

## LA PSICOACUSTICA DAL RUMORE ALLA MUSICA: ESEMPI PRATICI DI MISURA –

### Convegno AIA 2014

Raffaele Pisani (1), Chiara Devecchi (1), Paolo Onali (1)

1) Studio di ingegneria Acustica Pisani, Rivoli (TO)

#### 1. Introduzione

La percezione soggettiva di un suono, in termini di piacere o disturbo, può non corrispondere, numericamente, al valore misurato del livello di pressione sonora. Per questo, in passato, si introdussero le scale di ponderazione fonometriche A, B, C che, in maniera semplicistica, legavano la sensazione di intensità soggettiva percepita (loudness) ad un valore di livello di pressione sonora ponderato. Si semplificò ulteriormente la misura del rumore con l'uso della curva fonometrica A la quale, come è noto, non è in grado di quantificare correttamente la percezione di suoni di elevata intensità.

Una quantificazione in termini di piacevolezza di un suono musicale comporta questioni di natura soggettiva di estetica che coinvolgono, in linea di principio due aspetti:

1. Un aspetto fisico legato alle caratteristiche del suono (livello, timbro, altezza, durata, etc.)
2. Un aspetto soggettivo legato sia al meccanismo uditivo della percezione sia al gusto estetico sviluppato da una determinata persona.

Una quantificazione in termini di disturbo di un rumore non è realisticamente legata al solo livello sonoro. Sono coinvolti:

1. La presenza di componenti tonali ed impulsive
2. La sua durata
3. Il periodo in cui si manifesta (giorno, notte)
4. L'assuefazione dell'individuo al rumore di specifiche sorgenti (treno, traffico stradale etc.)

Per descrivere entrambi gli aspetti di un suono o rumore è necessario ricorrere a grandezze psico-fisiche definite a seguito di numerose sperimentazioni con prove di ascolto. Un indicatore ad oggi valido per esprimere la sensazione soggettiva di sonorità percepita (Loudness) è il *Son* che consente la costruzione di una scala numerica necessaria per tutti gli impieghi pratici: un raddoppio della intensità soggettiva è pari ad un valore doppio di *Son*.

La quantificazione numerica di un fenomeno sonoro vale, sotto quest'aspetto, sia per i suoni di uno strumento musicale sia per i rumori che accompagnano la vita di ogni giorno.

L'aspetto metrologico è complesso in quanto coinvolge l'acquisizione del segnale acustico, anche in termini binaurali, e l'elaborazione dello stesso con processi che simulano il comportamento dell'orecchio e l'interpretazione degli stimoli neurali operata dal cervello.

I segnali acustici possono essere stazionari nel tempo per cui è sufficiente considerare il fenomeno del mascheramento in frequenza; possono essere variabili nel tempo o di

natura impulsiva per cui si aggiunge un secondo fenomeno di mascheramento legato alla durata temporale di ciascun segmento elementare di suono.

Sotto l'aspetto metrologico pratico sono disponibili due metodi per quantificare l'intensità sonora percepita (Loudness) entrambi oggetto di specifiche normative:

- Il metodo di Zwicker e Fastl, fu descritto una prima volta in una pubblicazione del 1975. Il metodo grafico di calcolo fu oggetto, poi, della norma ISO 532 B (anno 1975).
- Il metodo di Moore e Glasberg fu pubblicato una prima volta nel 1996; fu successivamente rivisto nel 1997 per includere il calcolo della Loudness parziale. Tale metodo è oggetto della norma americana ANSI S3.4-2007.

## 2. Il programma di calcolo della loudness

I due aspetti metrologici, quello relativo al segnale musicale e quello relativo al rumore sono stati affrontati implementando uno specifico programma che fornisce l'andamento nel tempo della loudness. Poiché i suoni periodici e transitori sono l'essenza del segnale musicale si è ritenuto più conveniente utilizzare filtri "sintonizzati" sulle frequenze dei segnali (metodo di Moore) rispetto a filtri definiti "normalizzati" (metodo di Zwicker).

La teoria cosiddetta "dei luoghi" asserisce che lo stimolo acustico che raggiunge la membrana basilare induce vibrazioni della membrana in precise posizioni del suo sviluppo, posizioni legate alla frequenza dei suoni percepiti dall'orecchio. Oltre alla posizione del segmento eccitato da uno stimolo sinusoidale l'estensione dello stesso segmento sulla membrana è legata alla intensità dello stimolo. Questo meccanismo vibratorio spiega pienamente il fenomeno del mascheramento di un suono debole la cui frequenza è prossima a quello mascherante. La estensione del segmento eccitato dallo stimolo di determinata intensità consente di definire delle "bande critiche" in frequenza entro le quali il suono mascherato è coperto in virtù della intensità del suono o rumore mascherante (mascheramento in frequenza). Sotto questo aspetto si può ipotizzare un modello di funzionamento della membrana basilare come un banco di filtri che opera in parallelo (auditory filters). Secondo il modello di Zwicker il profilo del filtro, desunto dal fenomeno del mascheramento, presenta particolari pendenze con larghezze di banda di analisi chiamante "critiche" ed espresse in BARK. Il modello di Moore, invece, ricorre a filtri, a profilo rettangolare, con le bande passanti equivalenti in energia ERB a quelli dei filtri con pendenze desunte da prove soggettive. La frequenza di centro banda dei filtri è pari a quella dei suoni che eccitano la membrana basilare.

La diversa percezione di intensità soggettiva di suoni di pari livello ma di durata limitata, viene quantificata con l'impiego di costanti di integrazione diverse per l'attacco e per il rilascio di suoni di breve durata.

Entrambi i metodi portano alla definizione di una impronta di eccitazione legata all'ampiezza in uscita da ciascun filtro. L'ampiezza della risposta è espressa in densità di loudness ( Loudness specifico espresso in son/BARK o son/ERB) che tengono conto dei fenomeni di mascheramento. Il valore in Son della Loudness è ottenuto dalla somma dei diversi valori di loudness specifica.

## 3. Implementazione del programma di calcolo

Scopo finale del programma è quello di determinare l'andamento della Loudness specifica in funzione della scala delle sensazioni espresse in son/ERB:  $N'(ERB)$ .

Il segnale audio (formato \*.wav) subisce una prima filtratura, nel dominio della frequenza, per tener conto della risposta dell'orecchio esterno e medio fino all'attacco della staffa sulla finestra ovale Figura 1.

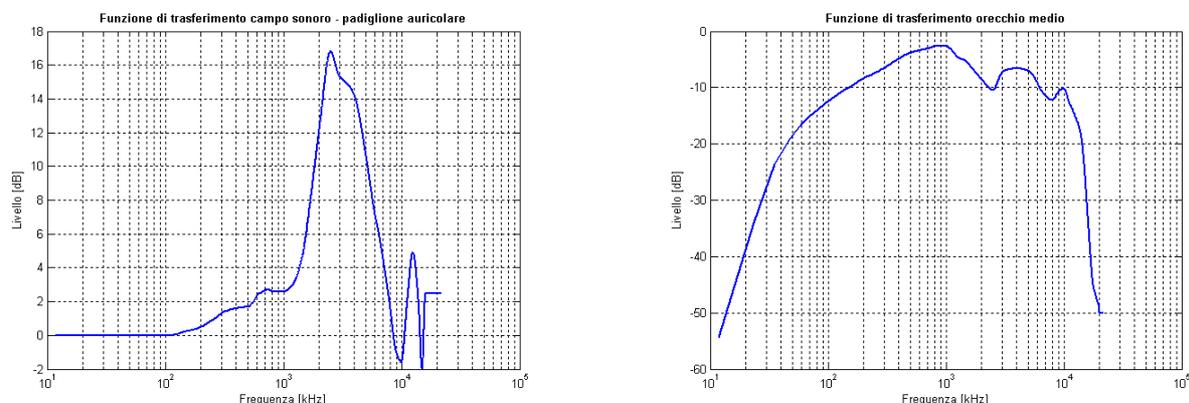


Figura 1 – Funzione di trasferimento tra ambiente esterno e membrana timpanica e tra membrana timpanica fino alla finestra ovale della coclea.

Il segnale variabile nel tempo, con proprio contenuto spettrale deve essere elaborato per tener conto dell'andamento temporale e del fenomeno di mascheramento. Il segnale audio filtrato è analizzato con algoritmo FFT su finestre multiple di diversa durata (da 64 ms, per risolvere le basse frequenze a 32 ms; a 16 ms; a 8 ms; a 4 ms; e a 2 ms). Le diverse finestre temporali agiscono simultaneamente sullo stesso segnale al fine di determinare i livelli nelle bande da 20 a 80 Hz; da 80 a 500 Hz; da 500 a 1250 Hz; da 1250 a 2540 Hz; da 2540 a 4050 Hz e da 4050 a 15000 Hz), si realizzano una serie di analisi FFT (con successione di 1 ms) che si presenta come analisi continua con “sovrapposizione temporale”.

L'andamento temporale del multispettro subisce due processi. Il primo per calcolare lo spettro di eccitazione attraverso il filtraggio con la risposta dell'auditory filter e la correzione di soglia dei filtri ERB; il secondo, in successione, per il calcolo della Loudness specifica (Son/ERB) dalla eccitazione attraverso una convoluzione con la FFT del segnale filtrato per tener conto del fenomeno del mascheramento in frequenza. Si giunge al valore complessivo della loudness (in son) mediante la somma delle Loudness specifiche nella scala delle sensazioni espresse in ERB. Per questo calcolo si utilizzano tre soglie normalizzate dalla soglia di saturazione alla soglia di udibilità.

Si procede al calcolo della densità spettrale di potenza (PSD) del segnale filtrato attraverso l'analisi con multispettro. Si calcola, in questo modo, il relativo filtro uditivo (auditory filter).

Se il segnale è stazionario si determina direttamente l'eccitazione  $E(f)$  e da essa la loudness specifica (esempio di una nota musicale tenuta o di un rumore industriale stazionario).

Se il segnale è variabile nel tempo si determina, ogni millisecondo, il valore della loudness istantanea globale utilizzando la FFT “multirisoluzione”. Dall'andamento della Loudness istantanea si può calcolare la loudness su “tempo breve” STL tenendo conto di una pesatura temporale analoga alla pesatura FAST e SLOW dei fonometri pervenendo ad un andamento del livello di loudness opportunamente pesato temporalmente (esempi di brani musicali, rumore di traffico etc).

Dall'andamento temporale della Loudness si possono calcolare i livelli statistici "percentili". Zwicker e Fastl propongono il calcolo dei percentili N7 per la parola; N5 per rumori di tipo ambientale e N4 per il rumore di traffico sull'andamento temporale della loudness determinato con procedimento diverso da quello descritto.

Glasber e Moore calcolano per l'andamento temporale della loudness istantanea il valore a tempo breve STL (short-term loudness) e, quindi, il valore massimo al fine di valutare la loudness globale. E' conveniente esprimere la loudness come livello di loudness attraverso il processo di conversione indicato dalla Norma ANSI S3.4-2007.

#### 4. La determinazione della loudness in campo musicale

Gli aspetti percettivi sono molteplici, si riportano due esempi: il primo relativo al calcolo della Loudness delle armoniche che costituiscono lo spettro sonoro della nota RE prodotta dal violino sulla terza corda.

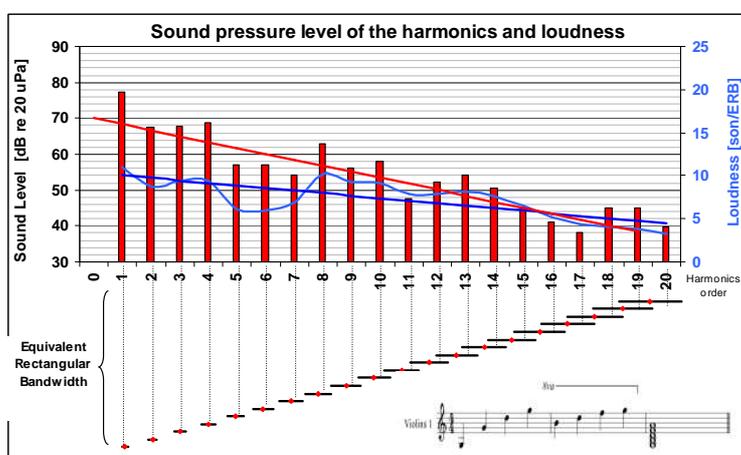


Figura 2 – Livelli di pressione sonora di ciascuna armonica (bande verticali rosse). Livello di loudness in Phon di ciascuna armonica curva continua blu

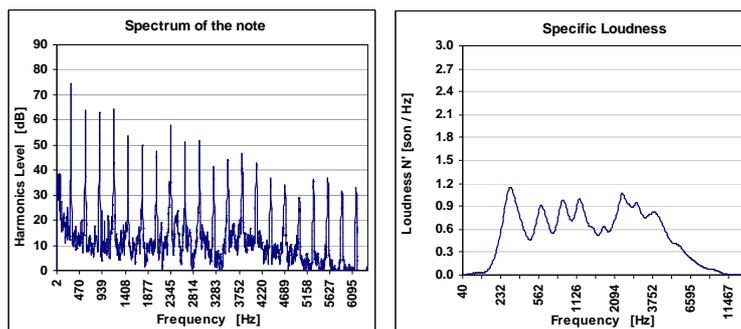


Figura 3 – Spettro del suono prodotto dalla nota RE. Si calcola la loudness specifica per determinare la loudness in Son

Dallo spettro FFT del segnale si calcola la loudness specifica per convoluzione del segnale con il banco di auditory filter (Figura 2).

Il secondo esempio è relativo all'andamento temporale della loudness di un breve brano musicale. Nello storico di Fig. 4 si confronta l'andamento del livello di loudness (phon) con il livello sonoro pesato "A". A lato del tracciato storico è riportato il grafico di dispersione dei livelli di loudness (phon) in funzione dei livelli sonori pesati "A".

Il campionamento è quello della Loudness istantanea un dato ogni un millisecondo.

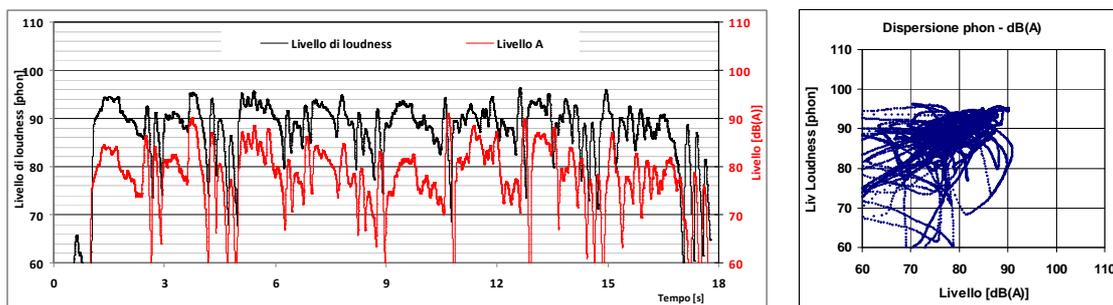


Figura 4 – Andamento temporale del livello di loudness a tempo breve confrontato con il livello sonoro pesato “A” rilevati durante l’esecuzione di un brano musicale

Dai tracciati grafici e dai valori dei livelli di pressione sonora e della loudness si calcolano i seguenti indici.

Descrittori	Livello A	Loudness Level
	$L_{Aeq,FAST}$ [dB(A)]	Short Time [phon]
Livello medio	81.2	89.9
Scarto tipo	10.8	8.5
minimo	38.6	59.5
massimo	91.0	96.2
Num. Campioni	17399	17301

Come è possibile osservare non vi è una dipendenza lineare tra i livelli sonori pesati “A” e il livello di loudness. Questo perché la loudness è più strettamente legata allo spettro che per i segnali musicali presenta significative periodicità e variazioni di timbro. La differenza media è di circa 8.7 dB.

## 5. La determinazione della loudness di rumori

Il programma di calcolo è implementato per analizzare, nel tempo, i rumori di carattere stazionario e quelli variabili.

A parità di livello equivalente i valori della loudness dipendono dall’andamento dello spettro del segnale, dalla sua composizione e dalla durata di eventuali eventi elementari di breve durata o short time. Per evidenziare l’importanza degli indicatori psicoacustici connessi con la quantificazione del disturbo sull’uomo sono stati analizzati rumori tipici quali: il rumore di un treno merci in transito, a 50 metri di distanza dal microfono; il rumore su una strada a scorrimento veloce a 20 metri di distanza; il rumore antropico in una strada urbana chiusa al traffico veicolare a forte affluenza di persone; il rumore industriale.

I grafici che seguono si riferiscono ai tracciati temporali dei 4 campioni sonori analizzati e per ciascuno di essi si calcolano i livelli statistici, il livello equivalente ed il livello STLmax.

### *Rumore di un treno*

Nella Figura 5 si riporta il tracciato storico del livello sonoro e della loudness rilevati durante il transito del treno. La curva nera si riferisce all’andamento della loudness con costante di tempo short breve, quella rossa si riferisce all’andamento del livello sonoro pesato “A”. Si osserva il fischio iniziale del treno merci in arrivo: il livello di

loudness coincide con il livello sonoro pesato “A”. La situazione cambia, invece, durante il transito del locomotore e dei vagoni. I livelli pesati “A” sono decisamente inferiori ai livelli di loudness.

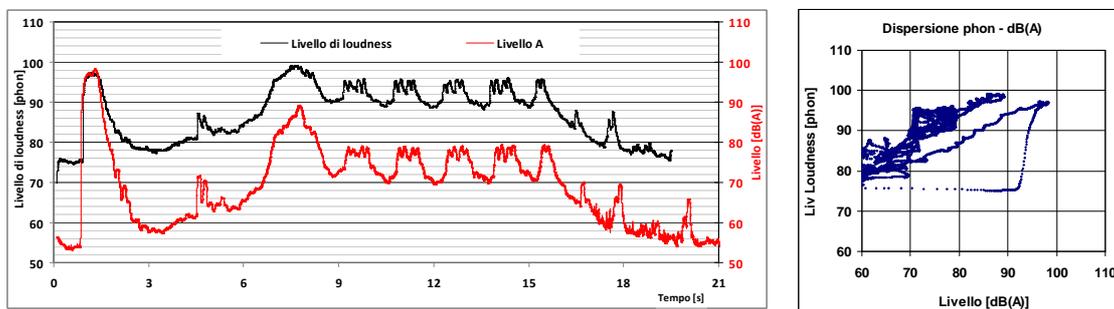


Figura 5 – Andamento temporale del livello di loudness a tempo breve confrontato con il livello sonoro pesato “A” rilevati durante il transito di un treno.

Il grafico della dispersione raccoglie su una retta la dipendenza del livello di loudness al livello sonoro. Si calcolano, quindi, i seguenti indici:

Descrittori	Livello A	Loudness Level
	$L_{Aeq,FAST}$ [dB(A)]	Short Time [phon]
Livello medio	82.0	91.1
Scarto tipo	10.2	6.8
minimo	52.4	75.5
massimo	98.2	99.1
Num. Campioni	21321	19102

Il livello di rumore captato durante il transito dei vagoni è mediamente pari a 82.0 dB(A), contro il livello di loudness pari a 91.1 Phon. La differenza media è di circa 9.1 dB.

*Rumore di traffico stradale*

Nella Figura 6 si riporta l’analisi di un rumore di traffico autostradale, non intenso, con evidenti passaggi di singole vetture. Il livello di rumore è mediamente pari a 60.7 dB(A), contro il livello di loudness pari a 80.9 Phon.

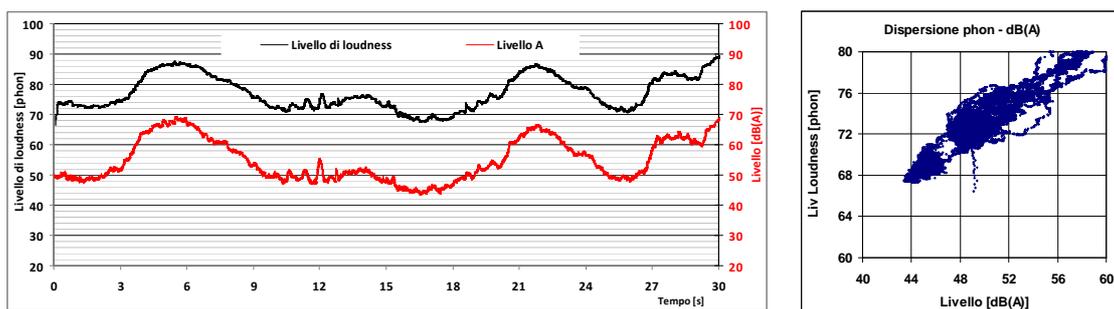


Figura 6 – Andamento temporale del livello di loudness a tempo breve confrontato con il livello sonoro pesato “A” relativo ad una misura di traffico autostradale

Anche in questo caso i punti nel grafico di dispersione si raccolgono lungo una retta. I valori statistici sono riportati nella tabella seguente. Si osserva che la differenza tra il livello sonoro ed il livello di loudness è di circa 20 dB. Gli scarti tipo scendono significativamente.

Descrittori	Livello A	Loudness Level
	$L_{Aeq,FAST}$ [dB(A)]	Short Time [phon]
Livello medio	60.7	80.9
Scarto tipo	7.1	5.8
minimo	43.4	67.3
massimo	69.6	89.2
Num. Campioni	34400	30021

*Rumore isola pedonale*

Le aree urbane prive di traffico stradale presentano una realtà sonora decisamente diversa da quella inquinata dal rumore di traffico. L'esempio riportato è stato registrato al quarto piano di un edificio che si affaccia su una strada chiusa delimitata da alti edifici continui. A volte il vociare delle persone si manifesta con intensità tale da consentire la comprensione del discorso.

Nella Figura 7 si riporta il tracciato temporale del livello di rumore prodotto esclusivamente dal vociare dei passanti.

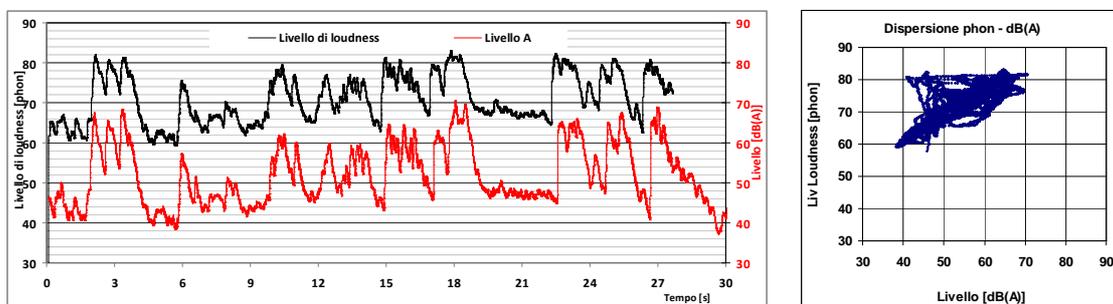


Figura 7 – Andamento temporale del livello di loudness a tempo breve confrontato con il livello sonoro “A” relativo al rumore antropico in una strada pedonale

Descrittori	Livello A	Loudness Level
	$L_{Aeq,FAST}$ [dB(A)]	Short Time [phon]
Livello medio	58.0	74.5
Scarto tipo	7.5	7.0
minimo	37.1	59.1
massimo	70.5	83.1
Num. Campioni	29899	27200

La differenza dei livelli equivalenti è pari a 16.5 dB, si avvicinano, invece, gli scarti tipo (per entrambi circa 7 dB).

*Rumore industriale di tipo continuo*

All'interno di uno stabilimento durante l'attività produttiva di più linee si rileva in un punto operatore un livello sonoro di 80.9 dB(A) contro un livello di loudness pari a 95.7 Phon.

Nella Figura 8 si riporta l'andamento del livello sonoro e del livello di loudness. Anche in questo caso il diagramma di dispersione Loudness/Livello sonoro evidenzia una dipendenza circa lineare dei due parametri. Lo scarto tipo per la stazionarietà del rumore è praticamente minimo.

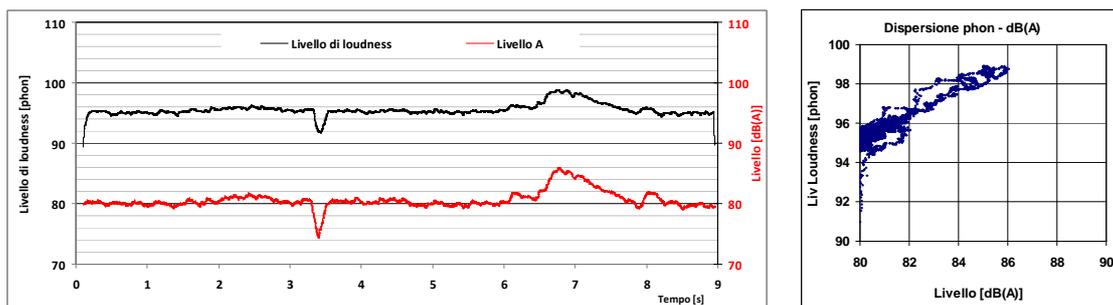


Figura 8 – Andamento temporale del livello di loudness a tempo breve confrontato con il livello sonoro pesato “A” relativo al rumore prodotto da un riduttore su un motore

Descrittori	Livello A	Loudness Level
	$L_{Aeq,FAST}$ [dB(A)]	Short Time [phon]
Livello medio	80.9	95.7
Scarto tipo	1.4	1.0
minimo	74.4	89.6
massimo	86.0	98.9
Num. Campioni	8722	8722

Sono stati effettuati campionamenti di rumore in circa 30 punti in prossimità delle diverse linee produttive. Il rumore rilevato è costante e presenta spettri e livelli diversi.

Di seguito nella Figura 8 si traccia il diagramma di dispersione fra i livelli sonori ed i livelli di loudness misurati.

L’interpolazione dei valori mostra un elevato coefficiente di correlazione se il polinomio di interpolazione è di quarto grado. Si passa da un coefficiente di correlazione  $R^2=0.9685$  per una regressione lineare ad uno pari a  $R^2=0.9775$  per una regressione polinomiale del quarto grado.

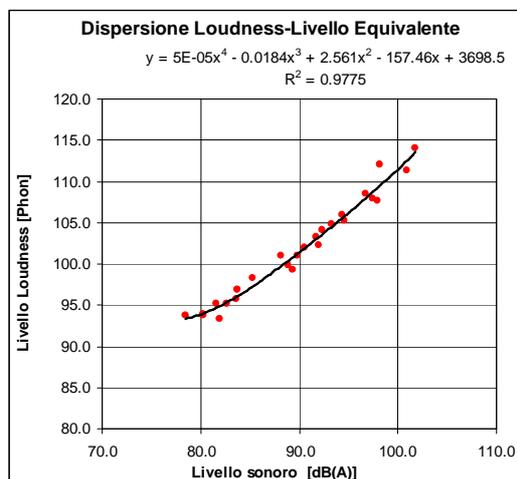


Figura 8–Grafico della dispersione fra i livelli di loudness ed i livelli equivalenti misurati

L’impiego di parametri psicoacustici per la valutazione del disturbo da rumore richiede una indagine approfondita della reazione della comunità ai rumori di diversi livelli di loudness. Se si vuole dare un significato quantitativo più coerente alla entità delle proteste di persone senza preconcetti.