

LO SFORZO VOCALE DALLA FISIOLOGIA ALLA PATOLOGIA: CORRELATI ANATOMICI E INDICATORI FUNZIONALI

Raffaele Pisani (1), Chiara Devecchi (1), Paolo Onali (1), Katia Mara (1), Pasquale Bottalico (2), Arianna Astolfi (2)

- (1) Studio di ingegneria acustica Pisani, Rivoli (TO)
- (2) Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica, gruppo TEBE

1. Introduzione

Gli organi preposti alla produzione della voce possono subire sollecitazioni oltre i limiti di un quotidiano e normale uso della parola, specialmente da parte di professionisti (cantanti, attori, insegnanti, etc.). È da tempo noto il problema delle patologie che insorgono nei casi in cui gli organi fonatori sono sottoposti a sforzi per motivi professionali e lavorativi. Alcuni autori hanno misurato indirettamente le vibrazioni delle corde vocali con un accelerometro, rilevando le vibrazioni indotte sulla superficie del collo, comparando la dose di vibrazione delle corde vocali con i valori limite che la letteratura suggerisce per la valutazione degli effetti su altre parti del corpo ed in particolare a quelli conseguenti alla sollecitazione mano braccio dei lavoratori che utilizzano utensili generatori di vibrazioni. Il rilievo delle vibrazioni delle corde vocali con un accelerometro è molto limitato, come verrà dimostrato di seguito, ed impedisce un'analisi di tipo elettroacustico del segnale vocale al fine di individuare le particolari patologie che emergono a seguito di sforzi vocalici ripetuti. Si ritiene più idonea la registrazione del segnale vocale utilizzando un laringofono, che riproduce la voce con una qualità comparabile con quella di un microfono, e che mantiene tutte le caratteristiche del segnale vocale. Si propone, infine, un metodo per rilevare le conseguenze su una fonazione normale, a seguito di uno sforzo vocale ripetuto. Questo metodo può consentire ai medici foniatri utili informazioni per individuare la patologia alla quale il soggetto va incontro.

2. La fonazione

Al fine di comprendere le metodologie attualmente in atto per valutare l'effetto dello sforzo vocale sulla qualità della voce (fino alle patologie estreme), è necessario descrivere gli elementi anatomici e le loro caratteristiche meccaniche - acustiche. La fonazione, con la produzione di suoni articolati che costituiscono le parole, nasce dalle vibrazioni delle corde vocali che generano un suono periodico che si propaga all'interno del condotto vocale (dalla trachea alle labbra). La forza propulsiva, per produrre la fonazione, è fornita nell'atto espiratorio dai polmoni i quali, azionati dai muscoli addominali, il diaframma, tutti i muscoli intercostali interni, gli scaleni, i pettorali, etc., producono la fuoriuscita dell'aria che attraversa i muscoli tireoaritenoidei, comunemente chiamati

corde vocali poste alla base della laringe. Una importante funzione, in cascata a quella esercitata dalla epiglottide, è la protezione da ingressi indesiderati di corpuscoli (cibo, etc.) nella trachea durante la fase inspiratoria. I muscoli tireoaritenoidei si contraggono in modo da porsi in posizione ravvicinata tra loro alla completa chiusura della trachea impedendo al flusso d'aria inspirata di raggiungere i polmoni (figura 1). La fonazione, invece, si manifesta durante il ciclo respiratorio di espulsione dell'aria inspirata che attraversa nuovamente i muscoli tireoaritenoidei. Questi, nella produzione dei suoni, sono a leggero contatto tra loro ed in tensione moderata che, in una prima fase, possono impedire momentaneamente la fuoriuscita dell'aria con un aumento di pressione al di sotto di essi. Raggiunta una determinata pressione sottoglottidea i muscoli tireoaritenoidei, nella seconda fase del ciclo, si aprono improvvisamente. La pressione creata al di sotto delle corde vocali diminuisce di colpo ed il sistema di blocco viene riattivato. Sono state elaborate diverse teorie sui meccanismi fonatori. Resta il fatto che la vibrazione delle corde vocali produce un flusso d'aria pulsato dovuto all'apertura, per un tempo breve, delle corde vocali e ad una chiusura delle stesse per un tempo più lungo. Il suono prodotto avrà una forma d'onda di tipo "a dente di sega" con determinate caratteristiche spettrali, quasi immutabili, ma con ampia variazione della frequenza di vibrazione durante l'eloquio.

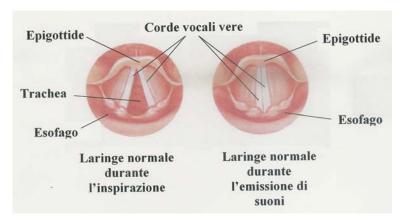


Figura 1 – La laringe e le corde vocali. Muscoli implicati nel processo di fonazione

Lo sforzo fonatorio interessa principalmente il funzionamento dinamico delle corde vocali che compiono continue oscillazioni, interrotte dalle pause e dai suoni consonantici, che per la voce maschile variano da 70 a 200 aperture e chiusure in un secondo mentre per la voce femminile variano da 100 a oltre 300 oscillazioni al secondo. La frequenza delle oscillazioni è detta frequenza fondamentale ed è indicata con F₀. Risulta evidente che, per un periodo di fonazione di alcune ore, il numero delle collisioni delle corde vocali è elevatissimo e che l'effetto indicato come fatica aumenta se aumenta la tensione a cui le corde vocali sono sottoposte e, quindi, il numero di contatti in un periodo di tempo di riferimento. La fatica aumenta se il soggetto è in particolari condizioni psicologiche ed ambientali per cui è costretto ad "alzare" la voce fino alle caratteristiche acustiche estreme della voce strillata ed urlata. Per questo motivo la valutazione dell'esistenza di un rischio di danno alle corde vocali si effettua considerando due aspetti fondamentali: i valori assunti dalla frequenza fondamentale, calcolandone il numero di oscillazioni complessive nell'arco di un periodo di riferimento sufficientemente lungo; il livello sonoro emesso e misurato in un punto di riferimento, ovvero desunto in via indiretta, analizzando il segnale di accelerazione rilevato nel punto terminale dello sterno appena sotto la laringe. Per completezza, occorre accennare ad altri parametri che caratterizzano il segnale vocale, oltre alla frequenza fondamentale, anche in relazione all'energia sonora emessa, come modulata e slittata verso frequenze più alte dalle risonanze dell'intero condotto vocale (dal cavo faringeo fino alle labbra, figura 2) e che assumono nome di formanti. La mobilità degli organi fonatori realizza spostamenti continui delle frequenze di risonanza del condotto vocale, esercitando un filtraggio del segnale periodico a dente di sega. Si producono, quindi, suoni vocalici con spettri diversi, ampiamente studiati nella acustica fonetica.

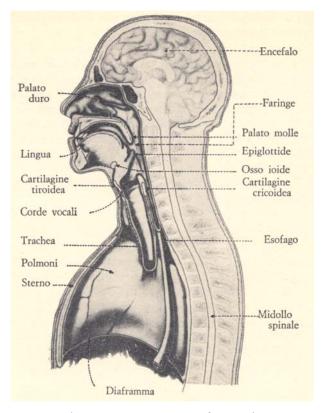


Figura 2 – L'apparato fonatorio

L'ambito di indagine si estende, in un primo momento, all'analisi della frequenza fondamentale durante la fonazione ed all'analisi della potenza sonora irradiata dal parlatore.

3. Fonetica acustica

La produzione della parola è legata alla successione articolata di fonemi che possono essere classificati come vocali, consonanti sonore e consonanti mute. È stato detto che i suoni vocalici sono quelli prodotti dalle corde vocali e, successivamente, modellati dalla risposta in frequenza del condotto vocale (formanti). Il filtraggio operato dal condotto vocale è caratterizzato dalla presenza di picchi di risonanza, denominati prima, seconda, terza, quarta formante, etc. I suoni che l'apparato fonatorio produce per vibrazione delle corde vocali sono le vocali stesse e le consonanti sonore (/m/, /n/, /g/, etc.). Nella produzione delle consonanti non sonore, invece, il meccanismo fonatorio produce delle occlusioni, dei sibili a livello labiale e palatale o interruzioni brusche delle vibrazioni delle corde vocali. Nella pronuncia dei suoni consonantici le corde vocali non vibrano e assumono un posizione aperta, di riposo, dalla quale fuoriesce l'aria, ad esempio, per la

pronuncia delle consonanti sibilanti, costrittive, etc. La caratteristica acustica della parola è rappresentata, molto efficacemente, ma solo a livello qualitativo, dal cosiddetto sonagramma della voce (figura 3). La frase pronunciata è "Le mie aiuole sono belle" in cui è visibile il concatenamento di vocali e consonanti sonore nella parola "aiuole". Anche lo iato /ie/, preceduto dalla nasale sonora /m/ in "mie", è significativo per l'articolazione di tutto l'apparato fonatorio che trae origine da una chiusura serrata delle labbra per la nasale /m/, a significare la occlusione del condotto buccale a vantaggio di una completa apertura della cavità nasale, collegata direttamente al cavo faringeo dallo spostamento del velo pendulo.

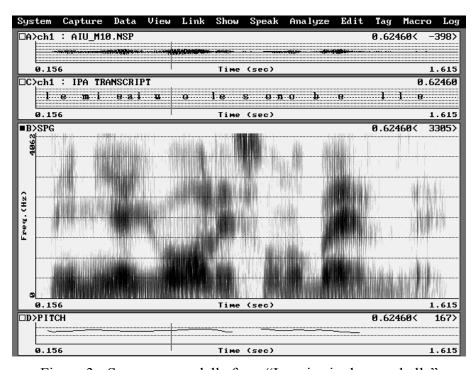


Figura 3 - Sonagramma della frase "Le mie aiuole sono belle"

La finestra indicata con la lettera A riporta il segnale vocale; la finestra C riporta la trascrizione in grafemi dei fonemi individuati nel tracciato A; la finestra B riporta l'analisi spettrografica della frase, laddove in ascissa è riportato il tempo, in ordinata è riportata la frequenza e gli annerimenti corrispondenti all'energia significativa contenuta nei diversi foni in quegli istanti e a quella determinata frequenza. La finestra D riporta l'andamento della frequenza fondamentale espressa in Hz, cioè in numeri di vibrazioni delle corde vocali al secondo. Se il sonagramma fornisce una rappresentazione qualitativa, ma sufficientemente completa della frase pronunciata, è possibile quantificare alcuni parametri mediante l'analisi del segnale. I principali algoritmi sono quelli per l'estrazione della frequenza fondamentale e delle formanti con l'impiego ricorrente del caepstrum e del predittore lineare. Per un conteggio del numero di collisioni delle corde vocali ci si basa sull'estrazione precisa della frequenza fondamentale, dei periodi sonori (istanti in cui si ha emissione vocalica per vibrazione delle corde) e dei periodi muti (istanti in cui le corde vocali sono chiuse o aperte a seconda delle pronuncia delle consonanti ovvero nelle pause durante la fonazione). L'analisi statistica delle pause (pausometria) evidenzia una distribuzione delle stesse di tipo bimodale in quanto discrimina le pause tra le parole dalle durate delle consonanti mute.

4. Le conseguenze che possono essere associate ad un abuso dell'organo della fonazione

La fatica vocale si manifesta in molte attività che richiedono l'uso della voce per esplicare la propria attività lavorativa. Si pensi agli insegnanti che impartiscono lezioni ad una classe numerosa ove il rumore ambiente, interno o proveniente dall'esterno, impone un aumento del livello di emissione sonora. Si pensi ai cantanti ed agli attori che si esibiscono per ore o studiano per ore sottoponendo ad uno sforzo le corde vocali. Si pensi a coloro che utilizzano la voce per comunicare informazioni a più persone (venditori ambulanti, etc.). Oggi molti mestieri per i quali viene utilizzata la voce sono spariti o utilizzano sistemi elettroacustici di amplificazione (che sostituiscono i megafoni). È da premettere, comunque, una differenza sostanziale tra attori e cantanti verso gli insegnanti: i primi, per mantenere una qualità elevata della voce, compiono numerosi esercizi, sia vocalici sia di respirazione. Gli insegnanti, invece, non sono educati all'uso della propria voce. Gli indicatori che consentono di diagnosticare una patologia vocale, legata alla fatica fonatoria, appartengono a quattro categorie diverse:

- Indicatori di natura percettiva: voce monotona con altezza quasi costante (monopitch); percezione della tensione dei muscoli preposti all'atto fonatorio, con attacco duro della glottide; percezione di fuoriuscita d'aria (Breathiness) durante la fonazione con riduzione del livello sonoro, ad indicare una non perfetta chiusura delle corde vocali; voce rauca, aspra (hoarseness) che riflette vibrazioni aperiodiche delle corde vocali, che risulta molto apparente alla fine di una giornata di lavoro.
- Indicatori di natura acustica: campo di fonazione ridotto, sia a livello di estensione nella gamma musicale, sia a livello di gamma dinamica in ampiezza, sia a livello di estensione della banda sonora prodotta; riduzione del campo di variabilità della frequenza fondamentale.
- Indicatori che emergono dalla laringoscopia: variazione della superficie di contatto delle corde vocali a non completa chiusura della trachea; variazione dei tessuti con insorgere di noduli, etc.; cambiamento della posizione della laringe, dovuta alla tensione muscolare; riflessi di natura neurologica.
- Indicatori di tipo fisiologico: aumento della portata d'aria durante la fonazione; inadeguato tempo di chiusura all'interno del periodo di vibrazione delle corde vocali; ridotta attività muscolare.

5. L'analisi dello sforzo vocale in pratica

Per caratterizzare e quantificare l'azione dinamica delle corde vocali, si utilizza, normalmente, un accelerometro di dimensioni contenute che viene posto in aderenza alla cute mediante nastro adesivo di tipo medicale. L'accelerometro acquisisce le vibrazioni generate dalle corde vocali ed invia ad un dispositivo il segnale, dal quale viene estratta una time history contenente la frequenza fondamentale, valutata ogni 50 ms, ed una stima del livello di pressione sonora, valutato a 15 cm dalla bocca. Per la stima del livello di pressione sonora è fondamentale effettuare una calibrazione dell'apparato che consenta di dedurre il livello sonoro prodotto dalla misura del livello dell'accelerazione. Tale calibrazione varia da persona a persona per effetto della diversa configurazione anatomica. Attraverso la misura della frequenza fondamentale ed il livello di vibrazione che si traduce in livello di pressione sonora, è possibile calcolare alcuni parametri dosimetrici legati alla prestazione vocale in esame. In letteratura si definiscono le seguenti grandezze:

Time Dose (\mathbf{D}_{t}), che quantifica il tempo di vibrazione delle corde vocali (voicing time), ed è definito come:

$$D_t = \int_0^{t_p} k_v dt$$
 [s]

dove:

 t_p è il tempo di osservazione;

 K_{ν} vale 0,1 a seconda che le corde vocali stiano vibrando o meno

Vocal Load Index (VLI), che quantifica il numero totale di periodi di oscillazione delle corde vocali. Tale valore va interpretato come il numero totale di collisioni tra le corde vocali che ne danneggiano il tessuto. È definito come:

(2)
$$VLI = \frac{1}{1000} \int_{0}^{t_{p}} k_{\nu} \cdot F_{0} \cdot dt$$
 [kcicli]

dove:

 F_0 è è la frequenza fondamentale.

Distance dose (D_d), che quantifica la distanza totale accumulata dalle corde vocali nella vibrazione.

(3)
$$D_d = \int_0^{t_p} k_v \cdot A \cdot F_0 dt$$
 [m]

dove:

A è l'ampiezza della vibrazione delle corde vocali e può essere calcolata con la relazione:

(4)
$$A = 0.05 \cdot L_0 \sqrt{(P_L - P_{th})/P_{th}}$$
 [m]

dove:

 L_0 è la lunghezza standard delle corde vocali (16 mm per gli uomini, 10 mm per le donne);

 P_{th} è la pressione di soglia per la fonazione ed è calcolabile come:

(5)
$$P_{th} = 0.14 + 0.06(F_0 / F_{0N})^2$$
 [kPa]

dove:

 F_{0N} è la frequenza fondamentale nominale (120 Hz per gli uomini e 190 Hz per le donne);

 P_L è la pressione polmonare, calcolabile attraverso il livello di pressione sonora SPL in dB misurato a 50 cm dalla bocca e fornito dalla relazione:

(6)
$$P_L = P_{th} + 10^{(SPL - 78,5)/27,3}$$
 [kPa]

Energy dissipation dose (De), quantificabile come l'integrale della potenza dissipata (P_d) dalle corde vocali nella vibrazione.

(7)
$$D_e = \int_0^{t_p} k_v \cdot P_d \cdot dt = \frac{1}{2} \int_0^{t_p} k_v \cdot \eta \cdot \omega^2 \cdot (A/T)^2 dt$$
 [J/m³]

dove:

T è lo spessore delle corde vocali;

η è la viscosità, entrambe funzione della frequenza fondamentale F₀

(8)
$$T = \frac{0.01580}{1 + 2.15\sqrt{F_0 / F_{0N}}}; \quad \eta = \frac{5.4}{F_0} \qquad Per \ uomo$$
$$T = \frac{0.01063}{1 + 1.69\sqrt{F_0 / F_{0N}}}; \quad \eta = \frac{1.4}{F_0} \qquad Per \ donna$$

Radiated energy dose (Dr), quantificabile come l'integrale della potenza irradiata (Pr) fuori dalla bocca durante la fonazione.

(9)
$$D_{r} = \int_{0}^{t_{p}} k_{v} \cdot P_{r} dt = 4 \cdot \pi \cdot R^{2} \cdot \int_{0}^{t_{p}} k_{v} \cdot 10^{(SPL-120)/10} dt$$

dove:

SPL è il livello di pressione sonora misurato a R metri di distanza dalla bocca.

Nella tabella che segue (Tab. 1), a titolo di esempio, si riportano i valori misurati su 4 uomini e 5 donne che hanno pronunciato le stesse frasi con sforzi vocali diversi. I parametri indicati vengono anche espressi in forma normalizzata dividendo il valore per il tempo di misura.

Tabella 1 – Parametri rilevati su un campione di 4 uomini e 5 donne

	Uomini				Donne				
Parametri	M1	M2	M3	M4	F1	F2	F3	F4	F5
Dt [s]	64.1	80.3	70.45	80.9	50	71.6	63.9	54	70.9
VLI [kcicli]	8.219	11.551	9.056	12.206	15.108	18.800	16.011	14.339	18.026
Dd [m]	28.454	52.656	25.771	36.167	96.912	42.867	110.869	38.885	55.014
De [mJ/cm^3]	39.206	129.824	28.563	46.367	178.415	20.064	167.639	39.486	27.491
Dr [mJ]	2.099	48.704	1.203	2.256	9936.800	18.405	7340.600	1260.200	19.599
Dt_percentuale [%]	45.542	56.272	55.429	64.462	43.011	69.045	65.271	45.570	68.935
VLI_norm [kcicli/s]	0.128	0.144	0.129	0.151	0.302	0.263	0.251	0.266	0.254
Dd_norm [m/s]	0.444	0.656	0.366	0.447	1.938	0.599	1.735	0.720	0.776
De_norm [mJ/s·cm^3]	0.612	1.617	0.405	0.573	3.568	0.280	2.624	0.731	0.388
Dr_norm [mJ/s]	0.033	0.607	0.017	0.028	198.736	0.257	114.877	23.337	0.276

6. Conclusioni

In analogia con quanto è avvenuto per i deficit uditivi prodotti in ambienti di lavoro rumorosi, si tenta di formulare, anche per la patologia funzionale dell'apparato fonatorio, un criterio di valutazione della dose di energia irradiata nell'ambito dell'attività lavorativa di coloro che utilizzano la voce come mezzo di comunicazione (cantanti, insegnanti, annunciatori radiofonici, televisivi, etc.). I parametri indicati quantificano il fenomeno, ma non producono informazioni funzionali sull'apparato fonatorio, come l'audiogramma per l'udito. Si rende necessario approfondire l'indagine relativa alla significatività dei parametri proposti utilizzando un metodo di acquisizione a banda più ampia di quella di un accelerometro che consente una più precisa acquisizione del segnale vocale anche in funzione di una più stretta correlazione tra livello sonoro rilevato a 50 cm dalla bocca e livello sonoro misurato in prossimità della laringe. Una acquisizione del segnale a larga banda consente di utilizzare i metodi tradizionali di indagine fonetico – acustica per la quale esiste una estesa casistica.

Bibliografia

Raymond H. Colton e Janina K. Casper – Understanding Voice Problems. (Williams & Wilkins)

R. J. Baker – Clinical Measurement of Speech and Voice. (A Colleg – Hill Publication Ingo R. Titze, Eric J. Hunter, Jan G. Svec – Voicing and silence periods in daily and weekly vocalizations of teachers (J.A.S.A 121(1), January 2007).

PRESENTAZIONE

LO SFORZO VOCALE DALLA FISIOLOGIA ALLA PATOLOGIA: CORRELATI ANATOMICI E INDICATORI FUNZIONALI

Raffaele Pisani (1), Chiara Devecchi (1), Paolo Onali (1), Katia Mara (1), Pasquale Bottalico (2), Arianna Astolfi (2)

- (1) Studio di ingegneria acustica Pisani, Rivoli (TO)
- (2) Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica, gruppo TEBE



Studio di Ingegneria Acustica Via Cav. di Vittorio Veneto, 8 10098 RIVOLI (TO) Tel. 011-9566871 Fax 011-9561261 e-mail sia.pisani@tin.it





I disturbi della parola come nuova malattia professionale

Gli organi preposti alla produzione della voce possono subire sollecitazioni oltre i limiti di un quotidiano e normale uso della parola, specialmente da parte di professionisti (cantanti, attori, insegnanti, etc.).

È da tempo noto il problema delle patologie che insorgono nei casi in cui gli organi fonatori sono sottoposti a sforzi per motivi professionali e lavorativi.

Le corde vocali costituiscono gli organi più deboli in quanto sottoposti a vibrazioni autogenerate durante la fonazione.

Le ripetute vibrazioni in condizioni di prolungato uso della parola possano generare infiammazione dei tessuti che rivestono i muscoli i quali vengono a contatto numerose volte al secondo. Si possono produrre, dopo lungo tempo delle patologie, che sfociano nella formazione di cisti, granulomi, noduli, etc.



Gli INDICATORI che consentono di diagnosticare una patologia vocale, legata alla fatica fonatoria, appartengono a QUATTRO CATEGORIE DIVERSE:

CATEGORIA 1 - Indicatori di natura percettiva:



Voce monotona, con altezza quasi costante (monopitch); percezione della tensione dei muscoli preposti all'atto fonatorio, con attacco duro della glottide; percezione di fuoriuscita d'aria (Breathiness) durante la fonazione con riduzione del livello sonoro, ad indicare una non perfetta chiusura delle corde vocali; voce rauca, aspra (hoarseness) che riflette vibrazioni aperiodiche delle corde vocali e che risulta molto apparente alla fine di una giornata di lavoro (disfonia).



CATEGORIA 2 - Indicatori di natura acustica:



- Campo di fonazione ridotto, sia a livello di estensione nella gamma musicale, sia a livello di gamma dinamica in ampiezza;
- riduzione della estensione della banda sonora prodotta;
- riduzione del campo di variabilità della frequenza fondamentale.



CATEGORIA 3 - Indicatori che emergono dalla laringoscopia:



- variazione della superficie di contatto delle corde vocali a non completa chiusura della trachea;
- variazione dei tessuti con insorgere di noduli, etc.;
- cambiamento della posizione della laringe, dovuta alla tensione muscolare;
- riflessi di natura neurologica .

CATEGORIA 4 - Indicatori di tipo fisiologico:



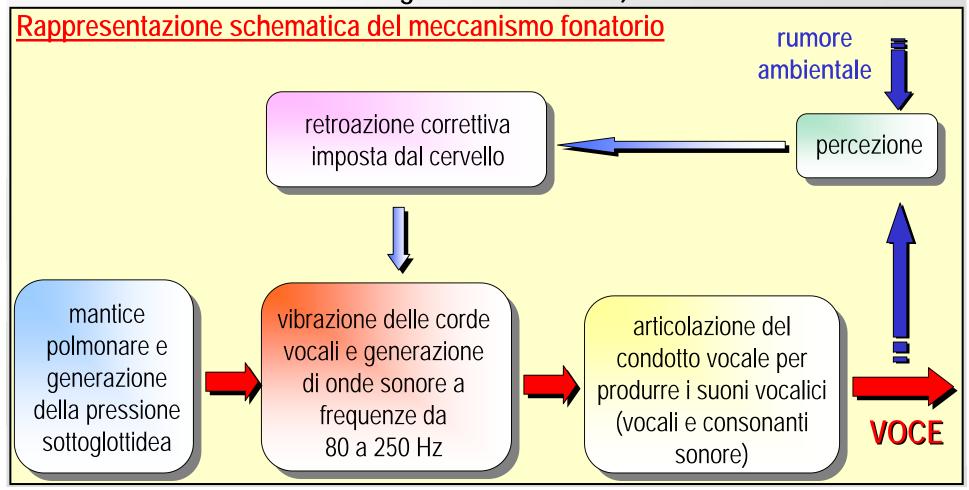
aumento della portata d'aria durante la fonazione;

inadeguato tempo di chiusura all'interno del periodo di vibrazione delle corde vocali;

ridotta attività muscolare

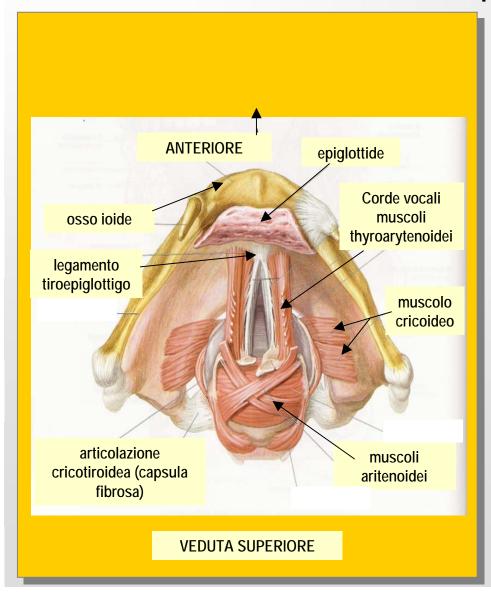


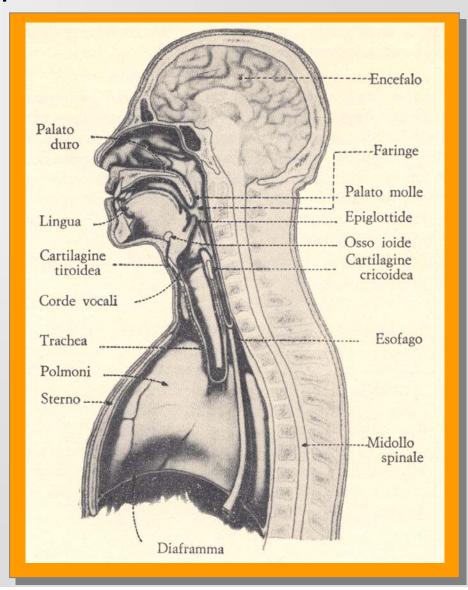
La fonazione, con la produzione di suoni articolati che costituiscono le parole, nasce dalle vibrazioni delle corde vocali che generano un suono periodico che si propaga all'interno del condotto vocale (dalla posizione della glottide alle labbra)





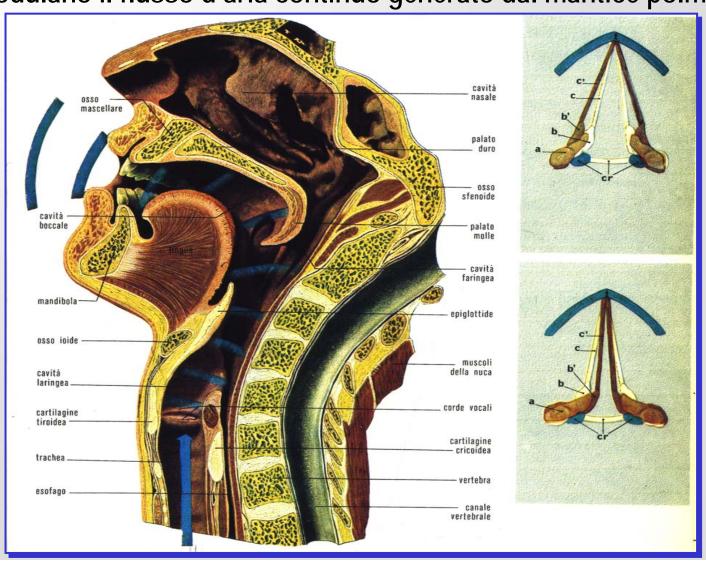
Anatomia dell'apparato fonatorio





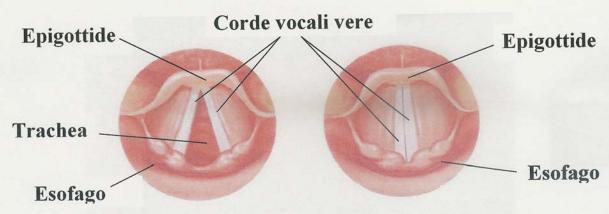


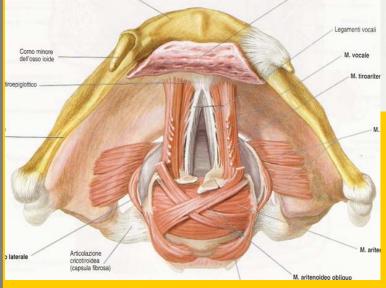
La produzione dei suoni vocalici trae origine dalle vibrazioni delle corde vocali che modulano il flusso d'aria continuo generato dal mantice polmonare





Il movimento delle corde vocali è determinato anche dalla tensione e rilassamento dei muscoli afferenti





Laringe normale durante l'inspirazione

Laringe normale durante l'emissione di suoni

Muscoli tensori delle corde vocali (cricotiroideo tiroaritenoideo)

Muscoli adduttori che provocano l'accollamento delle corde vocali con chiusura della glottide (cricotiroideo tiroaritenoideo)



L'attività motoria delle corde vocali

La produzione dei suoni vocalici è determinata dalle vibrazioni delle corde che aprono o chiudono l'orefizio che esse formano sul piano della glottide.

La perfetta chiusura impedisce all'aria, spinta dal mantice polmonare, di immettersi nella cavità faringea. Tale condizione viene anche realizzata repentinamente durante la pronuncia delle consonanti mute. Per le vocali e le consonanti sonore, invece, si assiste ad una apertura e chiusura delle corde vocali con frequenza di circa 120 volte al secondo (120 Hz).

Una voce ben impostata è caratterizzata da una completa occlusione delle corde vocali, mentre una voce meno brillante può presentare all'udito un leggero rumore dovuto alla fuoriuscita di aria per effetto di una non completa chiusura delle corde vocali.

La perfetta tenuta delle corde vocali è prodotta da una forza muscolare tra le stesse che si ripete 120 volte al secondo alternata a 120 rilassamenti.



L'attività dinamica delle corde vocali, su un periodo prolungato di fonazione, può produrre una irritazione della superficie dei muscoli tiroareitenoidei.

Atteso che, nella pronuncia delle parole vi sono istanti in cui le corde non oscillano (consonanti), è funzionalmente possibile il recupero.

Il meccanismo di protezione delle possibili lacerazioni del tessuto è facilitato dalla presenza del muco che ha una azione "lubrificante", alla irrorazione sanguigna del muscolo prodotta dai piccoli vasi superficilai allo smaltimento del calore ad opera della ventilazione polmonare che l'azione meccanica produce.

Le azioni suddette possono portare a danni reversibili e danni irreversibili quest'ultimi rimossi esclusivamente con operazioni chirurgiche.

DANNO REVERSIBILE



DANNO IRREVERSIBILE





La FATICA VOCALE, per quanto detto, è caratterizzata dai seguenti parametri:

il livello del suono - è prodotto dall'ampiezza di vibrazione delle corde vocali, dalla tensione delle stesse e dalla pressione sottoglottidea

la frequenza fondamentale - si riferisce esclusivamente ai periodi in cui vengono pronunciati suoni vocalici ed indica il numero di collisioni al secondo

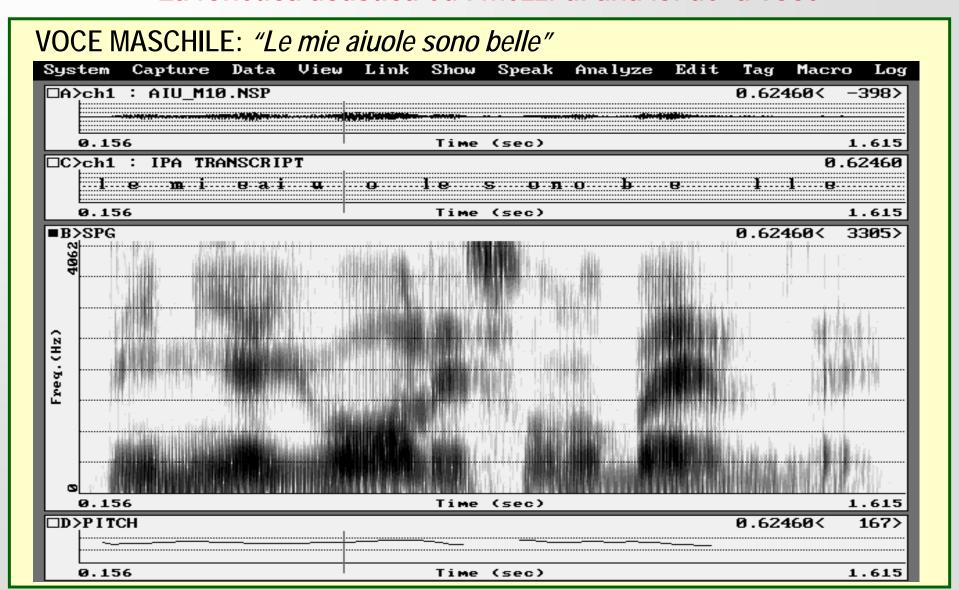
la durata della fonazione – è determinata dalla successione continua dei segmenti in cui le corde vocali vibrano, senza tener conto delle pause

le pause fonatorie – sia esse inferiori a 500 ms, sia esse superiori, consentono il recupero dell'attività meccanica dei muscoli

l'accelerazione delle corde vocali e l'energia da esse dissipata.



La fonetica acustica ed i mezzi di analisi della voce





Impostazione operativa per la dosimetria vocale



Acquisizione del segnale prodotto dalle vibrazioni delle corde vocali: microfoni, accelerometri, laringofono, elettroglottografo

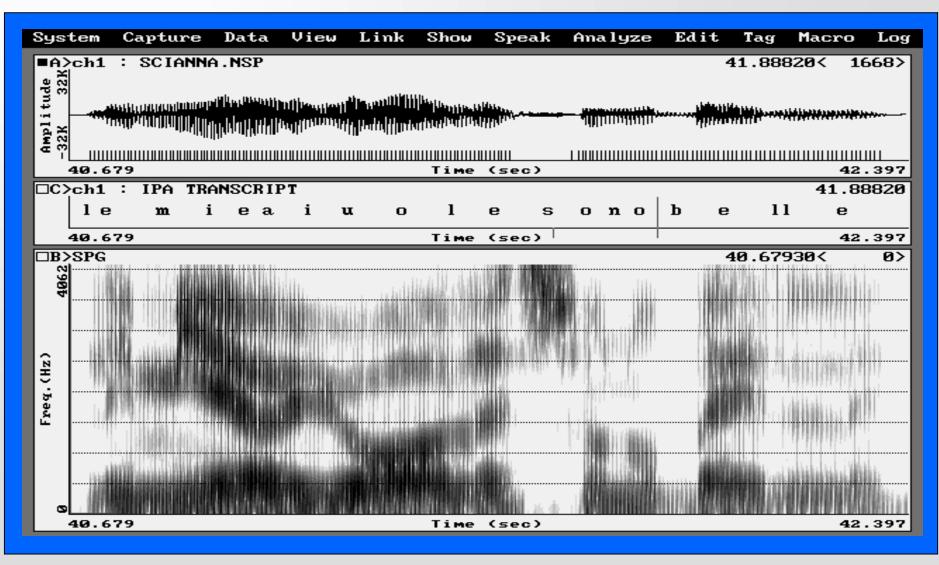


Analisi del segnale per l'estrazione della frequenza fondamentale per separare i segmenti vocalici (voiced) dai segmenti consonantici (unvoiced) e dalle pause. N° delle collisioni



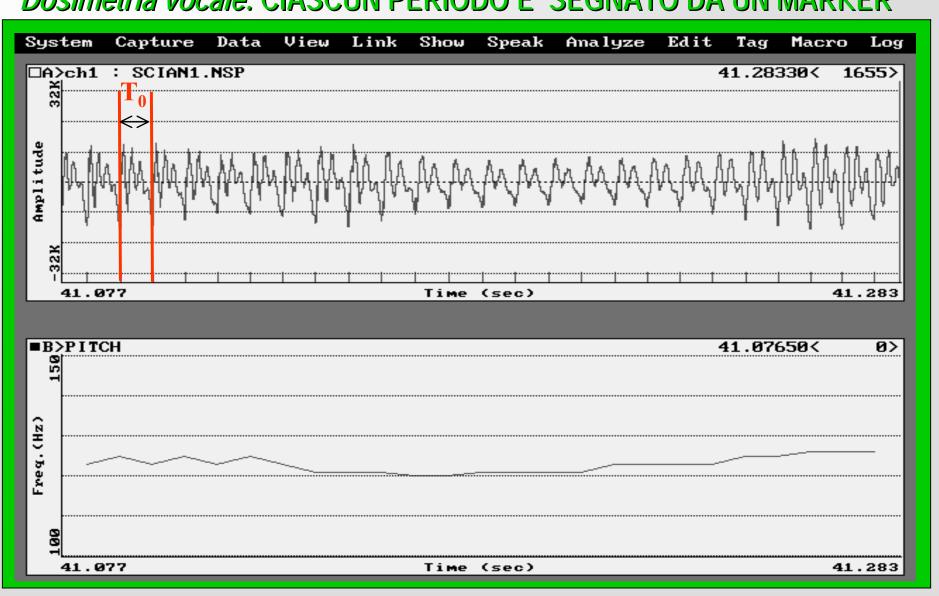
Calcolo degli indicatori della dosimetria vocale: rapportati alla durata della fonazione

Dosimetria vocale: ESTRAZIONE DELLA FREQUENZA FONDAMENTALE



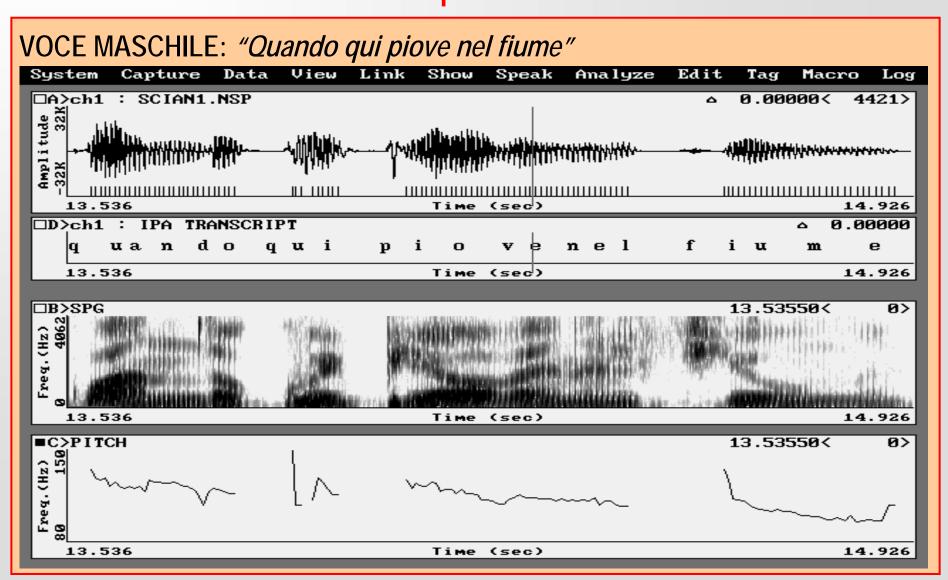


Dosimetria vocale: CIASCUN PERIODO E' SEGNATO DA UN MARKER



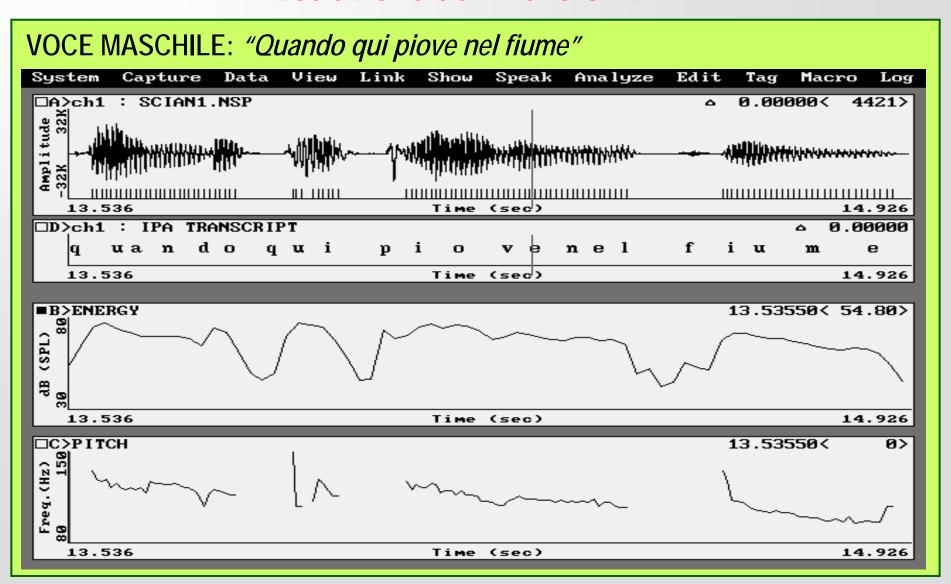


Estrazione della frequenza fondamentale F0





Estrazione del livello SPL





Per la stima del livello di pressione sonora è fondamentale effettuare una calibrazione dell'apparato che consenta di dedurre il livello sonoro prodotto dalla misura dell'accelerazione.

La calibrazione varia da persona a persona, per effetto della diversa configurazione anatomica.

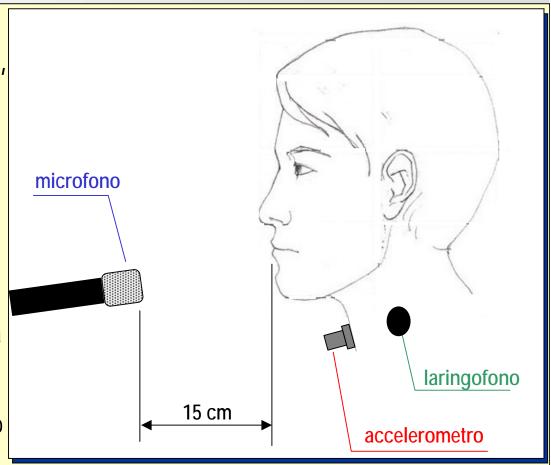
Attraverso la misura della frequenza fondamentale ed il livello di vibrazione, che si traduce in livello di pressione sonora, è possibile calcolare alcuni parametri dosimetrici, legati alla prestazione vocale in esame.



L'analisi dello sforzo vocale in pratica

Per caratterizzare e quantificare l'azione dinamica delle corde vocali, si utilizza, normalmente, un accelerometro di dimensioni contenute che viene posto in aderenza alla cute, mediante nastro adesivo di tipo medicale.

L'accelerometro acquisisce le vibrazioni generate dalle corde vocali ed invia ad un dispositivo il segnale dal quale viene estratta una time history contenente la frequenza fondamentale, valutata ogni 50 ms, ed una stima del livello di pressione sonora, valutato a 15 cm dalla bocca.



In letteratura si definiscono le seguenti grandezze ...

Time Dose (D_t)

Quantifica il tempo di vibrazione delle corde vocali (*voicing time*), ed è definito dalla relazione:

$$D_t = \int_0^{t_p} k_v dt$$
 [s]

dove:

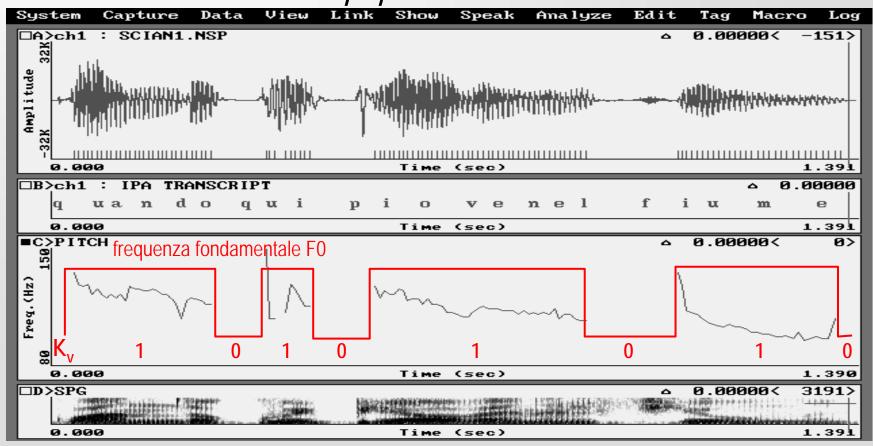
 t_p è il tempo di osservazione;

 \vec{k}_{ν} vale 0 oppure 1 a seconda che le corde vocali stiano vibrando o meno

Time Dose (D_t)

La funzione K_v vale 1 se il segnale è "voiced"; vale 0 se il segnale è "unvoiced"

VOCE MASCHILE: "Quando qui piove nel fiume"





Indice di carico vocale "Vocal Load Index" VLI

che quantifica il numero totale di periodi di oscillazione delle corde vocali. Tale valore va interpretato come il numero totale di collisioni tra le corde vocali che ne danneggiano il tessuto. È definito dalla relazione:

$$VLI = \frac{1}{1000} \int_{0}^{t_{p}} k_{v} \cdot F_{0} \cdot dt$$
 [kcicli]

dove:

 F_0 è la frequenza fondamentale

Dose di distanza "Distance dose" D_d

quantifica la distanza totale accumulata dalle corde vocali nella ampiezza delle proprie oscillazioni. t_n

$$D_d = \int_0^p k_v \cdot A \cdot F_{0.} dt$$
 [m]

dove:

A è l'ampiezza della vibrazione delle corde vocali e può essere calcolata con la relazione:

$$A = 0.05 \cdot L_0 \sqrt{(P_L - P_{th})/P_{th}}$$
 [m]

dove:

 L_0 è la lunghezza standard delle corde vocali (16 mm per gli uomini, 10 mm per le donne);

P_{th} è la pressione di soglia per la fonazione; P_L è la pressione polmonare

Pressione di soglia P_{th} e Pressione polmonare P_L

La pressione di soglia per la fonazione è calcolabile con la relazione:

$$P_{th} = 0.14 + 0.06 (F_0 / F_{0N})^2$$
 [kPa]

dove:

 F_{ON} è la frequenza fondamentale nominale (120 Hz per gli uomini e 190 Hz per le donne).

La pressione polmonare è calcolabile attraverso il livello di pressione sonora SPL in dB misurato a 50 cm dalla bocca ed è fornita dalla relazione:

$$P_L = P_{th} + 10^{(SPL-78,5)/27,3}$$
 [kPa]

Dose della dissipazione energetica "Energy dissipation Dose (De),

quantificabile come l'integrale della potenza dissipata (P_d) dalle corde vocali nella vibrazione.

$$D_e = \int_0^{t_p} k_v \cdot P_{d.} dt = \frac{1}{2} \int_0^{t_p} k_v \cdot \eta \cdot \omega^2 \cdot (A/T)^2 dt \qquad [J/m^3]$$

dove:

Tè lo spessore delle corde vocali;

 η è la viscosità, entrambe funzione della frequenza fondamentale F_0

$$T = \frac{0,01580}{1 + 2,15\sqrt{F_0/F_{0N}}}; \quad \eta = \frac{5,4}{F_0} \qquad Per \ uomo$$

$$T = \frac{0,01063}{1 + 1,69\sqrt{F_0/F_{0N}}}; \quad \eta = \frac{1,4}{F_0} \qquad Per \ donna$$

Dose di energia irradiata "Radiated energy dose (Dr)"

È fornita dall'integrale della potenza irradiata (Pr) fuori dalla bocca durante la fonazione.

$$D_r = \int_0^{t_p} k_v \cdot P_r dt = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \int_0^{t_p} k_v \cdot 10^{(SPL-120)/10} dt \quad [J]$$

dove:

SPL è il livello di pressione sonora misurato a R metri di distanza dalla bocca.



Parametri rilevati su un campione di 4 uomini e 5 donne con strumentazione commerciale

D_t Time Dose

D_e Energy dissipation Dose

VLI Vocal Load Index

D_r Radiated Energy Dose

D_d Distance Dose

	Uomini				Donne				
Parametri	M1	M2	M3	M4	F1	F2	F3	F4	F5
Dt [s]	64.1	80.3	70.45	80.9	50	71.6	63.9	54	70.9
VLI [kcicli]	8.2	11.6	9.1	12.2	15.1	18.8	16.0	14.3	18.0
Dd [m]	28.5	52.7	25.8	36.2	96.9	42.9	110.9	38.9	55.0
De [mJ/cm ³]	39.2	129.8	28.6	46.4	178.4	20.1	167.6	39.5	27.5
Dr [mJ]	2.1	48.7	1.2	2.3	9936.8	18.4	7340.6	1260.2	19.6
Dt_percentuale [%]	45.5	56.3	55.4	64.5	43.0	69.0	65.3	45.6	68.9
VLI_norm [kcicli/s]	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Dd_norm [m/s]	0.4	0.7	0.4	0.4	1.9	0.6	1.7	0.7	8.0
De_norm [mJ/s·cm ³]	0.6	1.6	0.4	0.6	3.6	0.3	2.6	0.7	0.4
Dr_norm [mJ/s]	0.0	0.6	0.0	0.0	198.7	0.3	114.9	23.3	0.3



CONCLUSIONI

L'audiometria quantifica il deficit uditivo anche per coloro che sono esposti al rumore in ambienti di lavoro. Indagini su larga scala hanno consentito di stimare il rischio di sordità professionale per i lavoratori esposti (ISO 1999).

L'analisi elettroacustica della voce dovrebbe consentire di correlare i parametri dosimetrici indicati con il rischio di insorgenza di patologie funzionali dell'apparato fonatorio per coloro che utilizzano la voce per scopi professionali (cantanti, insegnanti, annunciatori radiofonici, televisivi, etc.).



CONCLUSION

I parametri indicati quantificano il fenomeno, ma non producono informazioni funzionali sull'apparato fonatorio, come l'audiogramma per l'udito.

Si rende necessario correlare le dosimetrie vocali con indici elettroacustici di valutazione della "qualità" della voce utilizzando un metodo di acquisizione a banda più ampia di quella di un accelerometro.

In questo modo è possibile utilizzare i metodi tradizionali di indagine fonetico – acustica per i quali esiste una estesa casistica.