo de las reflexiones individuales de una respuesta al impulso. Posteriormente fue posible convertir estos valores en '*difference limens*' para los parámetros objetivos asociados con la claridad musical y la impresión espacial. Desde las medidas realizadas por W. Reichardt se ha avanzado mucho en el conocimiento de las características de los campos sonoros en salas en términos de parámetros objetivos, así como en la preferencia del oyente asociada con esos parámetros. Ha sido además posible crear simulaciones de campos sonoros que tuvieran parámetros habitualmente encontrados en salas y dentro del rango subjetivamente preferido.

En 1993, investigadores de la universidad de Salford (UK) [2] publicaron un artículo que es tomado como referencia en la actualidad. En él se midieron los *jnd* de varios parámetros fundamentales a la hora de determinar la calidad de una sala de conciertos: fracción lateral LF, coeficiente de correlación cruzada interaural IACC, tiempo central T_S y claridad C_{80} , pero sobre todo se establecía un sistema de simulación de campo sonoro creado dentro de una cámara anecoica que sirvió como referencia para posteriores estudios.

Los *jnd* obtenidos en el estudio de T.J. Cox y otros similares, fueron finalmente resumidos por I. Bork [3] en su artículo relativo al segundo '*Round Robin*' de simulación de acústica de salas, y son los que habitualmente se toman como referencia. El único cambio con respecto a sus valores que se ha introducido desde entonces, consistente en aumentar el *jnd* de la claridad de 0.5 dB a 1 dB, ya fue adelantado también por I. Bork y está basado en el trabajo realizado por J.S. Bradley [4] en 1999. La Tabla I muestra los *jnd* asociados a los distintos parámetros acústicos. Cabe destacar que para los tiempos de reverberación (T_{30} y EDT) el valor del *jnd* es relativo, estableciéndose como un porcentaje del valor del parámetro.

Tabla I. Parámetros acústicos junto con su *jnd* asociado.

Parámetro	<i>jnd</i>
EDT, T_{20} , T_{30}	5 % s
D_{50}	5 %
C_{50} , C_{80}	1 dB
T_S	10 ms
G	1 dB
LF	0.05
IACC	0.08

Sin embargo, los resultados obtenidos por I. Bork parecen mucho menores que lo que la experiencia práctica sugiere como apropiados. La determinación de los *jnd* no sólo se ve afectada por la complejidad de los campos sonoros utilizados y del cuidadoso control de todas las posibles variables, sino por el método psicométrico en sí mismo. En este contexto, parece adecuado advertir que otros autores han determinado valores mayores para los *jnd*, como R. Höhne [5], quien situó el *jnd* para C_{80} en campos sonoros reales alrededor de los 2.5 dB. Estos resultados fueron confirmados por I.B. Witew [6] mediante la utilización de campos sonoros sintéticos.

Por tanto, es necesario destacar que todavía no existe un consenso definitivo que acepte por igual toda la comunidad científica. De hecho, tampoco es posible encontrar *jnd* diferentes que dependan de la banda de frecuencia a estudiar – según los investigadores que los proponen, éstos sólo son válidos para la banda de 1 kHz – o del valor absoluto del parámetro, como cabe

suponer que pasa en la realidad, por lo que todavía queda camino por recorrer de cara a un acuerdo final.

En este contexto se enmarca el objetivo principal de este trabajo, donde se propone el uso de campos sonoros reales y test sicoacústicos basados en auralizaciones para la determinación del *jnd* de tres de los parámetros más importantes: Early Decay Time (EDT), Clarity (C_{80}) y Loudness (G). Además, se comparan los resultados con los encontrados en la literatura, obtenidos mediante la creación de campos sonoros sintéticos controlados.

SELECCIÓN DE RESPUESTAS AL IMPULSO

Las señales a comparar se han obtenido a partir de convoluciones de pasajes musicales grabados en cámara anecoica con IRs medidas en distintas salas y auditorios – Pablo Sarasate, Gayarre y Baluarte (Pamplona), Kursaal (San Sebastián) y Mozart (Zaragoza). Con la pretensión de que el valor del resto de parámetros se mantuviera constante y únicamente el estudiado mostrara variaciones, se seleccionaron IRs cuyos T_{30mid} fueran iguales, analizándose un total de tres subconjuntos o ‘Caso Base’ con T_{30mid} de 1.1, 1.9 y 2.8 s.

Dentro de cada ‘Caso Base’ se han seleccionado IRs cuyos EDT_{mid} , $C_{80}(3)$ y G_{mid} variaran al menos 3 *jnd*. De esta forma, el *jnd* obtenido para la figura de mérito correspondiente estaría directamente relacionado con la sensación subjetiva asociada a cada parámetro; viveza, claridad y sonoridad, respectivamente.

En la Tabla II se muestran los rangos de variación en el valor de las diferentes figuras de mérito estudiadas para cada ‘Caso Base’ y su correspondencia en *jnd* según la Tabla I.

Tabla II. Rango de valores analizado para cada figura de mérito y ‘Caso Base’.

Caso Base	T_{30mid} (s)	Rango EDT_{mid} (s)	Rango EDT_{mid} (<i>jnd</i>)	Rango $C_{80}(3)$ (dB)	Rango $C_{80}(3)$ (<i>jnd</i>)	Rango G_{mid} (dB)	Rango G_{mid} (<i>jnd</i>)
I	1.1	0.7 - 1.2	9.1	2.8 - 6.0	3.2	2.5 - 6.6	4.1
II	1.9	1.4 - 1.9	5.3	-1.9 - 2.2	4.1	1.6 - 5.8	4.2
III	2.8	2.4 - 2.9	3.6	-3.2 - 1.3	4.5	2.9 - 6.5	3.6

El hecho de que las IRs provengan de salas reales y no hayan sido sintetizadas de forma controlada, puede provocar la presencia de variables no deseadas en nuestro estudio. Como puede observarse en la Figura 1, pese a que los tiempos de reverberación para un determinado conjunto de señales seleccionadas fueron similares, la distribución frecuencial de los valores del parámetro G – y otros parámetros no representados - no es uniforme. De esta forma, los sujetos, además de juzgar la diferencia en el parámetro analizado, pueden verse influenciados por las diferencias entre las características de las señales seleccionadas.

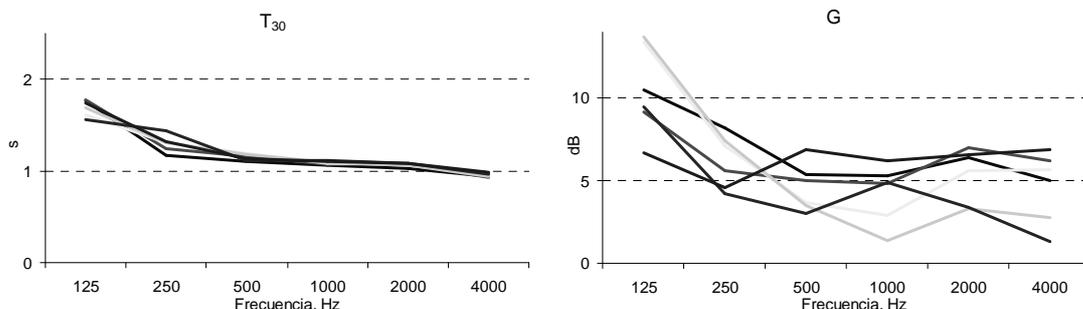


Figura 1. T_{30} (izda) y G (dcha) de las IRs seleccionadas en el estudio de G_{mid} - ‘Caso Base I’.

ELABORACIÓN DEL TEST

Los pasajes musicales [7] utilizados han sido fragmentos de entre 10 y 15 segundos de: Mendelssohn (4th. Mov – Symphonie N°3 in a minor) para el estudio del EDT_{mid} ; Mozart (Overture: Le nozze di Figaro) para el $C_{80}(3)$; y Glinka (Overture: Ruslan and Lyudmila) para el estudio del G_{mid} . Los sujetos que realizaron el test no recibieron ningún tipo de entrenamiento ni instrucción previa, tan solo se limitaban a responder si cada par de auralizaciones presentadas eran similares o diferentes.

No obstante, para facilitar la detección de posibles diferencias, se seleccionó un fragmento con finales abruptos y silencios cuando se analizaban variaciones en el parámetro EDT_{mid} , otro rápido para el caso de $C_{80}(3)$ y, por último, otro con subidas y bajadas de volumen de corta duración para el caso de G_{mid} . Cada sujeto analizaba un total de 45 pares de auralizaciones, 5 por cada parámetro y 'Caso Base'. Un total de 40 sujetos, con edades comprendidas entre 20 y 60 años y sin deficiencias auditivas reconocidas, respondieron al test. Algunos de ellos poseían conocimientos musicales y asistían a conciertos con frecuencia. Sin embargo, la mayoría pueden considerarse como no expertos en acústica, por lo que el conjunto puede considerarse representativo del oyente medio.

El método elegido para la realización del test fue el de comparaciones forzadas por pares. Este método es apropiado cuando las diferencias entre dos estímulos son mínimas. Limitar el número de estímulos a comparar al mismo tiempo a únicamente dos ayuda al sujeto que realiza el test a permanecer concentrado y no distraerse con cualquier cosa que pudiera influenciar su decisión. Se descartó usar una escala relativa para los estímulos a comparar porque aunque la información obtenida hubiera sido mayor, exigía un entrenamiento previo del sujeto y es un método que resulta muy complicado cuando las diferencias son sutiles. Asimismo, exceptuando cuando se deseaba estudiar la sensibilidad del oyente a cambios en la sonoridad, se realizó una equivalencia energética entre cada par de señales involucradas en cada prueba que minimizara la posible influencia de la diferente distancia fuente-receptor para cada IR obtenida.

El test estaba totalmente automatizado y controlado por un programa en MATLAB R2006a diseñado a tal efecto. Las melodías se presentaban a los sujetos mediante auriculares Sennheiser HD25 conectados a la salida de una tarjeta Creative Technology Ltd. Sound Blaster Audigy. Esta solución se considera suficiente para este estudio. Se prestó especial atención a las salas donde se realizaron las encuestas, eligiendo aquellas que presentaban menor ruido de fondo.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de los resultados se han establecido dos criterios distintos. Por un lado, según el criterio utilizado por Bradley [4], el *jnd* se establece como el valor de la diferencia detectada por un 50% de los sujetos extrapolando los resultados obtenidos con el test mediante una línea de tendencia polinomial de segundo orden. Sin embargo, resulta destacable que alrededor de un 30% de sujetos² ya detecta diferencias cuando ambas melodías son exactamente iguales en prácticamente todos los 'Casos Base' estudiados. Este hecho ya fue destacado por Bradley [4], que obtenía porcentajes del 20%, y lo achacó a que las diferencias entre los diferentes

² Curiosamente fueron los oyentes 'expertos' los que más detectaban diferencias no existentes, a pesar de que en general sus resultados eran bastante más coherentes que los de los 'inexpertos' que, por ejemplo, no apreciaban diferencias cuando éstas eran de 4 *jnd* y sí cuando eran de 0.5 *jnd*. De hecho, discriminar aquéllos sujetos que erraban en dicha comparación no mejoró los resultados, obteniéndose porcentajes muy similares en la mayoría de los casos.

estímulos eran tan pequeñas que podrían conllevar conjeturas incorrectas tanto en ése como posiblemente en el resto de casos. Por ello, se ha efectuado también un análisis estadístico basado en el método Chi-Cuadrado que permite examinar si un conjunto de datos mantienen una determinada tendencia o si, por el contrario, los sujetos responden al azar influenciados por el método de comparación forzada, para lo que es necesario aumentar el número de sujetos hasta al menos los 40 utilizados, frente a los únicamente 10 del estudio mencionado. Con este segundo método se establecería el *jnd* cuando el conjunto de datos manifiesten una clara tendencia hacia el “sí” con un grado de significación de $p < 0.05$. Tal y como se aprecia en la Tabla III, donde se representan los resultados obtenidos para el parámetro $C_{80}(3)$ y ‘Caso Base II’, esta diferencia de criterios conllevaría que mientras el *jnd*, según el primer criterio, podría establecerse alrededor de 0.6 jnds, aumentaría hasta situarse entre 1 y 2 jnds si pretendiéramos otorgar a los resultados significación estadística.

Tabla III. Resultados obtenidos en el parámetro $C_{80}(3)$ para el ‘Caso Base II’

Total/Diferencia (jnd)	0	0,5	1	2	4
Si	13	18	25	40	34
No	27	22	15	0	6
%	33	45	63	100	85
<i>Chi</i>	4,90	0,40	2,50	40,00	19,60
	No (95%)			Si (95%)	

Del análisis global de resultados se desprende que no existe tendencia a variar el *jnd* correspondiente con la magnitud de $C_{80}(3)$ o G_{mid}^3 aunque sí, tal y como se preveía, para el caso del EDT_{mid} . Por tanto, los resultados tanto para la claridad como la sonoridad fueron agrupados de cara a obtener un *jnd* apropiado para todo el rango de condiciones acústicas habitualmente presentes en salas de conciertos.

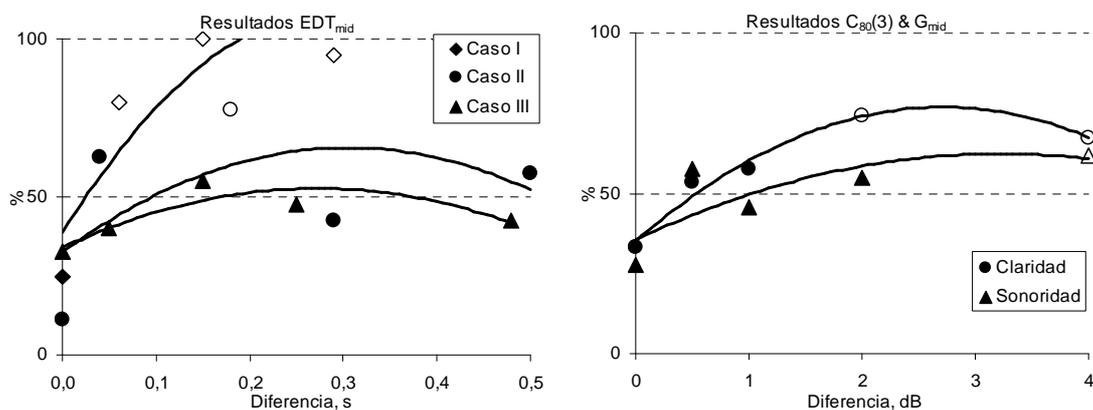


Figura 2. Porcentaje de sujetos que apreciaron diferencias entre cada par de melodías analizadas para el EDT_{mid} y cada ‘Caso Base’ (izda) y $C_{80}(3)$ y G_{mid} (dcha) agrupando los resultados de todos los ‘Caso Base’. Cuando el punto es transparente, el resultado obtenido puede considerarse estadísticamente significativo según la prueba Chi-cuadrado.

³ Aunque se apreció una mayor dificultad para detectar diferencias cuando los tiempos de reverberación eran muy altos, como en el ‘Caso Base III’, a partir de los datos disponibles es precipitado sacar una conclusión al respecto, teniendo en cuenta que dichos tiempos de reverberación, cercanos ya a los tres segundos, no son muy habituales en un auditorio.

En la Figura 2 se representan los resultados obtenidos para los tres parámetros analizados. A la izquierda, el análisis del parámetro EDT_{mid} para cada uno de los tres 'Caso Base'. Siguiendo el análisis realizado por Bradley [4] el jnd se establecería en torno al 5.5% del valor del parámetro prácticamente en los tres casos, si bien únicamente se obtendrían resultados estadísticamente significativos para el 'Caso Base I'.

En cuanto a los otros dos parámetros (Figura 2.dcha), de los resultados obtenidos y siguiendo el criterio anterior, el jnd se situaría en 0.6 dB para la claridad y 1 dB para la sonoridad, aunque aumentaría hasta posicionarse entre 1 y 2 dB y entre 2 y 4 dB respectivamente si pretendiéramos obtener resultados estadísticamente significativos.

Conviene apuntar que diferencias de esta magnitud son difíciles de detectar incluso en una situación experimental controlada. La procedencia y características de las IRs seleccionadas han podido influir en las decisiones de los sujetos que, además de estimar la diferencia en el parámetro analizado, probablemente juzgaron las diferencias en la distribución frecuencial de los valores de los parámetros en dichas IRs. Es probable que un exhaustivo entrenamiento de los sujetos hubiera conllevado cambios en los resultados obtenidos. Sin embargo, se cree que la aproximación utilizada en este experimento, consistente en la selección de un amplio rango de oyentes, produce resultados que pueden aplicarse más generalmente a situaciones habituales en salas de conciertos.

CONCLUSIONES

Se han determinado los jnd de las figuras de mérito EDT_{mid} , $C_{80}(3)$ y G_{mid} mediante campos sonoros reales y test sicoacústicos basados en auralizaciones. Los resultados son similares a los encontrados en la literatura, si bien algo mayores si se utiliza un método de significación estadístico para analizarlos, situándose en torno al 5.5% para el EDT_{mid} , 1-2 dB para $C_{80}(3)$ y 2-4 dB para G_{mid} . Debido a la dificultad para aislar las diferentes características de las IRs seleccionadas, lo que ha provocado incoherencias en las respuestas obtenidas, estos resultados deben ser tomados como preliminares y no debería descartarse un entrenamiento previo de los sujetos que vayan a responder a tests como el aquí analizado.

REFERENCIAS

- [1] Reichardt W., Schmidt W., "The detectability of changes in sound field parameters for music", *Acustica* 18, 274-282, 1967.
- [2] Cox T.J., Davies W.J., Lam Y.W., "The sensitivity of listeners to early sound field changes in auditoria", *Acustica* 79, 27-41, 1993.
- [3] Bork I., "A comparison of room simulation software – the 2nd round robin on room acoustical computer simulation", *Acta Acustica united with Acustica* 86, 943-956, 2000.
- [4] Bradley J.S., Reich R., Norcross S.G., "A just noticeable difference in C50 for speech", *Applied Acoustics* 58(2), 99-108, 1999.
- [5] Höhne R., Stroth G., "Zur Wahrnehmbarkeit von Deutlichkeits- und Durchsichtigkeitsunterschieden in Zuhörersälen" (The visibility of definition and clarity parameters in concert halls", *Acustica* 81, 309-319, 1995.
- [6] Witew I.B., "Is the perception of listener envelopment in concert halls affected by clarity? Fortschritte der Akustik - Proceedings of DAGA'06, Braunschweig (DE), 2006.
- [7] Denon Records PG-6006, "Anechoic orchestral music recording", Audio CD, 1988.