

ROBERTO ALBERA

ORECCHIO E MUSICA

*Come il nostro orecchio percepisce la musica
e come la musica ne è condizionata*



EDIZIONI MINERVA MEDICA

ROBERTO ALBERA

*Prof. Ordinario di Otorinolaringoiatria,
Università degli Studi di Torino*

ISBN: 978-88-7711-924-7

©2017 – EDIZIONI MINERVA MEDICA S.p.A. – Corso Bramante 83/85 – 10126 Torino
Sito Internet: www.minervamedica.it / *e-mail:* minervamedica@minervamedica.it

I diritti di traduzione, memorizzazione elettronica, riproduzione e adattamento totale o parziale, con qualsiasi mezzo (compresi microfilm e copie fotostatiche), sono riservati per tutti i Paesi.

I contenuti pubblicati nel volume sono di sola responsabilità dell'Autore e non sono garantiti dall'Editore, il quale non è responsabile della precisione o della veridicità di questi contenuti.



Indice

| | |
|---|-----|
| <i>Introduzione</i> | 1 |
| <i>Le basi fisiche della percezione acustica</i> | 7 |
| <i>Come l'uomo percepisce i suoni</i> | 20 |
| <i>Psicoacustica</i> | 31 |
| <i>Le modalità di generazione dei segnali acustici musicali</i> | 46 |
| <i>L'identificazione delle note</i> | 53 |
| <i>Consonanza e dissonanza tra le note</i> | 62 |
| <i>Le note musicali</i> | 71 |
| <i>Le scale musicali</i> | 83 |
| <i>Timbro</i> | 86 |
| <i>La registrazione dei segnali acustici musicali</i> | 90 |
| <i>Anatomia e fisiologia di uno strumento – il pianoforte orizzontale</i> | 97 |
| <i>Sordità e musica. Un caso storico – Ludwig Van Beethoven</i> | 109 |
| <i>Conclusioni</i> | 118 |
| <i>Bibliografia essenziale</i> | 120 |



Introduzione

Sin dall'antichità la musica riveste significati importanti per l'uomo, che spaziano fra concetti espressivi legati all'istintività umana, pratiche sacre, percorsi di ricerca della perfezione estetica e tentativi di descrivere, attraverso complicati algoritmi matematici, i confini e le regole della sua legittimità. La musica da sempre è fonte di un ampio e controverso dibattito relativo alla sua funzione, la cui unica conclusione capace di accordare tutti è che, fatte salve alcune eccezioni, comunque di essa non si possa "fare a meno". Il termine musica risale all'epoca greca classica e significa "*l'Arte ispirata dalle Arti*" (*ispirata dalle muse*) e conglobava anche la poesia e la danza. In esso ritroviamo l'alto valore che la musica ha e che, di fatto, i greci le riconobbero. Ricordiamo, in proposito, che proprio in questo periodo storico venne strutturata la codificazione del sistema di note che usiamo ancora oggi.

È ormai assodato che la musica è nata, insieme al linguaggio, attraverso la produzione di un linguaggio-suono che presentava un'ampia varietà di moduli sonori che va dalle grida al suono intonato. Contemporaneamente comparvero i primi strumenti musicali, inizialmente a percussione (idiofoni e membranofoni) e successivamente gli aerofoni e i cordofoni.

La musica è sempre presente nella mitologia dei popoli primitivi. Ad esempio in quella indiana il dio Prajapati con la sua voce creò il cielo, le acque e la terra mentre i nativi americani credevano che il loro dio avesse creato il mondo cantando tre volte. Nella mitologia cinese la musica e il canto erano ritenuti la voce degli antenati. Nella cultura ebraica le mura di Gerico furono abbattute dagli squilli delle trombe dei soldati d'Israele e in quella greca Anfione costruì le mura di Tebe suonando la lira.



Inoltre nelle popolazioni primitive la conoscenza delle formule rituali, nelle quali il suono prevale sulla parola, poneva i cantori e i sacerdoti al vertice della struttura sociale. Nella cultura cinese e indiana la musica era associata al ciclo delle stagioni, ai punti cardinali, ai segni zodiacali e a numerosi fenomeni naturali.

In epoca storica vi sono riferimenti alla musica, sia sacra sia profana, nel mondo egizio e mesopotamico fin dal III millennio a.C. con la descrizione di strumenti quali arpa, flauto e cetra. Successivamente la musica accrebbe progressivamente il proprio ruolo nella vita dell'uomo e, parallelamente, nacquero i problemi insiti con la sua codificazione e ne venne approfondita l'analisi scientifica, soprattutto dai cinesi e dai greci. L'epoca moderna della musica può essere fatta risalire a Severino Boezio (V-VI secolo d.C.), consigliere di Teodorico, che identificò tre generi musicali: *mundana* (dei pianeti e delle sfere celesti), *humana* (che congiunge armoniosamente l'anima e il corpo) e *instrumentalis* (prodotta dagli strumenti). Successivamente vi fu il contributo di numerosi filosofi quali Cassiodoro (VI-VII secolo d.C.), Isidoro (VI-VII secolo d.C.), Flacco Alcuino (VIII-IX secolo d.C.) e Aureliano di Rhéomé (IX secolo d.C.), fino a giungere a Guido d'Arezzo (XI secolo d.C.) al quale è ricondotta l'attuale codificazione in note e la sua trascrizione grafica.

Lo scopo del presente volume è quello di definire, sulla base delle attuali conoscenze scientifiche, gli aspetti che costituiscono i fondamenti fisici dei segnali acustici di tipo musicale e del funzionamento dell'apparato uditivo, provando a correlarli con quelli culturali che consentono, ad esempio, di apprezzare un brano musicale, in accordo con il gusto dell'epoca.

Fin dall'epoca greca vi è una diatriba tra quanti antepongono l'aspetto culturale ed

emozionale della musica e quanti ritengono che essa esprima semplicemente leggi matematiche e fisiche; è ovvio che entrambi gli aspetti concorrono a definire la pienezza dell'arte musicale. Nel presente volume non si vuole certo giungere ad una conclusione, ma si cercherà di far comprendere come il funzionamento dell'orecchio umano abbia condizionato la codificazione della musica in tutte le sue espressioni culturali e nelle diverse epoche.

Tuttavia, prima di iniziare ad affrontare questi aspetti, è utile porci alcune domande, ad esempio come possiamo definire la musica, come la differenziamo da altri segnali non musicali, ad esempio la voce ed i rumori, e quali messaggi ci trasmette. A questo proposito chiunque è in grado di distinguere un segnale acustico musicale da uno non musicale o se una persona stia cantando o parlando. A questa facilità di giudizio, basata su aspetti culturali propri dell'*homo sapiens sapiens*, non corrisponde un'altrettanto facile identificazione delle caratteristiche e peculiarità fisiche del segnale acustico musicale o cantato.

Ad alcune di queste domande si proverà a rispondere nel testo ma, per iniziare, se analizziamo le definizioni di musica i dizionari appaiono più o meno concordi nel definirla come *“l'arte dell'organizzazione dei suoni e dei rumori nel corso del tempo e nello spazio”*. Sempre secondo i dizionari si tratta di arte in quanto *“complesso di norme pratiche adatte a conseguire determinati effetti sonori, che riescono ad esprimere l'interiorità dell'autore e dell'ascoltatore, e si tratta di scienza in quanto studio della nascita, dell'evoluzione e dell'analisi dell'intima struttura della musica. Il generare suoni avviene mediante il canto o mediante strumenti musicali che, attraverso i principi dell'acustica, provocano la percezione uditiva e l'esperienza emotiva voluta dall'ar-*



tista". Come si vede la definizione privilegia gli aspetti culturali ed emozionali che derivano dall'ascolto musicale ma non ci aiuta molto a comprendere cosa realmente sia la musica; ad esempio l'emozione suscitata dall'ascolto di un brano è un aspetto tipico della musica occidentale mentre in altre culture il significato della musica, spesso più basata sul ritmo, è quello di aggregazione a scopo rituale.

Una domanda che spesso ci si pone è se la musica di per sé sia una forma di comunicazione assimilabile al linguaggio. La risposta non può che essere affermativa. Innanzitutto le note sono paragonabili ai fonemi, cioè gli elementi minimi del linguaggio, poiché capaci di veicolare le sensazioni e i contenuti emozionali che vengono trasmessi dall'autore e/o dall'esecutore in contesti differenti quali quello delle composizioni, delle interpretazioni o delle improvvisazioni; a questo proposito Rousseau riteneva che la musica, ed in particolare la melodia, fosse il più potente mezzo per esprimere pensieri e sentimenti. Inoltre la musica condivide con il linguaggio importanti peculiarità così riassumibili: entrambi costituiscono un sistema di comunicazione tra gli uomini, utilizzano il canale comunicativo in ingresso acustico-uditivo, possono produrre un numero praticamente illimitato di frasi, vengono acquisiti simulando quanto ascoltato, hanno una forma scritta, hanno una sintassi (cioè regole per associare tra loro le componenti minime, rispettivamente fonemi e note) e hanno una semantica (attribuzione di significato).

Ma, a differenza del linguaggio vocale, nella musica non è sempre facile comprendere il messaggio che l'autore o l'esecutore intende trasmettere, eccezion fatta per il canto, ove le parole assumono quasi in toto questa funzione. Gli scenari in cui la musica accompagna le parole sono innumerevoli e vanno dalle pra-

tiche sacre/magiche - si ricorda a tal proposito che la parola "cantare" è legata etimologicamente alla celebrazione e alla preghiera - sino alla musica contemporanea (leggera), in cui l'associazione fra canto e musica è diventata praticamente irrinunciabile.

Qualora non vi sia associato il canto, il significato del messaggio che si intende trasmettere viene affidato a più fattori. Innanzitutto alle peculiarità strutturali del brano legate alla velocità o lentezza del suo ritmo, e all'utilizzo prevalente di frequenze acute o gravi. Ritmi rapidi associati a tonalità maggiori inducono un senso di allegria mentre ritmi lenti associati a tonalità minori inducono una sensazione di tristezza (si pensi al rapido passaggio dal Crucifixus, lento e grave, al Resurrexit, veloce ed acuto, della messa in si minore di Johan Sebastian Bach, brani musicali, peraltro, associati al canto quindi facilmente interpretabili). Talvolta l'autore cerca di imitare i suoni della natura (si pensi al III movimento della VI sinfonia di Ludwig van Beethoven ove è simulato un temporale) oppure conferisce il significato al titolo del brano, che assume la funzione di indirizzare l'ascolto verso una specifica direzione percettiva. Infine l'Autore può esprimere sensazioni relative a vissuti personali non correlabili strettamente ed in modo univoco ad alcune situazioni o ad analoghe percezioni dell'ascoltatore; si pensi a "Quadri di una esposizione" di Modest Mussorgsky, in cui il titolo dei brani è relativo a sensazioni dell'autore di fronte ad una serie di quadri. Appare quindi evidente come la musica sia da considerare uno strumento comunicativo provvisto di una capacità di trasmissione di contenuti univoci "più debole" rispetto al linguaggio verbale-scritto.

Un altro aspetto molto importante della musica, ma non considerato in questo volume, è il suo ruolo terapeutico, sia in ambito





psicologico sia nella rimediazione della sordità mediante protesi o apparecchi acustici. Ricorderemo solo in questa introduzione che i benefici prodotti dalla musica sulla salute fisica e mentale dell'uomo erano già noti nelle epoche antiche, al punto che Apollo era considerato il Dio sia della Medicina sia della Musica. Gli aspetti benefici della musica sulla psiche sono anche ricordati nel mito di Orfeo, che, nella sua discesa nell'Ade nel tentativo di riportare in vita Euridice, suona la lira *“strumento che anestetizza il male e frena le passioni”*. Inoltre nel libro di Samuele della Bibbia è scritto che: *«Lo spirito del Signore si era allontanato da re Saul e uno spirito malvagio di Dio lo aveva invaso. Davide prendeva la cetra e suonava con la sua mano, Saul trovava la calma»*.

Ma anche i filosofi si sono interessati agli aspetti benefici della musica. Confucio scrisse *“volete sapere se un popolo è ben governato e ha buoni costumi? Ascoltate la sua musica”*. Damone, contemporaneo di Pericle, riteneva fondamentale l'educazione musicale in quanto pensava che le buone armonie fossero idonee a formare gli animi alla virtù ed al coraggio. Platone affermò *“lasciatemi scrivere i canti di una nazione e non mi importerà sapere chi fa le leggi”* e *“.. la ginnastica e la musica costituiscono il fondamento di ogni buona educazione. Mi pare infatti che un dio ha fatto dono agli uomini di queste due arti a sostegno di due parti dell'anima allo scopo di accordarle tra loro (La Repubblica, III 411e-412a);* inoltre riferì il seguente pensiero di Socrate sull'educazione dei ragazzi *“Come sarà dunque questa educazione? Sembra difficile scoprirne una migliore di quella che era adottata dai nostri vecchi: la ginnastica per il corpo, la musica per l'anima”*. Aristotele ne *“La Politica”* ci dice che *“ascoltare una musica sbagliata forma cattivi individui mentre una buona musica coltiva la mente come la ginnastica il*

corpo”, conferendole tre possibili funzioni: divertimento o riposo, forza che spinge verso la virtù, liberazione dagli affanni.

Nel periodo cristiano Boezio (V secolo d.C.) afferma che *“la musica ha il potere di migliorare o degradare il carattere”* e Sant'Agostino (VI secolo) nel *“De Musica”* ritiene che *“la musica può orientare l'anima verso un comportamento nobile e pio”*. In epoca più moderna il matematico-compositore Bartolomé Ramos de Pareja, che visse a cavallo tra il XV ed il XVI secolo d.C., affermò come *“certe scale avessero il potere di mettere in movimento gli umori corporei, di riscuotere dall'indolenza, di tenere a freno la rabbia e l'orgoglio, di mitigare la tristezza e la gioia... La musica fa miracoli e i musicisti greci sapevano ammansire le belve con la dolcezza del loro canto, catturare i cuori degli uomini, resuscitare i morti, ingraziarsi gli spiriti dell'aldilà, smuovere gli alberi”*. Martin Lutero scrisse che *“La musica ha delle risorse talmente meravigliose e preziose che ogni volta che cerco di parlarne e di decriverle mi mancano le parole. Insomma dopo la parola di Dio la nobile arte della musica è il maggiore tesoro al mondo. Essa controlla i nostri pensieri, la mente, il cuore e lo spirito. È una disciplina maestra di ordine e buone maniere e rende gli individui più miti e gentili, morali e ragionevoli”*. Francesco Bacone rafforzò questi concetti dichiarando che *“I poeti fecero bene a unire la musica e la medicina in Apollo perché il compito della medicina non è altro che intonare quella strana arpa che è il corpo umano e riportarla all'armonia”*. Anche Shakespeare riteneva che la musica giocasse un ruolo favorevole nello sviluppo dell'uomo affermando, nel Mercante di Venezia, che *“L'uomo che non ha la musica dentro di sé non è commosso dall'accordo di dolci suoni, è incline ai tradimenti, agli stratagemmi e ai profitti: i moti del suo spirito sono tristi come la notte e*



i suoi affetti bui come l'erebo: non fidatevi di un uomo simile". Il filosofo Hooke riteneva che la musica come arte fosse esercitata fin dall'infanzia del mondo, forse precedendo il linguaggio. Inoltre riportò la credenza italiana dell'epoca secondo la quale la musica avrebbe la capacità di neutralizzare il veleno della tarantola e che in Danimarca un musicista abbia inciso sull'umore del proprio Re in quanto suonando in una scala sbagliata lo indusse in uno stato di violenta frenesia mentre con un suono più armonioso lo ricondusse alla ragione. Per giungere ai giorni nostri è recente la pubblicazione di un libro del musicista Massimo Cotto nel quale sono elencati 333 brani rock con presunte capacità terapeutiche soprattutto, ma non solo, per patologie su base ansioso-depressiva; per tutti valga l'esempio citato nel volume di un brano dei Pynk Floyd del 1967, *That up the stetoscope and walk*, nel quale si sottolineavano gli effetti della musica nell'alleviare il dolore e nello stimolare il cervello.

Nella storia non tutti sono stati concordi nell'assegnare un ruolo positivo all'ascolto musicale. Nel medioevo la musica era da alcuni considerata come un fattore che poteva distogliere i fedeli dalla concentrazione alla preghiera. San Dunstano fu accusato di stregoneria quando costruì un'arpa eolica. Sant'Agostino, che in altri testi aveva considerato positivamente la musica, condannò la frequentazione di locali ove veniva eseguita musica in quanto causa di minor frequenza alle funzioni religiose. Sempre Sant'Agostino, comprendendo che l'emozione è suscitata dalla musica e non dalle parole, ritenne che l'associazione tra musica e preghiera fosse un peccato. Ma anche uno storico laico della fine del 300 d.C. come Ammiano Marcellino affermò che la musica aveva preso il posto della filosofia e "*trasformato le biblioteche in sepolcri*". Andreas Carlstadt,

uno dei principali riformatori dopo Lutero, riteneva che le note prodotte dall'organo fossero lascive e risvegliassero pensieri mondani e Calvino proibì i canti e le danze che non fossero religiosi.

Oggi ascoltare la musica è diventato un fenomeno sociale quasi connaturato con la nostra quotidianità e appare pertanto interessante per lettori di diversa preparazione culturale quali musicisti, medici, fisici, semplici fruitori, affrontare una rivisitazione delle relazioni fra uomo e musica, a partire dalle leggi che ne governano la fisica e la fisiologia dell'apparato uditivo. Nel testo saranno esaminate in modo approfondito, ma comprensibile anche per chi non abbia una preparazione specifica nei singoli campi, le caratteristiche fisiche proprie dei segnali musicali e la loro analisi mediante la trascrizione grafica, le modalità di funzionamento dell'apparato acustico, le basi matematiche della codificazione in note e scale, il loro riconoscimento ed il significato fisico di consonanza e dissonanza. Da questi aspetti si analizzeranno le modalità con le quali sono state definite le note, le scale musicali e le caratteristiche della registrazione e riproduzione della musica, per giungere alla *anatomia fisiologia* del pianoforte. Appare poi interessante far comprendere al lettore le ricadute della sordità in un musicista leggendo e commentando due lettere di Beethoven. Tuttavia, poiché la percezione della musica è un evento cosciente mediato dall'attività della corteccia cerebrale, non è possibile pensare di poter ridurre il tutto a una mera sequenza di eventi vibratorii e bioelettrici dell'orecchio. Per scelta, la complessa analisi delle attività cerebrali che sottendono la percezione musicale verrà trattata solo marginalmente.

Il volume può apparire una miscela di informazioni scientifiche e letterarie, ma il



desiderio dell'autore è proprio quello di far comprendere come i due aspetti possano, o meglio debbano, essere ben compresi e conosciuti per una migliore comprensione della musica. Come è già stato accennato si è cercato di mantenere l'informazione scientifica ad un livello che consenta una buona comprensione a tutte le tipologie di lettore cercando di rendere meglio comprensibili gli aspetti acustici rilevanti per la percezione musicale mediante trascrizioni grafiche dei suoni registrati; alcune parti del testo riferite soprattutto ad aspetti fisico-matematici possono essere considerate come approfondimenti e non fondamentali per la comprensione delle restanti parti.

La bibliografia sulla musica è sterminata. Prevalentemente, però, è una letteratura di critica e di storia musicale o, meno comunemente, di fisica acustica. Il presente testo, viceversa, rappresenta la visione della musica

che da parte di un audiologo, cioè di un medico che si occupa di fisiologia e patologia dell'orecchio; la centralità del testo è quindi l'analisi che compie l'organo uditivo sui segnali musicali che percepisce con alcuni cenni sulle ricadute nella percezione musicale che conseguono a un deficit uditivo. È un approccio non consueto del problema in quanto la letteratura medica in ambito musicale è rivolta soprattutto alle problematiche cognitive e riabilitative, e si spera che la lettura del volume possa fornire un interessante contributo alla comprensione più ampia del significato della musica.

Prima di concludere ritengo doveroso porgere un sentito ringraziamento ad Andrea e a Marisa e agli amici Giulia Andreoli, Roberto Bocca, Ernesto Buzano, Alessandra Canepa, Carlotta Montuschi, Massimo Mortarino e Vittorio Ramella per l'aiuto fornito nella scrittura e nella correzione del testo.



Le basi fisiche della percezione acustica

LA GENERAZIONE DEL SUONO E LA SUA TRASMISSIONE NELLO SPAZIO

L'evento fisico alla base della sensazione acustica è una modificazione dello stato di riposo delle molecole del mezzo attraversato, espresso nell'aria come valore di pressione atmosferica. Il periodico concentrarsi e allontanarsi delle molecole determina una variazione della pressione che dà origine ad un fenomeno che può essere percepito dal tatto come vibrazione, soprattutto se il mezzo è solido, e dall'udito come sensazione acustica, soprattutto, ma non esclusivamente, se il mezzo è aereo.

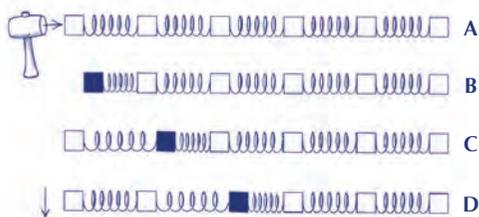
Il suono può essere considerato come lo stato oscillatorio di un mezzo elastico, inteso come una sostanza in grado di riprendere la propria forma e il proprio volume al cessare dell'azione di una forza deformante.

Al fine di comprendere il meccanismo di genesi e trasferimento delle vibrazioni acustiche nell'aria, situazione più comune ma non esclusiva di trasferimento di un'onda sonora, si immagini un corpo vibrante (sorgente sonora) che si sposta rispetto alla sua posizione di equilibrio statico inducendo un movimento alle molecole gassose che gli stanno davanti. Si viene così a determinare uno stato di moto molecolare definito come onda sonora (**Fig. 1**). Nel loro movimento le molecole aeree determinano, quindi, una compressione delle molecole che incontrano lungo il loro percorso e contemporaneamente lasciano uno stato di rarefazione dietro di loro (**Fig. 1C**). In seguito alla collisione le molecole in movimento trasferiscono la propria energia cinetica alle molecole collise.

La velocità di spostamento delle molecole aeree in condizioni normali è pari a 450-500

**Figura 1**

Esempio di trasferimento dell'onda sonora in un modello elastico costituito da una serie di molle intercalate da una massa. Una volta messa in movimento la prima massa la prima molla viene compressa (B); la sua energia viene quindi trasferita alla massa e alla molla successiva che, accorciandosi, allunga la molla precedente (C), che alla fine del ciclo ritorna alla posizione di riposo (D). Da Pierce modificato.



m/sec e il loro spostamento, prima di collidere con un'altra molecola, è pari a 6×10^{-6} m, con una frequenza di collisione pari a 10^{10} /sec. Dopo la collisione, per effetto di retroazione, la molecola tende a ritornare nella posizione iniziale, in ciò favorita dalla depressione creatasi dal suo precedente movimento in avanti (Fig. 1C e 2A e B).

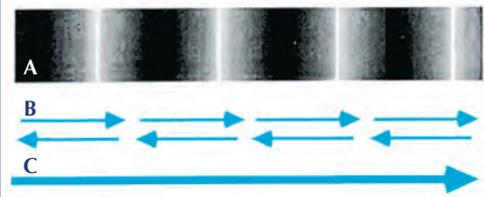
È quindi evidente che:

- nell'aria il moto delle particelle gassose alla base dell'onda sonora è costituito da un periodico movimento in avanti e indietro che determina il succedersi di fasi in cui le molecole si concentrano, determinando un aumento della pressione, e di fasi in cui esse tendono a essere rarefatte e in cui la pressione diminuisce rispetto a quella atmosferica;
- la trasmissione del suono non avviene per spostamento di molecole, come nel caso degli stimoli odorosi, ma come spostamento di energia (Fig. 2).

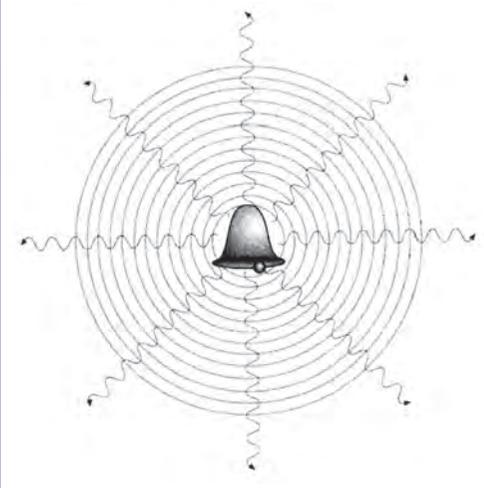
Le onde sonore si spostano nell'aria lungo una direzione di propagazione che, in assenza di ostacoli, avviene per cerchi concentrici. (Fig. 3).

Figura 2

Rappresentazione grafica del trasferimento dell'onda acustica. In A è rappresentata la concentrazione (in scuro) e la rarefazione (in chiaro) delle molecole lungo l'asse di propagazione del suono. In B, il movimento in avanti e indietro delle molecole del mezzo attraversato. In C, la direzione della propagazione del suono. Da Albera e Rossi.

**Figura 3**

Direzione di trasmissione dell'onda sonora nell'aria per cerchi concentrici.



Le onde sonore possono poi subire modificazioni definite come:

- riflessione: intesa come la quantità di energia acustica che non viene trasferita da un mezzo a un altro (ad esempio aria-acqua) ed è respinta dal secondo mezzo verso il primo secondo un angolo di riflessione uguale a quello incidente; forme particolari di riflessione sono l'eco, inteso come suono derivante dalla



riflessione di un'onda sonora che venga percepito come distinto dal suono di origine, e il riverbero; in quest'ultimo caso i due suoni non vengono percepiti come differenti con un intervallo temporale generalmente inferiore a 1/10 di secondo;

- rifrazione: intesa come la quantità di energia acustica che viene trasferita da un mezzo ad un altro (ad esempio aria-acqua); in questo caso l'onda sonora subisce modificazioni di ampiezza, di lunghezza d'onda e di direzione; queste modificazioni possono essere percepite immergendo le orecchie sott'acqua e verificando come il suono assuma una minore intensità e una diversa tonalità (più grave); in linea di massima un ostacolo non è mai completamente riflettente o assorbente e la quantità di suono riflesso o rifratto è funzione dell'impedenza acustica dei due mezzi e dell'angolo dell'onda sonora incidente sull'interfaccia;
- diffrazione: caratterizzata dalla capacità del suono di aggirare angoli e ostacoli;
- dispersione: si verifica quando un'onda sonora incontra un ostacolo di dimensioni piccole rispetto alla sua lunghezza d'onda; in questo caso si verifica una dispersione del suono in tutte le direzioni;
- interferenza: intesa come l'onda sonora risultante dalla sommazione algebrica di due o più onde sonore che si incontrano; nel caso più semplice se i due suoni sono in concordanza di fase l'intensità derivante sarà uguale alla somma delle due onde interferenti mentre se sono in opposizione di fase tra loro, una in rarefazione e l'altra in condensazione, la risultante sarà nulla.

La velocità di trasmissione del suono è correlata alla densità ed alla temperatura del mezzo attraversato; nell'aria a livello del mare ed alla temperatura di 20° essa è pari a 343 m/sec. La velocità si modifica in rapporto al mezzo attraversato (Tab. I).

| Tabella I | |
|--|---|
| Velocità di propagazione delle onde sonore in rapporto al mezzo attraversato. | |
| <i>Mezzo attraversato dal suono</i> | <i>Velocità di propagazione del suono</i> |
| Aria | 343 |
| Piombo | 1220 |
| Acqua | 1410 |
| Legno | 3400 |
| Vetro | 4100 |
| Acciaio | 5200 |

LE CARATTERISTICHE FISICHE DEL SUONO E LA LORO RAPPRESENTAZIONE GRAFICA

L'onda sonora, intesa come il periodico concentrarsi e diradarsi in un determinato punto delle molecole aeree, può essere rappresentata su un grafico che riporti sulle ascisse il tempo (analisi nel dominio del tempo) e sulle ordinate l'entità della variazione di pressione. La linea tracciata esprime quindi, istante per istante, il valore di pressione presente nel punto di misurazione; il valore può essere positivo, nelle fasi di concentrazione delle molecole (fase di condensazione) o negativo, nelle fasi di rarefazione delle molecole (fase di rarefazione) rispetto alla situazione di stazionarietà (pressione di riferimento). Questa rappresentazione grafica del suono è definita come oscillografica (Fig. 4).

Nel caso più semplice, l'oscillazione delle molecole ha un andamento definito pendolare armonico semplice o sinusoidale (in quanto funzione del seno del tempo). Nella figura 5 sono riportati gli oscillogrammi di due forme d'onda sinusoidali, caratterizzate dal periodico ripetersi di un'onda di morfologia regolare.





La curva sinusoidale è caratterizzata da:

- A) frequenza delle oscillazioni;
- B) ampiezza delle oscillazioni.

A) FREQUENZA

La frequenza di oscillazione di una vibrazione sinusoidale viene misurata in Hertz (Hz) ed esprime il numero di cicli interi di oscillazione eseguiti in un secondo.

Nella rappresentazione oscillografica un ciclo è inteso come l'intervallo compreso tra il punto di inizio della misurazione e il primo punto omologo successivo.

Lo svolgimento di un ciclo può essere misurato in termini di tempo (periodo, espresso in secondi) o di distanza coperta dall'onda (lunghezza d'onda espressa in metri - in questo caso sull'asse delle ascisse è riportata la lunghezza).

Il periodo e/o la lunghezza d'onda sono inversamente proporzionali alla frequenza. Infatti se il suono si sviluppa attraverso un

numero ridotto di cicli al secondo (bassa frequenza - Fig. 5A) avrà un'elevata lunghezza d'onda e un periodo lungo; viceversa se il suono presenta un elevato numero di cicli al secondo (alta frequenza - Fig. 5B) presenterà un breve periodo ed una lunghezza d'onda corta.

Il rapporto di relazione inversa tra periodo e frequenza è espresso dalla relazione:

Figura 4

Oscillogramma di vocale "A" prodotta da un soggetto di sesso maschile. In ascissa è riportato il tempo e in ordinata la pressione. Si evidenzia l'alternarsi di istanti nei quali la pressione è rispettivamente superiore e inferiore rispetto al valore di riferimento.

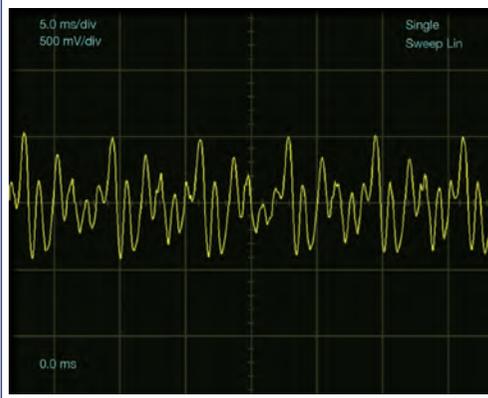
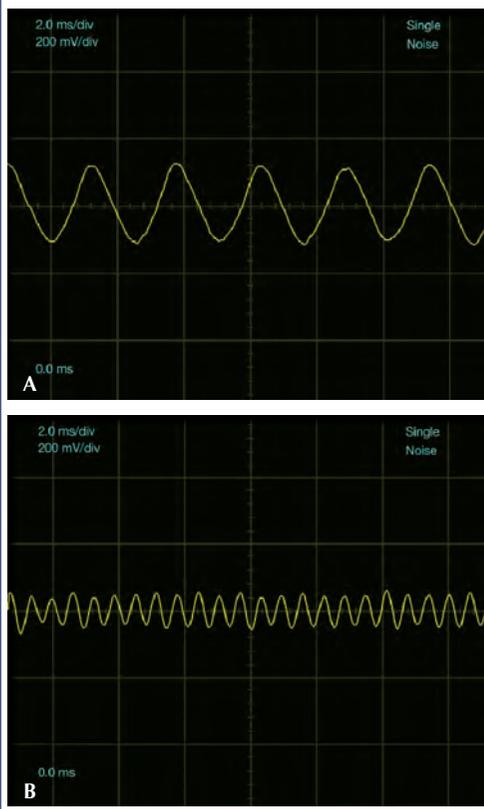


Figura 5

Forme d'onda sinusoidali prodotte da un organo Hammond con frequenza pari a 261,62 Hz - Do4 (A) e 1046,50 Hz - Do6 (B). È evidente come un suono di bassa frequenza (A) abbia un periodo lungo e viceversa per un suono di alta frequenza (B). Inoltre il tracciato A rappresenta un suono di intensità più elevata rispetto a quello rappresentato nel tracciato B.





$$a) T = \frac{1}{f}$$

in cui:

T = periodo

f = frequenza

Sulla base di questa equazione è possibile calcolare il periodo (cioè la durata di un ciclo) in rapporto alla frequenza. Infatti, se 1000 cicli si sviluppano in un secondo (1000 Hz), un singolo ciclo avrà una durata di 1 msec. Nella **tabella II** è riportata la durata di un singolo ciclo a diverse frequenze sulla base della formula (a).

La lunghezza d'onda è correlata alla tipologia del mezzo attraversato e alla sua temperatura e può essere calcolata sulla base della seguente formula:

$$b) \lambda = \frac{V}{f}$$

in cui:

λ = lunghezza d'onda

V = velocità di propagazione del suono

f = frequenza

Nella **tabella III** è riportata la lunghezza d'onda di un suono trasmesso attraverso l'aria all'altezza del mare e alla temperatura di 20° (condizioni che determinano una velocità di trasmissione del suono pari a 343 m/sec).

I segnali acustici non sono quasi mai di tipo sinusoidale. Questo tipo di suono è, infatti, riproducibile solo artificialmente mediante il diapason o un sintetizzatore (strumenti musicali elettronici, audiometro). Nella realtà quotidiana i suoni che percepiamo sono di tipo complesso, cioè costituiti da forme d'onda irregolari (non sinusoidali – Fig. 4).

Un aspetto particolare delle forme d'onda non sinusoidali è che queste, per quanto complesse possano apparire, sono comunque scomponibili in un numero più o meno elevato di onde sinusoidali che, sommate algebricamente tra loro, disegnano la forma d'onda d'origine (Fig. 6). La determinazione delle sinusoidi che compongono una forma d'onda complessa può essere eseguita mediante l'analisi di Fourier, matematico francese che, nei primi anni dell'800, introdusse la teoria secondo la quale un'onda periodica può essere scomposta in una somma infinita di seni e di coseni. Le frequenze così calcolate sono multipli interi di una frequenza fondamentale. In realtà anche suoni non periodici sono espressione di un insieme di forme d'onda sinusoidali che, in questo caso, non sono multipli interi della frequenza fondamentale.

Tabella II

Durata di un singolo ciclo dell'onda sonora in rapporto alla frequenza. È evidente il rapporto di relazione inversa tra i due parametri.

| Frequenza | Periodo (msec) |
|-----------|----------------|
| 125 | 8 |
| 250 | 4 |
| 500 | 2 |
| 1000 | 1 |
| 2000 | 0.5 |
| 4000 | 0.25 |
| 8000 | 0,125 |

Tabella III

Lunghezza d'onda dell'onda sonora trasmessa nell'aria, all'altezza del mare e alla temperatura di 20°, a diverse frequenze.

| Frequenza | Lunghezza d'onda (metri) |
|-----------|--------------------------|
| 125 | 2,744 |
| 250 | 1,372 |
| 500 | 0,686 |
| 1000 | 0,343 |
| 2000 | 0,1715 |
| 4000 | 0.08575 |
| 8000 | 0,042875 |



I suoni complessi possono quindi essere distinti in:

- periodici (o armonici): formati dalla somma algebrica tra una frequenza fondamentale, che ha il minore valore in Hz, e frequenze armoniche che sono multipli interi della fondamentale; in termini oscillografici un suono periodico può essere riconosciuto in quanto la forma d'onda si ripete periodicamente; ad esempio la forma riprodotta in **figura 4** è caratterizzata dal periodico ripetersi di un'onda di ampiezza maggiore rispetto alle altre e la distanza esistente tra due picchi è inver-

samente correlata con la frequenza (tanto maggiore è la distanza tanto minore è la frequenza fondamentale);

- non periodici: altrimenti definiti rumori, caratterizzati dalla somma algebrica di onde acustiche sinusoidali che non sono multipli interi della frequenza fondamentale (**Fig. 7**).

Da un punto di vista strettamente matematico la distinzione tra segnali periodici e non periodici è meno facilmente delineabile in quanto una forma d'onda apparentemente non periodica ma osservata per un periodo di tempo adeguato potrebbe essere parte di un segnale periodico che si ripete con un lungo intervallo di tempo, quindi con una frequenza fondamentale molto bassa; per cui in teoria un suono complesso non periodico può essere definito come tale solo se osservato per un tempo infinito. In pratica è possibile considerare come non periodico un segnale che non risulta periodico rispetto ad un tempo di osservazione sufficientemente lungo.

Riassumendo il mondo sonoro, da un punto di vista fisico, è quindi composto da forme d'onda:

- sinusoidali: non presenti in natura e originate da strumenti costruiti dall'uomo (audiometro, sintetizzatori analogici o digitali);
- complesse periodiche: anch'esse non presenti in natura ma prodotte dall'uomo o dagli animali come voce (o emissione vocale degli animali) in seguito alla vibrazione delle corde vocali o dagli strumenti musicali; è possibile che alcuni suoni naturali siano periodici ma in modo casuale;
- complesse non periodiche: rappresentano gli unici eventi acustici presenti anche in assenza della vita (rumore dell'acqua, del vento ecc..) e possono essere definiti come rumore.

Figura 6

Esempio di come la somma algebrica di forme d'onda sinusoidale (f_1 , f_2 e f_3) generino forme d'onda complesse (f_1+f_2 , f_1+f_3 , $f_1+f_2+f_3$). Da Albera Rossi.

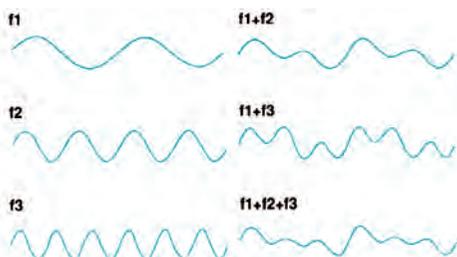
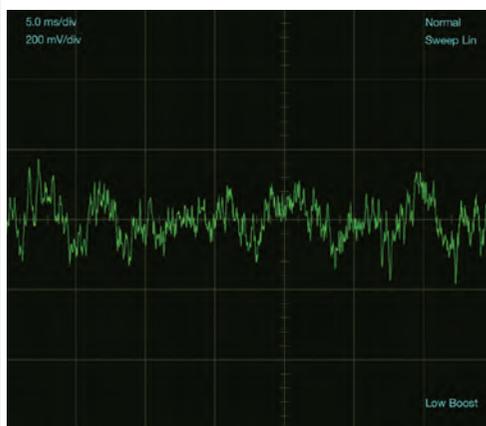


Figura 7

Riproduzione di una forma d'onda complessa non periodica (sedia trascinata).





In un capitolo successivo si chiariranno le modalità di genesi di un suono complesso periodico al fine di comprenderne le caratteristiche peculiari.

B) INTENSITÀ

L'entità di compressione e di rarefazione delle molecole del mezzo attraversato dall'onda acustica definisce il parametro d'intensità del suono. Nell'oscillogramma l'intensità è definita da quanto la curva si allontani dalla condizione di riposo (pressione atmosferica). Nella **figura 5** si evidenzia un suono di maggiore intensità (A – oscillazioni più

Figura 8

Progressiva riduzione dell'ampiezza dell'onda acustica allontanandosi dalla sorgente per fenomeni di attrito delle molecole del mezzo attraversato.

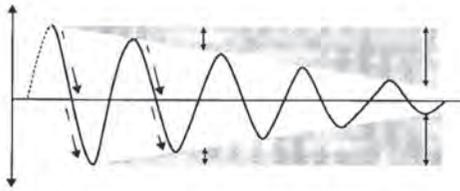
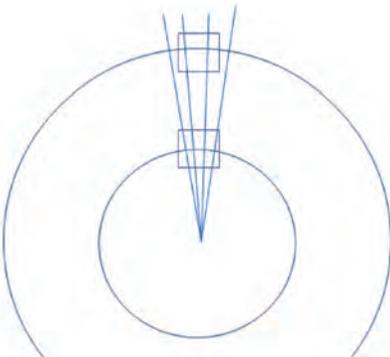


Figura 9

Progressiva riduzione dell'intensità sonora allontanandosi dalla sorgente per riduzione del numero di molecole che attraversano l'unità di superficie.



ampie) rispetto ad uno di minore intensità (B – oscillazioni meno ampie).

L'intensità acustica è funzione della distanza dalla sorgente sonora in quanto allontanandosi da essa l'onda sonora subisce una diminuzione di ampiezza per due fenomeni:

- perdita di energia dovuta all'attrito tra le molecole (fenomeno che determina la produzione di calore – **Fig. 8**);
- allargamento del fronte sul quale si diffonde l'onda sonora allontanandosi dalla sorgente; i cerchi concentrici presentano un perimetro progressivamente più lungo (**Fig. 9**); ciò determina l'allontanamento tra loro delle particelle in movimento per cui il numero che attraversa l'unità di superficie (m^2) si riduce progressivamente.

Sulla base di quest'ultimo fenomeno l'intensità dell'onda sonora si riduce proporzionalmente al quadrato della distanza esistente tra la sorgente ed il punto di misura. Ne deriva che raddoppiando la distanza il suono si riduce di 4 volte; quadruplicandola l'intensità si riduce di 16 volte, e così via.

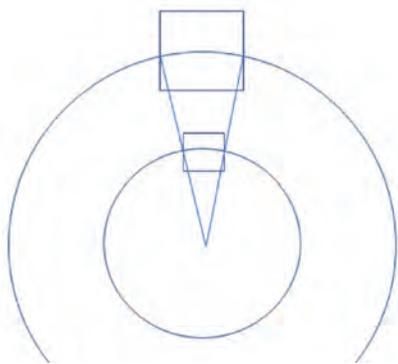
La riduzione dell'intensità acustica in base al quadrato della distanza è conseguente al fatto che per effetto dell'allontanamento dei raggi la stessa quantità di molecole attraverserà una superficie pari a $4 m^2$ (2 metri per lato) se la misurazione è eseguita a 2 metri di distanza oppure pari a $16 m^2$ (4 metri per lato) poiché la distanza è raddoppiata se la misurazione è eseguita a 4 metri di distanza dalla sorgente sonora (**Fig. 10**).

L'intensità acustica può essere misurata in termini di potenza o di pressione/intensità.

La potenza esprime l'effettiva capacità che ha una determinata sorgente sonora (amplificatore HiFi, pressa, autoveicolo, ecc.) nel produrre un suono, indipendentemente dalla distanza di misurazione. L'unità di misura è il Watt (lavoro/tempo).

**Figura 10**

Relazione tra intensità dello stimolo acustico e distanza dalla sorgente sonora. Il raddoppio della distanza tra sorgente (identificata dal punto di partenza dei due raggi) e punto di misura (identificato dai quadrati) determina una riduzione dell'intensità pari al quadrato della distanza. Infatti la superficie attraversata dall'onda sonora nel quadrato più prossimo alla sorgente (in cui ogni lato misura 2 metri) è pari a 4 m^2 mentre nel quadrato posto a distanza doppia (per cui ogni lato è pari a 4 metri) la superficie attraversata è pari a 16 m^2 .



Per comprendere il significato della potenza di una sorgente sonora la si immagini posta al centro di una serie di cerchi concentrici che irradia, senza ostacoli, l'onda acustica. Sulla base di quanto riportato nella **figura 10** è evidente che il numero di particelle in movimento che attraversano l'unità di superficie (espressa dal quadrato) è maggiore a livello del cerchio più prossimo alla sorgente, ma il numero di unità di superficie attraversata è maggiore a livello del cerchio più lontano (che ha una maggiore circonferenza); di conseguenza il prodotto tra il numero di particelle che attraversano l'unità di superficie e il numero di unità di superfici è costante, immaginando come irrilevanti i fenomeni di smorzamento descritti nella **figura 8**. Ne deriva che la misura della potenza è teoricamente non correlata con la distanza esistente tra sorgente e punto di ri-

levazione ed esprime la reale capacità che ha una sorgente nel produrre suono.

La misurazione della potenza non viene quasi mai utilizzata in ambito medico, ove ha interesse prevalente l'intensità percepita dall'orecchio: ad esempio per valutare i possibili effetti dannosi sull'udito o per eseguire una precisa taratura dei segnali acustici utilizzati nelle prove audiometriche. La potenza è di prevalente interesse in ambito ingegneristico; ad esempio per progettare l'insonorizzazione di una pressa o per definire l'amplificatore per un adeguato ascolto musicale in relazione all'ambiente. Ovviamente la potenza acustica da impiegare sarà diversa per l'ascolto musicale in un'auto, in una stanza o in uno stadio.

L'unità di misura della pressione acustica, intesa come la forza che sviluppano le particelle aeree in movimento su una superficie, è il Pascal (Newton/ m^2) mentre quella dell'intensità acustica, intesa come la quantità di particelle che attraversano una superficie, è il Watt/ m^2 . La misurazione di questi due parametri è eseguita in un determinato punto dello spazio, per cui il valore ottenuto corrisponde a quello effettivamente presente in quel dato punto, elemento fondamentale per definire la percezione che noi abbiamo del suono e che è correlato con la distanza esistente tra la sorgente e il punto di misurazione.

Il significato di potenza e intensità/pressione diviene facilmente intuibile considerando che un aeroplano in movimento è sicuramente una sorgente sonora più potente dello squillo di un telefono ma se l'aeroplano è molto distante dall'orecchio viene percepito meno forte rispetto allo squillo di un telefono posto molto vicino all'orecchio.

Il parametro distanza dalla sorgente sonora nella misura dell'intensità e della pressione acustica è dato dall'inserimento al denominatore della superficie (m^2 - Watt/ m^2 o Pa-



scal/m²) in quanto esiste una relazione inversa tra l'intensità del suono e la distanza dalla sorgente (Fig. 9 e 10).

Intensità e pressione sono due unità di misura che rappresentano due differenti modalità con le quali poter misurare la stessa quantità di suono (così come è possibile misurare una certa quantità di olio in Kg o in litri, ottenendo due valori diversi che descrivono, comunque, la stessa quantità). Il valore di pressione acustica è proporzionale al quadrato dell'intensità ($I \propto P^2$).

Nell'oscillogramma l'intensità della forma d'onda è data dall'ampiezza di oscillazione delle molecole, descritta dalla distanza esistente tra il punto di massimo valore (in alto nel tracciato oscillografico) e quello di minimo valore (in basso nel tracciato oscillografico – misura picco-picco). Quest'ultima misura non esprime, in realtà, l'effettiva percezione di intensità del nostro orecchio in quanto le aree sottese dalla forma d'onda nelle parti più vicine ai due picchi (massimo e minimo) si sviluppano in una frazione temporale così breve da non essere adeguatamente analizzabili.

Per ovviare a questo problema l'intensità acustica viene misurata sulla base della cosiddetta pressione efficace, definita dall'integrale della superficie sottesa dalla forma d'onda che, in termini grafici, è rappresentabile da un'ampiezza della forma d'onda dell'oscillogramma che sia pari ai 2/3 dell'ampiezza totale della forma d'onda (Fig. 11).

Poiché si tratta di onde elastiche, quindi caratterizzate dal succedersi di oscillazioni positive e negative, la somma algebrica delle superfici positive e negative determinerebbe valori molto vicini a 0; è quindi necessario rendere positivi tutti i valori elevando al quadrato il valore della pressione per poi calcolarne la radice quadrata secondo la seguente formula:

Figura 11

Rappresentazione grafica della pressione efficace (picco-picco) e della pressione efficace, espressa dall'area sottesa dalla forma d'onda. Da Del Bo modificata.

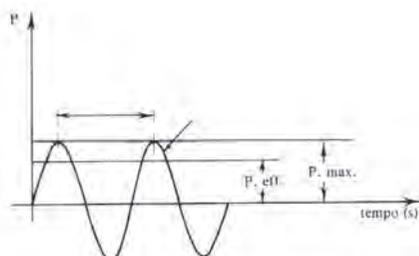
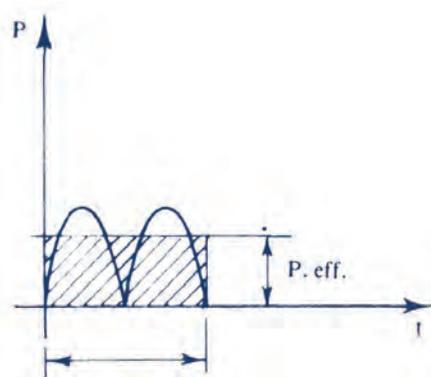


Figura 12

Misura della pressione efficace. Da Del Bo modificata.



$$P_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt}$$

ed ottenendo graficamente la misurazione riportata nella figura 12.

ALTRE MODALITÀ DI RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DEGLI EVENTI ACUSTICI

Fino a questo momento ci si è limitati alla semplice rappresentazione oscillografica della forma d'onda ma appare, a questo



punto, necessario esaminare altre modalità di rappresentazione del segnale acustico che ne consentano di evidenziare meglio il contenuto frequenziale e di intensità. A questo riguardo verranno descritte le due principali modalità utilizzate nell'analisi dei segnali acustici: l'analisi spettrale e l'analisi sonografica.

A) ANALISI SPETTRALE

L'analisi spettrale può essere definita bidimensionale in quanto, come l'oscillografia, consente di esaminare solamente due parametri di un segnale acustico, il contenuto frequenziale e l'intensità (mentre l'oscillografia consente di esaminare la variazione di intensità nel tempo).

Nell'analisi spettrale sull'asse delle ascisse sono rappresentate le frequenze presenti (analisi nel dominio delle frequenze) e su quello delle ordinate l'intensità. Ovviamente questa misurazione può essere eseguita solo su singoli campioni, ma vedremo che questa è la modalità con la quale opera l'orecchio interno nell'analisi che esegue sugli eventi acustici.

Nella **figura 13** sono riportati gli oscillogrammi (a destra) e le corrispettive analisi

spettrali di due forme d'onda sinusoidali, caratterizzate rispettivamente da una frequenza più bassa (primo tracciato in alto) e più alta (secondo tracciato dall'alto), e da una forma d'onda non sinusoidale (terzo tracciato dall'alto). Nei primi due tracciati, trattandosi di onde sinusoidali, l'analisi spettrografica identifica una sola frequenza il cui valore è desumibile dalla posizione della barra dell'istogramma sull'asse delle ascisse (rispettivamente 1000 e 3000 Hz). Il modulo di intensità è, viceversa, espresso dalla lunghezza della barra dell'istogramma per cui l'evento acustico rappresentato nel primo tracciato è caratterizzato da una maggior intensità rispetto a quello rappresentato nel secondo tracciato (dato desumibile anche dalla minore ampiezza del tracciato oscillografico). Il terzo tracciato oscillografico è espressione della somma algebrica della prima (1000 Hz) e della seconda forma d'onda (3000 Hz) per cui lo spettrogramma identifica le due frequenze presenti con la loro rispettiva intensità.

I tracciati spettrografici riportati nella **figura 13** rappresentano una situazione teorica di assenza di rumore di fondo e di estrema pulizia del segnale prodotto. In realtà gli spettrogrammi che vengono registrati sono resi meno puliti dalla presenza del rumore di fondo che, comunque, deve presentare un'intensità inferiore rispetto al segnale acustico in esame (altrimenti non sarebbe visualizzabile con questa metodica).

Nella **figura 14** sono riportati gli spettrogrammi di un tono puro di frequenza pari a 261.62 Hz (A), il cui oscillogramma è riportato nella **figura 5A**, e di una forma d'onda non sinusoidale periodica (B), che rappresenta la vocale "A" prodotta da un soggetto di sesso maschile (**Fig. 4**). Nei tracciati l'area colorata rappresenta il rumore di fondo mentre l'area grigia rappresenta la distribuzione

Figura 13

Analisi oscillografica (a sinistra) e spettrografica (a destra) di due forme d'onda sinusoidali, di frequenza rispettivamente pari a 1000 (prima traccia) e 3000 Hz (seconda traccia), e di una forma d'onda non sinusoidale (terza traccia) costituita dalla somma algebrica delle due forme d'onda riportate nella prima e seconda traccia.

