

1. Leq

Il **livello di pressione sonora equivalente (Leq)** è il principale parametro di riferimento delle norme, sia ai fini della valutazione del rischio (DL 277/91, DL 626/94), sia ai fini della valutazione del disturbo (L. 447/95 – legge quadro sull'inquinamento acustico). Quest'ultima ad esempio pone in primo luogo dei limiti massimi al Leq (in dB(A) in funzione della classe di destinazione d'uso del territorio e del periodo (diurno o notturno),

La zonizzazione acustica prevista dalla stessa legge consiste appunto nella definizione di queste classi per ogni parte del territorio. Si ricorda che tale compito spetta ai Comuni sulla base di criteri stabiliti dalle Regioni.

Il Leq relativo ad un periodo temporale T è così definito:

$$(1) \quad L_{eq} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{(L_p(t)/10)} dt \right] \quad \text{dB}$$

Dato un rumore reale, di livello fluttuante nel tempo, e considerando un periodo temporale T, il livello equivalente è il livello di un rumore costante che nel periodo considerato presenterebbe lo stesso contenuto di energia sonora.

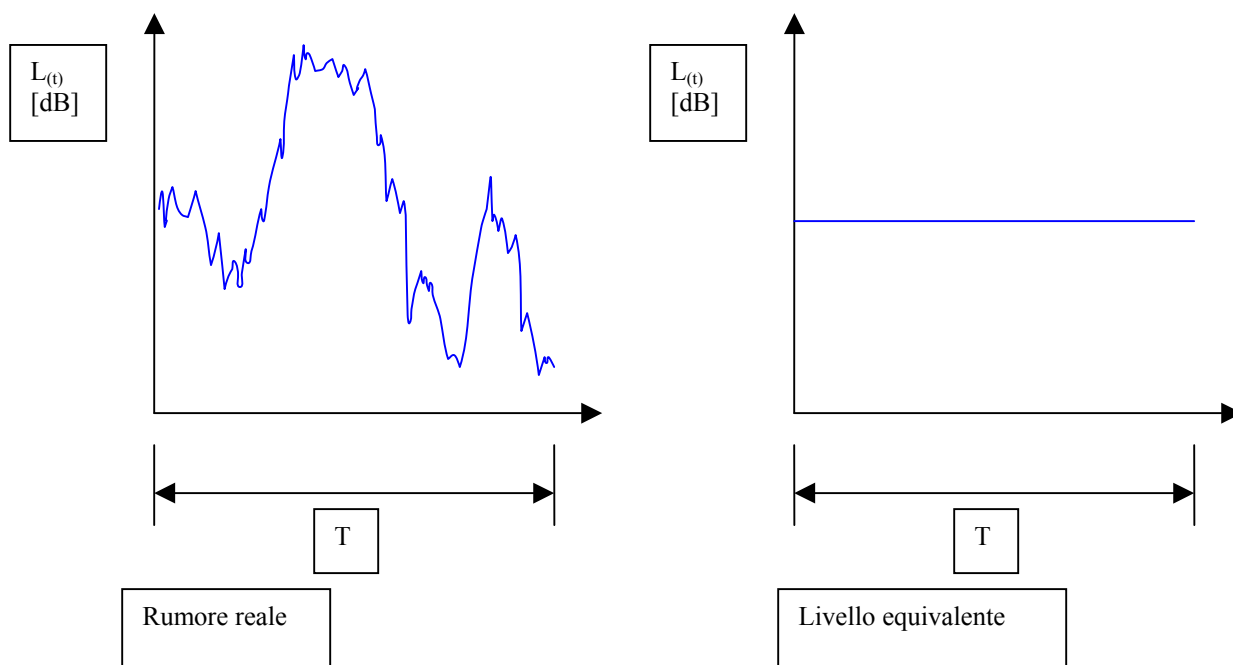


Figura 1

Se si conosce il livello di rumore equivalente in tre diversi periodi di tempo (o se il rumore è di livello costante e noto negli stessi tre periodi), come indicato nella seguente figura, il livello equivalente totale nel periodo complessivo si può ricavare usando le regole della somma logaritmica dei livelli sonori:

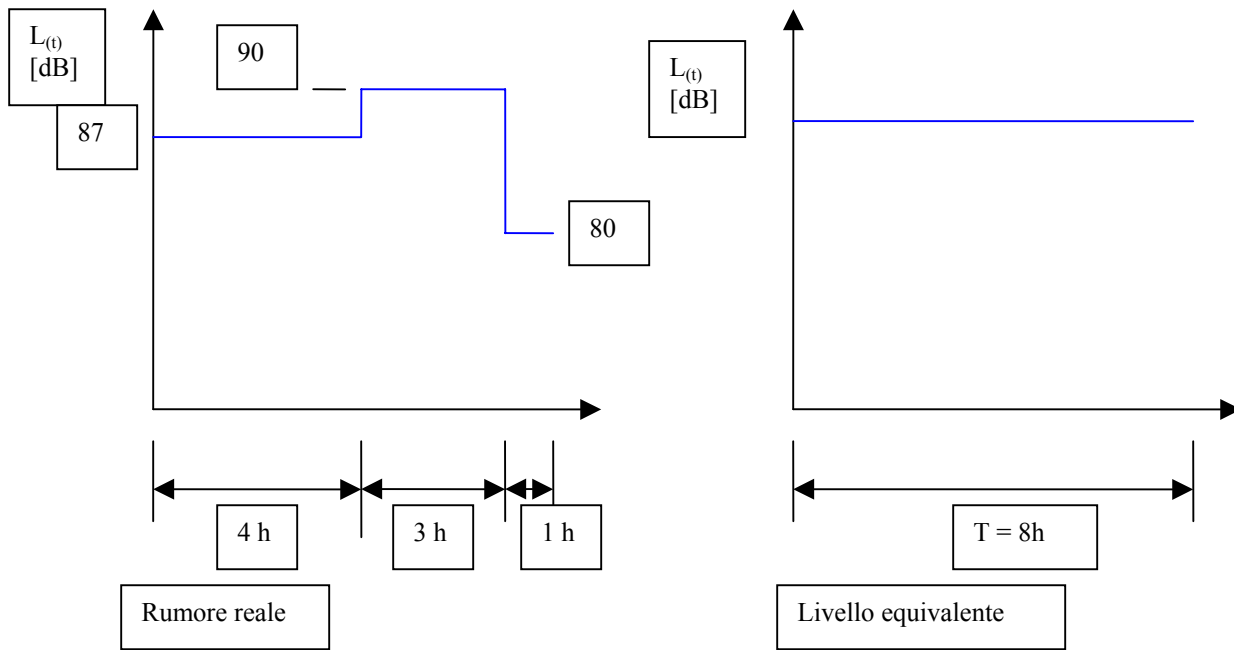


Figura 2

procedo ad una sommatoria

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{\Delta t_i} \sum_{i=1}^n 10^{(L_{eq,i}/10)} \Delta t_i \right] \quad \text{dB}$$

nel nostro caso:

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{8} (10^{8.7} \cdot 4 + 10^9 \cdot 3 + 10^8 \cdot 1) \right] = 88 \quad \text{dB}$$

in pratica sommo dei termini che rappresentano un contenuto di energia sonora ($p^2 = p_0^2 \cdot 10^{Lp/10}$) relativo ad un periodo di tempo e ne faccio la media nel tempo, dopodiché ne calcolo il livello sonoro.

Ai fini igienistici la dose di rumore assorbita da una persona in un dato periodo è fornita dal L_{eq} totale per il tempo di esposizione, i due termini sono riassunti dalla grandezza $L_{EP,D}$ o **Livello di esposizione** dove D sta per giornaliero. In pratica è il livello equivalente giornaliero, riferito ad un periodo di otto ore (normalizzato su otto ore), il che significa che se l'orario durante il quale si è esposti al rumore è diverso da otto ore il $L_{EP,D}$ è il livello equivalente che si riscontrerebbe se la stessa energia sonora fosse distribuita su un periodo di otto ore.

2. SEL (Single Event Level)

Un altro indicatore utile al calcolo del livello sonoro equivalente per composizione di livelli sonori relativi a cause diverse, è il Livello sonoro del singolo evento, o SEL (Single Event Level).

Esso è in genere riferito ad eventi sonori di breve durata (episodici) che possono riscontrarsi nel periodo di interesse: passaggio di un singolo veicolo su una strada, di un treno o di un aereo.

Il SEL è definito come il livello di rumore continuo, della durata di un secondo, che possiede lo stesso contenuto energetico dell'evento considerato, ovvero il livello sonoro che avrebbe il singolo evento se la sua energia sonora fosse concentrata nella durata di un secondo.

$$(2) \quad SEL = 10 \cdot \log \int_{t_1}^{t_2} 10^{(L_p(t)/10)} dt \quad \text{dB}$$

dove $L_p(t)$ è il livello di pressione all'istante t , mentre l'intervallo temporale di integrazione è definito come il tempo necessario affinché il livello dell'evento sonoro si porti da un valore di 10 dB(A) inferiore rispetto al suo valore di picco al valore di picco e quindi diminuisca di 10 dB(A).

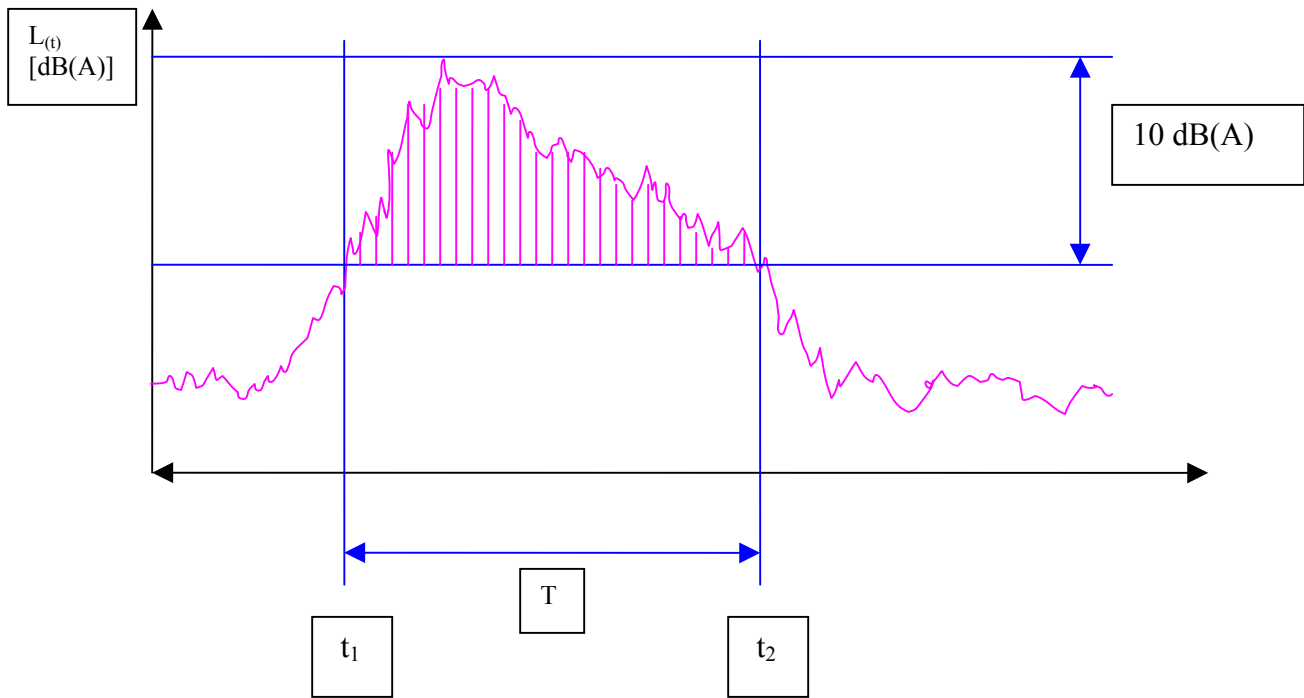


Figura 3 – intervallo temporale di integrazione ed energia sonora considerata nel calcolo del SEL relativo al passaggio di un convoglio ferroviario.

Un insieme di eventi sonori, ciascuno caratterizzato da un proprio SEL, darà luogo in un intervallo temporale T ad un livello equivalente continuo:

$$(3) \quad Leq_{A,T} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n 10^{(SEL_i / 10)} \right] \quad \text{dB}$$

Per ottenere il Leq totale cui è esposto il recettore alla precedente sommatoria riguardante i singoli eventi potrebbe dover essere sommato un Leq relativo ad un rumore di fondo.

Si noti che un asse viario può essere considerato una sorgente sonora lineare se percorso da un flusso continuo di veicoli, se invece passano pochi veicoli l'ora si deve usare un altro approccio: considerare i veicoli come sorgenti puntiformi in movimento e valutare il Leq nel periodo di interesse sommando i SEL relativi ad ogni passaggio di veicolo.

3. metodi previsionali

Esistono metodi di vario genere e di vario grado di complessità per la previsione dei livelli sonori equivalenti.

- 1) Metodi basati su correlazioni numeriche, ricavate da rilevazioni sperimentali ovvero da campagne di misura (es. modelli di rumore da traffico), queste correlazioni forniscono il valore del Leq in funzione di parametri quali: distanza del ricevitore dall'asse viario, numero di veicoli l'ora, magari distinti in leggeri e pesanti, loro velocità media etc. Si tratta di correlazioni la cui validità è in genere molto legata alle situazioni in cui sono state condotte le misure.
- 2) Softwares di simulazione numerica, con algoritmi di vario tipo::
 - basati sulla simulazione dell'onda sonora con le sue caratteristiche (lunghezza d'onda, ampiezza e fase): si avvalgono di metodi quali il finite elements models (FEM) od il boundary elements method (BEM),
 - basati sulla suddivisione dell'energia sonora emessa dalla sorgente in raggi (particle model) che possono essere divergenti (*beam tracing*) o non divergenti (*ray tracing*), i primi possono essere di varia forma: conica o piramidale,
 - sorgenti immagine (image sources), anche in questo caso vengono utilizzati raggi sonori (traiettorie di) che si riflettono specularmente sulle superfici,
- 3) Composizione di livelli sonori equivalenti e di SEL. Quest'ultimo metodo è particolarmente indicato per le previsioni a livello urbanistico.

3.1 Composizione di livelli sonori. Esempio 1.

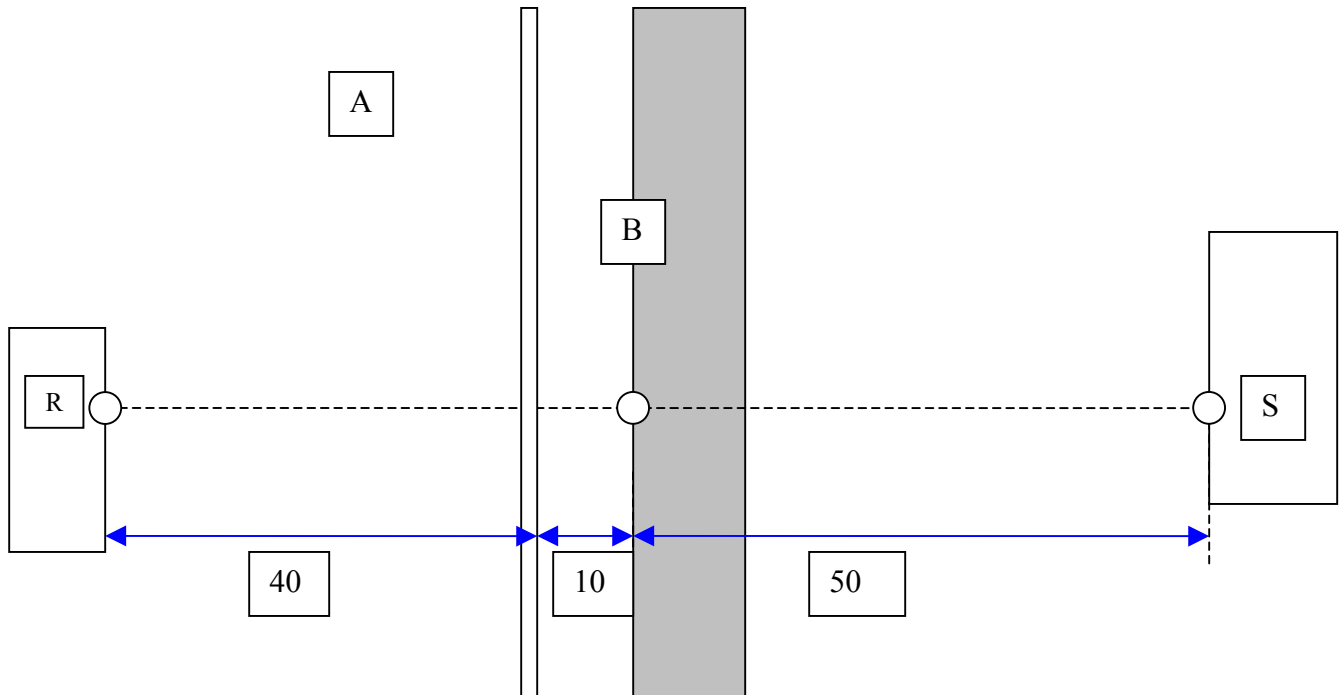
Un ricevitore *R*, posizionato a 4 m di altezza, è interessato dal rumore:

- a) di una strada, il cui bordo dista 50 m, e che produce un Leq orario a bordo strada ed all'altezza di un metro, di 75 dB(A),
- b) di un impianto industriale sito a 100 m di distanza ed all'altezza di 1 m, che è in funzione per 30' ogni ora, e che presenta i livelli di potenza in banda di ottava indicati nella seguente tabella:

Hz	125	250	500	1000	2000
L _w [dB]	100	105	101	96	96

Tra il ricevitore e la strada è interposto, a 40 m da R, uno schermo acustico, di lunghezza che possiamo considerare indefinita, e di altezza costante pari a 4 m.

Per calcolare il Leq complessivo dovuto alle due sorgenti si procede come segue.



a) Leq dovuto alla sola strada.

Considerando la strada come una sorgente lineare, l'attenuazione dovuta alla sola divergenza geometrica (cilindrica) sarà:

$$\Delta L = 10 \log \frac{r_1}{r_2} = 10 \log \frac{50}{1} = 17 \quad [\text{dB(A)}]$$

pertanto il Leq in R:

$$L_{eq,R} = L_{eq,bordostrada} - \Delta L = 75 - 17 = 58 \quad [\text{dB(A)}]$$

l'attenuazione per diffrazione dovuta allo schermo sarà:

$$A = 40 \text{ m}$$

$$B = (10^2 + 3^2)^{1/2} = 10,44$$

$$d = (50^2 + 3^2)^{1/2} = 50,09$$

$$\delta = A + B - d = 0,35 \text{ m}$$

Alla frequenza (di riferimento) di 500 Hz ($\lambda = 0,68 \text{ m}$) il numero di Fresnel è pertanto:

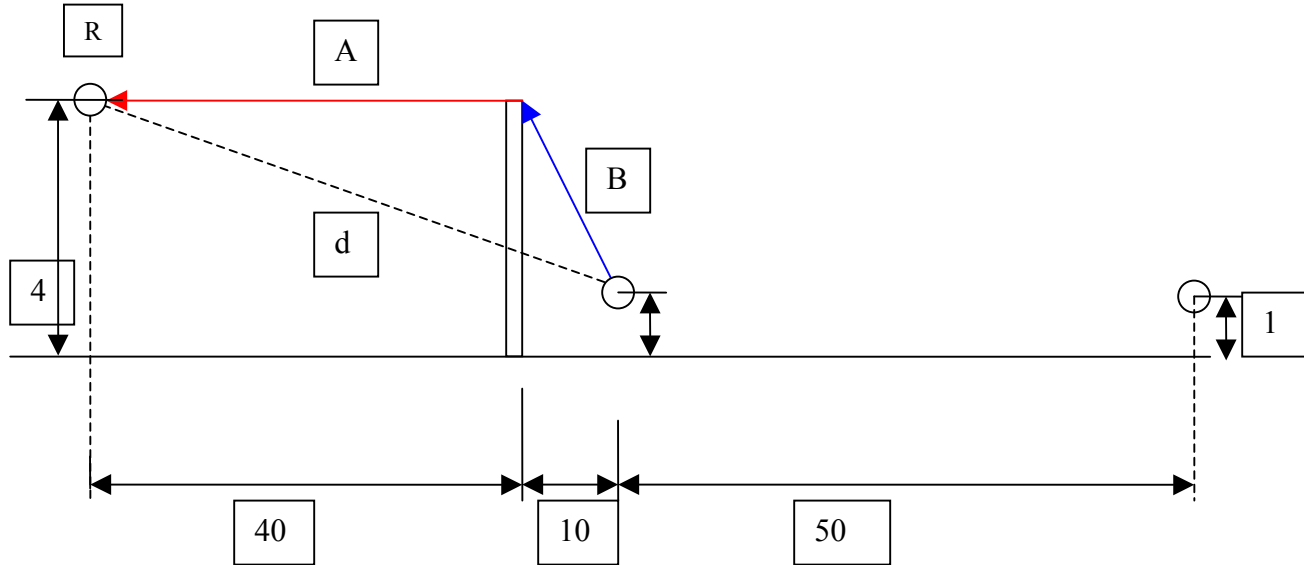
$$N = \frac{2 \cdot \delta}{\lambda} = \frac{2 \cdot 0,35}{0,68} = 1,03$$

l'attenuazione dovuta allo schermo:

$$\Delta L_d = 10 \log(3 + 20 \cdot N) = 10 \log(3 + 20 \cdot 1,03) = 13,7 \text{ [dB(A)]}$$

ed il livello in R dovuto alla sola strada è:

$$L_{eq, strada} = 58 - 13,7 = 44,3 \text{ [dB(A)]}$$



b) Leq dovuto al solo impianto industriale

Per il rumore industriale è disponibile lo spettro, anche in questo caso va calcolata l'attenuazione da divergenza, questa volta sferica, uguale in tutte le bande di ottava, e pari a:

$$d = r_1 = \sqrt{100^2 + 3^2} = 100,044m$$

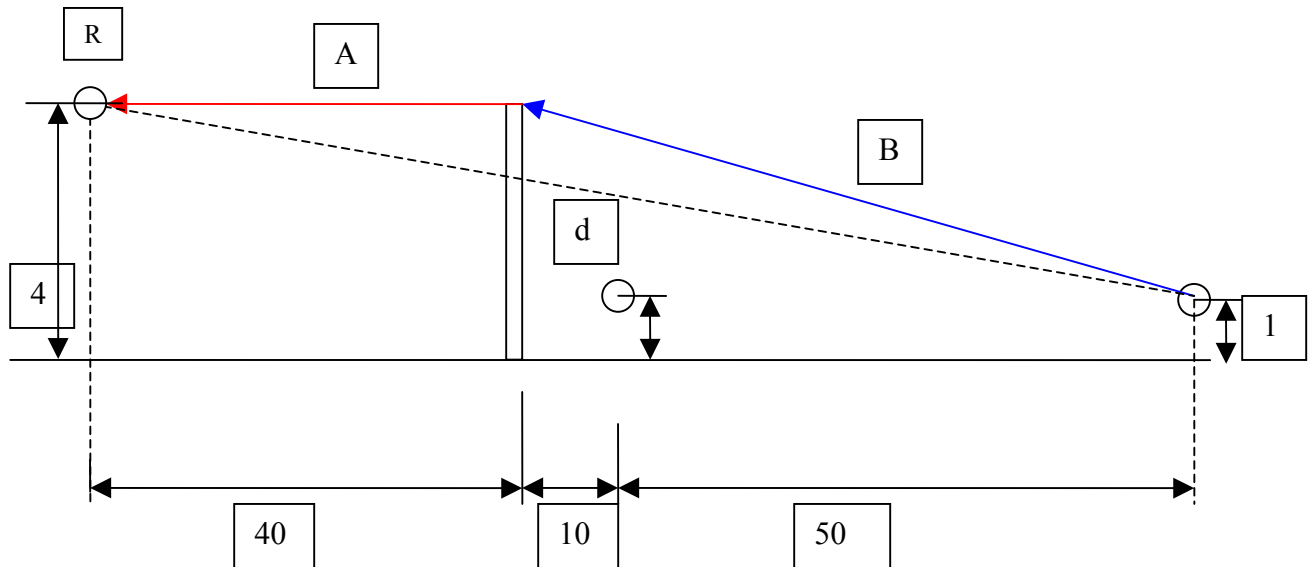
$$\Delta L = 10 \log \frac{r_1}{r_2} = 10 \log \frac{100,044}{1} = 40 \text{ [dB(A)]}$$

l'attenuazione dovuta allo schermo sarà invece diversa per ogni banda di ottava:

$$\delta = 40 + \sqrt{60^2 + 3^2} - \sqrt{100^2 + 3^2} = 0,03m$$

il numero di Fresnel e la conseguente attenuazione da diffrazione andranno calcolati per ogni banda di ottava:

Hz	125	250	500	1000	2000
L_w [dB]	100	105	101	96	96
Att. Da div.	-40	-40	-40	-40	-40
Att. Da diffraz.	-5,4	-5,8	-6,7	-8,1	-10
Filtro A	-16	-8,6	-3,2	-	+1,2
Livello risultante	38,6	50,6	51,1	47,9	47,2



Il che equivale ad un livello equivalente pari a:

$$L_{eq,industria} = 10 \cdot \log \left[10^{(38,6/10)} + 10^{(50,6/10)} + 10^{(51,1/10)} + 10^{(47,9/10)} + 10^{(47,2/10)} \right] = 55,62$$

il livello sonoro L al recettore risulterà dalla composizione dei due livelli $L_{eq,strada}$ e $L_{eq,industria}$

$$L_{eq,totale} = L_{eq,strada} + L_{eq,industria} \quad [\text{dB}]$$

ricordando che l'impianto industriale funziona solo per metà del tempo, il livello equivalente totale orario sarà:

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{60} \left(10^{4,43} \cdot 30 + (10^{4,43} \cdot 30 + 10^{5,56} \cdot 30) \right) \right] = 53,2 \quad [\text{dB}]$$

3.2 Composizione di livelli sonori. Esempio 2.

Un ricettore R è posizionato a 50 m da una linea ferroviaria, il L_{eq} orario è risultato essere pari a 64 dB(A), ed è determinato dal passaggio di 4 treni di lunghezza l pari a 200 m alla velocità di 120 km/h.

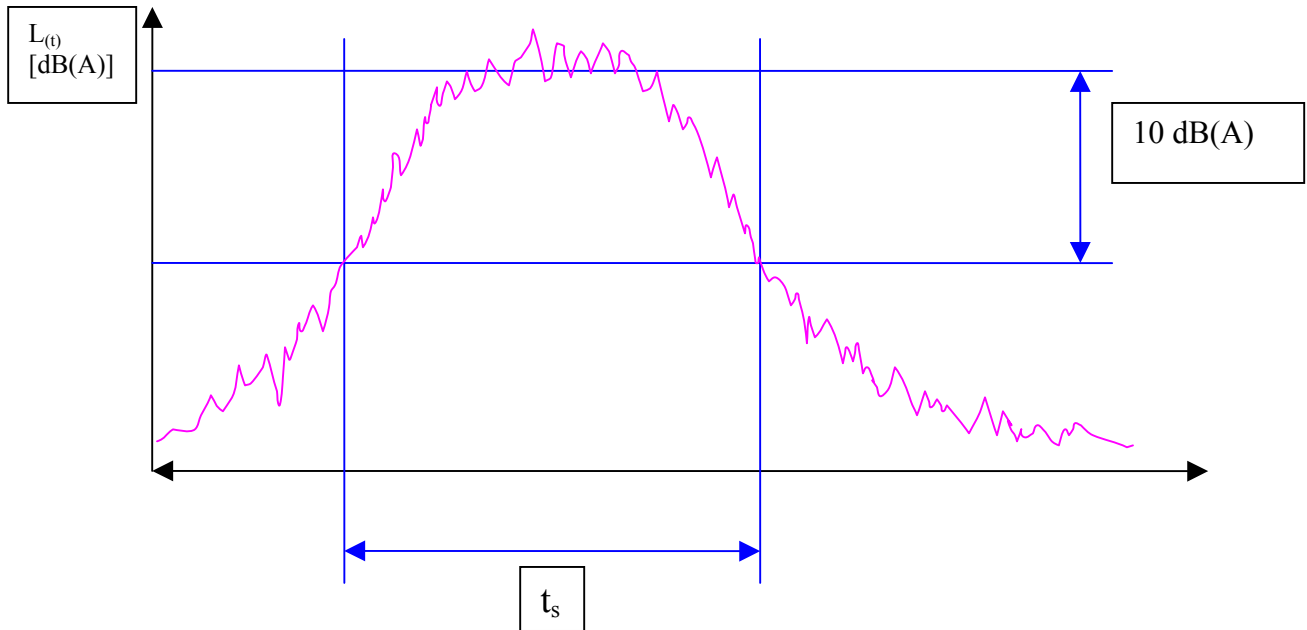
Si calcoli il L_W di ogni treno, ed il numero massimo di treni che potrebbero passare in un'ora senza che venga superato in R il L_{eq} limite di 70 dB(A).

$$L_{eq(1treno/h)} = L_{eq(4treni/h)} - 10 \cdot \log[4] = 64 - 6 = 58 \text{ dB(A)}$$

Ora questo livello equivalente orario può essere derivato dalla distribuzione su un'ora, ovvero dalla suddivisione su 3600 s, dell'energia sonora che nel calcolo del SEL viene invece concentrata nel periodo di un secondo. Pertanto se voglio ricostruire il SEL relativo al passaggio di uno di quei treni devo ri-moltiplicare quel valore per i 3600 s.

$$SEL_{(passaggi di 1 treno)} = 58 \text{ dB(A)} + 10 \cdot \log[3600] = 93,56 \text{ dB(A)}$$

Se ipotizziamo che la traccia acustica del passaggio di un treno abbia un andamento del tipo qui riportato:



la durata dell'evento in secondi si calcola con la seguente formula:

$$t_s = 3.6 \cdot \frac{l}{V} + \frac{6 \cdot d}{120}$$

dove l è la lunghezza del treno, V la sua velocità in km/h e d la distanza dell'ascoltatore dalla ferrovia. Ipotizzando che il livello massimo si mantenga più o meno costante durante l'evento, il SEL si calcola con la seguente formula:

$$SEL = L_{MAX} + 10 \cdot \log\left(3.6 \cdot \frac{l}{V} + \frac{6 \cdot d}{100}\right)$$

In questo caso sarà:

$$SEL = 93,56 = L_{MAX} + 10 \cdot \log\left(3.6 \cdot \frac{200}{120} + \frac{6 \cdot 50}{100}\right)$$

da cui si ricava:

$$L_{MAX} = 93,56 - 10 \cdot \log\left(3.6 \cdot \frac{200}{120} + \frac{6 \cdot 50}{100}\right) = 84 \text{ dB(A)}$$

quindi tenendo conto della divergenza e della direzionalità (divergenza semi-cilindrica) si calcola il L_w

Riguardo la seconda domanda, il L_{eq} limite di 70 dB(A) sarà dato da:

$$L_{eq} = 70 \text{ dB(A)} = L_{eq(\text{treno/h})} + 10 \cdot \log[x] = 58 + 10 \cdot \log[x]$$

pertanto il numero massimo di passaggi di treno all'ora sarà:

$$10 \cdot \log[x] = 70 - 58 = 12 \text{ -----} > \log[x] = 1,2 \text{ -----} > x = 15,84$$

3.3 Composizione di livelli sonori. Esempio 3.

Calcolare il Leq orario complessivo che incide su una facciata, conseguente alla presenza di una strada e di una ferrovia, distanti entrambe 80 metri,

Per la strada una formula di regressione fornisce:

$$L_{eq(strada)} = 0,21 \cdot V + 10,2 \log(Q_f) - 13,9 \cdot \log(d) + 49,5 = 60 \text{ dB(A)}$$

dove Q_f è il flusso fittizio equivalente di 200 veicoli leggeri più 6*10 veicoli pesanti l'ora, e V è la velocità media dei veicoli in miglia orarie.

Per il treno:

$$p_{\max}^2 = \frac{W \cdot \rho \cdot c}{8 \cdot l \cdot d} = \frac{20 \cdot 400}{8 \cdot 200 \cdot 80} = 0,0625$$

$$L_{\max} = 10 \cdot \log\left(\frac{p_{\max}^2}{p_0^2}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{0,0625}{(2 \cdot 10^{-5})^2}\right) = 81,9 \text{ dB}$$

la durata dell'evento in secondi si calcola con la seguente formula:

$$t_s = 3,6 \cdot \frac{l}{V} + \frac{6 \cdot d}{120} = 3,6 \cdot \frac{200}{100} + \frac{6 \cdot 80}{100}$$

dove l è la lunghezza del treno, V la sua velocità in km/h e d la distanza dell'ascoltatore dalla ferrovia. Ipotizzando che il livello massimo si mantenga più o meno costante durante l'evento, il SEL si calcola con la seguente formula:

$$SEL_{(passaggio1treno)} = 81,9 + 10 \cdot \log\left(3,6 \cdot \frac{200}{100} + \frac{6 \cdot 80}{100}\right) = 92,7 \text{ dB(A)}$$

adesso per ottenere il Leq relativo al passaggio di un treno devo "spalmare" quel SEL su un ora:

$$Leq_{(passaggio1treno)} = SEL_{(passaggio1treno)} - 10 \cdot \log(3600) = 92,7 - 35,5 = 57,2 \text{ dB(A)}$$

ipotizzando il passaggio di 8 treni/ora:

$$Leq_{(passaggio8treni)} = Leq_{(passaggio1treno)} + 10 \cdot \log(8) = 57,2 + 9 = 66,2 \text{ dB(A)}$$

sommo ora gli effetti di strada e ferrovia:

$$Leq_{(strada+ferrov.)} = 10 \cdot \log(10^{6,62} + 10^6) = 67,1 \text{ dB(A)}$$

se devo stare dentro il limite di 65 dB(A) intervengo sulla ferrovia che è la fonte dominante: devo ridurne il livello da 66,2 a 63,2, in quanto

$$Leq_{(limite.)} - Leq_{(strada)} = 63,2 \text{ dB(A)}$$

oppure procedo nel seguente modo:

$$Leq_{(limite.)} = 65 = 10 \cdot \log(10^x + 10^6)$$

$$10^{6,5} = 10^x + 10^6 \text{ --- } > 10^x = 10^{6,5} - 10^6$$

Bibliografia

[1] Legge 26 Ottobre 1995 n. 447 "Legge Quadro sull'inquinamento acustico". Supplemento ordinario alla G.U. n. 254 del 30.10.95.

[2] Bretoni, D. e A. Franchini (1997). *Metodi di Previsione del Rumore da Traffico*. Lezione tenuta presso la Scuola di Acustica dell'Università di Ferrara nell'A.A. 1997-98.