

ANÁLISIS DE LA PENALIZACIÓN POR TONALIDAD EN EL RD 1367/2007 Y SU RELACIÓN CON LA AUDIBILIDAD TONAL

Machín, J.; Arregui, A.; San Martín, R.; Arana, M.

Departamento de Física. Universidad Pública de Navarra
Campus de Arrosadia. 31006. Pamplona. Spain
marana@unavarra.es

Resumen

El RD 1367/2007 (al igual que la mayoría de las ordenanzas y normativas para el control del ruido) penaliza los niveles sonoros por la existencia de componentes tonales emergentes. La penalización puede ser de hasta 6 dB dependiendo de la banda de tercio de octava donde se encuentra la componente tonal y de la diferencia entre el nivel sonoro en la banda donde se encuentra el tono y los niveles de las bandas adyacentes. Por otra parte, existe normativa (UNE-EN 61400-11, por ejemplo) para determinar la tonalidad (y su correspondiente audibilidad) de cualquier tipo de ruido.

En el presente trabajo se lleva a cabo un estudio comparativo y de correlación entre la audibilidad tonal y la penalización contemplada en el RD 1367/2007, a fin de analizar la coherencia entre audibilidad de los tonos y su correspondiente penalización.

Palabras-clave: tonalidad, audibilidad, penalizaciones, RD 1367/2007.

Abstract

The RD 1367/2007 (like most of the bylaws and regulations relating to noise control) penalizes noise levels by the presence of emerging tonal components. The penalty could be up to 6 dB depending on the third octave band where the tonal component is located and the difference between the noise level in the tonal band and the levels of the adjacent bands. On the other hand, some standards (UNE-EN 61400-11, for example) determine the pitch and its correspondent audibility for any kind of noise.

In this paper a comparative study of correlation between tonal audibility and the penalty stipulated in the RD 1367/2007 is carried out in order to analyze the coherence between tonal audibility and its correspondent penalization.

Keywords: tonality, audibility, penalizations, RD 1367/2007.

PACS no. 43.50.Yw, 43.66.Ki.

1 Introducción

Por regla general, se utiliza el nivel sonoro continuo equivalente con ponderación A, L_{Aeq} , como el descriptor para la evaluación de la molestia que produce un ruido. No obstante, existen características del ruido que confieren al mismo una mayor molestia que lo que indica la cuantía de su L_{Aeq} [1,2]. Una de ellas es la existencia de componentes tonales. Si buena parte de la energía se concentra en una estrecha banda de frecuencias, la molestia se incrementa, lo cual está bien justificado fisiológicamente.

En concreto, El RD 1367/2007 [3] (al igual que la mayoría de las ordenanzas y normativas para el control del ruido) penaliza entre 0 y 6 dB los niveles sonoros por la existencia de componentes tonales emergentes, dependiendo la penalización de la banda de tercio de octava donde se encuentra la componente tonal y de la diferencia entre el nivel sonoro en la banda donde se encuentra el tono y los niveles de las bandas adyacentes.

Por otra parte, existe normativa para determinar la tonalidad (y su correspondiente audibilidad) de diferentes tipos de ruido (por ejemplo, UNE-EN 61400-11 [4], para ruido de aerogeneradores). La cuestión fundamental que nos planteamos en el presente trabajo es analizar la correspondencia (y coherencia) entre la audibilidad de las componentes tonales y la penalización que contempla la normativa. Dado que la casuística de los tipos de ruido es, prácticamente, infinita, será necesario sistematizar el análisis, asumiendo hipótesis simplificadoras sobre los ruidos a analizar.

2 Penalización por tonalidad en el RD 1367/2007

Para hallar la penalización por presencia de componentes tonales se realiza un análisis espectral del ruido (sin filtro de ponderación) entre las bandas de tercio de octava entre 20 Hz y 10 kHz. A continuación se calcula la diferencia:

$$L_t = L_f - L_s \quad (1)$$

donde L_f es el nivel de presión sonora de la banda f , la cual contiene el tono emergente. L_s es la media aritmética de los niveles en las bandas adyacentes (inferior y superior) a la banda f . La penalización, K_t , se obtiene aplicando la tabla 1.

Tabla 1 – Penalización por componente tonal emergente (RD 1367/2007)

Banda de 1/3 de octava, Hz	L_t , dB	K_t , dB
20 - 125	$L_t < 8$	0
	$8 \leq L_t \leq 12$	3
	$L_t > 12$	6
160 - 400	$L_t < 5$	0
	$5 \leq L_t \leq 8$	3
	$L_t > 8$	6
500 – 10.000	$L_t < 3$	0
	$3 \leq L_t \leq 5$	3
	$L_t > 5$	6

En el supuesto de la existencia de varias componentes tonales, se adopta como valor de K , el mayor de ellos.

3 Determinación de la tonalidad y audibilidad según UNE-EN 61400-11

Según esta norma, la tonalidad y audibilidad se determina basándose en un análisis de banda estrecha, típicamente, de 2 Hz, para periodos de medida de 10 s. Se requiere, en primer lugar, la identificación de máximos locales (posibles tonos). A continuación se calcula la energía ponderada en la *banda crítica* centrada en cada máximo local, sin incluir ni la línea de máximo local ni las dos líneas adyacentes. El ancho de banda crítica viene dada por:

$$\text{Ancho de banda crítico} = 25 + 75(1 + 1,4 \left[\frac{f_c}{1000}\right]^2)^{0,69} \quad (2)$$

donde f_c es la frecuencia central, en Hz, del posible tono.

El ancho de banda crítica varía desde 100 Hz, para frecuencias de 20 Hz, hasta 2,3 kHz para frecuencias de 10 kHz. Si el máximo local supera en más de 6 dB el nivel medio del *ruido enmascarado*, entonces se trata de un posible tono.

Dentro de la banda crítica, las líneas espectrales se pueden clasificar como ‘tonos’, ‘ruido enmascarado’ o ‘nada’, utilizando el siguiente procedimiento:

- Se calcula el nivel de presión sonora $L_{70\%}$ donde $L_{70\%}$ es el promedio de energía del 70% de las líneas espectrales con los niveles más bajos dentro de la banda crítica.

- Se define un criterio de nivel igual al nivel $L_{70\%}$ más 6 dB. Todas las líneas espectrales que se encuentren por debajo de este valor ($L_{70\%} + 6$ dB) serán clasificadas como *enmascaradas*.

- Se calcula $L_{pn,med}$, como el promedio de energía de las líneas espectrales clasificadas como enmascaradas.

- Se calcula $L_{pn,med} + 6$ dB. Una línea se clasifica como *tono* si su nivel excede $L_{pn,med} + 6$ dB. Sin embargo, si con la condición anterior tenemos varias líneas adyacentes clasificadas como tono, entonces habrá que añadir una restricción más a estas líneas adyacentes. Se identifica la línea con mayor nivel de energía, L_{max} , se le restan 10 dB a ese nivel energético y las líneas espectrales adyacentes que sobrepasen $L_{max} - 10$ dB entonces se clasifican como tono.

- Una línea se clasifica como ‘nada’ si no se clasifica ni como tono ni como enmascarada.

Finalmente, se determina el nivel de presión sonora del tono, L_{pt} , como la suma energética de todas las líneas espectrales clasificadas como tonos.

$$L_{pt} = 10 \cdot \text{Log} \sum_{i=1}^N 10^{L_{pti}/10} \quad (3)$$

Cuando existen líneas adyacentes clasificadas como tonos, se les aplica una corrección utilizando la ventana de Hanning. Esto requiere dividir la suma energética de las líneas adyacentes por 1,5.

El análisis anterior requiere del estudio previo de la influencia del ruido de fondo. Debe asegurarse que los tonos no son originados por el ruido de fondo. $L_{pn,med}$ debe corregirse de acuerdo con la ecuación:

$$L_s = 10 \cdot \log[10^{(0,1 \cdot L_{s+n})} - 10^{(0,1 \cdot L_n)}] \quad (4)$$

donde L_s es el nivel de la señal a estudio, L_n es el nivel del ruido de fondo y L_{s+n} es el nivel total, señal más ruido de fondo.

El nivel de ruido enmascarado, L_{pn} , se define por:

$$L_{pn} = L_{pn,med} + 10 \cdot \log \left[\frac{\text{ancho de banda crítico}}{\text{ancho de banda de ruido efectivo}} \right] \quad (5)$$

donde $L_{pn,med}$ es la energía promediada corregida de ruido de fondo de las líneas espectrales identificadas como enmascaradas dentro de la banda crítica. El ancho de banda de ruido efectivo es 1,5 veces la resolución de frecuencia, que incluye una corrección por la utilización de la ventana de Hanning.

La *tonalidad* se determina por la diferencia entre el nivel de tono, L_{pt} , y el nivel de ruido enmascarado en la banda crítica correspondiente, L_{pn} :

$$\Delta L_{tn} = L_{pt} - L_{pn} \quad (6)$$

Finalmente, para determinar la *audibilidad*, a cada valor de ΔL_f debe aplicarse una corrección dependiente de la frecuencia, a fin de compensar la respuesta del oído humano a tonos de frecuencia diferente. La *audibilidad tonal* se define por:

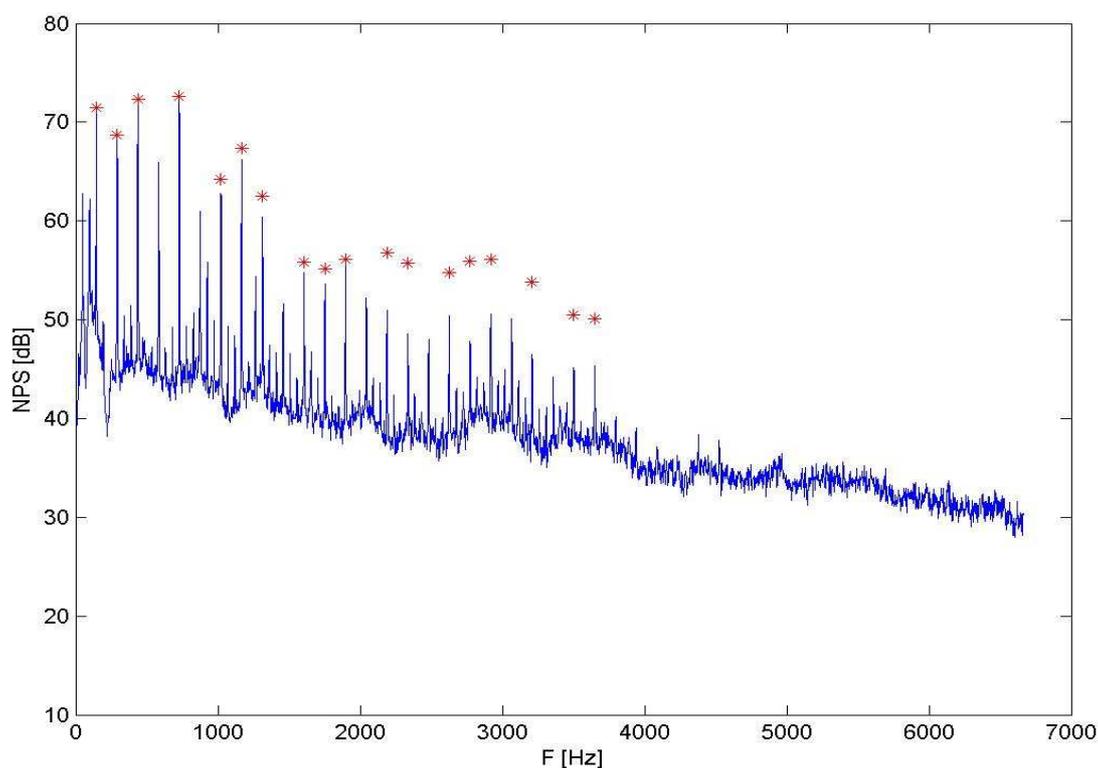
$$\Delta L_{a,f} = \Delta L_f - L_a \quad (7)$$

donde L_a es el criterio de audibilidad de frecuencia dependiente, definido como

$$L_a = -2 - \log \left[1 + \left(\frac{f}{502} \right)^{2,5} \right] \quad (8)$$

donde f es la frecuencia del tono, en Hz.

A modo de ejemplo, la figura 1 muestra el resultado del estudio de la tonalidad para un ventilador medido en cámara anecoica, con los resultados correspondientes a sus seis primeras componentes tonales (puntos rojos del gráfico).



Frecuencia (Hz)	146	292	438	730	1020	1168
L_{pt} (dB)	71,5	68,7	72,3	72,6	64,3	67,3
$L_{pn,med}$ (dB)	49,6	45,1	46,4	44,9	42,9	42,5
Tonalidad (dB)	6,6	8,1	10,1	11,2	4,0	7,1

Figura 1 – Análisis de la tonalidad para ventilador medido en cámara anecoica.

4 Correspondencia tonalidad (audibilidad)-penalización

Para analizar la correspondencia entre la tonalidad y la penalización por existencia de componentes tonales emergentes, asumiremos, en primera aproximación, la no influencia del ruido de fondo, a fin de no tener en cuenta las correcciones que ello implicaría, tanto en el cálculo de la penalización como de la tonalidad.

Generamos ruido rosa entre 20 Hz y 10 kHz. Exactamente, entre 18 Hz y 11.312 Hz. La tabla 2 muestra las bandas generadas (28 bandas de tercio de octava, 9 bandas de octava) con sus frecuencias inferior, central y superior. También se muestra el número de sub-bandas de 2 Hz que contiene cada banda (tanto de tercio como de octava) así como la amplitud de cada sub-banda de 2 Hz, a fin de que sea rosa el ruido generado. La amplitud, en cada banda de tercio de octava, es de 35 dB.

Tabla 2 – Ruido rosa generado

Banda número	Frec. Inf(Hz)	Frec. Cent(Hz)	Frec. Sup(Hz)	nº sub (1/3)	nº sub (1/1)	Amplitud sub (2 Hz)
1	18	20	22	3		30,23
2	24	25	28	3		30,23
3	30	31,5	34	3	10	30,23
4	36	40	42	4		28,01
5	44	50	54	6		28,01
6	56	63	68	7	22	26,55
7	70	80	86	9		25,46
8	88	100	110	12		24,21
9	112	125	138	14	44	23,54
10	140	160	174	18		22,45
11	176	200	220	23		21,38
12	222	250	278	29	89	20,38
13	280	315	352	37		19,32
14	354	400	444	46		18,37
15	446	500	560	58	177	17,37
16	562	630	706	73		16,37
17	708	800	888	91		15,41
18	890	1000	1120	116	353	14,36
19	1122	1250	1412	146		13,36
20	1414	1600	1778	183		12,38
21	1780	2000	2242	232	707	11,35
22	2244	2500	2826	292		10,35
23	2828	3150	3562	368		9,34
24	3564	4000	4488	463	1414	8,34
25	4490	5000	5654	583		7,34
26	5656	6300	7126	736		6,33
27	7128	8000	8978	926	2829	5,33
28	8980	10000	11312	1167		4,33

Con base en dicho ruido, el paso siguiente consiste en construir diferentes señales con incrementos de nivel en la frecuencia central de cada banda de tercio de octava, de tal forma que los *ruidos* generados tengan característica tonal (y posible penalización asociada) de diferentes intensidades.

Por ejemplo, para la banda de tercio de octava de 25 Hz, se incrementa su nivel en la frecuencia central (sub-banda de 2 Hz) en cuantía de 1 dB, hasta que el nivel en dicha banda sea de 36 dB. Se repite el proceso con incrementos de 1 dB, hasta el valor de 50 dB, en cuyo caso, la penalización es ya de 6 dB. Para las bandas centrales los incrementos van de 1 a 9 dB. Para las bandas superiores, de 1 a 6 dB. Ello implica que siempre se contemplan penalizaciones desde 0 hasta 6 dB en todas las bandas de frecuencia, de acuerdo con el RD 1367/2007. De este modo se generaron un total de 264 '*ruidos*' diferentes.

El paso siguiente consiste en calcular tanto la penalización asociada como la tonalidad (y consiguiente audibilidad) de acuerdo con la UNE-EN 61400-11. Para este último proceso se utilizó un programa desarrollado en MatLab®. Los resultados dependen, obviamente, del ruido de fondo existente, el cual puede modificar ambas características, penalización y tonalidad.

Mostraremos aquí los resultados para un ruido de fondo de nivel -10 dB en cada sub-banda en ausencia de ruido de fondo. Cabe decir que tales resultados no se ven apenas modificados por ruidos de fondo de nivel inferior en cada sub-banda. Para ruidos con diferencia menor, los resultados pueden variar notablemente. La casuística es, por supuesto, infinita. Hemos decidido un ruido de fondo de tal nivel ya que este nivel no requiere de corrección en la medida por ruido de fondo.

La figura 2 muestra la relación entre tonalidad (audibilidad) y penalización para tres bandas de tercio de octava centrales de los rangos de penalización por componente tonal emergente contemplados en el RD 1367/2007 (ver Tabla 1).

Como se observa en la figura 2, la tonalidad (y audibilidad) se incrementa en forma casi lineal. La penalización está, digamos, cuantizada. Se penalizan ruidos con componente tonal cuando la tonalidad (bajo las hipótesis aquí consideradas) alcanza valores de 7, 8.7 y 9.2 dB en las tres bandas consideradas. La penalización se mantiene constante (+3 dB) hasta que se alcanzan tonalidades de 12.5, 13.8 y 14 dB, respectivamente, en las tres bandas consideradas. Tonalidades por encima de los valores indicados no implican mayor penalización.

Entendemos que la penalización a llevar a cabo en una guía de cumplimiento debe ser relativamente simple. No obstante, el proceso de medida y cálculos asociados para cuantificar el índice de ruido continuo equivalente corregido, $L_{K_{eq,T}}$, es, de por sí, un tanto complejo, especialmente si hay que analizar la influencia del ruido de fondo en las penalizaciones por bajas frecuencias, impulsividad y tonalidad, como, de hecho, debe hacerse.

Una propuesta que mantiene los límites de penalización por componente tonal emergente, que asume sólo penalización cuando la tonalidad supera los 5 dB y que evita los ‘saltos’ bruscos de la misma (los cuales conllevan a que diferencias de más de 5 dB en la tonalidad impliquen idéntica penalización) se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 – Propuesta de penalización por componente tonal emergente

Banda de 1/3 de octava, Hz	L_t , dB	K_t , dB
20 - 125	$L_t < 6$	0
	$6 \leq L_t \leq 12$	$L_t - 6$
	$L_t > 12$	6
160 - 400	$L_t < 2$	0
	$2 \leq L_t \leq 9$	$[(6/7)*L_t] - (12/7)$
	$L_t > 9$	6
500 – 10.000	$L_t < 2$	0
	$3 \leq L_t \leq 6$	$1,5*L_t - 3$
	$L_t > 6$	6

La figura 3 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.

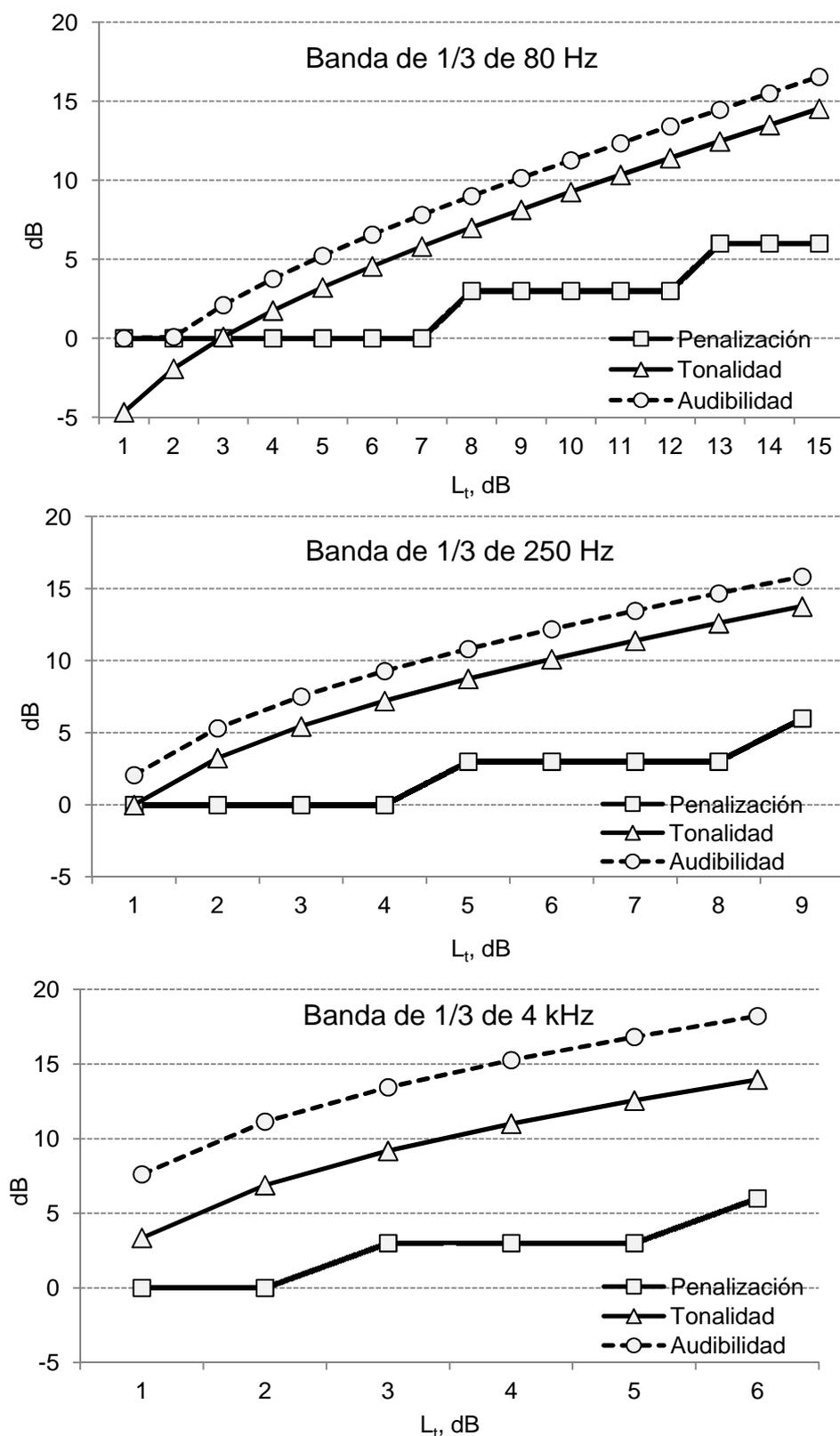


Figura 2 – Tonalidad y audibilidad versus penalización para las bandas de tercio de octava de 80 Hz, 250 Hz y 4 kHz.

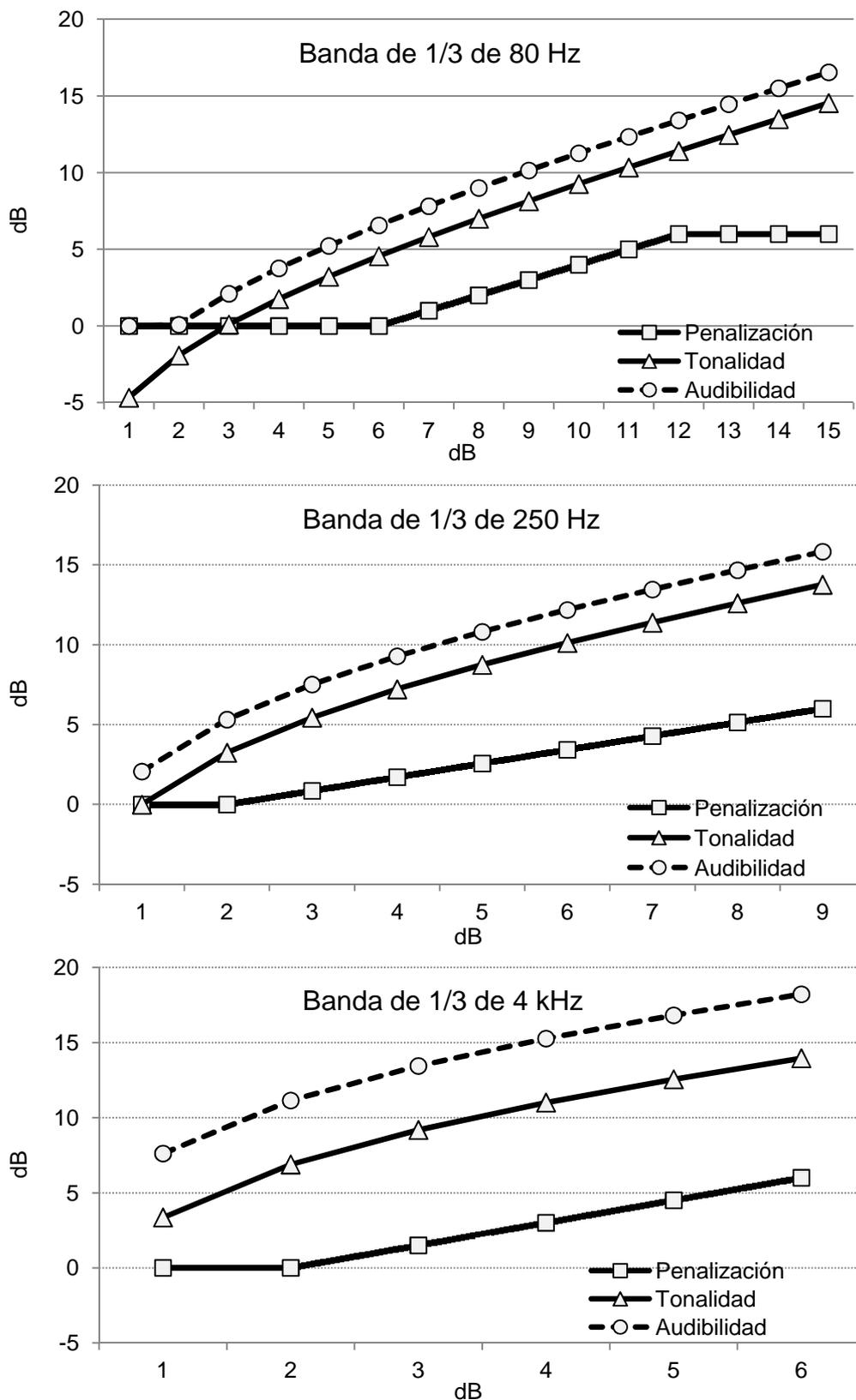


Figura 3 – Propuesta de penalización para los tres rangos de frecuencia: 20-125 Hz, 160-400 Hz y 500-10000 Hz, ejemplificados en 80, 250 Hz y 4 kHz.

5 Conclusiones

Hemos implementado un algoritmo en MatLab® para la evaluación de la tonalidad y audibilidad de acuerdo con la norma UNE-EN-61400-11.

Tras generar multitud de señales con diferente tonalidad, basada en tercios de octava (y bajo la hipótesis de ruido de fondo inferior a 10 dB respecto del de la señal a estudiar) hemos analizado la correlación entre la tonalidad y su penalización correspondiente en base al RD 1367/2007.

Finalmente, se propone una penalización más coherente (en nuestra opinión) 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.

Referencias

- [1] E. Zwicker y E. Terhardt, *Facts and models in hearing*, Springer Verlag. New York 1974.
- [2] Dau, T.; Hohmann, V. and Kollmeier, B. (Ed.), *Psychophysics, Physiology and Models of Hearing*, World Scientific Publishing, ISBN 981-02-3741-3, Singapore, 1999
- [3] RD 1367/2007, BOE n. 254, pp: 42952-73. (2007).
- [4] UNE-EN-61400-11 Aerogeneradores, Técnicas de medida de ruido acústico, 2004.