



## DISFUNCIONES EN LA PENALIZACIÓN POR TONALIDAD EN EL RD 1367/2007

Miguel Arana Burgui<sup>1\*</sup>  
Rubén Eguinoa Cabrito<sup>1</sup>  
Ana Valencia Leoz<sup>1</sup>  
Ricardo San Martín Murugarren<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Depto. de Ciencias. Instituto INAMAT2. Universidad Pública de Navarra

### RESUMEN

El RD 1367/2007 penaliza los niveles sonoros por la existencia de componentes tonales. La penalización puede ser de hasta 6 dB dependiendo de dos factores. En la redacción actual, dos ruidos indistinguibles pueden diferir (su penalización) en hasta 6 dB. Por otra parte, el criterio seguido por el RD se basa, exclusivamente, en el análisis en bandas de tercio de octava. Esto no tiene relación con las normativas (UNE-EN 61400-11, por ejemplo) que regulan la tonalidad y su correspondiente audibilidad. En el presente trabajo se ejemplifican las graves disfunciones a que da lugar la redacción actual. También se lleva a cabo un estudio comparativo y de correlación entre la audibilidad tonal y la penalización contemplada en el RD, a fin de analizar la coherencia entre audibilidad de los tonos y su correspondiente penalización.

### ABSTRACT

RD 1367/2007 penalizes sound levels for the existence of tonal components. The penalty can be up to 6 dB depending on two factors. In the current wording, for two indistinguishable noises, their penalty can differ by up to 6 dB. On the other hand, the criterion followed by the RD is based, exclusively, on the analysis in one-third octave bands. This has no relation with the standards (UNE-EN 61400-11, for example) that regulate tonality and its corresponding audibility. This paper exemplifies the serious dysfunctions to which the current wording gives rise. A comparative and correlation study is also carried out between tone audibility and the penalty covered in the RD, in order to analyze the coherence between tone audibility and its corresponding penalty.

**Palabras Clave**— Tonalidad, RD 1367/2007, Audibilidad.

### 1. INTRODUCCIÓN

El apartado 2 del Anexo I del RD 1367/2007 [1] define el *Nivel de ruido continuo equivalente*,  $L_{Aeq,T}$  como el índice básico para la valoración y evaluación del ruido. No obstante, en el punto c) del mismo apartado introduce correcciones al mismo, definiendo el *Índice de ruido continuo equivalente corregido*  $L_{K_{eq},T}$ . El índice de ruido  $L_{K_{eq},T}$ , es el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, ( $L_{Aeq,T}$ ), corregido por la presencia de componentes tonales emergentes, componentes de baja frecuencia y ruido de carácter impulsivo, de conformidad con la expresión siguiente:

$$L_{K_{eq},T} = L_{Aeq,T} + K_t + K_f + K_i \quad (1)$$

donde:

–  $K_t$  es el parámetro de corrección asociado al índice  $L_{K_{eq},T}$  para evaluar la molestia o los efectos nocivos por la presencia de componentes tonales emergentes.

–  $K_f$  es el parámetro de corrección asociado al índice  $L_{K_{eq},T}$ , para evaluar la molestia o los efectos nocivos por la presencia de componentes de baja frecuencia.

–  $K_i$  es el parámetro de corrección asociado al índice  $L_{K_{eq},T}$ , para evaluar la molestia o los efectos nocivos por la presencia de ruido de carácter impulsivo.

calculados, todos ellos, por aplicación de la metodología descrita en el anexo IV. El proceso para evaluar la molestia o los efectos nocivos por la presencia de componentes tonales emergentes es el siguiente:

a) Se realiza el análisis espectral del ruido en 1/3 de octava, sin filtro de ponderación.

b) Se calcula la diferencia:

$$L_t = L_f - L_s \quad (2)$$

donde:

$L_f$  es el nivel de presión sonora de la banda  $f$ , que contiene el posible tono emergente.

\* **Autor de contacto:** marana@unavarra.es

**Copyright:** ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

$L_s$  es la media aritmética de los dos niveles siguientes, el de la banda situada inmediatamente por encima de  $f$  y el de la banda situada inmediatamente por debajo de  $f$ .

c) Se determina la presencia o la ausencia de componentes tonales y el valor del parámetro de corrección  $K_t$  aplicando la tabla siguiente (Tabla 1):

**Tabla 1.** Corrección por la presencia de componentes tonales

Banda de frecuencia 1/3 de octava	Lt en dB	Componente tonal Kt en dB
De 20 a 125 Hz	Si $L_t < 8$	0
	Si $8 \leq L_t \leq 12$	3
	Si $L_t > 12$	6
De 160 a 400 Hz	Si $L_t < 5$	0
	Si $5 \leq L_t \leq 8$	3
	Si $L_t > 8$	6
De 500 a 10.000 Hz	Si $L_t < 3$	0
	Si $3 \leq L_t \leq 5$	3
	Si $L_t > 5$	6

d) En el supuesto de la presencia de más de una componente tonal emergente se adopta como valor del parámetro  $K_t$ , el mayor de los correspondientes a cada una de ellas.

La razón de introducir penalizaciones está motivada por estudios que han mostrado que ruidos con idéntico nivel  $L_{Aeq}$  inducen diferente molestia por características específicas del ruido. Así, por ejemplo, los ruidos intensos de baja frecuencia parecen producir síntomas claros, como trastornos respiratorios y dolor auditivo. Se ha observado que los juicios de sonoridad y las reacciones de molestia son mayores con los ruidos de baja frecuencia que con otros ruidos para un mismo nivel de presión sonora. Aunque los efectos de intensidades más bajas de ruido de baja frecuencia son difíciles de establecer por razones metodológicas, las pruebas sugieren que una serie de efectos adversos del ruido en general se derivan de la exposición al ruido de baja frecuencia [2]. Cabe decir, no obstante que las molestias parecen depender del nivel sonoro y que hay también trabajos en los que no se encontraron efectos asociados a la pérdida de audición con la exposición a ruidos de baja frecuencia [3]. La cuantificación de esta penalización requiere, simplemente, la medida con los filtros  $A$  y  $C$ .

Respecto a la penalización por la característica impulsiva, la cuantificación de esta penalización es muy simple; Se mide, preferiblemente de forma simultánea, los niveles de presión sonora continuo equivalente con ponderación frecuencial  $A$ ,  $L_{Aeq}$ , así como el mismo índice, pero con ponderación temporal impulso  $I$ ,  $L_{AeqI}$ . Se cuantifica la penalización en función de la diferencia entre ambos. Se sigue manteniendo el uso de la ponderación temporal impulso, aunque su introducción estuvo motivada para que los sonómetros analógicos pudieran mostrar de forma aproximada, el nivel del impulso (de duración muy breve) al

usuario. En realidad, se penalizan como impulsivos sonidos-ruidos que, razonablemente, no lo son; por ejemplo, la voz humana. Un análisis crítico de esta penalización puede verse en [4]. En el presente trabajo, discutiremos la penalización por componentes tonales.

## 2. TONALIDAD DE UN RUIDO. MEDIDA, EVALUACIÓN Y MOLESTIA.

Ruido tonal es un ruido caracterizado por la presencia de componentes de una determinada frecuencia o banda estrecha que son distinguibles respecto del sonido global, cuya percepción conlleva un aumento de la molestia asociada (RAE). Es obvio que esta definición es cualitativa. Un problema a la hora de ‘cuantificar’ tal definición es que los requisitos para que un sonido-ruido posea tonalidad los define la norma concreta que se utilice. Por ejemplo, el ancho de banda que se utilice (octavas, tercios, doceavos, banda crítica) depende del criterio que establezca la norma. La ‘distinguibilidad’ puede requerir un incremento del nivel (respecto a bandas contiguas) diferente. Una norma puede concluir que un tono es audible y otra norma puede concluir que no.

Las normas que se basan en estudios fisiocústicos y sicoacústicos bien contrastados son, evidentemente, preferibles. Así, por ejemplo, las normas UNE ISO 1996-2 [5] (junto con el documento ISO/PAS 20065 [6] para determinar la audibilidad de los tonos) y UNE-EN 61400-11 [7], definen con gran precisión los siguientes aspectos:

- a) Identificación de máximos locales (posibles tonos).
- b) Ancho de banda del análisis (típicamente, 2 Hz).
- c) Establecimiento del ancho de banda crítica.
- d) Cálculo del nivel medio del ruido enmascarado
- e) Determinación del nivel de tono.
- f) Cálculo de la tonalidad y audibilidad tonal.

En su anexo J, La norma UNE ISO 1996-2 propone el ajuste tonal siguiente a partir de la audibilidad media (Tabla 2).

**Tabla 2.** Ajuste tonal en función de la audibilidad media

Audibilidad media $\Delta L$ en dB		Ajuste tonal $K_T$ en dB
	$\Delta L \leq 0$	0
0 <	$\Delta L \leq 2$	1
2 <	$\Delta L \leq 4$	2
4 <	$\Delta L \leq 6$	3
6 <	$\Delta L \leq 9$	4
9 <	$\Delta L \leq 12$	5
12 <	$\Delta L$	6

Debido a la precisión de la evaluación subjetiva del ruido, la misma norma propone simplificar el ajuste tonal a solo dos valores:  $K_t = 3$  dB para  $2 \text{ dB} < \Delta L \leq 9 \text{ dB}$  y  $K_t = 6$  dB para  $\Delta L > 9 \text{ dB}$ . Por supuesto,  $K_t = 0$  dB para  $\Delta L \leq 2 \text{ dB}$ . Esta simplificación es la que adoptan tanto el RD 1367/2007 como

decretos autonómicos (a comentar posteriormente) y legislaciones análogas de países europeos.

Finalmente, en su anexo K (método de inspección), la norma UNE ISO 1996-2 propone una nueva simplificación. Para determinar la presencia de un tono, se compara el nivel de presión sonora en una banda de tercio de octava con los niveles de las bandas adyacentes. Para que se identifique como tono, su nivel debe exceder al de las adyacentes en una diferencia de nivel constante. Es importante dejar constancia de que la norma no dice que la comparación sea con el promedio de niveles de las bandas adyacentes. Posteriormente veremos cómo este añadido en el RD lleva a disfunciones claras. Las diferencias de nivel constante pueden variar con la frecuencia. Las posibles opciones que plantea son las adoptadas por el RD, es decir, 15 dB en las bandas de tercio de octava de baja frecuencia (25 a 125 Hz), 8 dB en las bandas de frecuencia media (160 a 400 Hz) y 5 dB en las bandas de alta frecuencia (500 Hz a 10 kHz). Como resumen de este apartado podemos decir lo siguiente. Las normas bien fundamentadas y contrastadas ([5], [7]) definen y evalúan con precisión el carácter tonal de un ruido en función de su audibilidad. Dada la relativa complejidad del proceso, proponen algunas simplificaciones. Tanto el RD como los decretos autonómicos adoptan tales simplificaciones en aras a la practicidad de las evaluaciones acústicas.

### 3. ASPECTOS PROBLEMÁTICOS EN LA PENALIZACIÓN POR TONALIDAD EN EL RD 1367/2007

#### 3.1. Comparativa con bandas adyacentes.

Un primer aspecto que resulta muy problemático (más bien, totalmente ilógico) es la penalización de sonidos sin, ciertamente, componente tonal. No existe ninguna frase en el RD en donde se defina qué es una componente tonal. Importa la comparación entre una banda y el promedio de sus limítrofes. Pondremos un ejemplo muy claro de esta posible disfunción. Lo haremos con sonidos recogidos de bases de datos públicas [8]. Se ha tomado un ruido de fondo (principalmente, tráfico) de duración 13 s. Se ha tomado un registro sonoro (13 s) de una aspiradora (Asp). Tal sonido se ha ecualizado incrementado en 7 dB su nivel en la banda de 6,3 kHz (Asp Eq). La figura 1 muestra las señales temporales de los tres ruidos. La figura 2 muestra el análisis espectral de los tres ruidos en bandas de tercio de octava. Debe notarse que, al ser los tres sonidos recogidos de una base de datos, los niveles medidos para los dos aspiradores no incluyen el ruido de tráfico. En la medida real, los niveles medidos para ambos aspiradores, incluirían el ruido de fondo. Observando la potencia espectral del RF, no cambiaría en nada los análisis y conclusiones que siguen, ni en el nivel global en dB o dBA, ni existencia de componentes tonales debidas al RF.

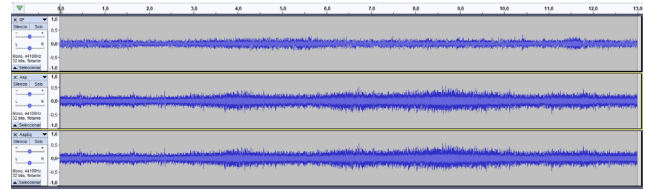


Figura 1. Señales temporales. Ruido de fondo (RF), aspirador (Asp) y aspirador ecualizado (AspEq).

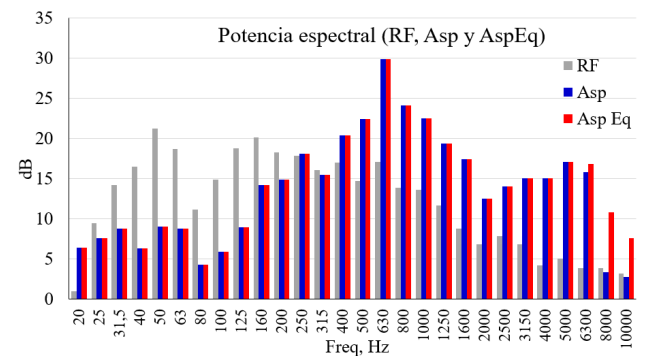


Figura 2. Análisis espectral de los tres ruidos en bandas de tercio de octava.

Los niveles en banda ancha para los dos aspiradores (sin ponderación y con ponderación A) son idénticos, 33,5 dB y 31,9 dBA. El RD ‘detecta’ un tono puro emergente en la banda de tercio de 630 Hz, penalizando el índice  $L_{K,eq}$  en 6 dBA; A la vista de la gráfica de la potencia espectral, ello resulta bastante razonable y acorde tanto con la norma UNE ISO 1996-2 [5] como con la con UNE-EN 61400-11 [7]. No obstante, también ‘detecta’ un tono puro emergente en la banda de tercio de 6,3 kHz. Si no existiera el tono en 630 Hz, el índice  $L_{K,eq}$  se vería penalizado en 6 dBA, debido a este ‘tono’ en 6,3 kHz. Sin embargo, observando el espectro (barras azules) no se intuye ningún tono emergente. Todavía más, ni siquiera el nivel en la banda de 6,3 kHz es superior al de la banda de 5 kHz. La razón es que el promedio de las bandas contiguas (5 y 8 kHz) es inferior en más de 5 dB al nivel de la banda de 6,3 kHz. Si el aspirador tuviera un nivel 7 dB más en la banda de 8 kHz (barras rojas) la penalización por tonalidad sería nula

Una primera premisa razonable sería la de exigir que la posible componente tonal posea nivel superior a las bandas contiguas. Esto se exige tanto en [5] como en [7], en el sentido de que el posible tono tenga un máximo local en el espectro. En nuestro caso, sería necesario añadir (al menos) que la posible componente tonal supere, en nivel, al de las bandas contiguas. Así, por ejemplo, lo especifica el Decreto 213\_2012 del Gobierno Vasco [9] requiriendo que el tono sea emergente de tal forma que destaque con respecto a las bandas inmediatamente anterior y posterior. Adicionalmente (lo cual complica la evaluación) también requiere que el tono sea audible según el umbral auditivo humano, en campo libre,

referenciado en la norma ISO 226:2003 [10]. También admite que, en el caso de que sea necesario, se pueden efectuar análisis en banda más estrecha que los 1/3 de octava cuando sea oportuno y siempre bajo normas internacionalmente reconocidas para su evaluación. En definitiva, este Decreto corrige la exigencia de máximo local y el requerimiento de audibilidad del tono, admitiendo análisis más detallados sobre la tonalidad.

El Decreto 176\_2009 [11] de la Generalitat de Catalunya es similar al RD, con dos particularidades. Por una parte, también requiere que el tono sea audible según el umbral auditivo humano, en campo libre, especificando en una tabla el valor mínimo audible ( $T_f$ ) para todas las bandas de tercio entre 20 Hz y 20 kHz. Por otra parte, como aspecto diferenciador, para determinar el valor de  $L_t$ , tanto  $L_f$  (nivel sonoro de la banda que contiene el tono emergente) como  $L_s$  (media aritmética de los niveles de las bandas inferior y superior) son el resultado de la media energética de tres mediciones consideradas válidas. Esto no se considera así ni en el RD ni en el Decreto vasco. Puede darse el caso de que alguna de tales medidas no cumpla los criterios de existencia de tono emergente y el promedio de ellas sí y viceversa.

Los rangos para la penalización en las distintas zonas de frecuencias son idénticos en el RD y en el Decreto 213\_2012 del Gobierno Vasco. Por el contrario, en el caso del Decreto 176\_2009 de la Generalitat de Catalunya, para la penalización de 6 dB en la zona de bajas frecuencias (20 a 125 Hz), se requiere que el valor de  $L_t$  sea superior a 15 dB, en vez de los 12 dB que requieren los dos primeros. En este aspecto, coincide con [5]. Otra referencia normativa es el Decreto 266/2004 de la Generalitat Valenciana [12]. En este caso, el tratamiento de la tonalidad es bastante más sencillo. Solo considera los rangos superiores del valor  $L_t$ , penalizando en una cantidad fija (5 dB) cuando dicho valor supera los 15, 8 y 5 dB en las zonas de 20-125 Hz, 160-400 Hz y 500-10.000 Hz, respectivamente.

### 3.1. Tonalidad en la frontera de bandas.

Otra disfunción del RD se produce cuando ‘la causa’ de la tonalidad se ubica en una zona de frecuencias entre dos bandas de tercio de octava, de tal forma que el nivel sonoro de las dos bandas que comparten tal componente se ‘reparten’ la energía entre ambas. Si tal componente se desplaza ligeramente a izquierda o derecha, pasa a contribuir bien a una o a otra banda. Aunque la sensación sonora pueda ser *exactamente* igual en cuanto a la percepción de la tonalidad (en base a normas más específicas, [5] [7]), la diferencia de penalización puede ser fácilmente de 3 dB (incluso de 6 dB). Lo mostraremos (descriptiva y auditivamente) con un ejemplo.

Se ha medido un ruido con componente tonal en torno a la frecuencia de 630 Hz. Su potencia espectral se muestra en la figura 3 (barras azules). Hemos desplazado la componente tonal ligeramente hacia la derecha; aproximadamente, un

tono musical, hasta 707 Hz. La potencia espectral de este segundo ruido se muestra también en la figura 3 (barras rojas). Los niveles de ambos ruidos son, esencialmente, idénticos, 43,2 y 43,1 dB (40,9 y 41,0 dBA). Sin embargo, aplicando la penalización por tonalidad del RD, el primer ruido se penaliza con 6 dB y el segundo no se penaliza. Por tanto, los niveles  $L_{K,eq}$  de tales ruidos son, finalmente, 46,9 y 41,0 dBA, lo cual supone una gran diferencia. La gráfica resulta bastante ‘engañosa’; El espectro del primer ruido muestra una ‘clara’ tonalidad, cuando el segundo no parece tonal (o, de otra forma, parece ‘bitonal’). Sin embargo, la tonalidad de ambos ruidos ([6], [7]) es, esencialmente, idéntica. Bajo análisis de bandas críticas, la tonalidad sería prácticamente idéntica, como se muestra en la figura 4, donde se ha realizado análisis de tonalidad en base a la banda crítica (diferente para las dos frecuencias) según la norma [7]. Esta diferente percepción es realmente algo artificial, producto de llevar a cabo el análisis en bandas de tercio de octava.

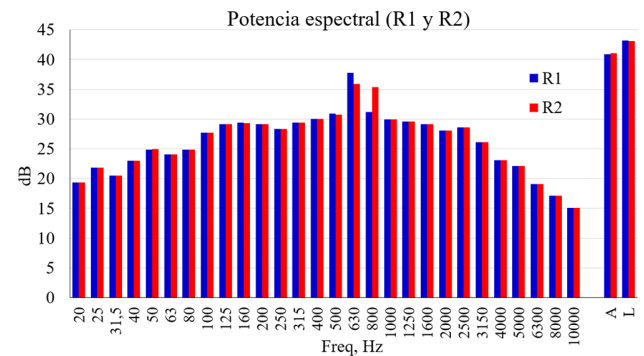


Figura 3. Análisis espectral de dos ruidos con componente tonal ligeramente desplazada

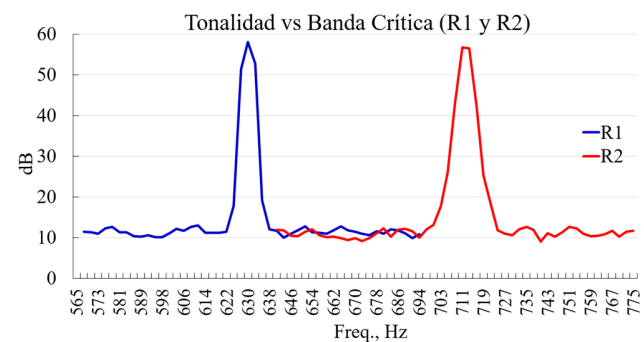


Figura 4. Tonalidad vs banda crítica, según UNE-EN 61400-11.

## 4. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS

Las Normas que describen con mayor precisión la medida y evaluación de la tonalidad ([5] [7]) requieren de un análisis de banda estrecha para calcular (dentro de una banda crítica) los niveles de tono y de ruido enmascarado para, finalmente, determinar la penalización en función de la audibilidad de los

tonos. De esta forma ([5], Anexo J, método de ingeniería) se cuantifica la penalización (ajuste tonal  $Kt$ ) en pasos de 1 dB, desde 0 dB hasta 6 dB, para diferentes rangos de audibilidad, de 0 dB en adelante. Debido a la precisión de la evaluación subjetiva del ruido, el mismo Anexo sugiere simplificar el ajuste tonal a solo dos valores, 3 y 6 dB, para audibilidades entre 2 y 9 dB, o superiores a 9 dB, respectivamente. En todo este proceso, insistimos, el análisis espectral ha de ser en banda estrecha, básicamente, con anchura de 2 Hz.

La misma norma ([3], Anexo K, método de inspección) admite que para determinar la presencia de un componente espectral de frecuencia discreta prominente (tono) se puede comparar el nivel en una banda de tercio de octava con los niveles de las bandas adyacentes. Se exige que el nivel de la banda 'tonal' exceda al nivel (promediado) de las contiguas. La percepción de la tonalidad cambia con la frecuencia. Las opciones que aporta el Anexo son: 15 dB en las bandas de tercio de octava de baja frecuencia (25 a 125 Hz), 8 dB en las bandas de frecuencia media (160 a 400 Hz) y 5 dB en las bandas de alta frecuencia (500 a 10.000 Hz).

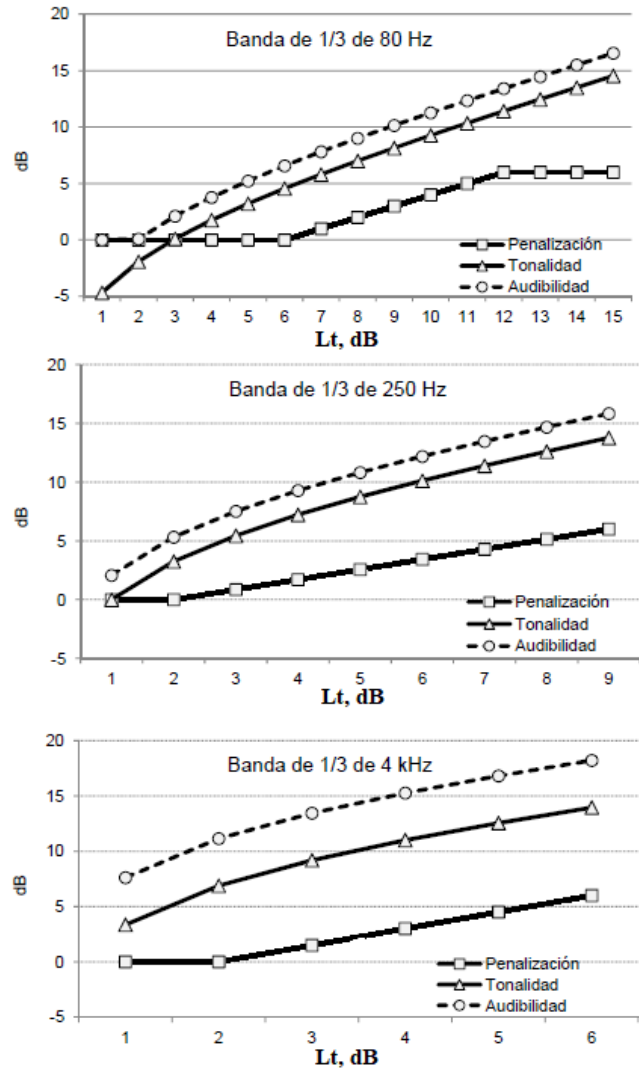
Tanto el RD 1367/2007 como los decretos autonómicos comentados ([5] [7]) se basan en estos dos Anexos para fijar únicamente dos posibles penalizaciones por tonalidad (3 ó 6 dB) según la diferencia  $Lt$  y según la zona de frecuencias. En el Decreto [8] la penalización es única, 5 dB, cuando se supere un valor dado de  $Lt$ . Esta forma de penalización es la simplificada que adopta el Anexo K (método de inspección) de la norma UNE-ISO 1996-2 [3].

Trabajos previos han analizado la correlación entre la tonalidad y su penalización correspondiente en base al RD 1367/2007 [13], proponiendo una penalización más coherente (y perfectamente correlacionada con la audibilidad) para las componentes tonales emergentes a aplicar en dicho RD, la cual mantiene los rangos de penalización mínimos y máximos, pero evitando los saltos bruscos de la misma. Asimismo, solo se lleva a cabo penalización cuando la tonalidad supera los 5 dB. Recuperamos tal propuesta en la tabla 3

**Tabla 3.** Propuesta de corrección por la presencia de componentes tonales. La penalización se redondearía al valor del entero más próximo.

Banda de 1/3 de octava, Hz	$Lt$ en dB	Penalización $Kt$ en dB
De 20 a 125	Si $Lt < 6$	0
	Si $6 \leq Lt \leq 12$	$Lt - 6$
	Si $Lt > 12$	6
De 160 a 400	Si $Lt < 2$	0
	Si $2 \leq Lt \leq 9$	$(6/7)*Lt - (12/7)$
	Si $Lt > 9$	6
De 500 a 10.000	Si $Lt < 2$	0
	Si $3 \leq Lt \leq 6$	$1,5*Lt - 3$
	Si $Lt > 6$	6

La figura 5 muestra en forma gráfica de penalización (versus tonalidad-audibilidad) para los tres rangos de frecuencia: 20-125 Hz, 160-400 Hz y 500-10000 Hz, si bien ejemplificados en las bandas de tercio de octava de 80 Hz, 250 Hz y 4 kHz.



**Figura 5.** Tonalidad, audibilidad y propuesta de penalización para los tres rangos de frecuencia: 20 – 125 Hz, 160 – 400 Hz y 500 – 10.000 Hz, ejemplificados en 80 Hz, 250 Hz y 4 kHz.

Las grandes capacidades de los equipos digitales actuales y la relativa facilidad para el uso de programas y aplicaciones que se pueden implementar [14] tanto por los fabricantes como por los usuarios, permiten la evaluación rigurosa de los niveles sonoros, incluidos los términos correctores. La simplificación de la medida (en ocasiones, injustificada) puede llevar a notables disfunciones.

## 6. CONCLUSIONES

En nuestra opinión, se producen disfunciones en el RD 1367/2007 en lo relativo a la tonalidad, tal como hemos intentado mostrar en el presente trabajo. Estimamos conveniente corregir/modificar/añadir (al menos) algunos aspectos para conseguir adecuar la penalización por tonalidad a la percepción humana.

1. Debiera exigirse que la posible componente tonal supere, en nivel, al de las bandas contiguas; es decir, que se trate de un máximo local en el análisis espectral, bien sea este en tercios, doceavas o en bandas críticas. Si el análisis lo fuera en tercios de octava, sería razonable exigir que la banda con posible tono superara en 3 dB el nivel de las adyacentes y el tono fuera audible según el umbral auditivo humano.

2. La evaluación de la tonalidad, basada en el análisis en bandas de tercio de octava lleva a minusvaloraciones de la misma cuando la/s componente/s tonal/es se encuentran en la frontera de dos bandas. Las gráficas espectrales del análisis en tercios de octava pueden resultar muy engañosas, no mostrando tonalidad cuando tal tonalidad es evidente. En caso de detectarse ‘tonalidad’ en dos bandas contiguas (1/3 de octava) se debiera exigir análisis en bandas críticas.

3. Las diferencias en los niveles finales, debidas a las dos consideraciones anteriores, pueden llevar a ‘errores’ (diferencias) de 6 dB en la valoración del ruido.

4. Se propone una penalización más coherente (y perfectamente correlacionada con la audibilidad) para las componentes tonales emergentes a aplicar en el RD, la cual mantiene los rangos de penalización mínimos y máximos, pero evitando los saltos bruscos de la misma

5. La simplificación que usa el RD 1367/2007 para la penalización por tonalidad y que lleva a posibles disfunciones, no está justificada (en nuestra opinión) dadas las grandes capacidades de los equipos digitales actuales y la relativa facilidad para el uso de programas y aplicaciones que se pueden implementar en el análisis de las medidas.

Con tales equipos y herramientas, pueden aplicarse (de forma relativamente fácil) normas internacionalmente reconocidas para la evaluación de la tonalidad.

## 12. REFERENCIAS

- [1] RD1367/2007. BOE núm. 254, de 23 de octubre de 2007. Ref. BOE-A-2007-18397, 2007.
- [2] Berglund B, Hassmén P, Job RF. Sources and effects of low-frequency noise. *J Acoust Soc Am*. 1996 May;99(5):2985-3002. doi: 10.1121/1.414863. PMID: 8642114, 1996.
- [3] Zhou, G.; Fu, W. Total serum bilirubin levels and sensorineural hearing loss in the US adolescents: NHANES 2007–2010. *Int. J. Pediatric Otorhinolaryngol*. 105, 20–26, 2018.

[4] Barti Domingo, Robert. Incorrecciones en la evaluación de componentes impulsivas, baja frecuencia y ruido de fondo. 53º Congreso Nacional de Acústica, TecniAcústica 2022. Elche, 2022.

[5] UNE-ISO 1996-2. Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 2: determinación de los niveles de presión sonora, 2020.

[6] ISO/PAS 20065. Acoustics. Objective method for assessing the audibility of tones in noise. Engineering method, 2016.

[7] UNE-EN 61400-11. Aerogeneradores. Técnicas de medida del ruido acústico, 2004.

[8] Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado (Intef). Ministerio de Educación y Formación Profesional. Acceso: mayo de 2023. <https://procomun.intef.es>

[9] DECRETO 213/2012, de 16 de octubre, de contaminación acústica de la Comunidad Autónoma del País Vasco. BOPV nº 222, 2012.

[10] ISO 226:2003. Acoustics - Normal equal-loudness-level contours, 2003

[11] DECRETO 176/2009, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 16/2002, de 28 de junio, de protección contra la contaminación acústica, y se adaptan sus anexos. Diario Oficial de Cataluña nº 5506, 2009.

[12] DECRETO 266/2004, Conselleria de Territorio y Vivienda de la Generalitat Valenciana, *por el que se establecen normas de prevención y corrección de la contaminación acústica en relación con actividades, instalaciones, edificaciones, obras y servicios*. DOGV nº 4.901, 2004.

[13] Machín, J.; Arregui, A.; San Martín, R.; Arana, M., Análisis de la penalización por tonalidad en el RD 1367/2007 y su relación con la audibilidad tonal, VIII Congreso Iberoamericano de Acústica, acústica 2012. Évora, Portugal, 2012.

[14] Arana, Miguel; San Martín, Ricardo; Ezcurra, Amaya; Valencia, Ana; Llorente, Elena, An Efficient Algorithm for the Evaluation of Tonality and the Determination of the Tonal Frequency According to IEC 61400-11, InterNoise 2019. Madrid Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings: InterNoise19, 16-19 June, Madrid, pp. 2017-2024, 2019

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Economía e Innovación la ayuda concedida por el Proyecto BIA2016-76957-C3-2-R, en el marco del cual se comenzó este trabajo