

QUANTIFICAZIONE DELL'IMPULSIVITÀ DI RUMORI INDUSTRIALI MEDIANTE LIVELLI SONORI PERCENTILI

IMPULSIVENESS OF INDUSTRIAL NOISES QUANTIFIED USING STATISTICAL NOISE LEVELS

Paolo Lenzuni *

INAIL - Settore Ricerca Certificazione e Verifica - U.O.T. Firenze

* Indirizzo dell'autore di riferimento - Corresponding author's address:

Via delle Porte Nuove 61 - 50144, Firenze, Italia

e-mail: p.lenzuni@inail.it

(Ricevuto il 30/06/2016, accettato il 06/09/2016)

RIASSUNTO

In questo lavoro viene indagata la possibilità che l'impulsività di un rumore possa essere efficacemente quantificata mediante la differenza fra i due livelli percentili L_1 ed L_{16} . A supporto di questa ipotesi vengono presentati test numerici eseguiti su diverse distribuzioni. Rispetto ad altri descrittori proposti nella recente letteratura, $(L_1 - L_{16})$ risulta concettualmente assai più semplice e non richiede alcuna elaborazione aggiuntiva rispetto a quanto fornito da un fonometro. La quantificazione dell'impulsività avviene assegnando un rumore ad una di quattro classi di impulsività, alle quali vengono associate penalità additive rispetto al livello equivalente pari a 0; 1; 3,5 e 4,5 dB rispettivamente.

ABSTRACT

This paper explores the hypothesis that noise impulsiveness can be effectively quantified using the difference between the two statistical levels L_1 and L_{16} . This hypothesis is further supported by some numerical tests carried out on various statistical distributions. When compared to other descriptors of impulsiveness discussed in the recent scientific literature, $(L_1 - L_{16})$ turns out to be much simpler both conceptually and computationally.

Quantification of impulsiveness is carried out by assigning a noise signal to one of four categories, which itself implies a penalty which ranges between 0 (class A, quasi-continuous) and 4.5 dB (class D, very impulsive).

parole chiave: impulsività; Kurtosi; livelli percentili.

keywords: impulsiveness, Kurtosis; percentile levels.

1. Introduzione

Viene definito impulsivo un rumore caratterizzato da brevi incrementi (bursts) di pressione sonora, ciascuno tipicamente di durata inferiore ad 1 secondo. Da almeno cinque decenni si discute della possibilità che un'esposizione a rumore impulsivo possa risultare, a parità di livello sonoro, più dannosa per l'udito di un'esposizione a rumore stazionario [1-3]. Nel tempo si è accumulata una notevole serie di indagini sperimentali (vedi ad esempio [4] per una recente rassegna) dai risultati contraddittori, con evidenze sia di tipo "positivista" che di tipo "negazionista". L'evoluzione della normativa tecnica ha inevitabilmente seguito questo andamento ondivago, finendo con il ritrattare anche le poche prese di posizione nette assunte negli anni.

In particolare meritano di essere citati due criteri:

- a) ISO 11204 – l'edizione 1996 [5] di questo standard conteneva l'appendice C "Guidelines for the detection of impulsive noise" nella quale compariva un semplice criterio di impulsività

$$(1) \quad L_{pA_{Ieq}} - L_{pA_{eq}} \geq 3 \quad [\text{dB}]$$

Nell'equazione (1) $L_{pA_{Ieq}}$ è il livello sonoro continuo equivalente ponderato A rilevato con la costante di tempo Impulse, mentre $L_{pA_{eq}}$ è il livello sonoro continuo equivalente ponderato A. Benché inserito nella UNI 9432 [6] e quindi di fatto promosso a criterio di riferimento per l'impulsività negli ambienti di lavoro, il criterio (1) è subito apparso difficilmente praticabile e oggi viene assai raramente utilizzato. Più recentemente l'appendice C è stata completamente rimossa, con tutto il suo contenuto, dalla versione 2010 [7] della ISO 11204 con ciò facendo venir meno anche il supporto formale all'utilizzo di questo metodo.

- b) ISO 1999 – l'edizione 1990 [8] di questo standard conteneva nella sua sezione 1 – Scope – la seguente affermazione "Some users may, however, wish to consider tonal noise and/or impulsive/impact noise about as harmful as a steady nontonal noise that is approximately 5 dB higher in level." Questo paragrafo è scomparso nella versione 2013 [9].

A completamento di questo quadro sconcertante citiamo il fatto che la norma tecnica UNI EN ISO 9612 [10], principale riferimento internazionale per la valutazione dell'esposizione professionale a rumore, non contiene alcun criterio di impulsività, neppure qualitativo.

Benché anche in tempi recenti [11] continuino ad apparire studi "negazionisti", la chiara maggioranza dei lavori degli ultimi 30 anni indica un significativo aumento della perdita uditiva in soggetti professionalmente esposti a rumore prevalentemente impulsivo [12-14]. Il problema di una ridefinizione del descrittore di esposizione, in modo tale da tener opportunamente conto (mediante una specifica penalizzazione) delle caratteristiche di impulsività del rumore, è di conseguenza più che mai attuale. Anche (soprattutto) perché il D.Lgs. 81/2008 [15], in linea con la direttiva europea da cui discende, se da una parte non contiene alcun criterio per quantificare l'impulsività, dall'altra prevede espressamente che l'impulsività debba essere presa in considerazione nel processo di valutazione del rischio (art. 190, comma 1 lettera a).

La penalizzazione dei rumori impulsivi nel contesto del discomfort acustico compare in due diversi contesti. Nella legislazione italiana (D.M 16.3.1998 - Allegato A, punto 15) esiste un unico fattore correttivo da aggiungere al livello equivalente $K_I = 3$ dB.

Nella normativa tecnica internazionale (ISO 1996-1:2016 [16]) compaiono due diversi fattori correttivi di 5 dB per “regular impulsive noise” e 12 dB per “highly-impulsive noise”. In entrambi i casi si tratta di penalizzazioni non direttamente tracciabili a studi scientifici e, soprattutto, che non dipendono dalla maggiore o minore impulsività del segnale. Gli studi [17, 18] sono quelli che con maggior rigore scientifico quantificano, mediante la cosiddetta *prominence*, l'impulsività di un suono, e sulla base di tale *prominence* calcolano il fattore correttivo di penalizzazione da applicare. Tuttavia i metodi proposti in questi lavori risultano eccessivamente complessi per una loro trasposizione nel mondo dell'acustica occupazionale.

In questo lavoro viene presentato un metodo di quantificazione dell'impulsività, che si inserisce in una scuola di pensiero ormai abbastanza adulta, basato sull'uso della kurtosi della distribuzione della pressione sonora. L'obiettivo è che il valutatore sia messo in grado di quantificare, con uno sforzo minimo, un elemento finora elusivo, ma sicuramente distintivo e potenzialmente rilevante per il danno uditivo, quale l'impulsività.

2. Quantificazione dell'impulsività mediante la kurtosi della distribuzione delle pressione

2.1 Sintesi della letteratura

A partire dai primi anni 2000 [19] è stato sviluppato negli Stati Uniti un metodo in grado di tener conto dell'impulsività del rumore modificando la metrica classica dell'esposizione al rumore (basata sulla semplice combinazione di livello equivalente e tempo di esposizione) attraverso la kurtosi (vedi ad esempio [20] per una discussione critica del significato di questa quantità) della distribuzione della pressione sonora p . Il metodo, che si fonda su un'idea già formulata negli anni '80 [21], si è sempre più arricchito di studi sperimentali condotti sia su animali sia su soggetti umani [22-28] e di modelli interpretativi mirati a trovare la miglior previsione dei dati di perdita uditiva anch'essi misurati sperimentalmente.

La kurtosi β_2 di una distribuzione, definita come il rapporto fra il momento quarto e il quadrato del momento secondo

$$(2) \quad \beta_2 = \frac{E(p - \bar{p})^4}{[E(p - \bar{p})^2]^2}$$

è di fatto un indicatore dell'importanza delle code di una distribuzione: se β_2 è grande le code sono estese (distribuzione leptokurtica) e viceversa se β_2 è piccolo (distribuzione platikurtica). Poiché la kurtosi di una distribuzione normale è identicamente pari a 3, la kurtosi è di fatto un semplice indicatore dello scostamento di una distribuzione dalla normalità, nei suoi dati più estremi.

La trasposizione di questo metodo alla pratica quotidiana si scontra tuttavia col fatto che la misura della kurtosi della distribuzione della pressione sonora relativa alla forma d'onda originale di un segnale acustico è tutt'altro che immediata e di fatto risulta inaccessibile ai tecnici impegnati nella valutazione del rischio rumore. E' stato quindi proposto un metodo che utilizza in alternativa la kurtosi della *time history* degli short L_{eq} [29]. Benché essa rappresenti un passo nella giusta direzione, si tratta comunque ancora di una quantità che richiede l'esportazione della *time history* e una successiva

fase di calcolo offline per la conversione dei livelli sonori in pressioni sonore e per il calcolo della kurtosi. E' assai probabile che questo percorso finisca comunque con lo scoraggiare la grande maggioranza dei possibili tecnici interessati ad una stima dell'impulsività.

La riformulazione in chiave semplificatrice di questo metodo, che affrontiamo in questo lavoro, parte con una revisione dell'analisi presentata in alcuni dei più recenti studi sperimentali, in particolare quello di Zhao et al. [25] e di Goley et al. [26]. In quest'ultimo lavoro viene proposto di modificare il tradizionale descrittore del contenuto energetico di un segnale L_{Aeq} mediante un termine aggiuntivo $g[f(t)]$ con il quale si tiene conto del dettaglio dell'andamento temporale del segnale $f(t)$, che viene invece ignorato nella tradizionale ipotesi di validità del principio di uguale energia

$$(3) \quad L'_{Aeq} = L_{Aeq} + g[f(t)] \quad [\text{dBA}]$$

L'equazione (3) consente di calcolare con estrema semplicità un livello equivalente effettivo L'_{Aeq} , che tiene conto dell'impulsività del segnale. Dai diversi L'_{Aeq} è poi immediato calcolare un valore effettivo L'_{EX} mantenendo la coerenza con le indicazioni di legge. Nella formulazione di Goley et al. [26], il termine $g[f(t)]$ assume la forma

$$(4) \quad g[f(t)] = \lambda \times \log \frac{\beta_2}{\beta_N} \quad [\text{dBA}]$$

dove β_2 è la kurtosi della distribuzione della pressione sonora, $\beta_N = 3$ è la kurtosi di una distribuzione normale e λ è una costante per la quale da un best fit ai dati sperimentali viene ricavato il valore di 4,04. Formalmente l'equazione (4) possiede le desiderate caratteristiche di trasparenza di significato e di coerenza con il descrittore di legge. Tuttavia essa non appare completamente soddisfacente per due diversi motivi:

- 1) si basa su uno studio, che peraltro contiene un numero limitato di casi, della perdita di funzionalità uditiva di animali (cincillà) e non di soggetti umani;
- 2) come già anticipato, si appoggia ad un descrittore, la kurtosi della distribuzione della pressione sonora, di fatto inaccessibile alla platea dei possibili utenti.

Queste due questioni verranno affrontate separatamente nelle due successive sottosezioni.

2.2 Adattamento a soggetti umani

Studi recenti sulla perdita uditiva di soggetti umani professionalmente esposti per lunghi periodi a rumore impulsivo sono stati presentati da Zhao et al. [25] e da Xie et al. [28]. I risultati di questi studi sono stati interpretati dagli autori mediante la semplice forma analitica

$$(5) \quad CNE = L_{Aeq,8h} + [\ln(\beta_2) + 1,9] \times \frac{\log(T)}{\log(2)} \quad [\text{dBA}]$$

nella quale CNE è l'esposizione cumulata a lungo termine, $L_{Aeq,8h}$ è il livello equivalente scalato alle 8 ore della giornata lavorativa nominale, β_2 è la kurtosi e T è il tempo (in anni). Le caratteristiche di impulsività del rumore vengono assunte costanti su

tutto il periodo espositivo (tipicamente 5-20 anni). Mediante semplici passaggi algebrici, l'equazione (5) può essere riscritta nella forma

$$(6) \quad CNE = L_{Aeq,8h} + \left[10 + 7,65 \times \log\left(\frac{\beta_2}{\beta_N}\right) \right] \times \log(T) \quad [\text{dBA}]$$

L'espressione dell'esposizione cumulata CNE consiste di:

- un primo termine $L_{Aeq,8h} + 10 \log(T)$ che rappresenta l'integrale dell'energia sonora nel tempo secondo il semplice principio di uguale energia;
- un secondo termine $7,65 \log(\beta_2/\beta_N) \log(T)$ che dipende dalla kurtosi e dal tempo, e incorpora le informazioni sull'impulsività.

Poiché gli effetti ipoacusici si manifestano su tempi dell'ordine di 10 anni (più o meno un fattore due), la dipendenza dal tempo del secondo termine può essere rimossa riscrivendolo nella forma $(7,65 \pm 2,3) \log(\beta_2/\beta_N)$.

Con questa approssimazione l'impatto della kurtosi nell'equazione (6) può essere riscritto sotto forma di un termine additivo che interviene sul livello equivalente

$$(7) \quad L'_{Aeq} = L_{Aeq} + 7,65 \times \log\left(\frac{\beta_2}{\beta_N}\right) \quad [\text{dBA}]$$

L'equazione (7) risulta formalmente identica all'equazione (4), a parte la costante λ che dal valore originale di 4,04 [25] passa ad un valore rivisto di 7,65. L'equazione (7) è basata su studi relativi a soggetti umani, ma nel contempo rimane compatibile con i dati originali su cincillà di Goley et al. Infatti, a causa della notevole dispersione dei dati [26], la funzione $\chi^2(\lambda)$ possiede un minimo molto piatto, o, in altri termini, il coefficiente di correlazione $R^2(\lambda)$ possiede un massimo molto piatto (Fig. 1). Nel seguito useremo il secondo termine dell'equazione (7) come miglior stimatore dell'effetto dell'impulsività sul livello equivalente.

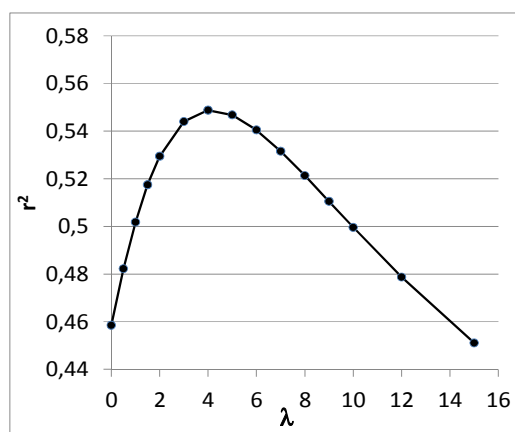


Figura 1 - Coefficiente di correlazione del fit ai punti sperimentali di Goley et al. [26] in funzione della pendenza della retta di regressione - Correlation coefficient of the regression line to the dataset of Goley et al. [26], as a function of the regression line slope.

2.3 Relazione fra kurtosi e livelli percentili

Considerando che la kurtosi della distribuzione della pressione sonora è in qualche modo legata alla frequenza e all'entità delle fluttuazioni più rilevanti, un'ipotesi da esplorare è che un possibile surrogato possa essere trovato in una combinazione di livelli percentili della pressione sonora.

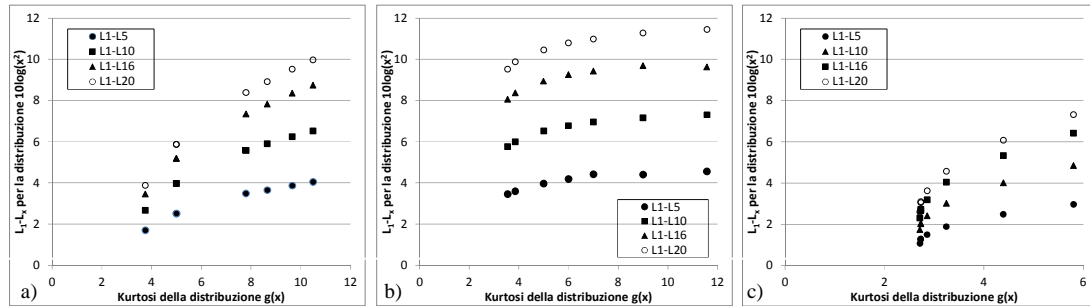


Figura 2 - Correlazione fra la differenza dei livelli percentili e la kurtosi della distribuzione della pressione sonora: (a) distribuzione Gamma; (b) distribuzione Pearson VII; c) distribuzione Weibull - Correlation between percentile noise level differences and kurtosis: (a) Gamma distribution; (b) Pearson VII distribution; c) Weibull distribution.

Una semplice verifica numerica evidenzia in effetti una stretta correlazione fra la kurtosi di una distribuzione $g(x)$ e la differenza $(L_1 - L_k)$ fra due percentili posti nella coda "positiva" della distribuzione della quantità $10\log(x^2)$. Poiché l'operatore $10\log(x^2)$ è quello che converte la pressione sonora nel livello sonoro, i percentili della distribuzione della quantità così ottenuta corrispondono ai livelli sonori percentili. La Figura 2 mostra tale correlazione per diversi livelli percentili L_k e per tre diverse famiglie di distribuzioni:

nella Figura 2a la distribuzione Gamma [30]

$$(8) \quad g(x) = \frac{\left(\frac{x}{b}\right)^{c-1} e^{-x/b}}{b\Gamma(c)}$$

nella Figura 2b la distribuzione di Pearson tipo VII [31, 32] (una generalizzazione della distribuzione t di Student)

$$(9) \quad g(x) = \frac{\Gamma(m)}{a\sqrt{\pi}\Gamma(m-1/2)} \times \left[1 + \left(\frac{x}{a}\right)^2\right]^{-m}$$

nella Figura 2c la distribuzione di Weibull [30]

$$(10) \quad g(x) = \frac{a}{b} \left(\frac{x}{b}\right)^{a-1} \times e^{-(x/b)^a}$$

I coefficienti di correlazione lineari sono molto alti per tutte le differenze ($L_1 - L_k$) ($\geq 0,95$ per le distribuzioni Gamma, $\geq 0,75$ per le distribuzioni di Pearson, $\geq 0,90$ per le distribuzioni di Weibull) e ancora più alti nel caso di una relazione logaritmica. Emerge quindi la possibilità che una quantità del tipo ($L_1 - L_k$), rappresenti un buon indicatore di impulsività. Va sottolineato che a questo riguardo la probabile non linearità della relazione che emerge da queste considerazioni è del tutto irrilevante. Quelle fatte finora sono semplicemente considerazioni a sostegno di un'ipotesi. Sarà poi l'analisi dei dati sperimentali a verificare la consistenza di tale ipotesi e di conseguenza identificare la modalità più opportuna con cui sfruttare l'eventuale correlazione.

Valori di k più elevati garantiscono un valore assoluto della differenza ($L_1 - L_k$) più alto, e quindi abbassano l'incertezza associata all'arrotondamento del risultato a 0,1 dB. Tuttavia valori di k troppo elevati non sono indicativi del comportamento della distribuzione nelle sue code, che è l'elemento principale che viene quantificato dalla kurtosi. Quindi la scelta si restringe fra $k = 16$ e $k = 20$. Sui dati sperimentali (vedi la successiva sezione 3) la correlazione fra differenza ($L_1 - L_{16}$) e kurtosi è leggermente migliore della correlazione fra differenza ($L_1 - L_{20}$) e kurtosi. Inoltre L_{16} ha un significato statistico più comodo (è il valore della media + 1 sigma per una distribuzione normale) e quindi la scelta è caduta su ($L_1 - L_{16}$).

Nella successiva sezione 3 verificheremo che la quantità ($L_1 - L_{16}$), indicata per brevità come DLP_{16} , possa effettivamente rappresentare un descrittore di impulsività con le desiderate caratteristiche di buona correlazione con la kurtosi della distribuzione della pressione sonora $\beta_2(p)$, e di immediatezza di calcolo.

3. Misure sperimentali

Misure eseguite nei mesi di Marzo e Aprile 2015 hanno consentito l'acquisizione di 24 segnali relativi ad altrettante attrezzature utilizzati in lavorazioni metalmeccaniche [28]. Chiaramente si tratta di un campione insufficiente, sia per consistenza numerica sia per tipologia di attrezzature, a rappresentare l'intera popolazione dei rumori industriali. Tuttavia un eventuale risultato positivo rappresenterebbe un buon punto di partenza sul quale costruire in futuro un modello più solido basato su un campione di opportuna consistenza e variabilità.

Le misure sono state effettuate mediante un analizzatore 01dB-Stell modello Harmonie, corredato da un microfono 01dB-Stell modello MCE212, ed analizzate mediante i relativi software dBTrait, dBTrig e dBFA. La Figura 3 mostra, a titolo di esempio, l'andamento nel tempo della pressione sonora misurata per una taglierina.

La Tabella 1 sintetizza i risultati ottenuti analizzando i dati raccolti in queste misure: in particolare nella colonna 2 compare il livello equivalente L_{Aeq} , nella colonna 3 la kurtosi della distribuzione della pressione sonora della forma d'onda originale $\beta_2(p)$ e nella colonna 4 la quantità DLP_{16} . In linea di principio è possibile calcolare con questi dati una retta di regressione o un'altra più opportuna funzione analitica che, combinata con un'espressione del tipo dell'equazione (7), conduca ad una funzione continua mediante la quale penalizzare rumori con diverso grado di impulsività. Tuttavia la combinazione di:

- a) una possibile non linearità nella relazione fra kurtosi e differenze fra i livelli percentili (vedi la Figura 2);
- b) una limitata consistenza numerica del campione e in particolare l'esiguità dei dati con valori di kurtosi alti (solo in 5 casi su 24 si ha $\beta_2 \geq 10$, e solo in 1 caso su 24 si ha $\beta_2 \geq 20$), suggerisce di limitarsi raggruppare i segnali in alcune classi di impulsività in modo da calcolare un coefficiente di correzione discreto.

Per l'identificazione delle classi è stata eseguita una cluster analysis monodimensionale, basata semplicemente sulla coordinata DLP_{16} .

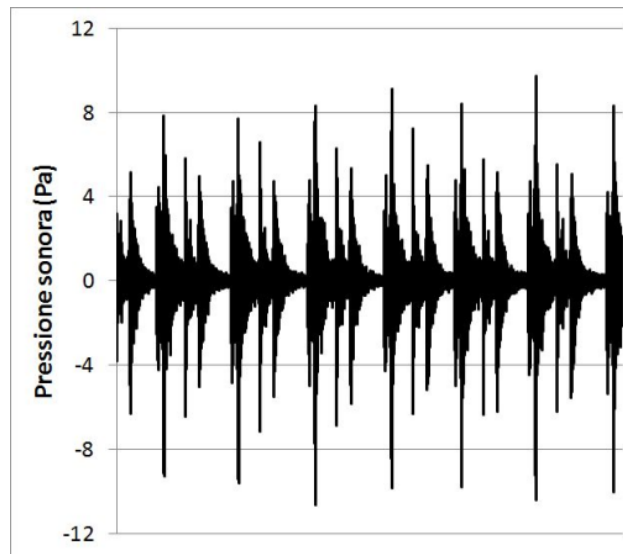


Figura 3 - Andamento temporale della pressione sonora (taglierina) - Sound pressure as a function of time (cutter).

Tabella 1 - Misure sperimentali di rumori industriali - Results of measurements of industrial noises.

<i>Utensile</i>	L_{Aeq} (dBA)	$\beta_2(p)$	DLP_{16} (dB)
Attestatrice	96,3	4,35	2,2
Avvitatore	76,4	4,43	0,7
Fresino	71,9	5,36	6,3
Mola grande	97,3	3,58	2,1
Mola piccola	91,1	3,68	2,2
Pantografo 1	102,7	5,46	2,3
Pantografo 2	102,5	7,82	5,1
Piegatrice 1	74,5	14,97	10,4
Piegatrice 2	71,1	4,57	6,8
Saldatrice ad elettrodo	70,2	8,24	4,4
Saldatrice a filo	90,5	42,80	6,6
Taglierina	88,7	18,42	6
Trapano a pistola	81,3	5,04	2,4
Troncatrice a disco (su ferro)	99,4	4,12	3,1
Troncatrice a nastro (su ferro)	86,8	4,20	2,4
Troncatrice a nastro (su alluminio)	91,6	19,70	6,8
Troncatrice a doppia testa 1	102,4	4,66	3,8
Troncatrice a doppia testa 2	103,0	4,25	3,9
Pistola ad aria compressa	93,7	6,74	4,7
Flessibile	86,7	3,78	1,6
Frullino	86,5	3,55	2,4
Martello	106,2	18,28	15,3
Mola	98,6	3,74	1,9
Sega a nastro	76,2	3,11	1,6

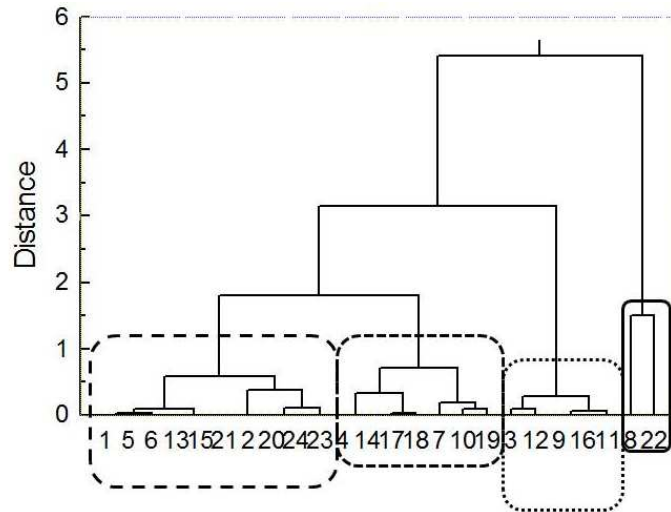


Figura 4 - Dendrogramma della cluster analysis dei segnali sonori, basata sul descrittore di impulsività DLP_{16} - Dendrogram of the cluster analysis of noise signals, based on the impulsiveness descriptor DLP_{16} .

Come mostrato dalla Figura 4, la cluster analysis evidenzia l'esistenza di 4 cluster così definiti: A) $DLP_{16} < 2,4$ (tratteggio lungo, 10 elementi); B) $3,1 < DLP_{16} < 5,1$ (tratteggio breve, 7 elementi); C) $6 < DLP_{16} < 6,8$ (puntini, 5 elementi); D) $DLP_{16} > 10,4$ (tratto continuo, 2 elementi).

Si osserva immediatamente nella Figura 5 che tutti e quattro questi cluster sono caratterizzati da una "dimensione" significativamente più piccola della loro reciproca "distanza" per cui possono essere definiti omogenei. Ogni cluster rappresenta pertanto una classe di impulsività.

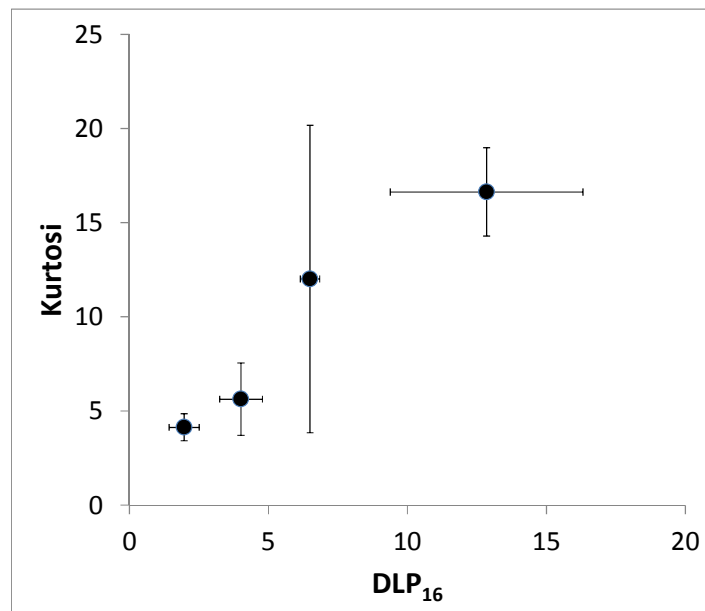


Figura 5 - I valori medi di DLP_{16} e delle kurtosi delle pressioni sonore $\beta_2(p)$ per le quattro classi di impulsività, e le relative deviazioni standard - Average values of DLP_{16} and of kurtosis of sound pressures $\beta_2(p)$ for the four impulsiveness categories with related standard deviations.

Tabella 2 - Classi di impulsività - Impulsiveness categories.

<i>Classe di Impulsività</i>	<i>Intervallo</i>	<i>Numero di segnali</i>
A	$DLP_{16} < 3$	10
B	$3 \leq DLP_{16} < 5,5$	7
C	$5,5 \leq DLP_{16} < 9$	5
D	$DLP_{16} \geq 9$	2

La Tabella 2 mostra gli intervalli di DLP_{16} scelti per separare le diverse classi di impulsività. Il fatto, in sé positivo, che la dimensione dei singoli cluster ovvero la dispersione dei valori di DLP_{16} all'interno di ogni singolo cluster sia piuttosto piccola, crea qualche incertezza nell'identificazione intervalli di DLP_{16} da applicare alle singole classi di impulsività. Tale incertezza può essere stimata dell'ordine del 10%.

Infine, per ciascuna classe di impulsività, la Tabella 3 mostra il valore medio della kurtosi $\beta_2(p)$ (colonna 2), e la correzione media per impulsività calcolata inserendo tale valore medio nell'equazione (7) (colonna 3).

Tabella 3 - Stime della correzione per impulsività - Estimates of the impulsiveness correction factor.

<i>Classe di Impulsività</i>	<i>Kurtosi media $\beta_2(p)$</i>	<i>Secondo termine dell'equazione (7)</i>	<i>Correzione per impulsività K_I</i>
A	4,13	1,07 dB	0 dB
B	5,63	2,09 dB	1 dB
C	12,01	4,61 dB	3,5 dB
D	16,63	5,69 dB	4,5 dB

Bisogna tuttavia considerare che la classe A raggruppa tutti quei rumori non impulsivi o minimamente impulsivi che rappresentano la base sulla quale è stata ricavata l'esistente relazione causa-effetto per la perdita uditiva, e quindi gli esistenti valori soglia di legge. Ad essa va pertanto assegnata una correzione nulla. Le stime migliori delle correzioni per impulsività K_I si ottengono di conseguenza sottraendo ai valori di K_I originariamente identificati per le quattro classi A, B, C, D (1,07 dB, 2,09 dB, 4,61 dB, 5,69 dB rispettivamente) il valore relativo alla classe A. I risultati finali, arrotondati a 0,5 dB, compaiono nella colonna 4.

I segnali utilizzati in questo studio hanno le limitazioni cui si è accennato all'inizio di questa sezione. Di tali limitazioni risente ovviamente anche la definizione delle classi di impulsività. L'applicabilità di queste ultime a tutti i rumori industriali risulta subordinata al completamento di uno studio con un campione numericamente più consistente e più articolato.

In sintesi, risulta possibile tener conto dell'impulsività di un rumore ricalcolandone il livello equivalente effettivo L^*_{Aeq} mediante l'equazione

$$(11) \quad L^*_{Aeq} = L_{Aeq} + K_I \quad [\text{dBA}]$$

La correzione per impulsività K_I viene calcolata assegnando il rumore stesso ad una di quattro classi di impulsività, assegnazione che avviene sulla base della differenza fra i due livelli percentili L_1 e L_{16} . La correzione del livello equivalente dovuta all'impulsività del segnale risulta compresa fra 0 e 4,5 dB.

Conclusioni

I principali punti di forza di questo studio sono:

1. è risultato possibile quantificare l'impulsività di un rumore mediante la differenza fra i livelli sonori percentili L_1 e L_{16} . Questo indicatore possiede un significato intuitivo e risulta veramente elementare da calcolare dato che non richiede alcuna elaborazione aggiuntiva rispetto a quanto già fornito da un fonometro contemporaneo;
2. allo stesso modo, l'algoritmo che corregge il livello equivalente per tener conto dell'impulsività (Eq. 11) è estremamente semplice sia dal punto di vista del significato, sia dal punto di vista matematico;
3. l'indicatore del potenziale di danno associabile al rumore al quale il soggetto è esposto nell'esecuzione di un dato compito, è e resta il livello equivalente. Pertanto viene rispettato il vincolo formale imposto dalla vigente legislazione e rimane perfettamente valido l'impianto procedurale che, partendo dalle misure, conduce al calcolo del livello di esposizione (es. usando il foglio di calcolo fornito a corredo della UNI EN ISO 9612), una volta eseguita la sostituzione del tradizionale L_{Aeq} con il nuovo L^*_{Aeq} .

Il principale elemento di debolezza di questo studio è rappresentato dalla modesta consistenza numerica del campione analizzato (24 segnali) e dalla "monotematicità" dei segnali, tutti relativi ad utensili caratteristici di lavorazioni metalmeccaniche. Considerati i promettenti risultati (vedi i punti precedenti) raggiunti in questo studio è auspicabile il modello descritto possa essere migliorato e reso più solido facendo uso di un campione di opportuna consistenza e variabilità.

Conclusions

This study's main results can be summarized as follows:

1. noise impulsiveness can be quantified using the difference ($L_1 - L_{16}$) between two statistical noise levels. This quantity is self-explanatory in its meaning, and it is extremely simple to calculate since it does not require any additional computation beyond what is provided by any contemporary sound level meter;
2. the algorithm developed to calculate the effective continuous equivalent sound pressure level that takes into account the noise impulsiveness (equation 8) is also straightforward both in its meaning and from a computational viewpoint;
3. the method does not alter the choice of the basic quantity used to characterize a given signal in the context of occupational exposure to noise, which is still the continuous equivalent sound pressure level. Consistency is therefore maintained with respect to:
 - the formal requirement set by the existing EU legislation;
 - the procedure set by ISO 9612 for the calculation of the noise exposure level, which can still be used just replacing the measured value L_{Aeq} with the effective value L^*_{Aeq} .

The most noticeable pitfall of this study is the limited size of the analyzed sample (only 24 signals), and its focus on metal workshop tools. This said, the promising preliminary results that have been achieved, make the model outlined in this work a viable basis, which should be improved and strengthened when supported by a larger and more exhaustive signal sample.

Ringraziamenti

Si ringrazia l'ing. Lucia Bertuzzi per l'apporto fornito nella realizzazione delle misure.

Bibliografia

- [1] Kryter, K.D., Ward, W.D., Miller, J.D., Eldredge, D.H. (1966). Hazardous exposure to intermittent and steady state noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 39(3), pp. 451-464.
- [2] Coles, R.R.A., Garinther, G.R., Hodge, D.C. (1968). Hazardous Exposure to Impulse Noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 43(2), pp. 336-343.
- [3] Ward, W.D. (1968). Proposed damage-risk criterion for impulse noise (gunfire). NAS-NRC Committee of Hearing, Bioacoustics and Biomechanics, Washington, U.S.A.
- [4] Lie, A., Skogstad, M., Johannessen, H.A., Tynes, T., Mehlum, I.S., Nordby, K.C. et al. (2016). Occupational noise exposure and hearing: a systematic review. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 89(3), pp. 351-372.
- [5] ISO 11204: 1996. Acoustics, Noise emitted by machinery and equipment. Measurement of emission sound pressure levels at a work station and at other specified positions. Method requiring environmental corrections. Geneva, Switzerland: ISO.
- [6] UNI 9432: 2011. Acustica, Determinazione del livello di esposizione personale al rumore nell'ambiente di lavoro. Milano, Italia: UNI.
- [7] ISO 11204: 2010. Acoustics, Noise emitted by machinery and equipment - Determination of emission sound pressure levels at a work station and at other specified positions applying accurate environmental corrections. Geneva, Switzerland: ISO.
- [8] ISO 1999: 1990. Acoustics, Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment. Geneva, Switzerland: ISO.
- [9] ISO 1999: 2013. Acoustics, Estimation of noise-induced hearing loss. Geneva, Switzerland: ISO.
- [10] UNI EN ISO 9612:2011. Acustica, Determinazione dell'esposizione al rumore negli ambienti di lavoro. Metodo tecnico progettuale. Milano, Italia: UNI.
- [11] de Toro, M.A., Ordoñez, R., Reuter, K., Hammershøi, D. (2011). Is it necessary to penalize impulsive noise +5 dB due to higher risk of hearing damage? *Journal of the Acoustical Society of America*, 129(6), pp. 3808-3817.
- [12] Starck, J., Toppila, E., Pyykko, I. (2003). Impulse noise and risk criteria. *Noise and Health*, 5(20), pp. 63-73.
- [13] Tambs, K., Hoffman, H.J., Borchgrevink, H.M., Holmen, J., Engdahl, B. (2006). Hearing loss induced by occupational and impulse noise: results on threshold shifts by frequencies, age and gender from the Nord-Trøndelag Hearing Loss Study. *International Journal of Audiology*, 45(5), pp. 309-317.
- [14] Forget, P. (2011). Assessment of mean auditory hazard incurred by occupational exposure to impulse noise. *European Annals of Otorhinolaryngology, Head and Neck Diseases*, 128(1), pp. 14-17.
- [15] Decreto Legislativo n. 81 del 9 aprile 2008. Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e sicurezza nei luoghi di lavoro. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, Suppl. n.108/L, 30/4/2008.

- [16] ISO 1996-1: 2016. Acoustics, Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 1: Basic quantities and assessment procedures. Geneva, Switzerland: ISO.
- [17] Pedersen, T.H. (2001). Objective method for measuring the prominence of impulsive sounds and for an adjustment of L_{Aeq} . In: Proceedings of Internoise 2001. The Hague, The Netherlands, 27-30 August.
- [18] NordTest method NT ACOU 112: 2002. Acoustics: prominence of impulsive sounds and adjustment of L_{Aeq} . Espoo, Finland.
- [19] Hamernik, R.P., Qiu, W., Davis, B. (2003). The effects of the amplitude distribution of equal energy exposures on noise-induced hearing loss: the kurtosis metric. *Journal of the Acoustical Society of America*, 114(1), pp. 386-395.
- [20] DeCarlo, L.T. (1997). On the meaning and use of kurtosis. *Psychological methods*, 2, pp. 292-307.
- [21] Erdreich, J. (1986). A distribution based definition of impulse noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 79, pp. 990-998.
- [22] Qiu, W., Hamernik, R.P., Davis, B. (2006). The kurtosis metric as an adjunct to energy in the prediction of trauma from continuous, non-Gaussian noise exposures. *Journal of the Acoustical Society of America*, 120(6), pp. 3901-3906.
- [23] Hamernik, R.P., Qiu, W., Davis, B. (2007). Hearing loss from interrupted, intermittent and time-varying non-Gaussian noise exposures: the applicability of the equal energy hypothesis. *Journal of the Acoustical Society of America*, 122(4), pp. 2245-2254.
- [24] Davis, R.I., Qiu, W., Hamernik, R.P. (2009). Role of the kurtosis statistics in evaluating complex noise exposures for the protection of hearing. *Ear & Hearing*, 30(5), pp. 628-624.
- [25] Zhao, Y., Qiu, W., Zeng, L., Chen, S., Cheng, X., Davis, R. et al. (2010). Application of the kurtosis statistic to the evaluation of the risk of hearing loss in workers exposed to high-level complex noise. *Ear & Hearing*, 31(4), pp. 527-532.
- [26] Goley, G., Song, W., Kim, J. (2011). Kurtosis corrected sound pressure level as a metric for risk assessment of occupational noises. *Journal of the Acoustical Society of America*, 129(3), pp. 1475-1481.
- [27] Davis, R.I., Qiu, W., Heyer, N.J., Zhao, Y., Yang, Q., Li, N. et al. (2012). The use of the kurtosis metric in the evaluation of occupational hearing loss in workers in China: implications for hearing risk assessment. *Noise & Health*, 14(61), pp. 330-342.
- [28] Xie, H.W., Qiu, W., Heyer, N.J., Zhang, M.B., Zhang, P., Zhao, Y. et al. (2016). The use of the kurtosis-adjusted cumulative noise exposure metric in evaluating the hearing loss risk for complex noise. *Ear & Hearing*, 37(3), pp. 312-323.
- [29] Lenzuni, P., Bertuzzi, L. (2015). Nuove metriche di esposizione professionale a rumore. In: *Atti del 42° Convegno AIA*, Firenze, 16-17 Luglio, paper 21.
- [30] Evans, M., Hastings, N., Peacock, B. (1993). *Statistical Distributions*. New York: John Wiley & Sons.
- [31] Abramowitz M., Stegun I.A. (1964). *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. National Bureau of Standards.
- [32] Nadarajah, S., Kotz, S. (2000). A product Pearson-type VII density distribution. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 211(1), pp. 103-113.