



Appunti di acustica pratica N°8.- 20140102



## Decibelando .-

B. Abrami

**1.- Premessa generale.-** Nell'estate del 2010, avendo litigato con la fidanzata, me ne andai al mare da solo. Trovatomi con una inaspettata disponibilità di tempo, mi proposi di scrivere un libro che chiarisse i concetti legati alla misura di suoni e rumori, che cercasse di far capire cosa vuol dire usare un fonometro. La mattina scrivevo, il pomeriggio al mare, la sera a cantare e suonare la chitarra con gli amici triestini. In quindici giorni arrivai fino al capitolo dei filtri per l'analisi in frequenza e là lo ho lasciato. Ho fatto la pace, pace che dura ancora e spero che duri, anche se a detrimento del libro. Mi sembra peraltro, nei recessi del mio essere, che le cose scritte reclamino la luce, e luce sia! Pubblicherò, piano, piano, i vari capitoli come "appunti di acustica pratica". Questo è il primo della serie, non necessariamente nell'ordine dei capitoli.

**2.- Premessa al presente.-** Nei miei seminari viene dato ampio spazio alla sperimentazione: come "suona" un tono puro, una banda stretta, un rumore rosa o bianco; come questi vengano rappresentati con i vari sistemi di analisi, a banda costante e percentuale costante; come dal suono si arriva al profilo storico; come da profilo e spettro si riconosca una sorgente; come si identifichino gli artefatti di misura, ecc. Le conoscenze di acustica generale vengono date per scontate, se ne parla unicamente nei seminari sul rischio di esposizione perché gli operatori del settore si devono confrontare con più discipline (campi elettromagnetici, radiazioni ottiche, esposizione termica, ecc) e sono necessariamente, data l'ampiezza della scienza necessaria, "sprovvoluti" in tutto. Bisogna fornir loro una base culturale minima ma efficiente allo scopo. I partecipanti ai seminari di acustica e vibrazioni ambientali sono soggetti dedicati alla materia, sono prevalentemente TCAA, e dispongono delle nozioni generali perché hanno partecipato ad una varietà di corsi introduttivi. Le nozioni fornite però sono generalmente insufficienti a far capire cosa sia un fonometro e come si arrivi ai risultati cercati nelle fasi operative; cose che dovrebbero essere l'A,B,C, di ogni professionista. La serie delle pubblicazioni che seguiranno, come mio "tentativo di libro", vanno viste come un sussidio didattico, la conoscenza del loro contenuto renderà più proficua la partecipazione ai miei seminari.

**3.- Muoversi contemporaneamente in più domini.-** Il fonometro è un essere anfibio, vive parte di energia acustica e parte di energia elettrica. Il microfono è il mediatore fra i due domini. Domini che hanno in comune il fatto di coprire una gamma molto estesa di valori: da qualche micro Pascal a qualche centinaio di Pascal e da qualche microVolt ( $10^{-6}$  Volts) a qualche decina di Volts. Il tutto viene gestito dall'algoritmo del decibel che accomuna i due regni. Chi non vuole indecibelarsi, può anche saltare questo paragrafo, ma gli sarà molto difficile capire come funziona un fonometro e di conseguenza tutto il resto.

Il decibel (dB) non è una unità di misura. Unità di misura sono il metro, il joule, il secondo, il Pascal, ecc. Il decibel è l'unità di relazione logaritmica fra grandezze omogenee.

Può esprimere relazioni fra potenze (W) nella forma:  $dB = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{W_0} \right)$

Può esprimere relazioni fra ampiezze (x) nella forma:  $dB = 20 \log_{10} \left( \frac{x}{x_0} \right)$

In entrambi i casi il pedice zero stà ad indicare una grandezza di riferimento che consenta di risalire dalla relazione (ad esempio 1.000 volte) al valore rappresentato. Se  $x_0$  è un centesimo di Euro, una relazione di 1.000 starà ad indicare ( $0,01 \cdot 1.000 = 10$  Euro) dieci euro. Quindi, dato che il logaritmo in base dieci di mille è 3,0 (numero delle cifre intere meno uno, più la mantissa, ma la mantissa di 1 è zero), 60 dB riferiti a un centesimo di euro ( $60 \text{ dB}_{\text{ref},0,01\text{€}}$ ) fanno 10 €. Nei testi di acustica o vibrazioni, in genere non viene indicata la base del logaritmo dandosi per scontato che sia 10; la base viene indicata solamente quando diversa da 10.

Si può risalire dai decibel alla relazione in potenza con l'antilogaritmo:  $\left(\frac{W}{W_0}\right) = 10^{\left(\frac{\text{dB}}{10}\right)}$

Si può risalire dai decibel alla relazione in ampiezza con l'antilogaritmo:  $\left(\frac{x}{x_0}\right) = 10^{\left(\frac{\text{dB}}{20}\right)}$

I decibel come relazioni di potenza e di ampiezza					
A crescere dal riferimento			A scendere dal riferimento		
dB	Potenza ( $W/W_0$ )*	Ampiezza ( $x/x_0$ )*	dB	Potenza ( $W/W_0$ )*	Ampiezza ( $x/x_0$ )*
0	1	1	0	1	1
1	1,26	1,12	-1	0,77	0,89
3	2	1,41	-3	0,5	0,7
6	4	2	-6	0,25	0,5
10	10	3,16	-10	0,1	0,31
20	100	10	-20	0,01	0,1
40	10.000	100	-40	$1/10^4$	0,01
60	1.000.000	1.000	-60	$1/10^6$	0,001
80	100.000.000	10.000	-80	$1/10^8$	0,0001
100	10.000.000.000	100.000	-100	$1/10^{10}$	0,00001
120	1.000.000.000.000	1.000.000	-120	$1/10^{12}$	0,0000001

\*Da moltiplicare per il valore di riferimento per avere il valore misurato.-

Chiamiamo livello una relazione espressa in decibel e valore la grandezza rappresentata da un livello con riferimento. Se non si conosce il valore di riferimento ( $W_0$  o  $x_0$ ) un livello in decibel esprime solamente una relazione, come nel linguaggio comune siamo usi a dire che una cosa è il doppio (+6 dB), o il triplo (+10 dB), di un'altra; o ne è la metà (-6 dB), o un decimo (-20 dB), o un millesimo (-60 dB).-

Valori di riferimento normalizzati per misure in decibel			
Grandezza	Riferimento	Lessico	120 dB sono:
Potenza	$10^{-12}$ Watts	Un picowatt	1 Watt
Voltaggio (elettrico)	$10^{-6}$ Volts	Un microvolt	1 Volt
Intensità acustica	$10^{-12}$ Watts/m <sup>2</sup>	Un picowatt/m <sup>2</sup>	1 Watt/m <sup>2</sup>
Pressione acustica in aria	$2 \cdot 10^{-5}$ Pascal	20 micropascal	20 Pascal
Pressione acustica in acqua	$10^{-6}$ Pa	Un micropascal	1 Pascal
Accelerazione (vibrazioni)	$10^{-6}$ ms <sup>-2</sup>	Un micrometro/secondo <sup>2</sup>	1 m/s <sup>2</sup>
Velocità (vibrazioni)*	$10^{-9}$ ms <sup>-1</sup>	Un nanometro/secondo	1 mm/s
Spostamento (vibrazioni)	$10^{-12}$ m	Un picometro	1 mm

\*Le marine militari utilizzano generalmente  $10^{-8}$  ms<sup>-1</sup> che corrispondono a 10 mm/s per 120 dB

In generale per passare da un livello ( $\text{dB}_{\text{ref. XX}}$ ) al suo valore ( $x$  o  $W$ ), quando si conosca il riferimento ( $W_0$  o  $x_0$ ), si procederà così:

$$\text{in ampiezza, } x = x_0 * 10^{\left(\frac{\text{dB}}{20}\right)}; \text{ in potenza, } W = W_0 * 10^{\left(\frac{\text{dB}}{10}\right)}$$

Così  $120 \text{ dB}_{\text{ref. 1}\mu\text{V}}$  corrispondono ad 1 Volt;  $120 \text{ dB}_{\text{ref. 1}\mu\text{m/s}^2}$  corrispondono ad  $1 \text{ ms}^{-2}$  e così via.-

Si può fare un pò di fatica ad entrare nella logica del decibel, ma è una fatica ampiamente ripagata dai vantaggi che si ricavano dalla magia dei decibel, soprattutto quando si ha a che fare con più grandezze interagenti fra loro come: vibrazione → intensità sonora; tensione di ingresso di un amplificatore → intensità sonora.

Nel caso di un rumore generato **solo** dalla vibrazione di una superficie solida, se noi siamo in grado di prevedere di poter abbattere il livello della vibrazione di 4,5 decibel, sappiamo immediatamente che il livello del rumore scenderà di 4,5 decibel.

Nel caso di un generatore di segnale (bianco, rosa o sinusoidale) che alimenta un sistema di altoparlanti, noi sappiamo a priori che aumentando di 6,0 dB (due volte) la tensione di ingresso dell'amplificatore di potenza, ad esempio da 0,5 a 1 Volt, aumenteremo puntualmente di 6,0 dB il livello del campo sonoro generato dagli altoparlanti; parliamo ovviamente di sistemi lineari.-

**4.- Amplificazioni e filtraggi.-** Nel fonometro, si svolgono una serie di elaborazioni del segnale: amplificazione, filtraggio, calcolo del valore efficace che in passato aveva il suo limite nella gamma dinamica del rivelatore (20-30 dB) e oggi nella gamma dinamica del convertitore analogico-digitale (80-120

dB). I decibel di amplificazione, di filtraggio e di gamma dinamica, non hanno un valore fisso di riferimento perché il valore del riferimento è il segnale di ingresso, quello che proviene dal microfono o dall'accelerometro, che è variabile per definizione. Il riferimento è 0 dB ovvero nessuna amplificazione e nessuna attenuazione.-

**5.- Amplificazioni.-** Nel fonometro, immediatamente dopo la trasduzione, con livelli di pressione sonora dell'ordine dei 74 dB<sub>re,μ20Pa</sub> abbiamo, in uscita dal preamplificatore, segnali dell'ordine dei 5 mV che vanno amplificati per poterli poi gestire nelle successive elaborazioni come: filtraggio, calcolo del valore efficace, oppure per pilotare il convertitore analogico-digitale nei fonometri più moderni. Occorre quindi amplificare il segnale (farlo diventare più "forte"). Un amplificatore si caratterizza per il suo "guadagno", ovvero di quante volte riuscirà ad accrescere un segnale che venga proposto al suo ingresso.

Nella vita di tutti i giorni, operiamo spesso con il "guadagno", tutte le volte che cambiamo il volume della radio, del televisore, di una sistema di riproduzione sonora. Dire che uno stadio di amplificazione guadagna 60 dB (volte 1.000) vuol dire che se entrano 5 mV ne usciranno 5 volts o, più in generale, che il segnale all'ingresso verrà amplificato di 1.000 volte.



Dovendo definire il guadagno ( $G$ ) partendo dalla misura del segnale di ingresso ( $V_{in}$ ) e del segnale di uscita ( $V_{out}$ ) procederemo nel seguente modo:

$$G = 20 \log \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right); \text{ dB}$$

**6.- Insalata mista di decibel.-** Vediamo ora un aspetto pratico di fonometria per padroneggiare il quale occorre sapersi muovere nei decibel come il classico pesce nell'acqua. Un fonometro esce dalla fabbrica tarato in dB<sub>re,1μV</sub> cui corrispondono, per 50,0 mV di segnale di ingresso, 94,0 dB<sub>re,1μV</sub>. Se il microfono fornito con il fonometro è un microfono da 50,0 mV/Pa (1 Pascal è pari a 94,0 dB<sub>re,μ20Pa</sub>) durante l'operazione di calibrazione non ci sarà da fare alcuna modifica. Il fonometro, in prima battuta, leggerà il livello fornito dal calibratore, 94,0 o 114,0 o 120,0 dB che sia.

Se invece la sensibilità del microfono è di 12,0 mV/Pa e gli applichiamo un calibratore da 94,0 dB<sub>re,μ20Pa</sub>, in prima battuta, prima dell'aggiustamento della calibrazione, leggeremo 81,6 dB<sub>re,1μV</sub> (in realtà, per i puristi del numero, sono 81,58362 ma il fonometro arrotonda al primo decimale). Ci mancano quindi 94,0 - 81,6 = 12,4 dB di guadagno da parte dell'amplificatore, prima che il fonometro possa leggere come 94,0 il livello della pressione-campione fornita dal calibratore. Questi 12,4 dB che mancano sono "semplici" decibel di guadagno (20log di 50/12 = 20log 4,16 = 12,4 dB) e non hanno quindi nessun riferimento.

A questo punto se vogliamo misurare, abbiamo tre alternative:

- Sommare 12,4 dB a tutte le misure, dopo aver misurato;
- portare il segnale di ingresso da 12,0 a 50,0 mV sostituendo il microfono (perché il fonometro per farci leggere 94,0 vuole sempre e comunque vedere lo stesso voltaggio all'ingresso del convertitore analogico-digitale),
- aumentare il guadagno dell'amplificatore di ingresso di 12,4 dB, ed è quello che normalmente facciamo.

In questa variazione del guadagno dell'amplificatore di ingresso consiste l'operazione della calibrazione.

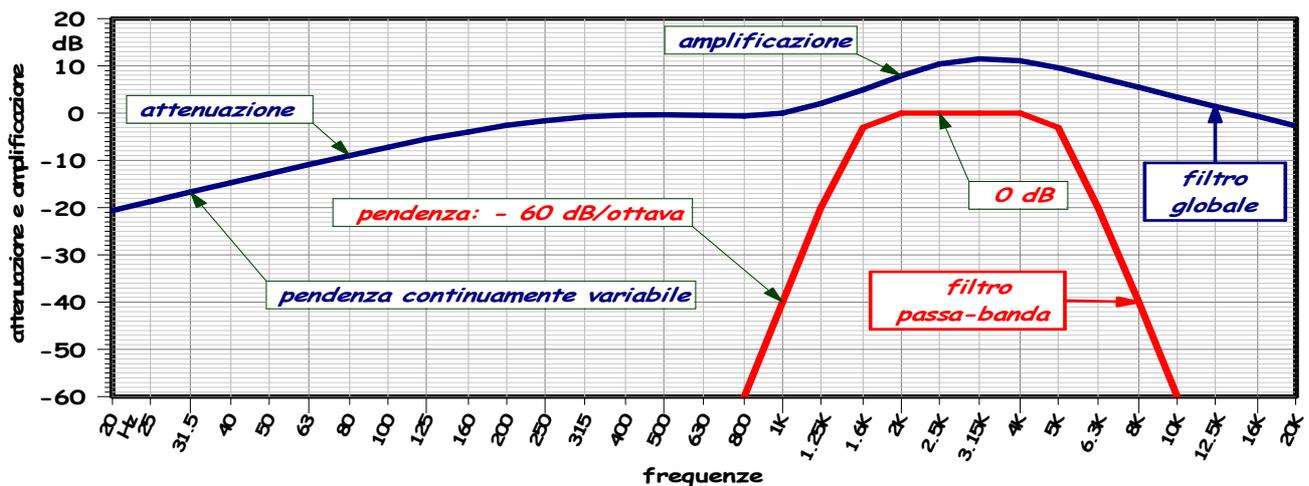
Una conseguenza indesiderata ma importante, e troppo spesso trascurata, di questa operazione è che l'amplificatore di ingresso, una volta che abbiamo aumentato di 12,4 dB il suo guadagno, non amplificherà solo il segnale acustico, quello che viene dall'aria e che noi intendiamo misurare, ma anche il segnale elettrico di rumore di microfono e preamplificatore, con i quali non vorremmo avere a che fare, ma dai quali non possiamo prescindere. Se prima della operazione di calibrazione, con un microfono da 50,0 mV/Pa, il rumore intrinseco era di 18,0 dB<sub>re,μ20Pa</sub>, dopo la calibrazione diventerà 18 + 12,4 = 30,4 dB<sub>re,μ20Pa</sub>; e questo vuol dire che quando avremo un segnale acustico di 20 o 25 o 27 dB il nostro fonometro leggerà sempre e comunque 30,4 + 20 = 30,7dB; 30,4 + 25 = 31,5dB; 30,4 + 27 = 32,0dB.

**7.- Filtraggi.-** Dopo l'amplificazione il segnale del fonometro può essere sottoposto a due tipi fondamentali di operazioni di filtraggio: un filtraggio chiamato "globale", che in una sola botta copre tutto il campo delle frequenze (20 Hz - 20 kHz), e sono i cosiddetti "filtri di ponderazione" A,B,C,D,Z; oppure un filtraggio per gruppi di frequenze, ad esempio da 100 a 200 Hz, poi da 200 a 400, poi da 400 a 800 e sono i cosiddetti filtri passa-banda di analisi, ad esempio, i filtri a 1/3 di ottava o i filtri FFT.



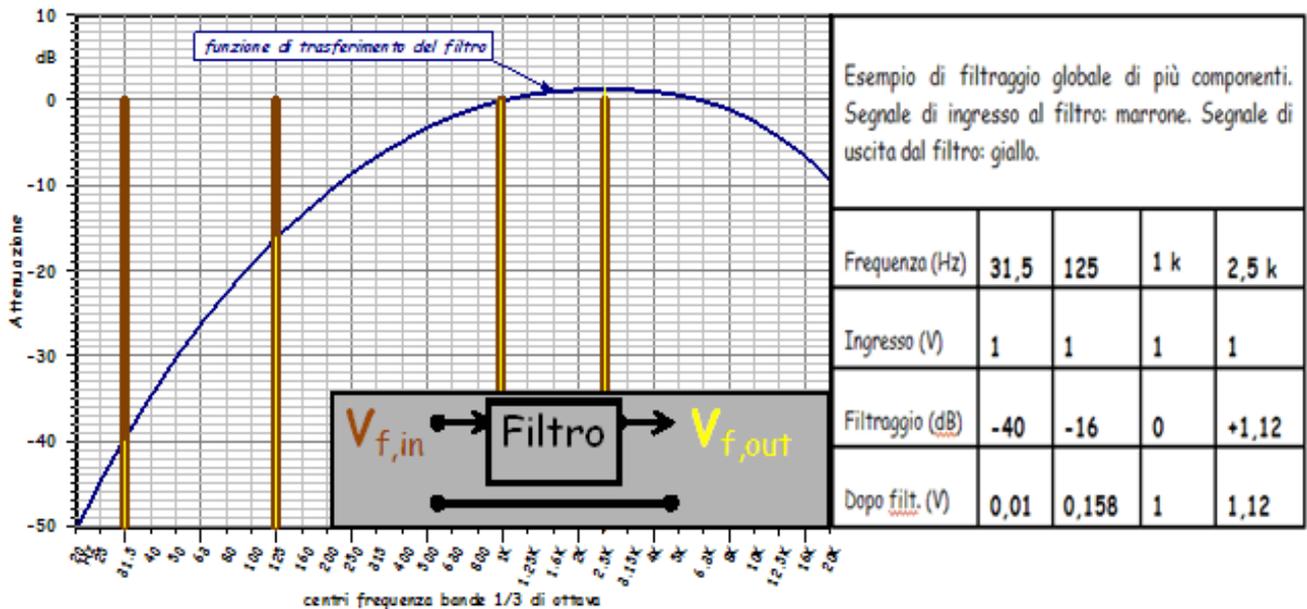
Un filtro di tipo globale, in acustica, ha generalmente il compito di escludere o limitare (attenuare), prima della misura, quella parte dell'energia sonora, che, in funzione della frequenza, non partecipa alla formazione dell'esperienza sonora umana o, al caso, di amplificarne una parte.

Un filtro passa-banda di analisi ha il compito di isolare un gruppo più o meno esteso di frequenze al fine di conoscere il contenuto di energia di quel gruppo. Le proprietà di un filtro vengono espresse come attenuazione quando il segnale viene diminuito di valore (decibel negativi) o come amplificazione quando il segnale viene aumentato di valore (decibel positivi), il tutto in funzione della frequenza.



Nella figura vediamo un esempio di filtro passa-banda (rosso) e di filtro globale (blu). Il filtro passa-banda, nel gruppo di frequenze che vuol rappresentare, offre 0 dB di attenuazione (tanto entra, tanto esce dal filtro, rapporto 1). Al di fuori di quel gruppo di frequenze il filtro passa-banda è tanto migliore quanto più attenua il segnale fuori-gruppo; questa capacità si esprime come pendenza fuori-gruppo o fuori banda in dB/ottava, nel caso in figura la pendenza fuori banda è di -60dB/ottava (abbattimento del valore del segnale di 1/1.000 per ottava).-

Il filtro globale invece presenta una pendenza continuamente variabile funzione della legge che vuol rappresentare. In figura vediamo il filtro di ponderazione "D", sviluppato nel 1956 da Karl Kryter, su richiesta della Federal Aviation Administration (USA) frustrata dagli insuccessi dovuti all'uso del filtro di ponderazione "A" nel prevedere le reazioni delle popolazioni esposte a rumore aeromobile. Kryter pensò bene, ad esempio, di considerare nella ponderazione l'amplificazione del meato uditivo che è di circa 12 dB alla frequenza di 3.15 kHz, cosa completamente ignorata, per limiti tecnologici, da Arnold Petersen e Leo Beranek al momento della creazione dei filtri A,B,& C nel 1933 .-



**8.- Sommando le ampiezze.-** Ai filtri può venir proposta una componente tonale (energia acustica concentrata ad una sola frequenza, larghezza di banda = 0) o, più facilmente, spettri complessi costituiti da più componenti in frequenza, vale la pena di chiedersi come si sommeranno queste componenti una volta uscite dal filtro. Facciamo un esempio considerando che non vi sia amplificazione da parte dell'amplificatore di ingresso (guadagno 0 dB): come da figura soprastante, nel filtro globale entra 1 V rispettivamente alle frequenze di 31,5; 125; 1.000; 2.500 Hz. Escono 10 millivolt a 31,5Hz; 158 millivolt a 125Hz; 1 volt a 1.000Hz; 1,12 volt a 2.500Hz. Se conosciamo la sensibilità del microfono ( $S_{\text{microfono}}$ , ad esempio 0,05 V/Pa) che ha prodotto i segnali originali di 1V cadauno possiamo anche risalire ai rispettivi valori di pressione sonora ponderata (dopo il filtro globale):

$$P_{Vout} = \frac{V_{out \text{ filtro}}}{S_{\text{microfono}}}; \text{ per } 1,12 \text{ di } V_{out \text{ filtro}}: P_{Vout} = \frac{1,12}{0,05} = 22,4 Pa$$

Possiamo quindi risalire ai valori della pressione ponderata rappresentati dal voltaggio di uscita dal filtro conoscendo la sensibilità del microfono, ovviamente questa dovrà essere invariabile con la frequenza o, meglio, la sensibilità dovrà essere lineare (non cambiare) nel campo di frequenze investigato:

Correlazione voltaggio in uscita dal filtro e pressione ponderata corrispondente per una sensibilità del microfono da 50mV/Pa (0.05V/Pa)				
Frequenze (Hz)	31,5	125	1.000	1.250
Sensibilità del microfono V/Pa	0,05	0,05	0,05	0,05
Voltaggio in uscita del filtro globale (V)	0,01	0,158	1	1,12
Pressione sonora ponderata (Pa)	0,2	3,16	20	22,4
Livello di pressione sonora ponderata (dB <sub>re,μ20Pa</sub> )	80	103,97	120	120,98

La somma di più segnali di ampiezza (x), siano essi di tensione o pressione o accelerazione o altro, avviene in base al contenuto di potenza (W); ricordando che  $W \propto x^2$  la somma sarà:  $x_{tot} = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2}$ .  
Nel nostro caso, per i segnali in uscita dal filtro la tensione ponderata somma ( $V_{w,tot}$ ) sarà:

$$V_{w,tot} = \sqrt{0,01^2 + 0,158^2 + 1^2 + 1,12^2} = 1,5 \text{ (Volts)}$$

Se guardiamo la cosa sul fronte della pressione ponderata somma la ( $P_{w,tot}$ ) sarà:

$$P_{w,tot} = \sqrt{0,2^2 + 3,16^2 + 20^2 + 22,4^2} = 30,2 \text{ (Pascal)}$$

Naturalmente il collegamento fra 1,5 Volts e 30,2 Pascal è la sensibilità del microfono, difatti:

$$\text{Sensibilità} = \frac{\text{Voltaggio in uscita}}{\text{pressione in ingresso}} = \frac{1,509789}{30,19579} = 0,05 \text{ (Volts/Pascal)}$$

Se invece vogliamo sommare i singoli valori di pressione ponderata, letti però come livelli di pressione sonora (dB<sub>re,μ20Pa</sub>)..... i valori oramai li conosciamo

$$LPS_{w,tot} = 10 \log \left[ \left( 10^{\frac{20 \log(\frac{0,01}{0,00002})}{10}} \right) + \left( 10^{\frac{20 \log(\frac{0,158}{0,00002})}{10}} \right) + \left( 10^{\frac{20 \log(\frac{1}{0,00002})}{10}} \right) + \left( 10^{\frac{20 \log(\frac{1,12}{0,00002})}{10}} \right) \right] = \dots$$

$$\text{o più semplicemente: } = 10 \log \left[ \left( 10^{\frac{80}{10}} \right) + \left( 10^{\frac{103,97}{10}} \right) + \left( 10^{\frac{120}{10}} \right) + \left( 10^{\frac{120,98}{10}} \right) \right] = 123,5 \text{ (dB}_{re,\mu 20Pa}\text{)}$$

Se ora siamo in grado di eliminare la componente a 1.250 Hz, quella da 120,98 dB<sub>re,μ20Pa</sub>, possiamo prevedere la variazione di livello che ne conseguirà ricordando che sia a sommare che a sottrarre il decibel, si somma e si sottrae sempre e comunque l'antilogaritmo di potenza. Chiamiamo  $L_1$  il livello totale (123,5 dB<sub>re,μ20Pa</sub>) e  $L_2$  il livello da sottrarre (120,98 dB<sub>re,μ20Pa</sub>); la differenza sarà:

$$L_1 - L_2 = 10 \log \left[ \left( 10^{\frac{L_1}{10}} \right) - \left( 10^{\frac{L_2}{10}} \right) \right] = 10 \log \left[ \left( 10^{\frac{123,5}{10}} \right) - \left( 10^{\frac{120,98}{10}} \right) \right] = 120,1 \text{ (dB}_{\text{re},\mu\text{20Pa}})$$

Quando si ha a che fare con più sorgenti tutte dello stesso livello, come ad esempio, uno spettro fatto da 2.500 componenti, tutte uguali, diciamo di 60 dB, riferiti a quello che vi pare tanto la somma non dipende dal riferimento, allora l'incremento di livello ( $\Delta L$ ) dovuto al sommarsi in potenza di queste componenti, se chiamiamo N il numero delle componenti, sarà:

$$\Delta L = 10 \log N = 10 \log 2.500 = 67,95 \text{ dB}$$

Quindi partendo da 2.500 componenti da 60 dB/cad avremo un livello-somma di  $60+67,95 = 127,95 \text{ dB}$ .

**9.- Riassumendo.-** Ho cercato di evidenziare quanto sia importante capire cosa sia il decibel se si vuol padroneggiare l'oggetto fonometro. Abbiamo razzolato fra decibel di attenuazione (- dB) e decibel di amplificazione (+ dB), decibel riferiti ad  $1\mu\text{V}$ , decibel riferiti ad  $1\mu\text{s}^{-2}$ , e decibel riferiti a  $20 \mu\text{Pa}$ , decibel sommati e decibel sottratti. Mi sembra evidente che senza la comprensione di queste relazioni il fonometro verrà sempre visto come una scatola nera che prima si orienta verso la sorgente, poi si legge un numero che non si sa da dove viene, ma al quale, in ogni caso, si attribuisce valore di verità, come selvaggi.